



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

Coefficientes estructurales de materiales granulares utilizados en la Ciudad de Cuenca

Autor:

Christian Miguel Pacheco Rodríguez

Director:

César Humberto Maldonado Noboa, Ing. Msc.

Trabajo de Titulación presentado ante la ilustre
Universidad Católica de Cuenca
como requisito parcial para optar el título de:
Ingeniero Civil

CUENCA- ECUADOR

Julio – 2018

DECLARACIÓN:

Yo, Pacheco Christian Miguel; declaro bajo juramento que el trabajo descrito es de mi autoría, que no ha sido anteriormente presentado por ningún grado o calificación profesional, y que he consultado la totalidad de las referencias bibliográficas que se incluyen en este proyecto, y eximo a la UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

A handwritten signature in purple ink, appearing to read 'Christian Pacheco', with a large, stylized initial 'P' above the name.

Autor: Pacheco Rodríguez, Christian Miguel.

C.I.: 010548353-1

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Msc. Juan Solá Quintuña

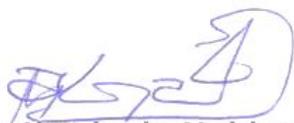
COORDINADOR DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación denominado “**COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE MATERIALES GRANULARES USADOS EN LA CIUDAD DE CUENCA**”, realizado por **PACHECO RODRÍGUEZ, CHRISTIAN MIGUEL** ha sido revisado y orientado durante su ejecución, por lo que certifico que el presente documento, se sujeta a las normas éticas de investigación, por lo que está expedito para su sustentación.

Cuenca, Julio de 2018.

:



**Ing. Civ. César Humberto Maldonado Noboa. MSc.
DOCENTE DE INGENIERÍA CIVIL
DIRECTOR PROYECTO DE TITULACIÓN**

DEDICATORIA.

A Dios nuestro señor, por en la fe; permitirme encontrar la sabiduría y el conocimiento necesario para cumplir mis objetivos. A mis padres por apoyarme a cada instante, especialmente en los momentos de mayor desazón.

EPÍGRAFE

“El Trabajo duro, siempre vence al talento natural”

Maito Gai

AGRADECIMIENTO:

A mi queridísima familia y amigos, también a mis docentes a lo largo de mi formación profesional, gracias por su paciencia, confianza y apoyo.

LISTA DE ABREVIATURAS

C.E.: Coeficientes estructurales.

P.F.: Pavimentos flexibles.

M. A.: Método AASHTO.

Mr: Módulo Resiliente

RESUMEN

Debido a su simplicidad y amplio respaldo investigativo, el método de American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) para diseño de pavimentos, es uno de los más utilizados en nuestro medio. Entre las variables más importantes de diseño, están aquellas relacionados con el dimensionamiento de los espesores o capas que forman la estructura de pavimento. Estos parámetros reciben el nombre de “**Coefficiente Estructural**” (CE) y son representados por valores adimensionales. Los coeficientes estructurales varían en función de la naturaleza de las capas que componen la estructura, que a su vez son función de los materiales constitutivos de éstas. Se dice entonces que un material es de mejor calidad que otro, si su coeficiente estructural es mayor. De lo antedicho; resulta fácil notar que este importante parámetro es considerablemente sensible y que depende del lugar de extracción. El problema radica, en que la mayoría de los diseños de pavimentos flexibles realizados en la Ciudad de Cuenca, relacionan coeficientes estructurales de materiales granulares obtenidos en otras Ciudades/Países mediante diversos textos guía.

Este trabajo investigativo pone en práctica la metodología planteada por AASHTO para la obtención de Coeficientes estructurales de materiales granulares; específicamente base y sub-base; buscando así, determinar y validar, los coeficientes estructurales específicos de materiales granulares utilizados comúnmente en el diseño y construcción de pavimentos flexibles en la Ciudad de Cuenca

PALABRAS CLAVE: COEFICIENTE ESTRUCTURAL, MATERIALES GRANULARES, PAVIMENTOS FLEXIBLES, BASE, SUB-BASE, ESPESORES DE CAPAS, ESTRUCTURA DE PAVIMENTO, CALIDAD DE MATERIALES, CBR, MÓDULO RESILIENTE.

ABSTRACT

Due to its simplicity and broad research support, the method of American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) for pavement design, is one of the most used in our environment. Among the most important design variables are those related to the sizing of the thicknesses or layers that make up the pavement structure. These parameters are called "Structural Coefficient" (CE) and are represented by dimensionless values. The structural coefficients vary depending on the nature of the layers that make up the structure, keeping in relation to the constituent materials of these. It is said then that a material is of better quality than another, if its structural coefficient is greater. From the foregoing; it is easy to notice that this important parameter is considerably sensitive and depends on the place of extraction. The problem lies in the fact that the flexible pavement designs made in the City of Cuenca relate structural coefficients of granular materials foreign to our environment. This research work puts into practice the methodology proposed by AASHTO to obtain structural coefficients of granular materials: base and sub-base, thus seeking; determine and validate, the specific structural coefficients of granular materials commonly used in the design and construction of flexible pavements in the City of Cuenca.

KEY WORDS: STRUCTURAL COEFFICIENT, GRANULAR MATERIALS, FLEXIBLE PAVEMENTS, BASE, SUB-BASE, LAYER THICKNESS, PAVEMENT STRUCTURE, QUALITY OF MATERIALS, CBR, RESILIENT MODULE

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO PRIMERO: ANTECEDENTES, ESTADO DEL ARTE Y PLANTEAMIENTO DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN:	4
1.4 OBJETIVOS.....	5
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	5
<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	5
1.5 ZONA DE ESTUDIO: UBICACIÓN Y ÁREA DE INFLUENCIA.....	6
1.6 ESTADO DEL ARTE Y COEFICIENTES ESTRUCTURALES COMO PARTE DEL MÉTODO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES AASHTO.....	8
1.6.1 Breve historia del diseño de pavimentos.....	8
1.6.2 Métodos de diseño de pavimentos existentes.....	9
1.6.3 Evolución del método AASHTO y discusión.....	11
1.6.4 Repaso histórico de las correlaciones que precedieron al método AASHTO 93.....	13
1.6.5 Análisis de C.E. y su relación con el número estructural.....	17
1.7 CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES GRANULARES SEGÚN NORMA ECUATORIANA VIAL.....	21
1.7.1 Sub-base granular.....	21
1.7.2 Base granular.....	25
1.8 PARÁMETROS DE ENSAYOS EN LABORATORIO NECESARIOS PARA LA OBTENCIÓN DE COEFICIENTES ESTRUCTURALES.....	31
1.8.1 Ensayo de California Bearing Ratio (C.B.R).....	32
1.8.2 Módulo Resiliente.....	32
CAPÍTULO SEGUNDO: RELACIÓN ENTRE ENSAYOS DE LABORATORIO Y COEFICIENTES ESTRUCTURALES.....	46
2.1 DISCUSIÓN ACERCA DE LA RELACIÓN ENTRE RESULTADOS DE C.B.R Y COEFICIENTE ESTRUCTURAL DE MATERIALES GRANULARES.....	47
2.2 ECUACIONES DE CORRELACIÓN DE COEFICIENTES ESTRUCTURALES CON C.B.R.....	49
2.2.1 Correlación entre C.B.R y coeficiente estructural para Sub-bases granulares.....	49
2.2.2 Correlación entre C.B.R y coeficiente estructural para Base granular.....	53
2.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN ACERCA DE LA RELACIÓN ENTRE MÓDULO RESILIENTE Y COEFICIENTE ESTRUCTURAL DE MATERIALES GRANULARES.....	57
2.3.1 Valores comunes para módulos resilientes de materiales granulares sujetos a condiciones de servicio regulares.....	57
2.3.2 Correlación entre Módulo Resiliente y coeficiente estructural para Sub-bases granulares.....	61
2.3.3 Correlación entre Módulo Resiliente y coeficiente estructural para bases granulares no ligadas.....	64
2.4 RELACIÓN ENTRE MÓDULO RESILIENTE Y C.B.R.....	66
CAPÍTULO TERCERO: ESTUDIO DE MATERIALES GRANULARES USADOS EN LA CIUDAD DE CUENCA.....	71

3.1	ENSAYOS DE MATERIALES GRANULARES.....	72
3.1.1	<i>Descripción del conjunto de muestreo.....</i>	72
3.1.2	<i>Clasificación y verificación de cumplimiento de materiales según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)</i>	73
3.1.3	<i>Determinación de valores aproximados de Mr a través de clasificación de materiales granulares SUCS y AASHTO según (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016).....</i>	87
3.1.4	<i>Resultados: Valores de CBR de muestras.....</i>	91
3.1.5	<i>Cálculo de Mr a través de parámetros físicos de los materiales granulares.....</i>	93
3.2	CORRELACIÓN ENTRE C.B.R. Y MÓDULO RESILIENTE DE MATERIALES GRANULARES A TRAVÉS DE REGRESIÓN LINEAL.....	95
CAPÍTULO CUARTO: METODOLOGÍA Y RESULTADOS: OBTENCIÓN DE COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE MATERIALES GRANULARES		97
4.1	COEFICIENTES ESTRUCTURALES DEL CONJUNTO DE MUESTRAS DE BASE GRANULAR.	98
4.1.1	<i>Aplicación de Fórmula AASHTO 93' que relaciona el valor de C.B.R. para la obtención de C.E. ...</i>	98
4.1.2	<i>Aplicación de Fórmula AASHTO 93' que relaciona el valor de módulo resiliente para la obtención de C.E.....</i>	99
4.1.3	<i>Comparación con valores de C.E. recomendados por diversos autores.</i>	102
4.2	COEFICIENTES ESTRUCTURALES DEL CONJUNTO DE MUESTRAS DE SUB-BASE GRANULAR.	103
4.2.1	<i>Aplicación de Fórmula AASHTO 93' que relaciona el valor de C.B.R. para la obtención de C.E. .</i>	103
4.2.2	<i>Limitación de Fórmula AASHTO 93' que relaciona el valor de módulo resiliente para la obtención de C.E.....</i>	104
4.2.3	<i>Comparación con valores de C.E. recomendados por diversos autores.</i>	106
CAPÍTULO QUINTO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		107
5.1.-	CONCLUSIONES	108
5.2.-	RECOMENDACIONES:.....	110
BIBLIOGRAFÍA.....		112
ANEXOS.....		115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Zona de estudio. Generado por el autor.	6
Ilustración 2 Principales proveedores de materiales granulares a la Ciudad de Cuenca. Fuente: Google Maps	7
Ilustración 3 Principales proveedores de materiales granulares a la Ciudad de Cuenca. Ilustración administrativa Cantonal. (Verde: Cantón Cuenca; Morado: Cantón Paute.). Generado por el autor.	7
Ilustración 4. Circuitos construidos para la prueba AASHTO. Fuente: (Escobar, 2013)	11
Ilustración 5. Características de los circuitos en donde se realizaron las pruebas AASHTO. Fuente: (Escobar, 2013).....	12
Ilustración 6 Métodos mecánicos-empíricos para el diseño de pavimentos. Como en todo proceso existen entradas y salidas, el tratamiento de información hasta cierto punto es mecanicista, luego se torna empírico. Fuente: (Core, Ceylan, & Harrington, 2005)	14
Ilustración 7. Izquierda: Sistema multicapa de Pavimento flexible. Extraído de: http://engineeringfeed.com/components-of-road Derecha: Sistema multicapa de pavimento rígido.. Extraído de: https://es.slideshare.net/Yoelbin/pavimento-37600329	21
Ilustración 8 Fajas granulométricas para sub-base clase 1. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 348	23
Ilustración 9 Fajas granulométricas para sub-base clase 2. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 348	23
Ilustración 10 Fajas granulométricas para sub-base clase 3. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas De Ecuador, 2013). p. 348.....	24
Ilustración 11 Fajas granulométricas para base clase 1. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas De Ecuador, 2013). p. 381.....	27
Ilustración 12 Fajas granulométricas para base clase 2. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas De Ecuador, 2013). p. 381.....	28
Ilustración 13 Fajas granulométricas para base clase 3. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas De Ecuador, 2013). p. 382.....	29
Ilustración 14 Fajas granulométricas para base clase 3. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 382	30
Ilustración 15 Distribución de esfuerzos en sub-rasante debido a eje de carga. Imagen recortada extraída de: (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009) p. 2	34
Ilustración 16 Distribución de esfuerzos en elemento diferencial.. Imagen recortada extraída de: (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009) p. 2.....	35
Ilustración 17 Esfuerzos en dos puntos cercanos. Imagen extraída de: (Jiménez Acuña, 2009)	36

Ilustración 18 Deformación bajo cargas repetidas.....	38
Ilustración 19 Curva común de un ensayo triaxial cíclico. Wermeister et al., 2001 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).....	39
Ilustración 20 Variación del módulo resiliente con el grado de saturación para un mismo material. Imagen extraída de: Rada&Witezak, 1981 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).....	40
Ilustración 21 Variación del módulo resiliente con el grado de compactación. Imagen extraída de: Magnusdottir&Erlingsson, 2002 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007)	41
Ilustración 22 Variación del módulo resiliente con el estado de esfuerzos. Imagen extraída de: Zaman et al., 1994 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).....	41
Ilustración 23 Esquema de un sistema multi-capa de pavimento flexible. Imagen extraída de: https://ingenieriareal.com/metodo-aashto-para-pavimento-flexible/	47
Ilustración 24 Números estructurales de Carpeta Asfáltica, Base y Sub-base.....	48
Ilustración 25 Gráfica de tabla 10: Curva CBR vs coeficiente estructural de sub-base granular (a_3).....	51
Ilustración 26 Relación de coeficientes estructurales de Sub-base granular con ensayos de laboratorio. Imagen extraída de: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993).....	52
Ilustración 27 Gráfica tabla 12:Relación entre CBR y coeficiente estructural de base granular (a_2).....	55
Ilustración 28. Nomogramas para la obtención de coeficientes estructurales para base granular. Tomado de: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993).....	56
Ilustración 29 Valores típicos para módulos de resiliencia. Nótese aquí que el valor máximo corresponde aprox. A 43000 Psi Información extraída de: Mokwa Y akin 2009, (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016).....	59
Ilustración 30 Valores típicos para módulos de resiliencia. Nótese aquí que el valor máximo corresponde aprox. A 43000 Psi Información extraída de: Mokwa Y akin 2009, (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016).....	60
Ilustración 31 Variación del módulo resiliente con los esfuerzos volumétricos. Tomado de: (Richardson, 1994).	61
Ilustración 32 Información extraída de: Whiffin y lister, 192 citado por Selvaraj que a su vez es citado por (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016).....	62
Ilustración 33 Gráfica de la ecuación 22 y 23.....	63
Ilustración 34 Gráficas ecuaciones 24 y 25.	65
Ilustración 35 Gráfica de ecuaciones que relacionan el módulo resiliente (Mpa) con el valor de C.B.R. Nótese la variación de dominios.....	68

Ilustración 36 Gráfica de ecuaciones que relacionan el módulo resiliente (psi) con el valor de C.B.R. Nótese la variación de dominios.....	69
Ilustración 37 Análisis granulométrico de muestra 1 obtenida en Mina “Roca Azul”	74
Ilustración 38 Análisis granulométrico de muestra 2 obtenida en mina “Roca Azul”	75
Ilustración 39 Análisis granulométrico muestra 3 obtenida en mina “Roca Azul”	76
Ilustración 40 Análisis granulométrico de muestra 3 obtenida en planta procesadora “B”	77
Ilustración 41 Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular	78
Ilustración 42 Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como sub- base granular.....	79
Ilustración 43 Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular	81
Ilustración 44 Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular	82
Ilustración 45 Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular	83
Ilustración 46 Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular	84
Ilustración 47 Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular	85
Ilustración 48 Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular	86
Ilustración 49 Rango de variación de Mr de materiales tipo base según información presentada por (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)	89
Ilustración 50 Rango de variación de Mr de materiales tipo base según información presentada por (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)	91
Ilustración 51 Gráfica Mr-CBR para materiales granulares estudiados.....	95
Ilustración 28. Nomogramas para la obtención de coeficientes estructurales para base granular. Tomado de: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993).....	100
Ilustración 26 Relación de coeficientes estructurales de Sub-base granular con ensayos de laboratorio. Imagen extraída de: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993).....	105

CAPÍTULO PRIMERO: ANTECEDENTES, ESTADO DEL ARTE Y PLANTEAMIENTO DE INVESTIGACIÓN



1.1 Introducción.

Entre los métodos más utilizados para el diseño de pavimentos flexibles en la ciudad de Cuenca está el establecido por AASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials), este método ha sido desarrollado por una serie de procedimientos empíricos-experimentales; a diferencia de los métodos analíticos, la mayoría de los parámetros utilizados dependen totalmente de los materiales usados durante los procesos de modelación. Resulta razonable establecer que estos materiales difícilmente serán los mismos que en otros lugares, haciendo que la aplicación de diversos coeficientes de diseño para un determinado lugar sea más bien inexacta¹, esto es especialmente cierto en el ámbito de los coeficientes estructurales para materiales granulares (Base y sub-base específicamente), que a menudo son tomados de tablas de diseño; las cuales, han sido tabuladas con la utilización de materiales de otras regiones, ciudades o países, haciéndose necesaria la determinación o validación de éstos, pero, en función de los utilizados en la Ciudad de Cuenca.

Este trabajo investigativo está enfocado en determinar los coeficientes estructurales para materiales granulares usados en la Ciudad de Cuenca, mediante la realización de diversos ensayos², los cuales han sido aprendidos en las asignaturas afines a la Mecánica de Suelos y cuyos resultados fueron insumos para las prácticas realizadas en la asignatura de pavimentos.

Los insumos obtenidos tras los ensayos a los materiales granulares serán aplicados en modelaciones que relacionen a éstos con:

- I. Coeficientes estructurales.
- II. Parámetro de funcionalidad estructural de los pavimentos flexibles (M_r).

¹ Puesto que, como se dijo, los materiales a usarse para la construcción del pavimento flexible han de ser distintos a los considerados en las modelaciones.

² Clasificación de Suelos, Límites de Atterberg, Compatación, California Bearing Ratio, entre otros.



Para ello se hace una extensa revisión de la metodología AASHTO³ y conocimientos afines. Se espera así obtener coeficientes estructurales, determinados especialmente para su uso en los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles en la Ciudad de Cuenca, acto seguido se procederá a realizar una comparación con los establecidos por diversos autores con el objeto de determinar la existencia de una variación sustancial⁴.

1.2 Planteamiento de la Investigación.

Los diseños de pavimentos flexibles por el método AASHTO consideran una serie de parámetros. Estos parámetros están ligados esencialmente con los requisitos de resistencia y de servicio. Los pavimentos flexibles están conformados por un sistema multi-capa, *que en la mayoría*⁵ de los casos comprende: Pavimento, Base y Sub-base que son colocados sobre la subrasante. Ahora bien; durante los procesos de desarrollo del método, se realizaron una serie de pruebas experimentales; lo que se hizo, es construir tramos de pavimentos y someterlos a pruebas de diversas cargas, (Algunos tramos eran destinados a cargas de vehículos pesados, otras en cambio, eran sometidas a cargas de vehículos livianos) para luego de cierto tiempo realizar mediciones de deformaciones, pruebas de durabilidad de cada estructura-prototipo, y con esto calibrar el método de diseño; el más claro ejemplo, es la prueba AASHTO que tuvo una duración de 9 años (1951-1960), desde su planificación hasta la obtención de resultados (Escobar, 2013), sin embargo el M. A. ha seguido evolucionando hasta la actualidad (Escobar, 2013). Un parámetro estructural de vital importancia es el denominado “Coeficiente

³ El método AASHTO relaciona diversos parámetros de funcionalidad, servicio y capacidad. Es el único actualmente que ha introducido el tema de “coeficiente estructural” en sus procedimientos de diseño.

⁴ En nuestro medio, a menudo en los diseños de estructuras de pavimento (por el método AASHTO) se utilizan coeficientes estructurales obtenidos en tablas y/o en textos guía. De encontrarse una variación **importante** de los CE determinados en este proyecto, con los que usualmente se utilizan; suena lógico creer que, existirá, de la misma forma; un desfase notable en otros lugares que también, sigan procedimientos similares. Resultará menester realizar una recomendación de que este mismo estudio se realice en diferentes lugares, especialmente, en los que sus diseños de pavimentos están basados en CE de materiales ajenos a los que usualmente utilizan, disminuyendo así la inexactitud de resultados y obteniendo un mejor desempeño de la estructura.



estructural”, que es una característica intrínseca de cada una de las capas que conforman la Estructura de Pavimento. Aquí surge la pregunta, ¿Los coeficientes estructurales de base y sub-base que encontramos en tablas de diseño son los mismos que de los materiales que utilizamos como insumos en la construcción de P.F.? Esta pregunta responde este documento y es pues, la idea general de esta investigación.

1.3 Justificación:

El desarrollo de vías terrestres en el Ecuador en los últimos años, ha tenido una importancia trascendente en la micro y macro economía. Los caminos vecinales, redes viales, autopistas, etc., están en constante crecimiento; sin embargo, en lo que respecta a pavimentos flexibles; en ciertos casos la vida útil de éstos ha sido poca, debido a problemas de servicio, estructurales, de construcción, entre otros. Se cree que estos problemas van dados de la mano de la no disponibilidad de datos exactos de cualidades de los materiales granulares, haciéndose necesario un análisis que valide la información utilizada para el diseño de pavimentos. Uno de los problemas pertinentes a solucionar, al alcance de estudiantes de pregrado; es precisamente, el de determinar coeficientes estructurales bastante aproximados para un área de estudio. Estos resultados servirán para refinar los diseños de pavimentos, y otorgarnos espesores de diseño más realistas acorde a los insumos utilizados en la construcción. Finalmente, estos resultados podrán ser utilizados por todas las empresas constructoras de caminos de nuestra ciudad, así como de cualquier entidad⁶, siempre que empleen el método AASHTO para diseño y construcción de pavimentos flexibles.

⁶ Dentro del área de estudio.

1.4 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL: Determinación de coeficientes estructurales para materiales granulares utilizados en la ciudad de Cuenca

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- I. Realizar una descripción del método de diseño de pavimentos AASHTO.
- II. Realizar una discusión de la relación existente entre el valor CBR con los coeficientes estructurales de materiales granulares no ligados.
- III. Realizar una discusión de la relación existente entre el módulo resiliente con coeficientes estructurales de materiales granulares no ligados.
- IV. Establecer una relación entre el valor CBR y módulo resiliente de los materiales granulares no ligados, objeto de estudio.
- V. Establecer la relación existente entre el número estructural y los coeficientes estructurales de las capas de pavimento.
- VI. Realizar una descripción de las características granulométricas de materiales granulares usados en las normas de diseño y construcción de pavimentos en el Ecuador.
- VII. Obtener el valor de CBR (Ensayo de California Bearing Ratio) de cada uno de los materiales granulares objetos de estudio; mediante ensayos en laboratorio
- VIII. Explicar la metodología de obtención del valor del módulo resiliente de los materiales granulares objeto de estudio.
- IX. Aplicar la metodología AASHTO para la obtención de coeficientes estructurales para sub-base granular no ligada.
- X. Aplicar la metodología AASHTO para la obtención de coeficientes estructurales para base granular no ligada.

- XI. Comparar los coeficientes estructurales obtenidos de materiales granulares usados en la ciudad de Cuenca con los establecidos en la metodología AASHTO

1.5 Zona de estudio: Ubicación y área de influencia.

La zona de estudio comprende los Cantones: Cuenca, Paute y Santa Isabel; ubicados en la provincial del Azuay. Ilustración 1.

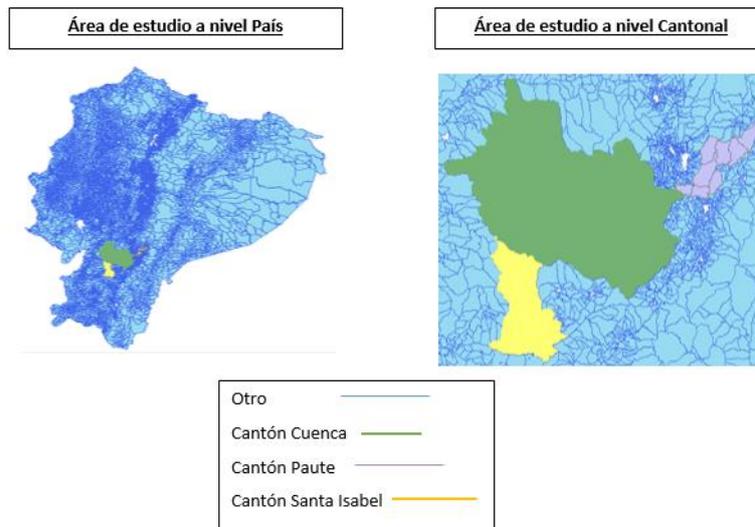


Ilustración 1
Zona de estudio. Generado por el autor.

No obstante, la zona de estudio comprendería todos aquellos lugares en donde la construcción de P.F. utilice como insumos materias granulares provenientes de las minas-canteras o plantas de procesamiento (Que son 4 solamente). Esta aclaración es bastante importante, por lo siguiente: sin bien es cierto, existen investigaciones cuyos límites son *determinados* por un área de influencia, en el caso de esta investigación, no existe tal aspecto; ya que, los materiales obtenidos de las plantas de procesamiento (o minas-canteras) pueden utilizarse en lugares ajenos a los cantones descritos en la ilustración 1, aun así; se establece un área de influencia ya que las minas o plantas procesados; objeto de toma de muestras; son las principales proveedoras de materiales granulares, y *al menos* dentro de la Ciudad de Cuenca que es donde se basa este estudio, los ingenieros viales a cargo adquirirán materiales provenientes de éstas, por la cercanía, calidad, entre otros. Ilustración 2 y 3.



Ilustración 2

Principales proveedores de materiales granulares a la Ciudad de Cuenca. Fuente: Google Maps

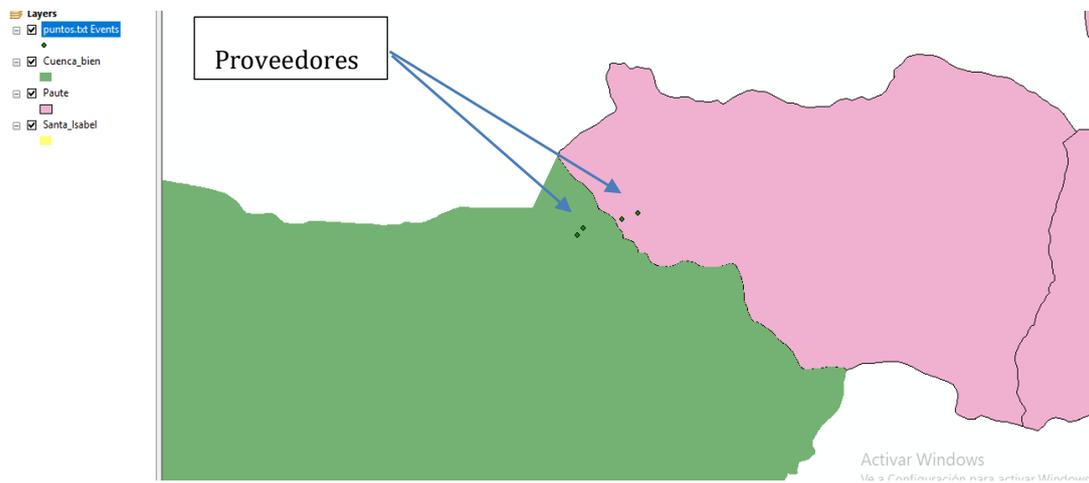


Ilustración 3

Principales proveedores de materiales granulares a la Ciudad de Cuenca. Ilustración administrativa Cantonal. (Verde: Cantón Cuenca; Morado: Cantón Paute.). Generado por el autor.

1.6 Estado del arte y coeficientes estructurales como parte del método de diseño de pavimentos flexibles AASHTO

1.6.1 Breve historia del diseño de pavimentos.

Remontándonos al ámbito de la construcción de caminos (Bilbao, 2014) manifiesta que: “Los grandes sistemas viales tienen su origen en períodos anteriores a los recordados por la historia” (p. 3). En efecto, civilizaciones como Egipto y Babilonia ya contaban con altos niveles de construcción alrededor del año 3000 a 2000 A.C. (Bilbao, 2014). Sin embargo, entrando en ámbitos netamente técnicos, las metodologías de diseño de pavimentos se remontan a mucho antes de 1920 (Escuela de Caminos de Montaña, 2006); como era de esperarse estos métodos no eran exactos pues no tenían en cuenta ciertos parámetros relacionados con la funcionalidad.

Primero se describirá a groso modo la evolución de los métodos de diseño de pavimentos, para luego enfocarnos especialmente en los flexibles e ir estableciendo una serie de ideas importantes para esta investigación.

El *desarrollo de métodos* de diseño para pavimentos puede estar dividido en tres partes (Corredor M., 2010):

- I. Antes de la Segunda Guerra Mundial: En el cual se conciben métodos de diseño que dependen de las características de los suelos, así como también se procede a la utilización de procesos de construcción; realizados en otros pavimentos que han presentado un buen comportamiento, al final de esta época se cuentan con más de 18 métodos de diseño de pavimentos.
- II. Desde el término de la Segunda Guerra Mundial hasta 1988: Las acciones de las cargas son consideradas y se relacionan con el comportamiento de la estructura. Se establece una gran cantidad de variables que participan en el diseño, tales como los



grados de falla, el número de aplicas de cargas en el pavimento y se sirven de la ayuda de los “Ensayos en Carreteras”. Se da el experimento vial AASHTO

- III. Desde 1993 hasta la actualidad: AASHTO procede al desarrollo de un método denominado “Mecanicista” basándose especialmente en el principio de esfuerzos y deformaciones, alcanzándose para el año 2010 un método denominado “Empírico-Mecanicista para el diseño de pavimentos”. Se extiende el tema de la “Servic-capacidad”

1.6.2 Métodos de diseño de pavimentos existentes.

Como se ha establecido anteriormente, los primeros métodos de diseños de pavimentos aparecen antes de 1920, como es de esperarse estos métodos no tomaban en cuenta diversos parámetros (hoy esenciales), y básicamente su orientación se enfocaba a reproducir construcciones de pavimentos cuyo desempeño había sido satisfactorio. Y; tal como se puede hacer una idea el lector, cuando estas construcciones se hacían en entornos totalmente distintos, ya sea por características mecánicas pobres de los suelos, climas muy gélidos o en su defecto muy cálidos, se presentaban inconsistencias en cuanto al desempeño y funcionalidad esperados, por ello se dice que eran métodos no muy confiables. (Escuela de Caminos de Montaña, 2006). Entre los métodos más conocidos están:

- I. Métodos cuya base fue la Mecánica de Suelos.
- II. Métodos del Índice de grupo.
- III. Métodos basados en la clasificación y formación de suelos: Edafológicos.
- IV. Métodos basados en el principio carga-deformación de la sub-rasante.
- V. Métodos de CBR (California Bearing Ratio)
- VI. Métodos del Valor regional R.
- VII. Métodos basados en pruebas/ensayos triaxiales.

1.6.2.1 Métodos de diseño basados en ensayos de caminos.

Sin duda los métodos que más han sobresalido han sido aquellos cuyo desarrollo se ha basado en la construcción y sondeo de pavimentos (Ya sean flexibles, rígidos u otros). A continuación, se describen los métodos desarrollados en base a pruebas experimentales a lo largo de los años:

- I. Ensayos de camino de Bates: Se dio entre los años 1922 y 1923, para este ensayo se construyó una calzada de 4km, de diferentes tramos, en las que se usaron materiales diversos como insumos.
- II. Ensayo de Caminos de Maryland: Realizado aproximadamente en 1950, en donde se construyó un tramo de 1,8 km cuyo pavimento era catalogado como rígido; el principal logro fue el de determinar los efectos o comportamiento del pavimento tras la aplicación de dos vehículos modelo.
- III. Ensayo de Caminos de la WASHO⁷: Realizada entre los años de 1953 a 1954, en las que se construyeron dos caminos rectos de 580 metros de longitud. El objeto era entender el comportamiento del pavimento tras la aplicación de cargas de ejes simples, tándem y tridem; observar los modos de falla y relacionarlos con los espesores del pavimento.
- IV. Ensayo de caminos de la AASHO: Realizado entre los años de 1958 a 1960. Aquí se introdujo un importante parámetro dentro de los métodos de diseño: *La serviciabilidad*. Esta característica funcional tenía en cuenta la capacidad del pavimento para otorgar una superficie funcional, lisa y cómoda al usuario, queda introducido por vez primera el *índice de serviciabilidad* PSI (Present Serviceability index)

⁷ Western Association of State Highway Officials

- V. Extensiones del método AASHO: Se analizaron diferentes parámetros y se refinaron los procedimientos de diseño, sin embargo existían ciertas limitaciones al método de ese entonces, no obstante; (Escuela de Caminos de Montaña, 2006), manifiesta en este punto que el ensayo de AASHO : “Fue el más completo realizado hasta ese entonces, pero poseía ciertos defectos, tales como: único medio ambiente, el mismo tipo de sub-rasante y materiales para pavimentos del norte de Illinois” p.10

1.6.3 Evolución del método AASHTO y discusión.

Entre los años de 1956 a 1958, se construyeron 6 pistas o circuitos (4 grandes y 2 pequeños) para la realización de pruebas experimentales.

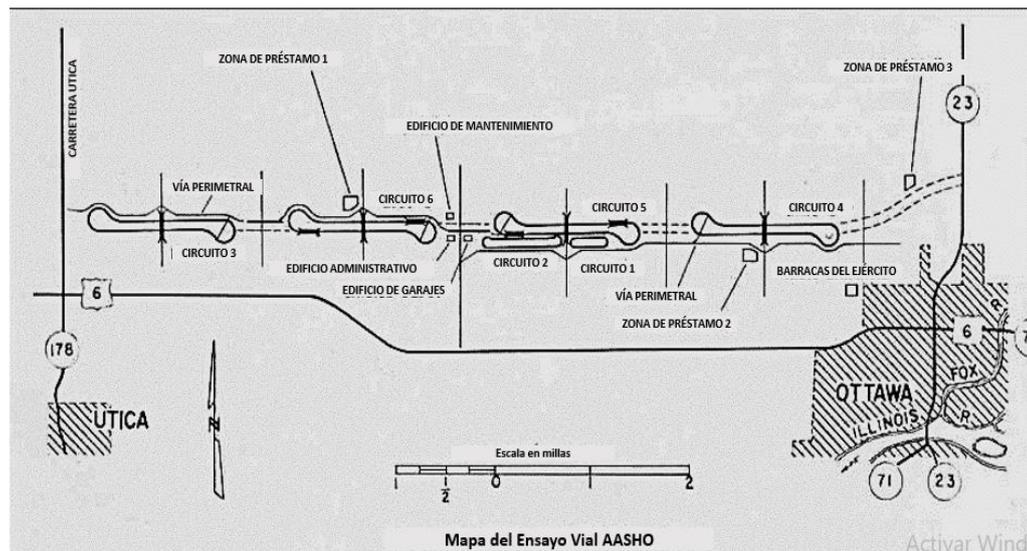


Ilustración 4.

Circuitos construidos para la prueba AASHTO. Fuente: (Escobar, 2013)

Como se ve en la ilustración 4, las pistas (circuitos) 3, 6, 5 y 4 son de tamaño considerablemente mayor que los circuitos 1 y 2. Cada pista tenía un objetivo de pruebas, así se analizarían variables por separado. Los circuitos estaban compuestos de tramos rectos con curvas de retorno. Ilustración 5.

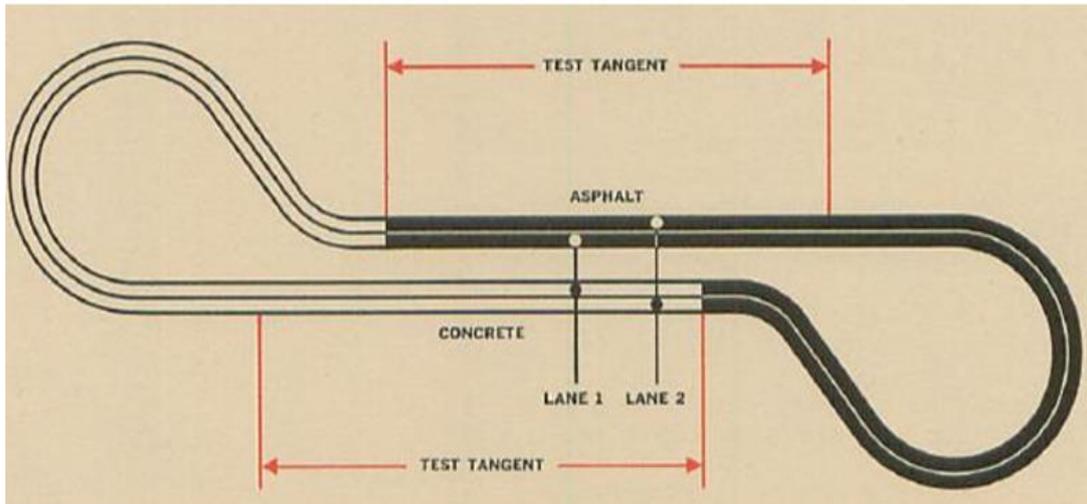


Ilustración 5.

Características de los circuitos en donde se realizaron las pruebas AASHTO. Fuente: (Escobar, 2013)

La pista primera (#1) se destinó a cuantificar la influencia del clima y cargas estáticas, la pista segunda (#2) se sometió a cargas livianas dinámicas y de la tercera a la sexta se aplicaron variadas cargas pesadas dinámicas que iban aumentando con respecto a cada pista (Escobar, 2013).

Como se puede ver, el M.A. está basado en diversas pruebas, que han sido realizados con el objeto de encontrar parámetros dependientes de la funcionalidad y durabilidad. Actualmente (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) establece en sus consideraciones de diseño los siguientes parámetros:

- I. Rendimiento del pavimento
- II. Tráfico
- III. Suelo de la carretera
- IV. Materiales de construcción
- V. Ambiente
- VI. Drenaje
- VII. Confiabilidad
- VIII. Costos del ciclo de vida, y



IX. “Shoulder design⁸” o arcén.

Debido a los importantes parámetros que utiliza el método AASHTO, y la practicidad con la que se pueden realizar diseños de pavimentos, éste se convierte en uno de los más utilizados. Autores como (Torres Espinoza, 2010), (Higuera Sandoval, 2011), (Corredor M., 2010) (Escobar, 2013), (Vásquez Varela, 2014) incorporan dicho método en sus libros/Documentos de clase; con objetivos de enseñanza, en cuanto que otros, determinan coeficientes estructurales propios de los materiales de su entorno con el objetivo de obtener espesores de capas más realistas (Olidis & David, 2004), (Subagio, Rachman, Mardiyah, & Cahyanto, 2005), (Hiltunen, 2014), (Richardson, 1994), (Gudishala, 2004), (Rada & Witczak) o sino de obtenerlos de materiales reciclados que han de ser utilizados como base, (Masrur, 2016), estos estudios realizados en algunos países y diversas ciudades de Estados Unidos presentan una metodología apropiada y otorgan ecuaciones, que servirán de guía para el desarrollo de este trabajo de investigación, dicho sea de paso, estas correlaciones también se encuentran en la metodología AASHTO y en los libros de enseñanza citados anteriormente.

1.6.4 Repaso histórico de las correlaciones que precedieron al método AASHTO 93.

Como bien se sabe, un sistema es un conjunto de procesos que tiene *entradas* y *salidas*; así, debe existir cierta información preliminar con la que se ha de contar. (Core, Ceylan, & Harrington, 2005) establecen que el comportamiento de los pavimentos posee tres influencias primarias:

- I. Tráfico
- II. Ambiente
- III. Pavimento (Materiales y espesores)

⁸ Según la definición de AASHTO, un “shoulder” o arcén es la “porción de carreteras contigua al camino recorrido para el alojamiento de vehículos detenidos para uso de emergencia, y para apoyo lateral por rehabilitación”. El “Shoulder” también es considerado por algunas agencias/empresas como un desvío/espaldón temporal para ser utilizado durante la rehabilitación del camino habitual recorrido (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) p. I-29

Estas influencias, o parámetros son las bases para el desarrollo de cualquier método de Diseño de pavimentos; existiendo los métodos mecanicistas, empíricos o una combinación de los dos. Ilustración 6. (Escobar, 2013) en su material didáctico establece que el M.A es un método mecanicista-Empírico.

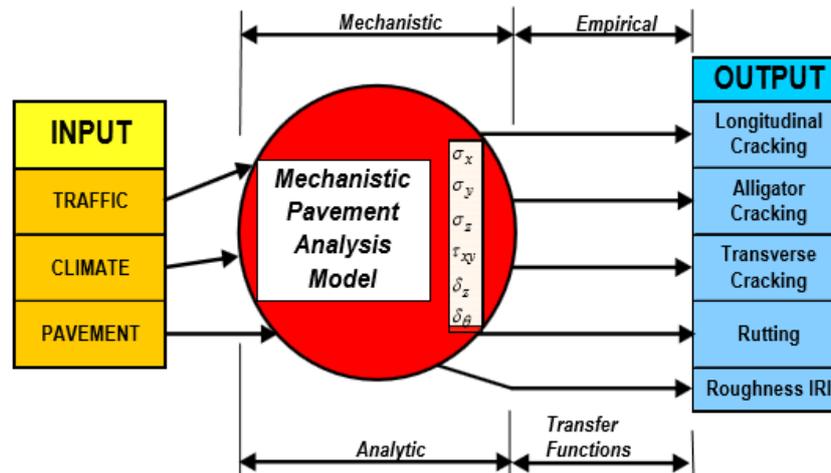


Ilustración 6

Métodos mecánicos-empíricos para el diseño de pavimentos. Como en todo proceso existen entradas y salidas, el tratamiento de información hasta cierto punto es mecanicista, luego se torna empírico. Fuente: (Core, Ceylan, & Harrington, 2005)

La información de los ensayos experimentales de caminos otorgaba relaciones empíricas entre los espesores del pavimento, la magnitud de las cargas, los tipos de ejes aplicados⁹, y la pérdida de serviciabilidad. La primera fórmula desarrollada por AASHTO, relacionaba estos parámetros de la siguiente manera:

Ecuación 1

$$\text{Log } W = \log \rho + \frac{G}{\beta}$$

Donde:

W= Número de aplicaciones de la carga para llevar a la serviciabilidad final

⁹ Si un camión con características de eje tridem, se le cambiara con un eje tándem, considerando que las llantas no fallasen por la carga; éste causaría estragos notables en el pavimento. Aquí el tema de la concentración de tensiones es bastante importante, este es uno de los errores del estudiante durante sus primeras fases de introducción a los métodos de diseño.

G = El logaritmo de la relación de pérdida de serviciabilidad en un tiempo t que lleva al decremento de una serviciabilidad de 1.5

β = Una función de diseño y variables de carga que tienen influencia en la forma de la curva *Serviciabilidad & Número de aplicaciones de carga (W)*. También se tenía en cuenta un parámetro denominado Número estructural (SN). La expresión matemática que la define es:

Ecuación 2

$$\beta = 0,40 + \frac{0,081 * (L_1 + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} * L_2^{3,23}}$$

Además:

- L_1 es la carga en un eje simple o en un eje tándem
- También, L_2 es un código de ejes (1 para simple y 2 para tándem)

ρ = Función que denota el número esperado de aplicaciones de carga para llevar a una serviciabilidad de 1,5. Esta variable relacionaba también el parámetro denominado Número estructural (SN), como sigue:

Ecuación 3

$$\text{Log } \rho = 5,93 + 9,36 \log(SN + 1) - 4,79 (L_1 + L_2) + 4,33 \log L_1$$

Los conocimientos e investigaciones avanzaron y ya para el año de 1972 AASHTO contaba con una ecuación más exacta:

Ecuación 4

$$\text{Log } W_{t18} = 9,36 \text{Log}(SN + 1) - 0,20 + \frac{G}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + \frac{1}{F_r} + 0,372(Si - 3,0)$$

En la ecuación “ W_{t18} ” corresponde a las aplicaciones de ejes simples de 80 KN o 18000lb

Y también:

$$G = \text{Log} \left(\frac{4,2 - P_t}{4,2 - 1,5} \right)$$

Siendo P_t un valor de la capacidad de funcionalidad-servicio para el tiempo de diseño.

Esta ecuación estaba enfocada en las condiciones de entorno¹⁰, en donde se realizó el experimento vial. Para que esta ecuación pudiera ser aplicable en otros entornos se introduce el concepto de “Factor Regional” (Fr) y valor de soporte de la sub-rasante (S_i) que depende del C.B.R del material.

Para el año de 1986, se tuvieron los siguientes avances:

- I. Aparece el concepto de confiabilidad (Diseños con niveles apropiados de riesgo)
- II. El ensayo del módulo resiliente reemplaza al ensayo C.B.R y es utilizado como variable de entrada.
- III. Son tomadas en cuenta las condiciones de drenaje m_i
- IV. Se considera los factores de hinchamiento por sub-rasantes expansivas.

Considerando los datos anteriores se procede a realizar una modificación a la anterior ecuación de diseño para obtener:

$$\text{Log } W_{t18} = Z_r S_o + 9,36 \text{Log}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}(\Delta IPS)}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \text{Log}(Mr) - 8,07$$

Donde:

W_{t18} es el número de aplicaciones de cargas de 80 KN o 18000lb

Z_R abscisa correspondiente a un área igual a la confiabilidad R en la curva de distribución normalizada¹¹.

¹⁰ Es decir, condiciones tanto climáticas como de las características de los materiales de esa región.

¹¹ Para más información ver Cap 6, ap 6.2.3 de (Escuela de Caminos de Montaña, 2006)



S_o desviación standard de los parámetros.

ΔIPS es la pérdida de serviciabilidad prevista.

Mr es el módulo resiliente de la sub-rasante.

La ecuación 6, es la actual (1993) ecuación utilizada en la metodología AASHTO.

Es necesario resaltar dos importantes parámetros en los que se enfocará este proyecto investigativo que son el Módulo Resiliente “ Mr^{12} ” y el Número estructural “ SN^{13} ”; veremos pues a lo largo de este documento que estas variables guardan principal relación con los coeficientes estructurales de los materiales granulares objeto de estudio.

1.6.5 Análisis de C.E. y su relación con el número estructural.

1.6.5.1 Definiciones de: “coeficientes estructurales”

A continuación, se presentan algunas definiciones de coeficientes estructurales establecidos por diversos autores.

(Escobar, 2013), (Corredor M., 2010); en sus respectivos trabajos mencionan la misma definición, establecen que: “Los C.E., provienen de la relación empírica entre *el Número Estructural (SN) de una estructura de pavimento y los espesores de cada capa*, y que expresan **la habilidad relativa de un material para poder funcionar como un componente estructural de un pavimento determinado.**” p.27. y p. 33 respectivamente.

Otra definición, es la establecida por (Sanchez Sabogal, 2016) en la que alude a que los coeficientes estructurales “Miden **la capacidad relativa de una unidad de espesor** de una determinada capa **para funcionar como componente estructural del pavimento**”p.29

¹² El módulo resiliente presentado en la ecuación 6 corresponde al material de la sub-rasante, no confundir con el comentario efectuado, que manifiesta que alude al Mr , pero de materiales granulares.

¹³ Dicho sea de paso, se menciona que existe dos tipos de “SN” el primero, analizado en la ecuación 2, 4 y 6 que tiene por nombre “Número estructural *de tránsito*” y el segundo está presente en la ecuación 7, ambos se relacionan conforme la ecuación 8. Ver: sección 1.6.5.6 para mayor detalle.



(AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), establece que: “Estos coeficientes de capa expresan la RELACIÓN EMPÍRICA entre SN y grosor de cada capa y, es una medida de la capacidad relativa del material para funcionar como componente estructural del pavimento.” p.107

En cuanto a lo visto, como definición formal de C.E. para este documento, podemos decir que:

“Los C.E son una cuantificación de la capacidad de cada espesor/capa como componente estructural de un sistema anisótropo y están relacionados con parámetros resistentes de los diferentes materiales que constituyen un pavimento flexible”

1.6.5.2 Objeto de asignación de valores como C.E.

(AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) al respecto menciona que “Se asigna un valor para este coeficiente a cada material de capa en la estructura del pavimento **con el fin de convertir los espesores de capa reales en miembro estructural (SN).**” p.107

1.6.5.3 Parámetros principales de los cuales dependen los coeficientes estructurales.

(AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) explica que: “El módulo elástico (dinámico: Mr) se ha adoptado como la medida estándar de la calidad del material”. Y, actualmente, es utilizado principalmente, en la obtención de C.E. Aunque hay correlaciones disponibles para determinar el módulo a partir de pruebas como **R-Value**¹⁴, el procedimiento recomendado es la medición directa utilizando el Método AASHTO T 274 (Base, sub-base y materiales granulares no unidos) y ASTM D 4123 para concreto asfáltico y otros materiales estabilizados.” p107.

¹⁴ Ver más: 1.5 de (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) página 33, en donde se encuentra una explicación formal del Valor R.

(AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) hace un comentario interesante al respecto: “La investigación y los estudios de campo indican que muchos factores influyen en los coeficientes de las capas, por lo que **la experiencia¹⁵ de la agencia debe incluirse en la implementación de los resultados de los procedimientos presentados.** *Por ejemplo, el coeficiente de la capa puede variar con el espesor, el soporte subyacente, la posición en la estructura del pavimento, etc.*

1.6.5.4 Consideraciones respecto a la variación de los módulos dinámicos (resilientes) en laboratorio frente a los de in situ

Se debe tener en cuenta que pueden obtenerse valores de módulo elástico de laboratorio que son sustancialmente diferentes de los que pueden existir para una condición in situ. Por ejemplo, la presencia de una capa muy rígida no unida sobre una capa/espesor de baja rigidez puede dar como resultado un cambio de volumen y una reducción correspondiente de rigidez.

Como una directriz para capas superiores de materiales no ligados, la relación de módulo elástico de la capa superior a la de la capa inferior no debe exceder los valores que producen tensiones de tracción en espesores/capas granulares no unidos.

1.6.5.5 Categorías de estimación de coeficientes estructurales.

La metodología referente a la obtención/estimación de estos coeficientes se divide en cinco categorías, según el tipo y la función del material de la capa. Estos son concreto/hormigón, asfáltico, base granular, sub-base granular, tratado con cemento y base bituminosa. Otros materiales como la cal, el limo foliar de la cal y el cemento ceniciento son materiales

¹⁵ Se recomienda que las empresas encargadas en el diseño de pavimentos analicen los factores de coeficientes estructurales no solo desde una perspectiva teórico, sino también constructivo y, aún más importante: Una perspectiva **objetiva-singular**; ya que los espesores varían y debido a la anisotropía. Las elasticidades son diferentes en cada capa y esto puede generar una “descompactación”.

aceptables, y cada agencia debe desarrollar cuadros¹⁶. Las cinco categorías descritas, constan en el texto guía de diseño de pavimentos AASHTO de 1993, y como se ha mencionado, AASHTO recomienda que se efectúe un proyecto afín. Dicho sea de paso, este documento; para cumplir con los fines descritos, aplica las recomendaciones AASHTO para la determinación de coeficientes estructurales.

1.6.5.6 Relación entre número estructural y coeficiente estructural de capa.

El número estructural (SN) es la variable que relaciona los coeficientes estructurales, los parámetros de diseño considerados en el M.A (Ver:1.6.3) con los espesores de los materiales, mediante las ecuaciones presentadas en el apartado 1.2 de (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), ecuaciones 6 (Llámesese número “estructural de tránsito”) y 7 (Llámesese número “estructural de la estructura”) de este documento.

Ecuación 7

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Donde:

a_i ¹⁷ son coeficientes estructurales para pavimento (1) base (2) y sub-base (3)

D_i Son los espesores de pavimento (1) base (2) y sub-base (3)

m_i son los coeficientes de drenaje del material base (2) y sub-base (3)

El número estructural de la ecuación 7 (de la estructura) en comparación con el número estructural de la ecuación 6 (tránsito) deberá cumplir con:

Ecuación 8

$$SN_{ESTRUCTURA} \geq SN_{TRÁNSITO}$$

¹⁶ Tal como lo afirma, AASHTO 1993, se recomienda el análisis para otros materiales a más de los granulares no ligados que es competencia de este documento.

¹⁷ Para efectos de este proyecto, se le asigna de manera arbitraria a los parámetros ' a_1 ', ' a_2 ' y ' a_3 ', los valores de coeficientes estructurales para pavimento, base y sub-base, respectivamente. El lector debe tener en cuenta que estas variables no son específicas y que toman valores de las capas que se está analizando, pudiendo existir, un número ' n ' de capas tan bajos como 1 y tan altos como 5.

1.7 Características de materiales granulares Según Norma Ecuatoriana Vial.

1.7.1 Sub-base granular

(Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013) define sub-base como “La capa granular localizada entre la sub-rasante y la base granular en los pavimentos flexibles y la capa que normalmente debe colocarse inmediatamente debajo de un pavimento rígido”

p.340. Ilustración 7.

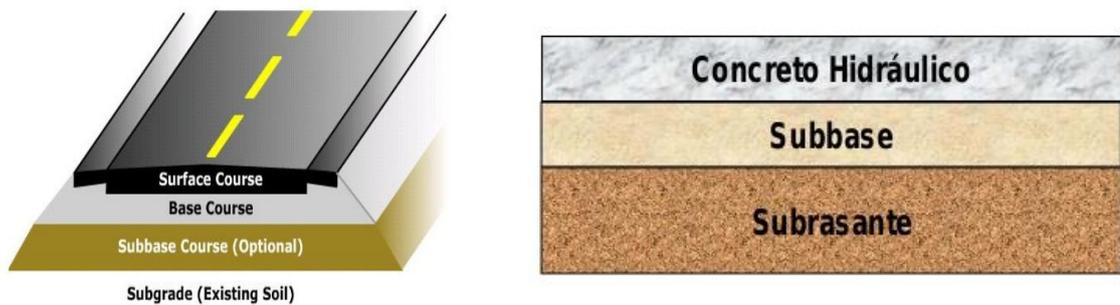


Ilustración 7.

Izquierda: Sistema multicapa de Pavimento flexible. Extraído de: <http://engineeringfeed.com/components-of-road>
Derecha: Sistema multicapa de pavimento rígido.. Extraído de: <https://es.slideshare.net/Yoelbin/pavimento-37600329>

(Maldonado, 2016) explica que estos materiales podrán ser:

- I. Naturales
- II. Cribados
- III. Parcialmente Cribados
- IV. 100% Triturados
- V. Mezclados

En efecto, en función del tipo procesamiento, que a su vez está íntimamente ligado con la granulometría y agregado máximo, se le podrá catalogar como sub-base tipo I, II o III.

1.7.1.1 Sub-base tipo/clase 1

Los materiales (Agregados) se obtienen por la trituración de material pétreo (Roca o Grava). Para que un material de sub-base encaje en esta clase deberá cumplir con una granulometría requerida (Ver más adelante tabla 1) y cuando menos el 30 % del agregado será obtenido por procesos de trituración.

1.7.1.2 Sub-base tipo/clase 2

(Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013) menciona al respecto que “Son sub-bases construidas con agregados obtenidos por trituración o cribado en yacimientos de piedras fragmentadas naturalmente o gravas” p.340 De la misma manera que en la clase 1, cuando menos, el 30% del árido grueso será obtenido por procesos de trituración p. 945.

1.7.1.3 Sub-base clase 3

Esta clase de sub-base es elaborada con agregados de origen natural, que se hallen dentro de las fajas granulométricas respectivas (Ver tabla 1)

1.7.1.4 Granulometrías

La gradación será de grueso a fino acorde a lo establecido en (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). Véase: Tabla 1.

Tabla 1. Granulometría de acuerdo a tipo de Sub-base.
Información extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). P 341.

Tamiz		SUBBASE CLASE 1		SUBBASE CLASE 2		SUBBASE CLASE 3	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
3"	76.2 mm						100
2"	50.4 mm				100		
1.5"	38.1 mm		100	70	100		
Nº4	4.75 mm	30	70	30	70	30	70
Nº40	0.425 mm	10	35	15	40		
Nº200	0.075 mm	0	15	0	20	0	20

Las fajas granulométricas de las distintas clases se presentan a continuación:

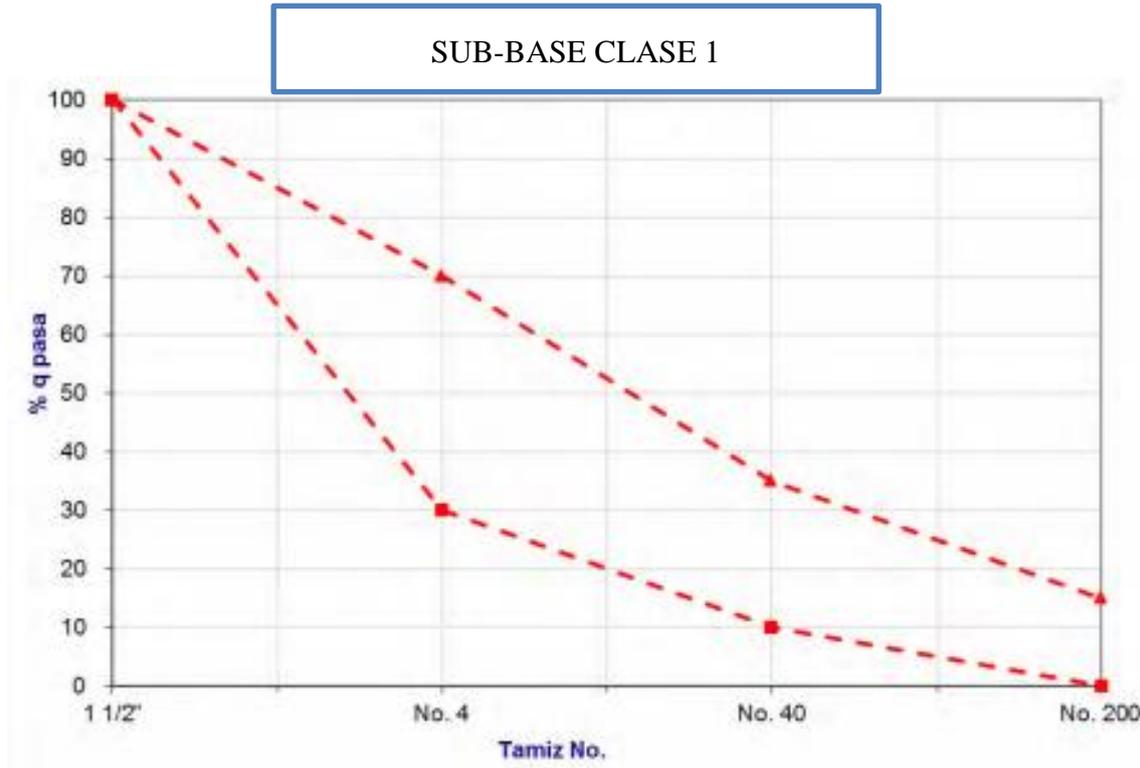


Ilustración 8
Fajas granulométricas para sub-base clase 1. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 348

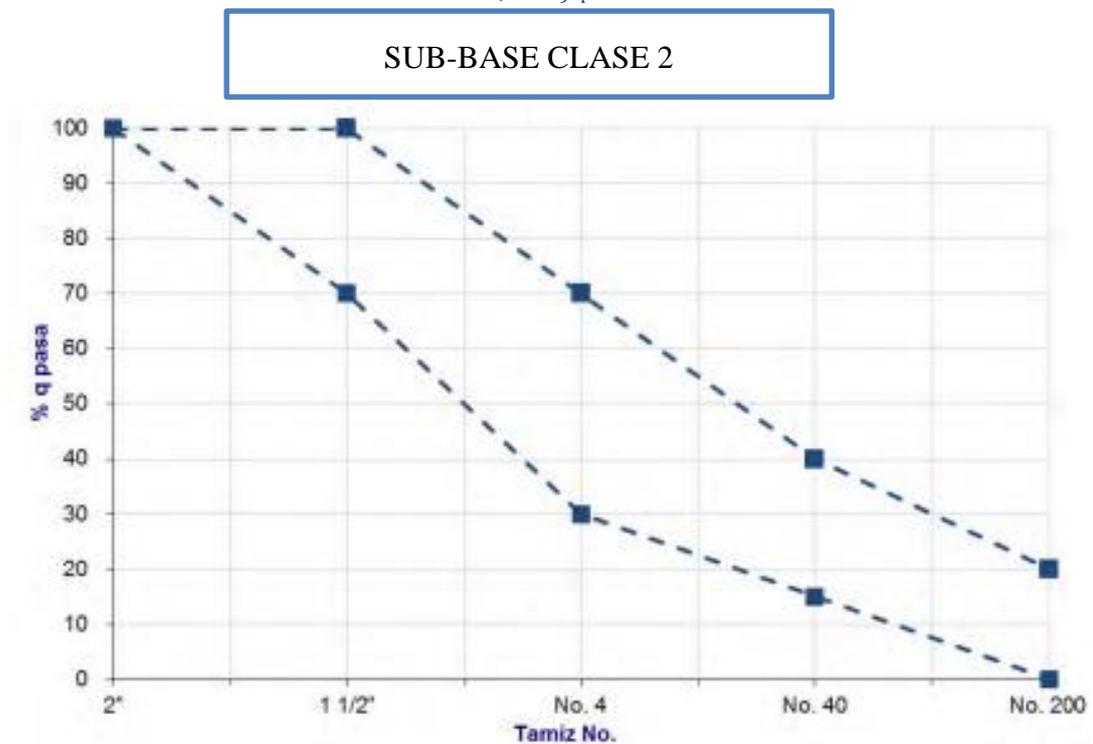


Ilustración 9
Fajas granulométricas para sub-base clase 2. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 348

SUB-BASE CLASE 3

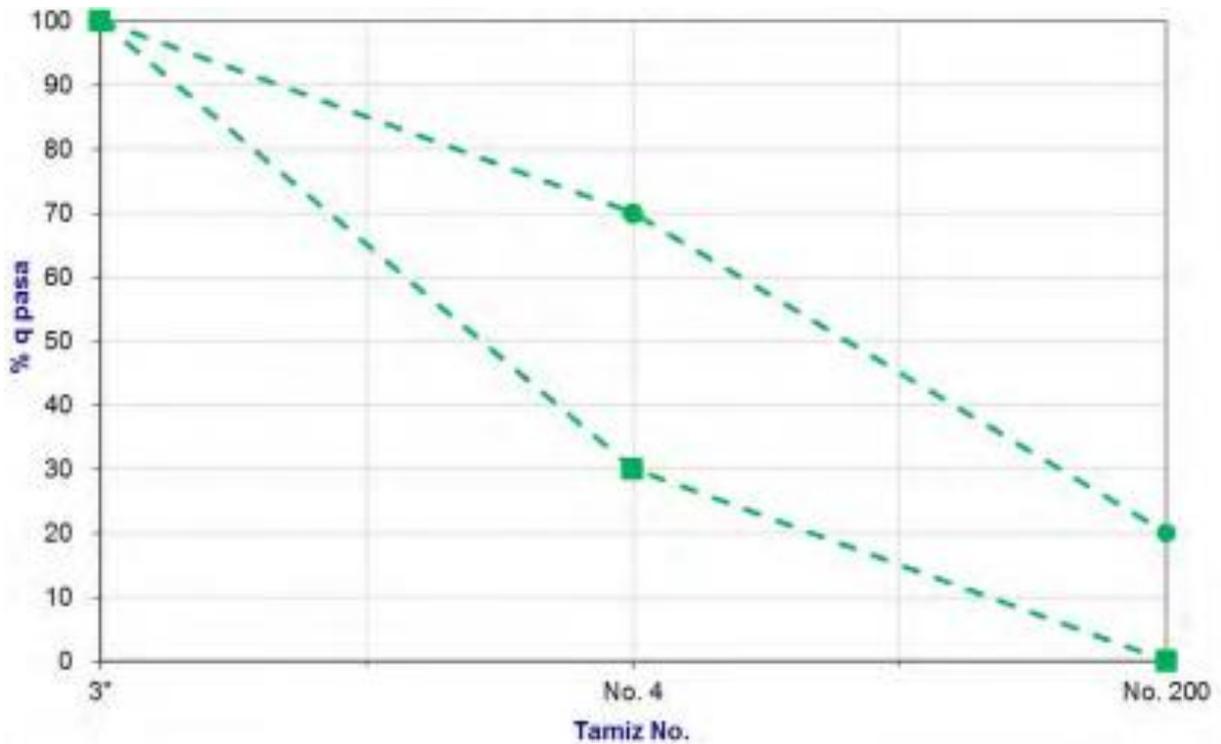


Ilustración 10

Fajas granulométricas para sub-base clase 3. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 348

1.7.1.5 Requisitos comunes

A más de las características granulométricas y porcentaje de agregado triturado mínimo, para un material ser considerado sub-base deberá también presentar las siguientes características físicas:

- I. No deberá presentar una degradación o desgaste mayor al 50% (Ensayo de abrasión)
- II. El valor de C.B.R no deberá ser menor al 30%
- III. El límite líquido debe de ser menos del 25%
- IV. El índice de plasticidad será menor a 6%

1.7.2 Base granular

Es la capa de material granular que *por lo general* se encuentra inmediatamente por debajo de la carpeta de pavimento e inmediatamente arriba de la capa de sub-base. Para que un material sea catalogado como base deberá poseer ciertos requisitos un poco más exigentes que para el material de sub-base. Se puede catalogar en función de su calidad, de 1^oera a 4^o clase en ese orden, la elección de una clase respectiva dependerá de la magnitud y tipo de proyecto. A continuación se describen los diferentes usos en función de la calidad según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)

1.7.2.1 Recomendaciones para uso de material de base según NEVI

Véase tabla 2:

Tabla 2
Recomendaciones para uso de material base de acuerdo a su clase.
Información extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). Pág. 372

Material Especificado	Tipo de Carretera	No. Carriles	TPDA
BASE CLASE 1	Para uso principalmente en aeropuertos y carreteras con intenso nivel de tráfico	8 a 12	>50000
BASE CLASE 2	Carreteras de 2 hasta 6 carriles con un ancho mínimo por carril de 3,65 m. Se incluye franja central desde 2 a 4 m.	2 a 6	Entre 50000 y 8000
BASE CLASE 3	Vías internas de urbanizaciones con bajo nivel de tráfico	2 a 4	Entre 8000 y 1000
BASE CLASE 4	Caminos vecinales	2	<1000

1.7.2.2 Base clase 1:

Material granular conformado por agregados gruesos y finos, para pertenecer a la clase tipo 1, los agregados deben ser 100% triturados y cumplir con las características granulométricas presentada en la tabla 4, tabla 404-1.2 de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). P. 373.

*Tabla 3
Granulometría requerida para bases tipo 1. Información extraída de: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)*

TAMIZ		BASE CLASE 1 TIPO A		BASE CLASE 1 TIPO B	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
2"	50 mm		100		100
1 1/2"	37.5 mm	70	100	70	100
1"	25 mm	55	85	60	90
3/4"	19 mm	50	80	45	75
3/8"	9.5 mm	35	60	30	60
Nº4	4.75 mm	25	50	20	50
Nº10	2 mm	20	40	10	25
Nº40	0.425 mm	10	25	2	12
Nº200	0.075 mm	2	12		

La gráfica de las fajas granulométricas de la tabla 3 se presentan a continuación:

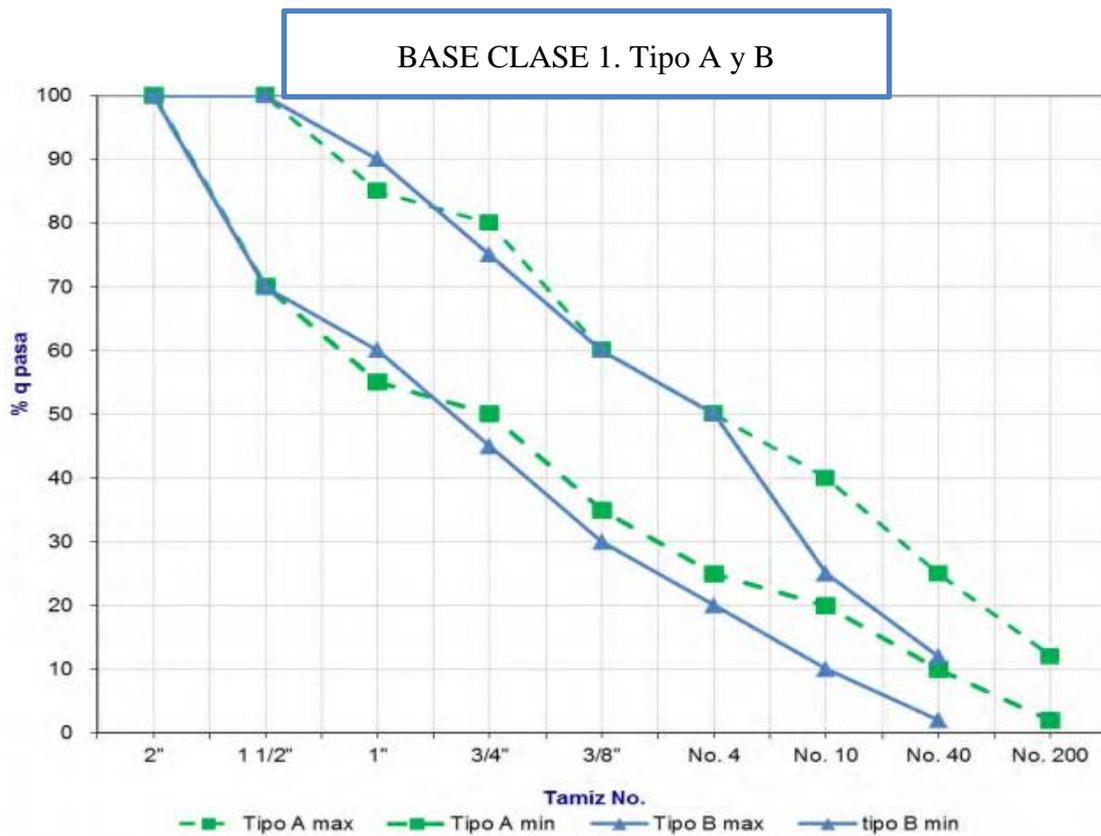


Ilustración 11

Fajas granulométricas para base clase 1. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 381

1.7.2.3 Base clase 2:

Material granular conformado por agregados gruesos y finos. Para pertenecer a la clase tipo 2, los agregados deben ser al menos el 50% triturados y cumplir con las características granulométricas presentada en la tabla 4, tabla 404-1.3 de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). P. 374.

Tabla 4
Granulometría requerida para bases tipo 2. Información extraída de: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)

TAMIZ		BASE CLASE 2	
		MÍN	MÁX
2"	50 mm		100
1 1/2"	37.5 mm	70	100
1"	25 mm	55	85
3/4"	19 mm	47	75
3/8"	9.5 mm	35	65
Nº4	4.75 mm	25	55
Nº10	2 mm	15	45
Nº40	0.425 mm	5	25
Nº200	0.075 mm	0	10

La gráfica de la faja granulométrica de la tabla 4 se presenta a continuación:

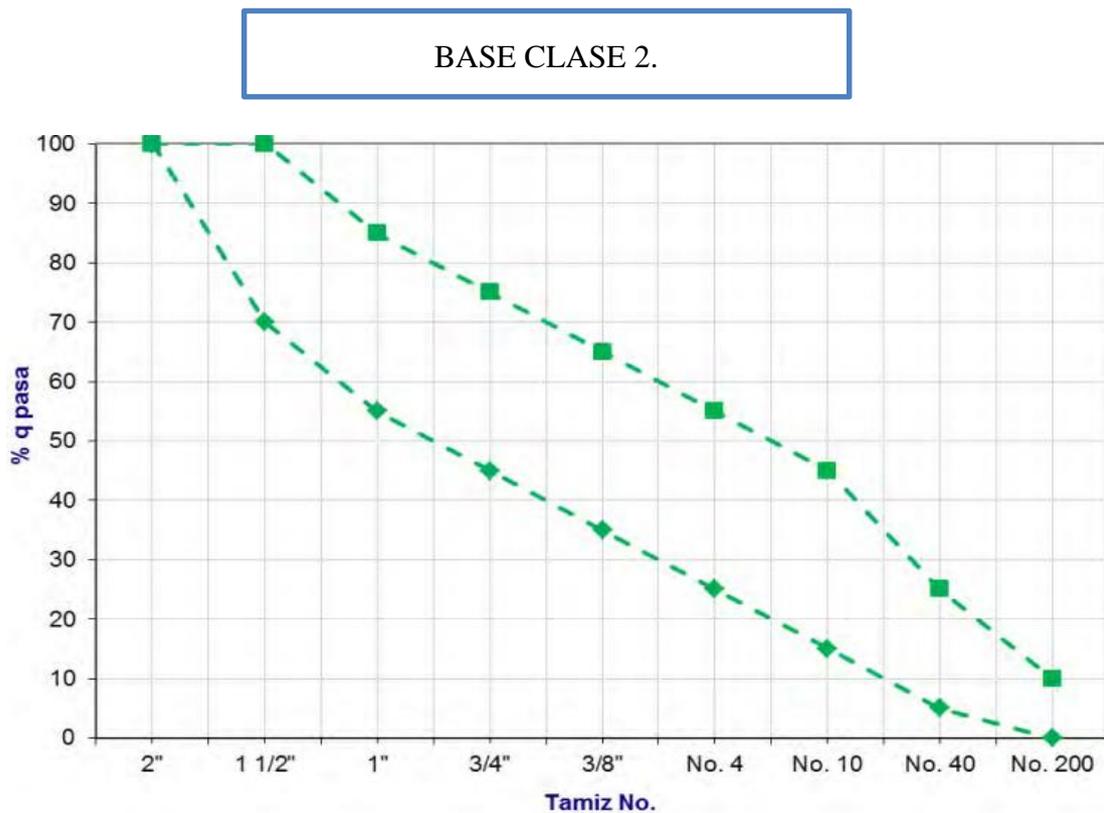


Ilustración 12
Fajas granulométricas para base clase 2. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 381

1.7.2.4 Base clase 3:

Para pertenecer a la clase tipo 3, los agregados deben ser al menos, 25% triturados y cumplir con las características granulométricas presentadas en la tabla 5, tabla 404-1.4 de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). P. 374.

La gráfica de la faja granulométrica de la tabla 5 se presenta a continuación:

Tabla 5
Granulometría requerida para bases tipo 3. Información extraída de: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)

TAMIZ		BASE CLASE 3	
		MÍN	MÁX
2"	50 mm		100
1"	25 mm	70	100
3/4"	19 mm	60	90
3/8"	9.5 mm	40	75
Nº4	4.75 mm	30	60
Nº10	2 mm	15	45
Nº40	0.425 mm	10	30
Nº200	0.075 mm	0	15

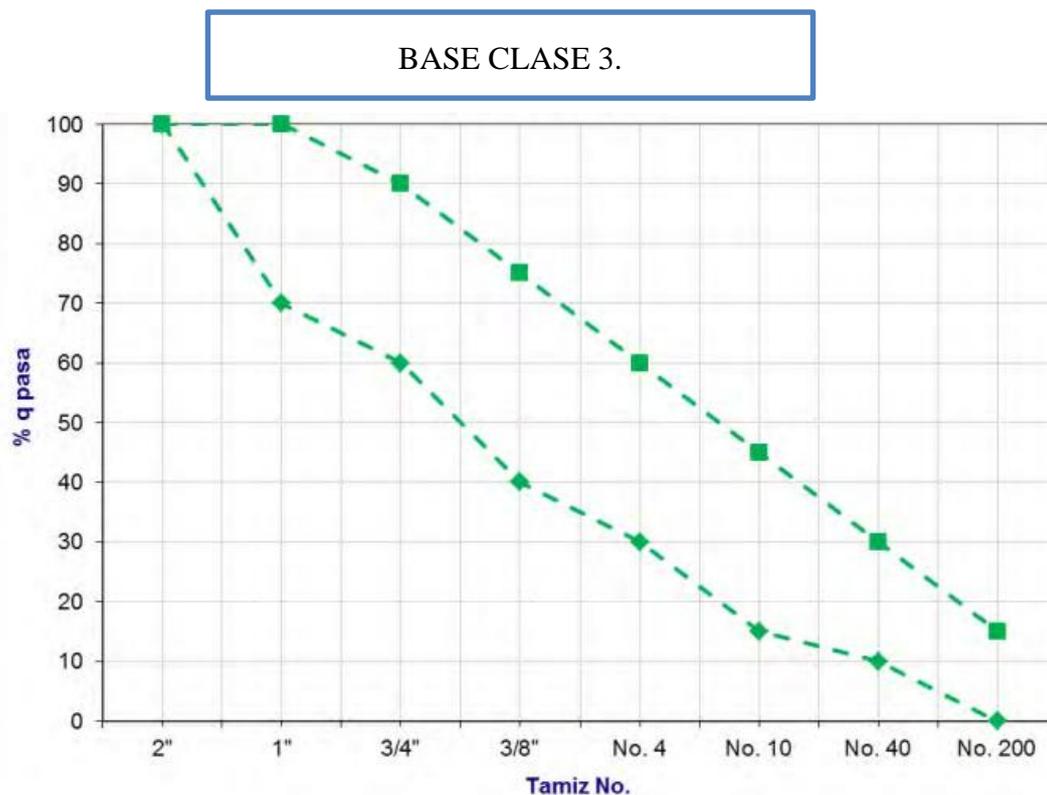


Ilustración 13
Fajas granulométricas para base clase 3. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 382

1.7.2.5 Base clase 4:

Con respecto a estas bases (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013) menciona que “Son bases conformadas por agregados/materiales obtenidos por procesos de trituración o cribado de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas”. p. 373. Para ser catalogados como base tipo 4, deberán estar dentro de los límites de fajas granulométricas presentados en la tabla 6.

Tabla 6
Granulometría requerida para bases tipo 4. Información extraída de: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)

TAMIZ		BASE CLASE 4	
		MÍN	MÁX
2"	50 mm		100
1"	25 mm	60	90
3/4"	4.75 mm	20	50
3/8"	0.075 mm	0	15

La gráfica de la faja granulométrica de la tabla 6 se presenta a continuación:

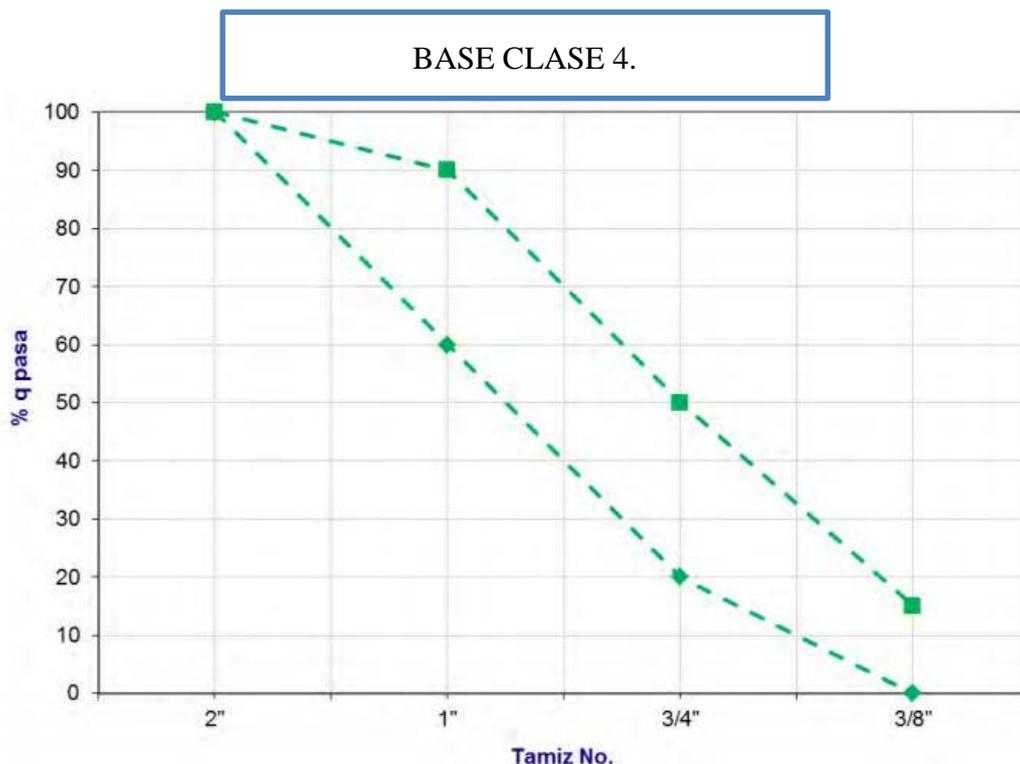


Ilustración 14
Fajas granulométricas para base clase 3. Gráfica extraída de (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). p. 382



1.7.2.6 Requisitos comunes

- I. El material grueso no poseerá un porcentaje de desgaste/abrasión superior al 40%.
- II. No se dará una pérdida de peso mayor a 12% en ensayos de “desempeño a la acción de la intemperie” Ver más: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). P 938.
- III. El valor de C.B.R. deberá ser en todo caso mayor o igual al 80%
- IV. El límite líquido deberá ser menos de 25%
- V. El índice de plasticidad deberá ser menos de 6%

1.8 Parámetros de ensayos en laboratorio necesarios para la obtención de coeficientes estructurales.

La obtención de coeficientes estructurales, requiere como insumo una serie de parámetros que son encontrados en base a ensayos de laboratorio. Con seguridad se puede establecer que existe una relación entre coeficientes estructurales con: Módulo Resiliente y C.B.R. (Core, Ceylan, & Harrington, 2005), (Escobar, 2013), (Corredor M., 2010), (Higuera Sandoval, 2011), (Torres Espinoza, 2010). Si bien es cierto estos valores son insumos directos para encontrar/calcular el coeficiente estructural de un material en particular, existen otras variables que pueden influir. (Sanchez Sabogal, 2016) menciona que “C.E. estructurales son función de:

- I. Resistencia del Material (Que involucra CBR, Módulo resiliente, entre otros)
- II. Calidad de la Construcción
- III. Estado de Esfuerzos.” p.29

A continuación, se establecerá una descripción breve teórica de los ensayos de laboratorio necesarios para la obtención de coeficientes estructurales.

1.8.1 Ensayo de California Bearing Ratio¹⁸ (C.B.R)

El ensayo C.B.R. mide la capacidad resistente del suelo a la penetración por “punzonamiento” de un vástago de aproximadamente 3 pulgadas cuadradas; en una probeta de 6 pulgadas (15 cm) de diámetro y 5 pulgadas (12.5 cm) de alto; la velocidad del vástago es de aproximadamente 1.27 mm/ mín. La fuerza necesaria para penetrar 2.5 mm. dentro del suelo se cuantifica a determinados intervalos de penetración, una vez determinadas las fuerzas se comparan con otras que han sido las necesarias para producir iguales/similares penetraciones (2.5 mm) en una muestra de referencia que consiste en un “suelo” de roca partida/ triturada. Este razonamiento nos conduce a la siguiente ecuación:

Ecuación 9

$$\% CBR = \frac{\sigma_{necesario \text{ para deformar } 0.1" \text{ de la muestra}}}{\sigma_{necesario \text{ para deformar } 0.1" \text{ del material patrón}}} * 100$$

Este método es bastante conocido y no se hará una descripción profunda; ya que se da por sentado que el lector conoce los métodos y procedimientos de este ensayo.

1.8.2 Módulo Resiliente.

El ensayo de módulo resiliente fue desarrollado como un camino más realista para simular las condiciones de cargas dinámicas a las que estará sometido el pavimento flexible; en contraposición al ensayo C.B.R que como se sabe la naturaleza de las cargas son estáticas. En efecto, (Escuela de Caminos de Montaña, 2006) establece que: “el módulo resiliente es considerado como una propiedad que describe de mejor manera el comportamiento del suelo, bajo cargas dinámicas de ruedas. Una rueda que se mueve imparte un *pulso dinámico*

¹⁸ En español: “Ensayo de soporte de california”. Se desarrolló/generó por parte de la división de carreteras de California de 1929.



a todas las capas del pavimento y a la subrasante, como respuesta a este pulso dinámico cada capa de pavimento sufre una deflexión” p. 65. El estudio de los módulos resiliente de materiales para pavimentos flexibles no ha tenido una atención sustancial, ya que al menos en nuestro medio se sigue utilizando como insumo principal el C.B.R. Sin embargo, AASHTO ya había desarrollado protocolos de ensayos para Mr. desde 1992. (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009). Se han encontrado investigaciones que desarrollan correlaciones entre C.B.R y Módulo Resiliente. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), (Corredor M., 2010), (Escuela de Caminos de Montaña, 2006), (Higuera Sandoval, 2011), (Escobar, 2013), (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009), (Torres Espinoza, 2010), (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007), (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016), (Jiménez Acuña, 2009). Debido a la poca atención a este tema, se hará un análisis del módulo resiliente, insumo indispensable para la obtención de coeficientes estructurales.

1.8.2.1 Generalidades

El término “Resiliente” es utilizado en diversos ámbitos, como en la psicología, ecología, música, ingeniería, superación personal, entre otros. En todos ellos podemos encontrar una característica común: *La capacidad de recuperación de un elemento tras haber sufrido una modificación inicial (sustancial o no)*. A medida que un elemento se recupera *sin perder en alguna medida sus características iniciales* se podría decir que es más resiliente. Este concepto también es utilizado en la mecánica de materiales durante los estudios del comportamiento de los materiales; especialmente los diagramas esfuerzo-deformación, que incluyen: ductilidad, fragilidad, rango elástico-plástico, etc. En la rama de pavimentos tiene un significado parecido. Cuando un vehículo transita sobre pavimento (En este caso hablaremos de pavimento flexible) los neumáticos transmiten cargas a la carpeta asfáltica,

a la base, sub-base y a la sub-rasante, esto conllevará a que en ese instante *se generen deformaciones* diferentes en cada una de las capas debido a que es un elemento anisótropo.

Ilustración 15 y 16.

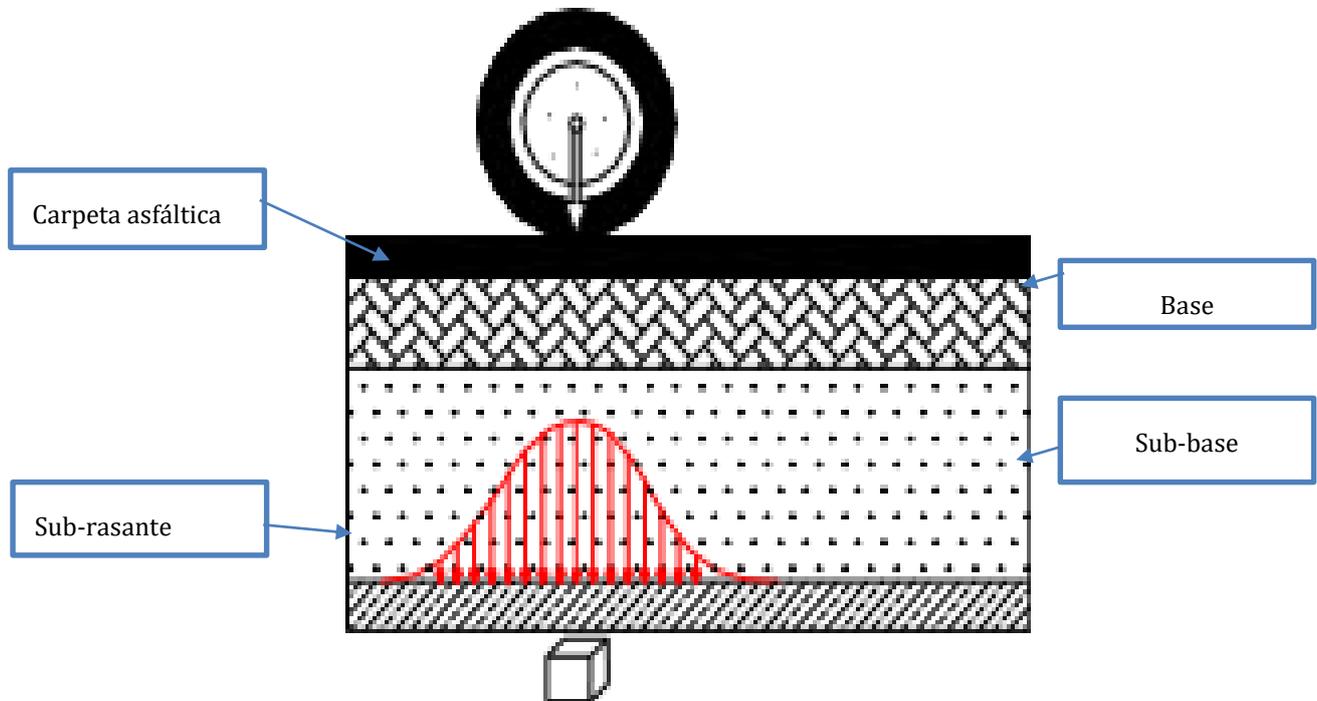


Ilustración 15

Distribución de esfuerzos en sub-rasante debido a eje de carga. Imagen recortada extraída de: (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009) p. 2

La ilustración 15, toma como ejemplo una distribución de esfuerzos en la sub-rasante causada por el eje del vehículo; sin embargo, en las demás capas estructurales, ocurre algo similar¹⁹. Tomemos un elemento diferencial de una de las capas granulares; encontraremos que, debido a la carga del eje del vehículo (En ese instante) están generándose esfuerzos de la siguiente manera: (Ilustración 16)

¹⁹ Con similar se refiere a que estará también sometido a esfuerzos, no obstante; como se menciona unas líneas antes, la distribución de esfuerzos no será la misma en las demás capas debido a la anisotropía.

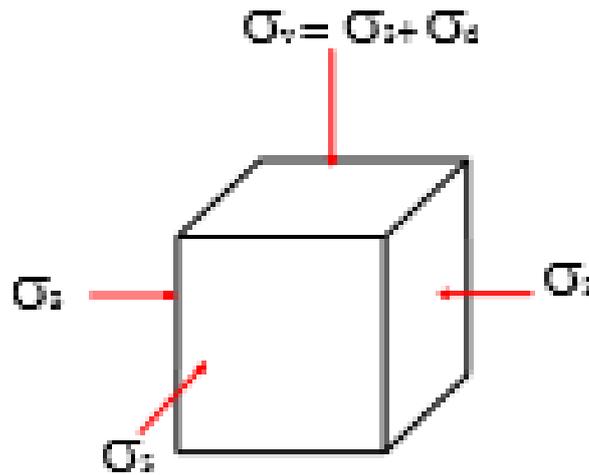


Ilustración 16

Distribución de esfuerzos en elemento diferencial. Imagen recortada extraída de: (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009) p. 2

Para efectos de explicación, diremos que:

$\sigma_3 = \text{Presión de confinamiento}$

$\sigma_d = \text{Esfuerzo desviador} = \sigma_v - \sigma_3$

$\sigma_v = \text{Esfuerzo vertical} = \sigma_3 + \sigma_d$

La ilustración 16 muestra el esquema de esfuerzos en el elemento diferencial elegido para ese instante 't'. Una vez el vehículo haya conseguido desplazarse, el mismo elemento diferencial experimentará diferentes esfuerzos, pero estos, serán menores que como cuando estaba la carga inmediatamente superior, por ello nuestro análisis se centrará en el punto de esfuerzos y deformaciones máximas (Carga inmediatamente arriba del diferencial estudiado) Ilustración 17.

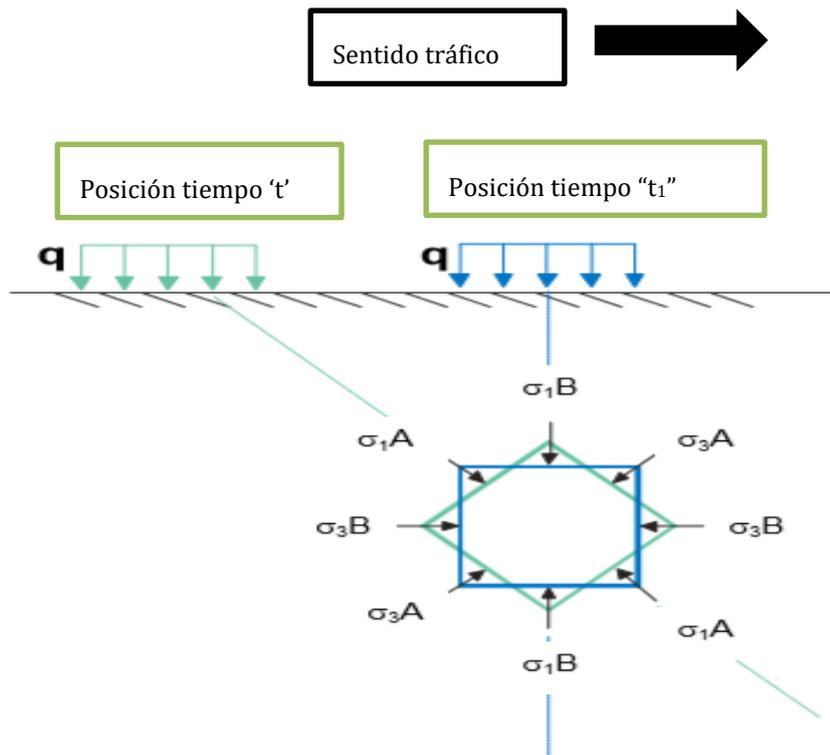


Ilustración 17

Esfuerzos en dos puntos cercanos. Imagen extraída de: (Jiménez Acuña, 2009)

Así también, las deformaciones variarán; y para ese elemento, se irán haciendo más pequeñas a medida que el vehículo se aleja. Una vez el vehículo se ha alejado por completo el diferencial de material granular volverá a su **estado no deformado; parcialmente**, es decir solo **una parte** de la deformación total **se recuperará**. Las deformaciones permanentes y no permanentes dependerán del material, y diremos que, si un material 'A' se recupera en mayor medida que otro material 'B', tras aplicarle las mismas cargas dinámicas; el mismo número de veces, entonces 'A' es *más resiliente que B*. Más adelante se mostrará que para determinar el módulo resiliente de un material, se requiere de una metodología que incluye la realización de ensayos triaxiales cíclicos, es decir que se dará cargas repetidas a la muestra, simulando las condiciones de un pavimento que está constantemente sometido a cargas vehiculares.

1.8.2.2 Definiciones y Análisis

Seed *et al.* (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007) estableció el término “Módulo Resiliente” (M_r) como la relación existente entre la magnitud/valor del esfuerzo desviador y la deformación axial recuperable o *resiliente*. (ϵ_r) en un ensayo triaxial²⁰. Véase ecuación 10.

Ecuación 10

$$M_r = \frac{\sigma_v - \sigma_3}{\epsilon_r}$$

La ecuación 10 es aplicable si el esfuerzo que confina el material es constante (P.C.C o Presión de Confinamiento Constante). Por otro lado, si es variable (P.C.V o Presión de Confinamiento Variable.) deberá aplicarse la ecuación 11:

Ecuación 11

$$M_r = \frac{(\sigma_v - \sigma_3)((\sigma_v + 2\sigma_3))}{\epsilon_r (\sigma_v + 2\sigma_3) - 2\sigma_3\epsilon_r}$$

Los resultados obtenidos (M_r) a través de ensayos en cámaras triaxiales cuya presión de confinamiento es constante son iguales o superiores a los obtenidos en cámaras triaxiales con presión de confinamiento variable. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007)

Una gráfica que ilustra las deformaciones permanentes (Plásticas) y no permanentes (elásticas) debido a las cargas repetidas se toma de (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009) y se presenta a continuación:

²⁰ Es necesario establecer que, si bien es cierto la definición matemática de módulo resiliente está dado por la ecuación 10, es una ecuación que debe utilizarse para la determinación en ensayos. Esto se menciona ya que la finalidad de esta sección es presentar ecuaciones de correlación para la obtención del módulo resiliente, para ello es necesario utilizar ecuaciones que son propias para suelos finos y suelos gruesos. (Hiltunen, 2014) (Gudishala, 2004), (Higuera Sandoval, 2011) (Escuela de Caminos de Montaña, 2006). Las ecuaciones para suelos finos son parecidas a la ecuación 10, en las que el módulo resiliente depende del esfuerzo desviador, no obstante para suelos granulares, entra otra variable denominada “esfuerzos volumétricos” que, como se podrá intuir es la suma de esfuerzos, de esto deducimos que *a medida que los esfuerzos aumentan el módulo resiliente aumenta en cambio para suelos finos la deducción es totalmente opuesta* (Escuela de Caminos de Montaña, 2006), (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007), (Richardson, 1994). En esta perspectiva debe tenerse cuidado ya que la literatura es más bien contradictoria (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

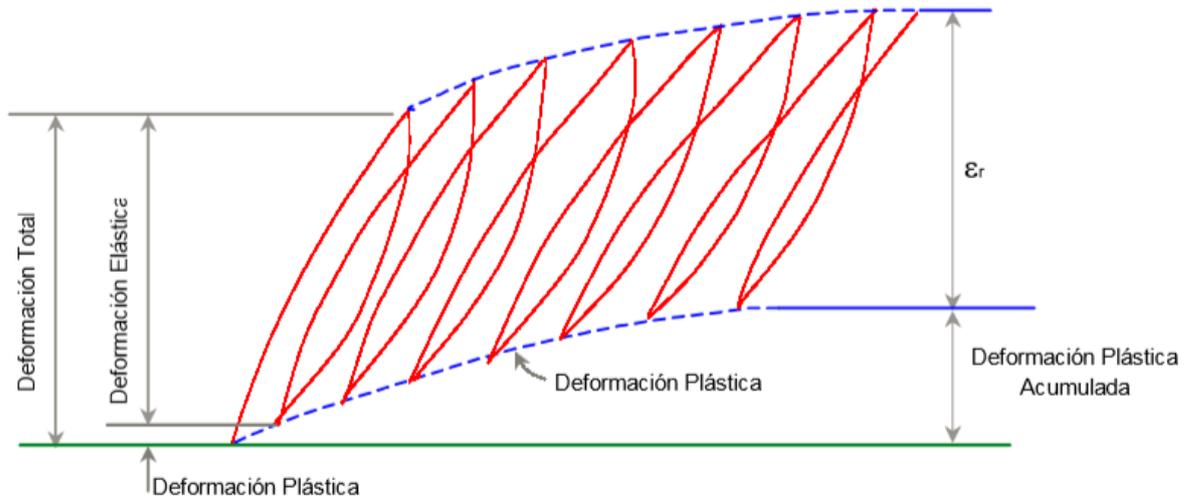


Ilustración 18
Deformación bajo cargas repetidas.

La ilustración 18 presenta un esquema del comportamiento de un material sometido a ciclos de carga. Tras la aplicación de las primeras cargas existirán deformaciones elásticas y plásticas, no obstante, a medida que el ciclo de cargas aumenta, cada vez existen menos deformaciones plásticas hasta el punto en el que el material es completamente resiliente (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007), (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009), (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009). Este fenómeno es debido principalmente a la densificación del material/ asentamiento plástico. La ilustración 19²¹,

²¹ Presentada por Wermeister et al., 2001 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

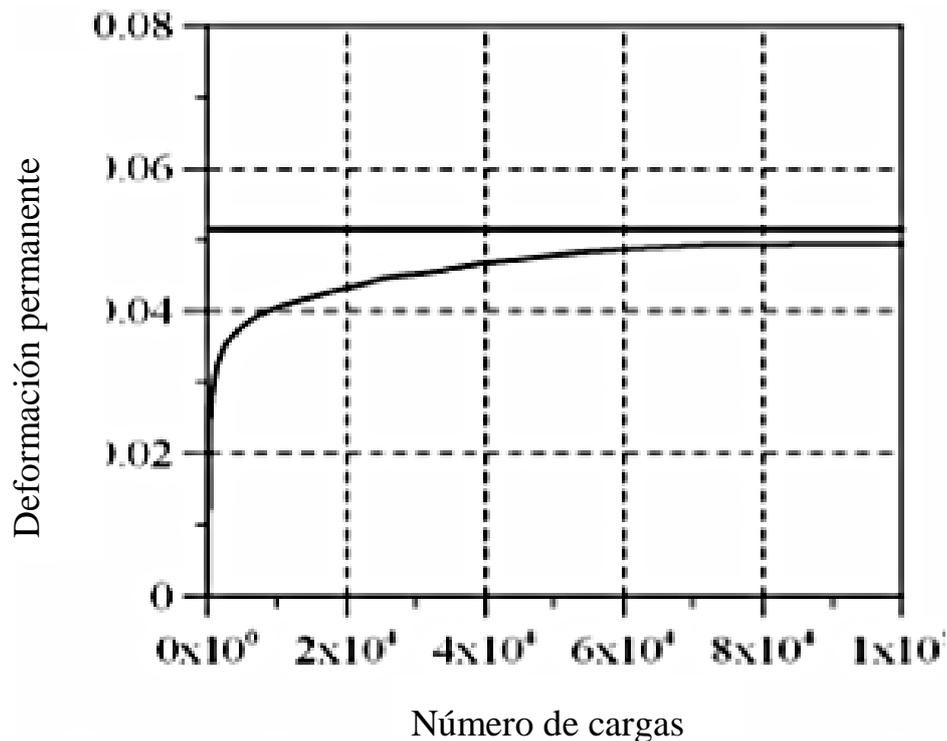


Ilustración 19

Curva típica/común de un ensayo triaxial cíclico. Wermeister et al., 2001 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007)

Explica la importancia de aplicación de un número alto de cargas antes de establecer la resiliencia de un material, que viene siendo la recuperación del material tras el retiro de una carga aplicada, nótese entonces la importancia de la aplicación de un número ‘n’ de cargas. Este valor “n” viene establecido en protocolos de ensayos, así como la magnitud de cargas de confinamiento. (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016).

1.8.2.3 Factores que influyen el valor del módulo resiliente.

Hay que tener claro que el valor del módulo resiliente es bastante variable, inclusive; un mismo material presentará diferentes módulos a lo largo de los meses del año, por eso es que en los procedimientos de diseño se obtiene un “módulo resiliente ponderado” (Sanchez Sabogal, 2016), (Higuera Sandoval, 2011), (Escuela de Caminos de Montaña, 2006). Es razonable pensar que esto se da por los cambios de temperatura, humedad relativa del ambiente, entre otros. A más de éstos, existen bastantes parámetros que pueden influir en el valor de módulo resiliente, a continuación se presentan factores que influyen el valor del

módulo resiliente (Jiménez Acuña, 2009), (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016), (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007):

- I. Humedad (mayor por encima de la óptima, menor módulo) Ver ilustración 20
- II. Densidad (Mayor densidad mayor módulo) Ver ilustración 21.
- III. Estado de esfuerzos. Ver ilustración 22.
- IV. Historia de esfuerzos
 - a. Duración del esfuerzo
 - b. Frecuencia
 - c. Número de repeticiones
- V. Ciclos de congelamiento y deshielo
- VI. Tamaño de la muestra
- VII. Granulometría
- VIII. Cantidad de material fino finos (Diferente de VII)
- IX. Tipo de suelos
- X. Límites de consistencia

También, (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016), menciona que: “Suelos con cualquiera de estas características: índice plástico bajo, bajo límite líquido, bajo valor de peso específico, contenido de materia orgánica, presentan módulos bajos.”p.27

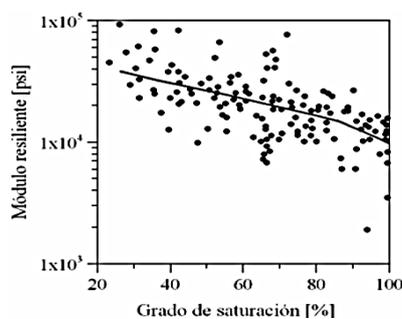


Ilustración 20

Variación del módulo resiliente con el grado de saturación para un mismo material. Imagen extraída de: Rada&Witezak, 1981 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007)

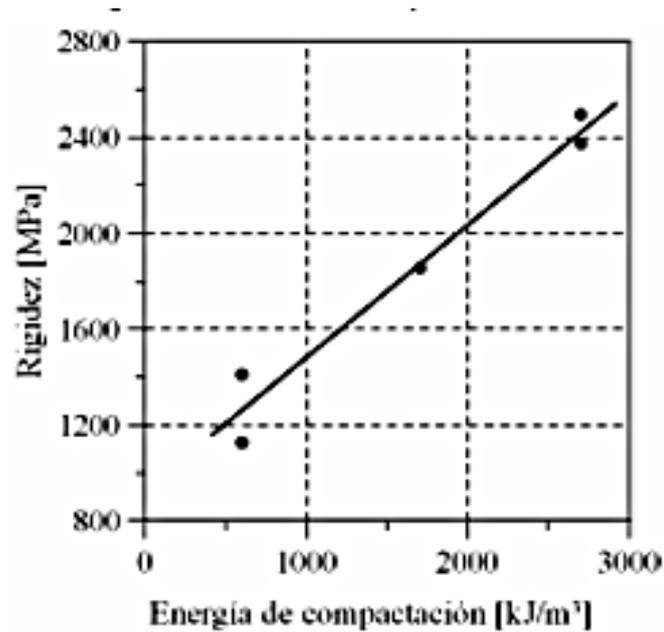


Ilustración 21

Variación del módulo resiliente con el grado de compactación. Imagen extraída de: Magnúsdóttir&Erlingsson, 2002 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007)

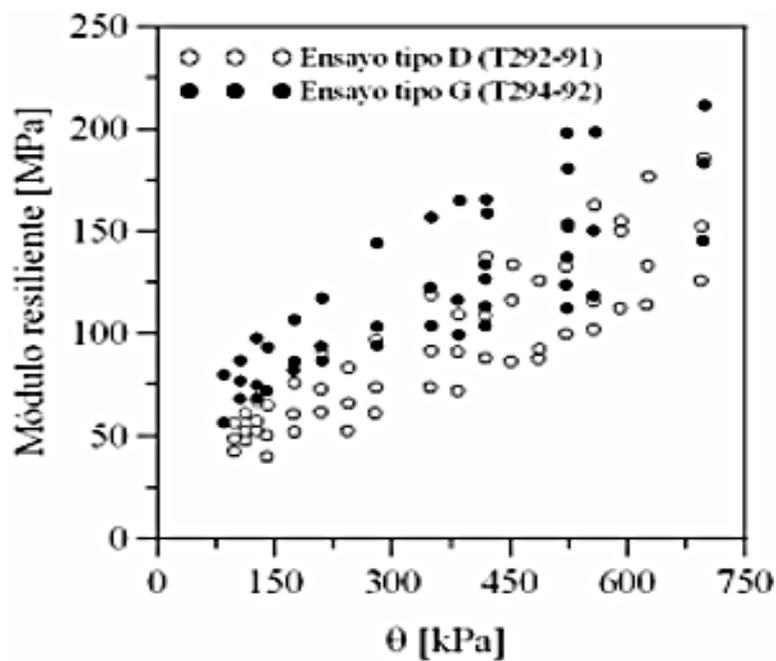


Ilustración 22

Variación del módulo resiliente con el estado de esfuerzos. Imagen extraída de: Zaman et al, 1994 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007)

1.8.2.4 Protocolos de ensayo de módulo resiliente.

AASHTO en el año de 1992, propuso la norma “Resilient Modulus of Uriband Granular Base/Sub base Materials and Subgrade Soils” T294-92I, para la realización de este ensayo es necesario contar con (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009):

- I. “Cámara-Triaxial
- II. Sistema de control/sondeo y aplicación de cargas repetitivas.
- III. Equipo de medición de cargas, deformaciones, registro de variables.
- IV. Equipo para confeccionar especímenes.” p. 4

El ensayo AASHTO mencionado anteriormente, reconoce dos tipos de materiales (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009):

- I. Tipo 1 (Gruesos), es decir todos aquellos materiales que no sean ligados y que al menos el 70% del material debe pasar el tamiz N°10 y como máximo el 20% puede pasar el tamiz N°200²².
- II. Tipo 2 o finos, es decir todos aquellos no ligados que no estén dentro de 1²³.

A más de esto, el ensayo propuesto por AASHTO deberá cumplirse siguiendo los siguientes parámetros. Véase tabla 7 y 8.

Tabla 7

Protocolo SHRP P46. Información extraída de: (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

Material	Duración de la carga	Duración de ciclos	Localización de equipos medidores de deflexión	Espécimen	Método reconstrucción	No. Capas espécimen
I	0.1 s	1 s	Fuera de la cámara triaxial	15 cm de diámetro	Vibratorio	5
II				7.1 cm de diámetro	Estático	

²² Según la clasificación AASHTO, serían suelos A-1, A-1-b, A2 o A3.

²³ Según la clasificación AASHTO, serían suelos A-4, A-5, A-6 y A-7

Y,

Tabla 8

Protocolo SHRP 846. Información extraída de: (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

Secuencia No.	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	No. Aplicaciones de carga
0	41.4	27.6	1000
1	41.4	13.8	100
2	41.4	27.6	100
3	41.4	41.4	100
4	41.4	55.2	100
5	41.4	69	100
6	20.7	13.8	100
7	20.7	27.6	100
8	20.7	41.4	100
9	20.7	55.2	100
10	20.7	69	100
11	0	13.8	100
12	0	27.6	100
13	0	41.4	100
14	0	55.6	100
15	0	69	100

La tabla 7 presenta el protocolo guía para la realización del ensayo, en tanto que la tabla 8 presenta las secuencias y número de aplicación de cargas por secuencia, así como los esfuerzos (ilustración 16). Tras haber clasificado el material como tipo I o II (Tabla 7) se deberá colocar éste; en una probeta de 15 y 7.1 cm de diámetro respectivamente, el material de la probeta deberá contener una humedad tal; que tras una compactación dentro de la probeta; el material granular presente una densidad cercana a la máxima (Ensayo Proctor modificado). Como siguiente paso se deberá colocar el espécimen dentro de una cámara de equipo triaxial cíclico, en la que se irá aplicando cargas tal como lo describe la tabla 8. En cada secuencia es necesario tomar lecturas de deformación, durante la aplicación de las cargas y al momento de que éstas se retiran, al final de las secuencias el material tenderá a

comportarse de acuerdo a la ilustración 19, con esto; y según el alcance de los equipos se aplicarán cualesquiera de las ecuaciones presentadas en la siguiente sección:

1.8.2.5 Ecuaciones para estimar el módulo resiliente de materiales granulares.

Existen más de 25 ecuaciones que determinan el módulo resiliente, en el ámbito de materiales granulares; algunas son establecidas para ensayos con cargas de confinamiento variable y otras para constante. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007). En la presente investigación se citarán sin embargo las que más se ajusten a los recursos con los que se cuenta en nuestro medio y también las más utilizadas: La primera que se citará es la obtenida por Brown & Pell, 1967; Hicks & Monismith 1971; Hicks & Monismith, 1972 (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007)

Ecuación 12

$$M_r = K_1 \left(\frac{\theta}{\rho_e} \right)^{k_2}$$

Donde:

θ es la sumatoria de esfuerzos principales/esfuerzos volumétricos.

P_a es una presión de referencia de 100 kilo-Pascales

K_1 y K_2 son parámetros de los materiales granulares obtenidas por regresión.

Esta ecuación se desarrolló mediante la utilización de ensayos cíclicos de confinamiento constante.

Una ecuación, bastante interesante para obtener el valor del módulo resiliente es la propuesta por Rada & Witczak, 1981, (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007), que relaciona el grado de saturación (Humedad del material) y la energía de compactación de los materiales granulares. Véase: ecuación 13:

Ecuación 13

$$M_r = C_0 + C_1 S_r + C_2 EC + C_3 \log(\theta)$$

Donde:

C_t Son parámetros obtenidos por regresión

θ sumatoria de esfuerzos principales

s_t es el grado de saturación

Finalmente, citaremos la fórmula desarrollada por Rahim & George (2005) (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007), la cual es empírica y toma en cuenta el efecto del esfuerzo, densidad, grado de uniformidad, contenido de agua y finos para materiales granulares:

Ecuación 14

$$M_r = K_1 * \rho_a \left(1 + \frac{\theta}{1 + q}\right)^{k_2}$$

Donde:

Ecuación 15

$$K_1 = 0.12 + 0.80\gamma_d - 0.53w - 0.017(\#200) + 0.314(\log Cu)$$

Y,

Ecuación 16

$$K_2 = 0.226(\gamma_d * w)^{1.2385} * \left(\# \frac{200}{\log Cu}\right)^{0.124}$$

En el que:

θ sumatoria de esfuerzos principales

q es el esfuerzo desviador

γ_d es la densidad seca

w es el contenido/cantidad de agua

ρ_a es la presión atmosférica

#200 es el porcentaje del material que pasa el tamiz No. 200 en un ensayo granulométrico.

Cu es el coeficiente de uniformidad.



**CAPÍTULO SEGUNDO:
RELACIÓN ENTRE ENSAYOS DE LABORATORIO Y
COEFICIENTES ESTRUCTURALES.**

2.1 Discusión acerca de la relación entre resultados de C.B.R y coeficiente estructural de materiales granulares

Por lo general²⁴, los pavimentos flexibles están compuestos por tres capas: Carpeta Asfáltica, Base y sub-base, esta última, se asienta sobre la fundación, que es el suelo natural o en su defecto material de mejoramiento. Ilustración 23.

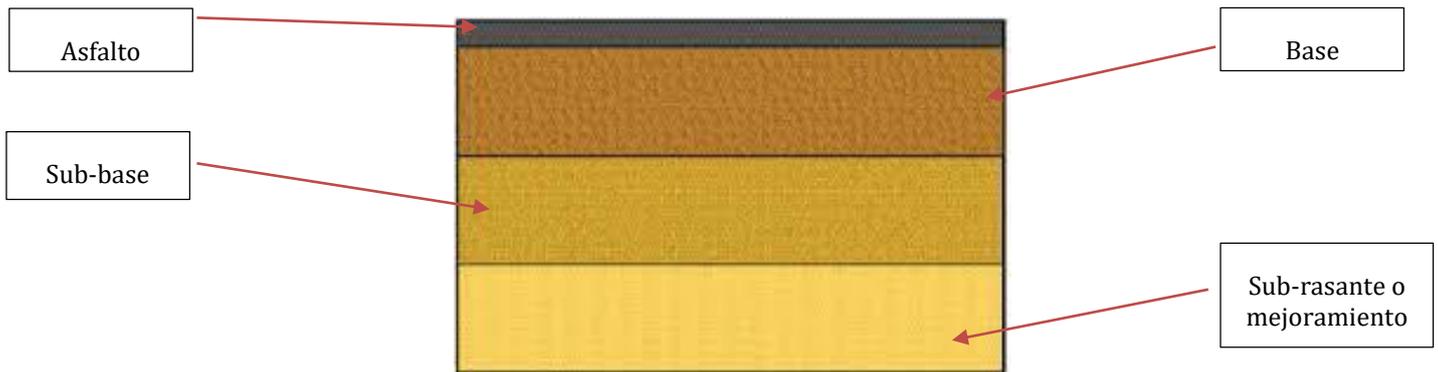


Ilustración 23

Esquema de un sistema multi-capa de pavimento flexible. Imagen extraída de: <https://ingenieriareal.com/metodo-aashto-para-pavimento-flexible/>

Como se sabe, cada capa del sistema contribuye en alguna magnitud estructural al apropiado desempeño del pavimento. En función de esta magnitud de contribución al funcionamiento se obtienen coeficientes estructurales para cada capa o dicho de otro modo *cada capa aporta un número estructural (de la estructura) singular que sumado deberá ser mayor al número estructural de tránsito calculado con las correlaciones del método AASHTO*. Ahora citamos la ecuación 7²⁵ :

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Que puede reescribirse de la siguiente manera:

²⁴ Se ha visto estructuras de pavimentos hasta de cinco capas: Carpeta asfáltica, base, sub-base, mejoramiento y pedraplén. (Maldonado, 2016)

²⁵ Ver nota número 16 que explica los valores (arbitrarios) asignados a los parámetros a.

$$SN = \sum a_i * D_i * m_i^{26}$$

Véase la ilustración 24.

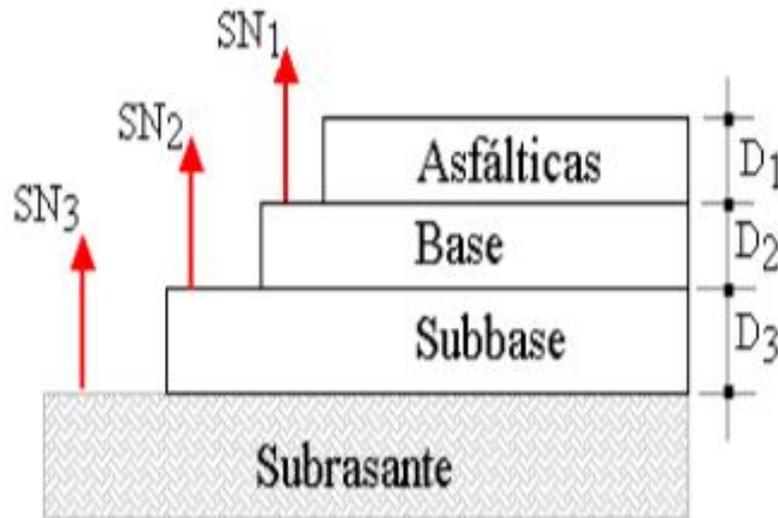


Ilustración 24
Números estructurales de Carpeta Asfáltica, Base y Sub-base

Así, el número estructural total²⁷, se verá implicado por las características mecánicas de cada material; la cuantificación de estas características anteriormente era a través del valor de C.B.R (Escobar, 2013), (Escuela de Caminos de Montaña, 2006), (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009), sin embargo AASHTO introdujo en su método de diseño, el valor del “Módulo resiliente” (Mr) como un parámetro más sensible; y, a diferencia del C.B.R las cargas analizadas son de carácter dinámico, proporcionando así, información más realista (Escuela de Caminos de Montaña, 2006). No obstante, los equipos²⁸ necesarios para realizar los ensayos que determinen el valor de Mr son difíciles de conseguir y al menos en nuestro medio, un ensayo de estos, resulta bastante costoso; por ello se sigue usando el valor de C.B.R.

²⁶ La ecuación 17, (Ec. 7 reescrita); nos muestra de una manera más clara, la posibilidad de un número “n” de capas del sistema estructural.

²⁷ De la estructura, claro está.

²⁸ Equipo triaxial cíclico, cuyo costo (en nuestro medio) es superior a los \$100000

2.2 Ecuaciones de Correlación de coeficientes estructurales con C.B.R

2.2.1 Correlación entre C.B.R y coeficiente estructural para Sub-bases granulares.

(Higuera Sandoval, 2011) presenta²⁹ la ecuación 29b, (Ecuación 18 de este documento) que relaciona C.B.R con coeficientes estructurales de la siguiente manera:

Ecuación 18

$$a_3 = 0.058 * CBR^{0.19}$$

Donde:

a_3 = Coeficiente estructural de la capa de sub-base

CBR= Valor de C.B.R. en porcentaje (%)

Así también, (Rada & Witczak) establece una ecuación para sub-base no ligadas, en las que a más del C.B.R, se incluyen otros parámetros.

Ecuación 19

$$a_3 = (A + B * C.B.R) + f_c + f_s$$

Donde:

A = 0.080 si el material es de granulometría delgada o 0.100 si es de granulometría gruesa³⁰.

B= 0.0064 si el material es de granulometría delgada o 0.0021 si es de granulometría gruesa.

f_c Es el esfuerzo de compactación³¹ realizado en el laboratorio.

f_s Es la humedad que contenía el material durante el análisis. Ver tabla: 9.

Dicho sea de paso, la ecuación 19 es solo aplicable para un rango de valores de C.B.R menores o iguales al 20%.

²⁹ Ecuación, que a su vez fue obtenida de (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

³⁰ La estimación como tal, de si es un suelo fino o grueso; se lo hace a través de la curva granulométrica; mediante la clasificación de suelos SUCS y/o AASHTO, determinando el porcentaje de la muestra tomada, que pasa por el tamiz #200. Será considerado suelo fino si un valor mayor al 50% (Criterio SUCS) o 35% (Criterio AASHTO) de la muestra pasa el tamiz #200.

³¹ Es decir, la fuerza (con la que se compacta) dividida para el área del suelo que es compactado en ese instante.

Tabla 9
Información extraída de: (Rada & Witczak)

SUB-BASE	Material	Fc	Fs
	Escoria ³²	-0.051	-0.087
	Arena/Grava	-0.045	-0.046

En cuanto a los límites de coeficientes estructurales para sub-base granular no tratada, se ha encontrado que pueden oscilar en el rango de: (0-0.055)/cm ; (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993). Algunos autores han determinado valores específicos de C.E.; [0.035,0.043] /cm (Torres Espinoza, 2010) y [0.023,0.0433] /cm (Rada & Witczak). Se deduce, de los valores presentados; que la variación *relativamente sustancial* depende de los diferentes entornos en donde se procedió a realizar el análisis³³. (Rada & Witczak) realizaron pruebas experimentales a 32 materiales de sub-base con diferentes niveles de humedad, en las que la variación de coeficientes fue **hasta del 60%**. p.4.

(Torres Espinoza, 2010), presenta un cuadro (tabla 10 de este documento) que relacionan los valores de C.B.R con coeficientes estructurales de sub-base granular (a₃); la gráfica de estos valores se presenta en la ilustración 25.

Tabla 10
Valores de C.B.R-a₃
Información extraída de: (Torres Espinoza, 2010)

CBR %	C.E. de sub-base granular: a ₃
10	0.08
15	0.09
20	0.093
25	0.102
30	0.108
35	0.115
40	0.12
50	0.125
60	0.128
70	0.13
80	0.135
90	0.138
100	0.14

³² Se entiende por escoria a los desechos sólidos de las industrias metalúrgicas o afines.

³³ En efecto, los autores citados son de países diferentes.

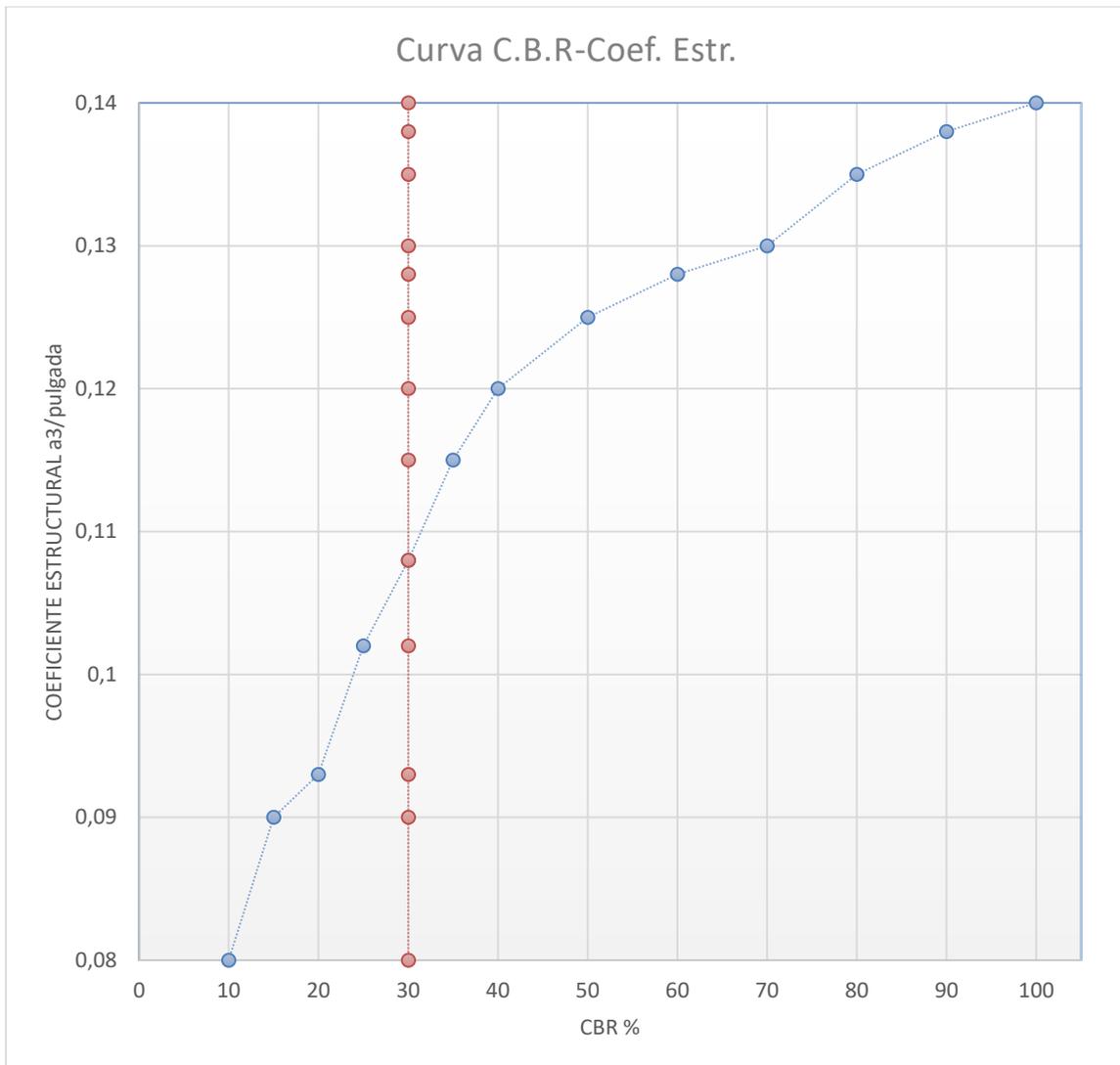


Ilustración 25

Gráfica de tabla 10: Curva CBR vs coeficiente estructural de sub-base granular (a_3)

Según la normativa actual; uno de los requisitos para que un material sea catalogado como Sub-base granular es el valor de C.B.R, el cual debe estar por encima del 30%, con este supuesto, entramos en la gráfica de la ilustración 25 y encontramos que el mínimo valor de un coeficiente estructural de sub-base deberá ser de 0.105. / pulgada [0.0413]

De la misma manera, (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) presenta nomogramas para obtener el coeficiente

estructural de sub-base granular (a_3) en función del CBR u otros parámetros; tales como Mr, ensayo triaxial de Texas y Valor-R³⁴, Ilustración 26.

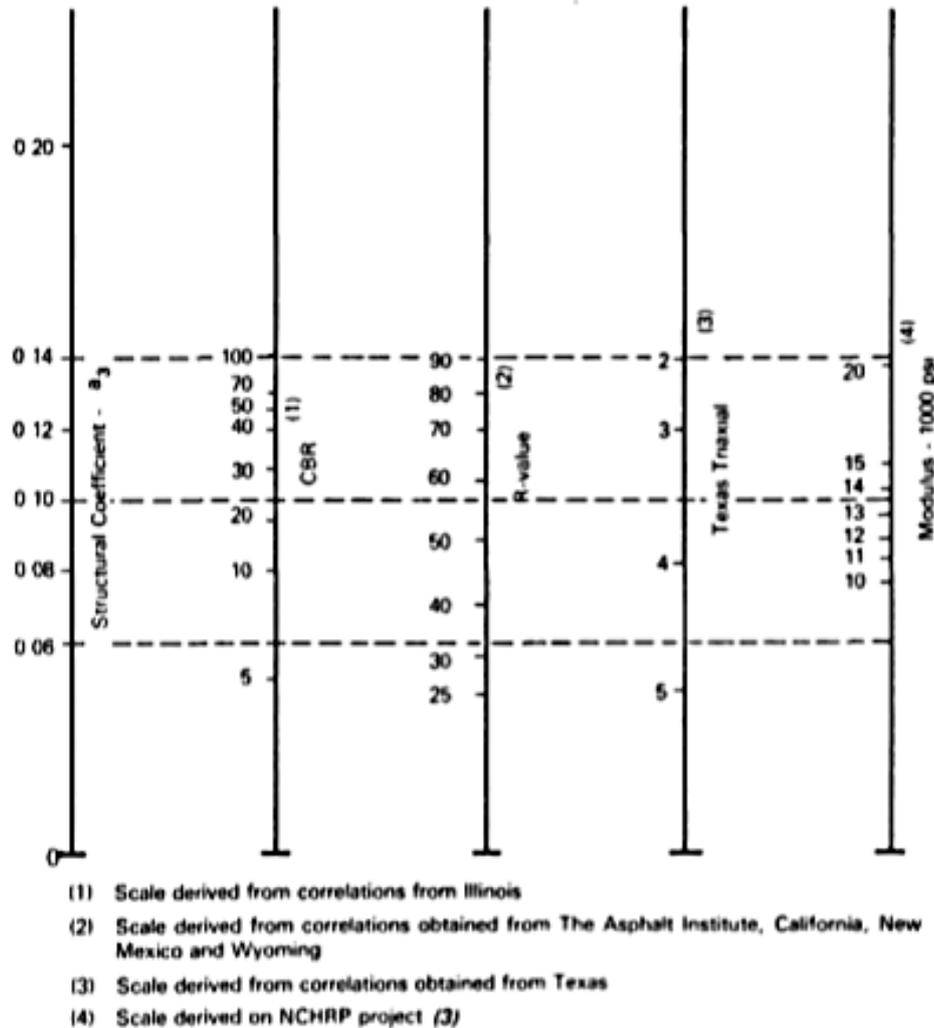


Figure 2.7. Variation in Granular Subbase Layer Coefficient (a_3) with Various Subbase Strength Parameters (3)

Ilustración 26

Relación de coeficientes estructurales de Sub-base granular con ensayos de laboratorio. Imagen extraída de: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

³⁴ Para saber más acerca de los ensayos "Triaxial de Texas" y "Valor-R" consultar (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

2.2.2 Correlación entre C.B.R y coeficiente estructural para Base granular.

De la misma manera, (Higuera Sandoval, 2011) presenta la ecuación³⁵ 31^a (Ecuación 20 de este documento) que relaciona C.B.R con valores de coeficientes estructurales para base de la siguiente manera:

Ecuación 20

$$a_2 = 0.032 * CBR^{0,32}$$

Donde:

a_2 = Coeficiente estructural de la capa de sub-base

CBR= Valor de C.B.R³⁶. en porcentaje (%)

(Rada & Witczak) establece una ecuación para base no ligadas, en las que, como en el punto 2.2.1; a más del C.B.R las relaciona con los parámetros de compactación y de humedad del material analizado.

Ecuación 21

$$a_2 = (A + B * C.B.R) + f_c + f_s + f_t$$

Donde:

A = 0.130 si el material es triturado o 0.180 si es escoria (desechos sólidos de la industria metalúrgica o metal-mecánica que son utilizados como parte de material granular³⁷)

B= 0.0035 si el material es triturado o 0.0024 si es escoria

f_c Es el esfuerzo de compactación aplicado en el laboratorio

f_s Es la humedad³⁸ del material durante el análisis, Ver tabla 11.

f_t depende del espesor de la capa, que ha sido tomado en los ensayos de laboratorio. Véase tabla: 11.

³⁵ Que a su vez, fue desarrollada por (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

³⁶ Como se ha mencionado anteriormente, se tomará el valor de C.B.R. al 95% de su densidad máxima.

³⁷ La escoria puede llegar a ser un material muy útil, especialmente como parte del agregado en hormigones de altas resistencias.

³⁸ Se deduce que el porcentaje de agua en el material granular, corresponde a aquel que otorgue la densidad máxima.

Tabla 11
Información extraída de: (Rada & Witczak)

BASE	Material	Fc	Fs	Ft
	Triturado	-0.040	-0.087	-0.045
	Escoria	-0.045	-0.046	-0.025

La ecuación 21 ha sido desarrollada para materiales cuyos valores de C.B.R son bajos³⁹. Recordar que uno de los requisitos principales para que materiales granulares sean catalogados como base, es que posean un valor de C.B.R. superior al 80% (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013) (Torres Espinoza, 2010), presenta un cuadro de valores (Tabla 12 de este documento) que relacionan el C.B.R con el coeficiente estructural para base granular.

Tabla 12
Relación de CBR con C.E. de base granular.
Información extraída de: (Torres Espinoza, 2010)

CBR %	C.E. base granular a ₂
20	0.07
25	0.085
30	0.095
35	0.1
40	0.105
45	0.112
50	0.115
55	0.12
60	0.125
70	0.13
80	0.133
90	0.137
100	0.14

En cuanto a los límites de coeficientes estructurales para base granular no tratada, se ha encontrado que pueden oscilar en el rango de: (0-0.079)/cm; (AMERICAN ASSOCIATION

³⁹ Menores al 30%

OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993). Por otro lado, para zonas específicas, se han encontrados valores de [0.028,0.051] para gravas graduadas uniformemente y para agregados triturados graduados uniformemente; en tanto que, los límites de C.E están entre [0.047-0.055] y [0.0378-0.078] para gravas que presenten un grado de saturación menor al 40% (Rada & Witczak); p.4. (Torres Espinoza, 2010). La gráfica de la tabla 12 se presenta en la ilustración 27. Como se había mencionado en puntos anteriores; para que un material cumpla con el requisito común de ser base (sin perjuicio de los demás requerimientos) deberá poseer un valor de C.B.R por encima del 80%

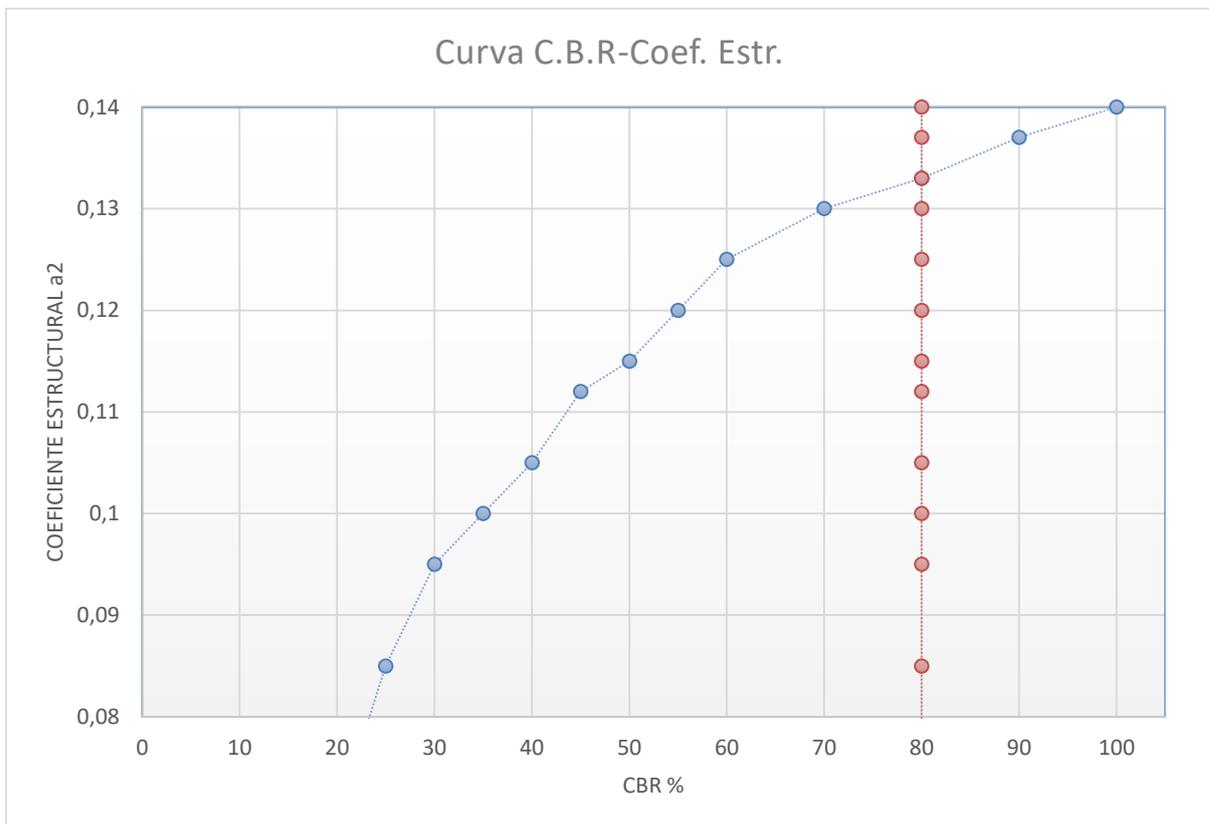
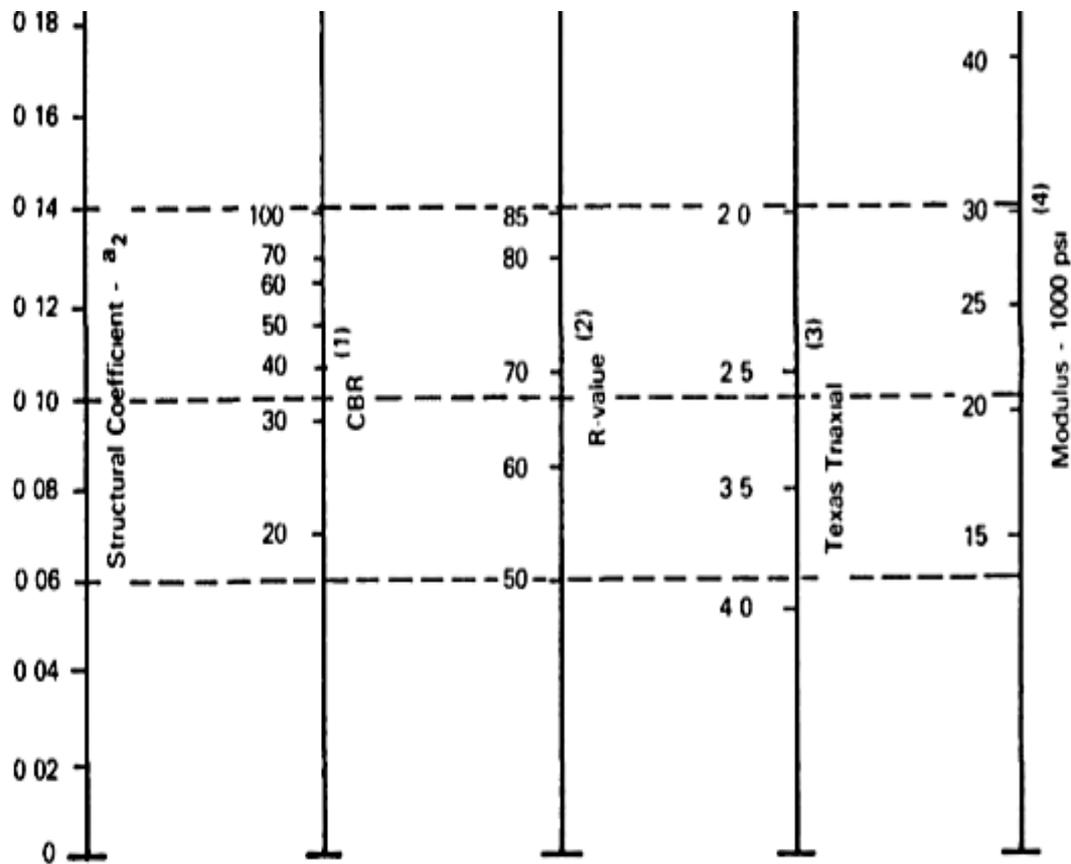


Ilustración 27
Gráfica tabla 12: Relación entre CBR y coeficiente estructural de base granular (a_2).

Para finalizar se presenta la ilustración 28, que constituye un nomograma establecido por (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION

OFFICIALS, 1993), que permite determinar el valor de C.E a_2 mediante los resultados de los ensayos “Triaxial de Texas”, “Valor-R” y “Módulo resiliente”



- (1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois
- (2) Scale derived by averaging correlations obtained from California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived by averaging correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

Figure 2.6. Variation in Granular Base Layer Coefficient (a_2) with Various Base Strength Parameters (3)

Ilustración 28. Nomogramas para la obtención de coeficientes estructurales para base granular. Tomado de: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

2.3 Análisis y discusión acerca de la relación entre módulo resiliente y coeficiente estructural de materiales granulares

Como bien se ha mencionado, el ensayo del módulo resiliente pretende simular condiciones mucho más realistas de carga, al que estarán sometidas las capas del pavimento, hasta tal punto que en la metodología AASHTO actual (1993 en adelante), éste reemplaza al valor del C.B.R en el cálculo de los coeficientes estructurales. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) p. II-20. Inclusive⁴⁰ existen autores que determinan coeficientes estructurales, primeramente, encontrando el valor de CBR por ensayos de laboratorio, para luego reemplazar el valor de éste en ecuaciones de correlación entre el módulo resiliente y CBR. (Richardson, 1994), (Rada & Witczak), acto seguido, obtienen los valores de coeficientes estructurales, aplicando ecuaciones de la AASHTO pág. -II20 (ecuación 22 de este documento) e II-22 (ecuación 23 de este documento) (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993),

En las secciones siguientes se irán presentando ecuaciones de correlación entre CBR Y Mr. Antes de esto, se hará una recopilación de valores para módulos resilientes de materiales granulares en función de las clasificaciones de suelos SUCS y AASHTO.

2.3.1 Valores comunes para módulos resilientes de materiales granulares sujetos a condiciones de servicio regulares.

El módulo resiliente para materiales granulares puede fluctuar entre valores de 10000 a 20000 psi (69 a 139 Mpa) para materiales Sub-base y de 12000 a 40000 (82.7 Mpa a 275.79 Mpa) para materiales de Base, según (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993).

⁴⁰ El desarrollo de ecuaciones de correlación entre Mr y CBR pueden resultar en grandes beneficios económicos. Se recomienda la realización de este estudio en el cantón Cuenca.

Por otro lado, (Gudishala, 2004) establece un rango de 143 a 298 Mpa para materiales granulares mediante ensayos de campo y, (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016) recopilan información acerca de módulos resilientes de materiales granulares de los Estados Unidos, esta información se presenta en las tablas 13 y 14.

Tabla 13

Valores de Mr para suelos de New Hampshire.

Janoo et al 1999 citado por Malla y Joshi, 2006 (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

Descripción del suelo	Tipo de Suelo		Humedad óptima %	Densidad (Kg/m ³)	Mr efectivo (MPa)
	Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS			
Limo con algo de arena fina. Algo de grava, de fina a gruesa. Algo de arena de gruesa a media	A-4	SM	9	2050	45
Arena fina, algo de limo	A-2-4	SM	14.5	1714	62
Grava de fina a gruesa y pequeñas cantidades de arena fina	A-1-a	SP	9.5	1730	265
Arena de gruesa a media, pequeñas cantidades de arena fina	A-1-b	SP	13.6	1643	26
Limo arcilloso.	A-7-5	ML	23.5	1618	21

Tabla 14

Valores de Mr para suelos de New Hampshire

Rhode Island, Lee et al (1994) citado por Malla Y Joshi, 2006 (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

Tipo de Suelo		Pasa malla No 200	Humedad óptima %	Densidad (KN/m ³)	Mr efectivo (MPa)
Clasificación AASHTO	Clasificación SUCS				
A-1-b	SW	10	6.9	20.97	89.7
A-1-b	SW	10	7.8	20.7	92.5
A-1-b	CL-ML	60.7	6.4	20.77	71.8
A-3	SPSM	8.9	9.3	19.05	67.6
A-1-b	SP-SM	7.3	6.3	21.68	92.5
A-1-b	SW-SM	7.2	8.6	19.81	82.8
A-1-b	SM	11.3	10	19.27	91.1
A-1-b	SC	20.8	6.1	21.18	90.4

En la literatura, también se encuentran registros de valores comunes de módulos de resiliencia para cada suelo según la clasificación AASHTO y SUCS, esta información fue reportada por Mokwa Y akin 2009, (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016) las gráficas correspondientes se presentan en las ilustraciones 29 y 30.

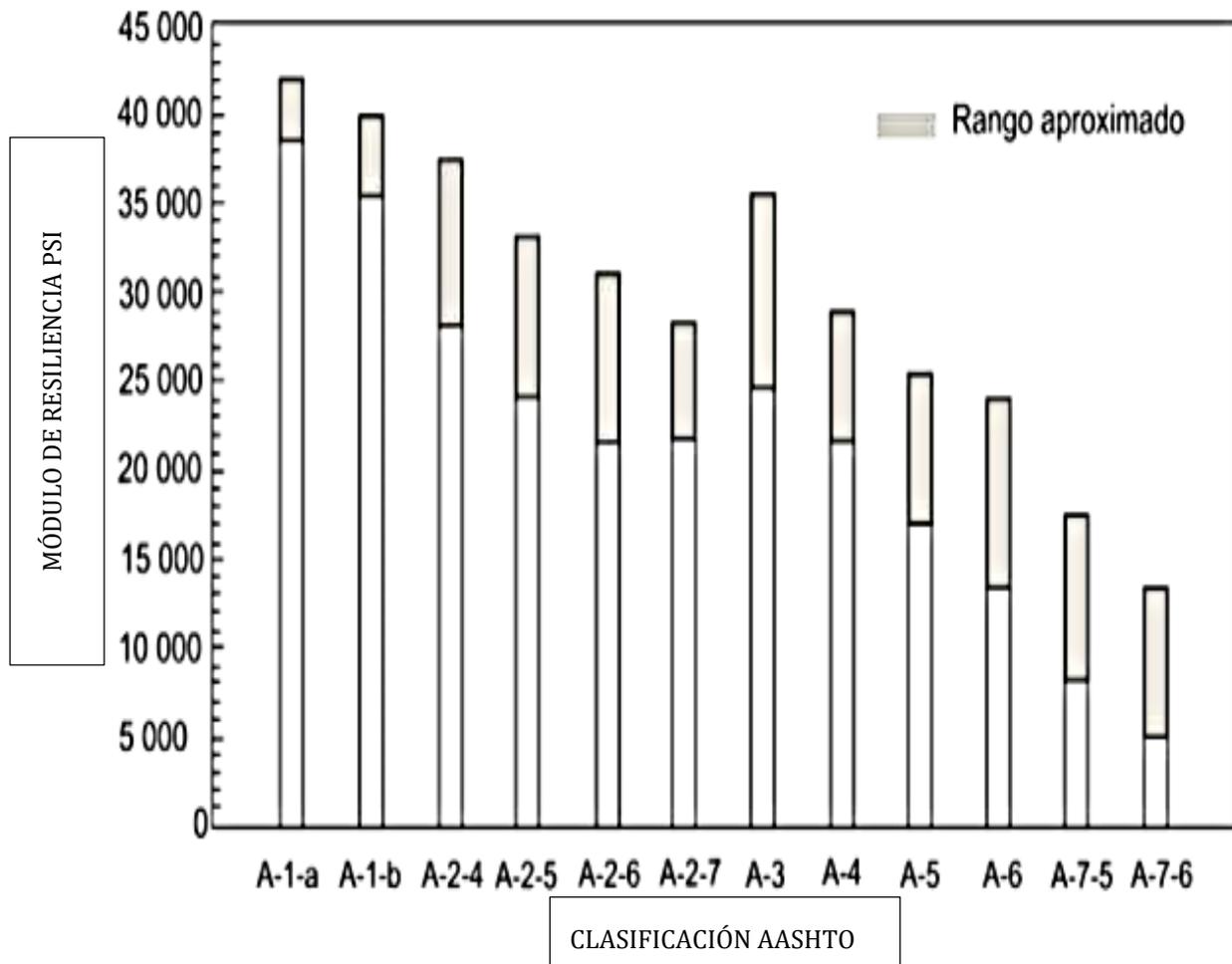


Ilustración 29

Valores típicos para módulos de resiliencia. Nótese aquí que el valor máximo corresponde aprox. A 43000 Psi
Información extraída de: Mokwa Y akin 2009, (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

Nótese que, de estos valores típicos, el valor máximo corresponde a 43000 Psi o 296.5 Mpa, estos valores superan por dos veces aproximadamente, aquellos módulos máximos encontrados en los nomogramas de AASHTO para sub-bases y al máximo para materiales Base. Se recomienda analizar este aspecto de variación. Finalmente, en la ilustración 30 se presentan M_r típicos, pero esta vez según la clasificación SUCS.

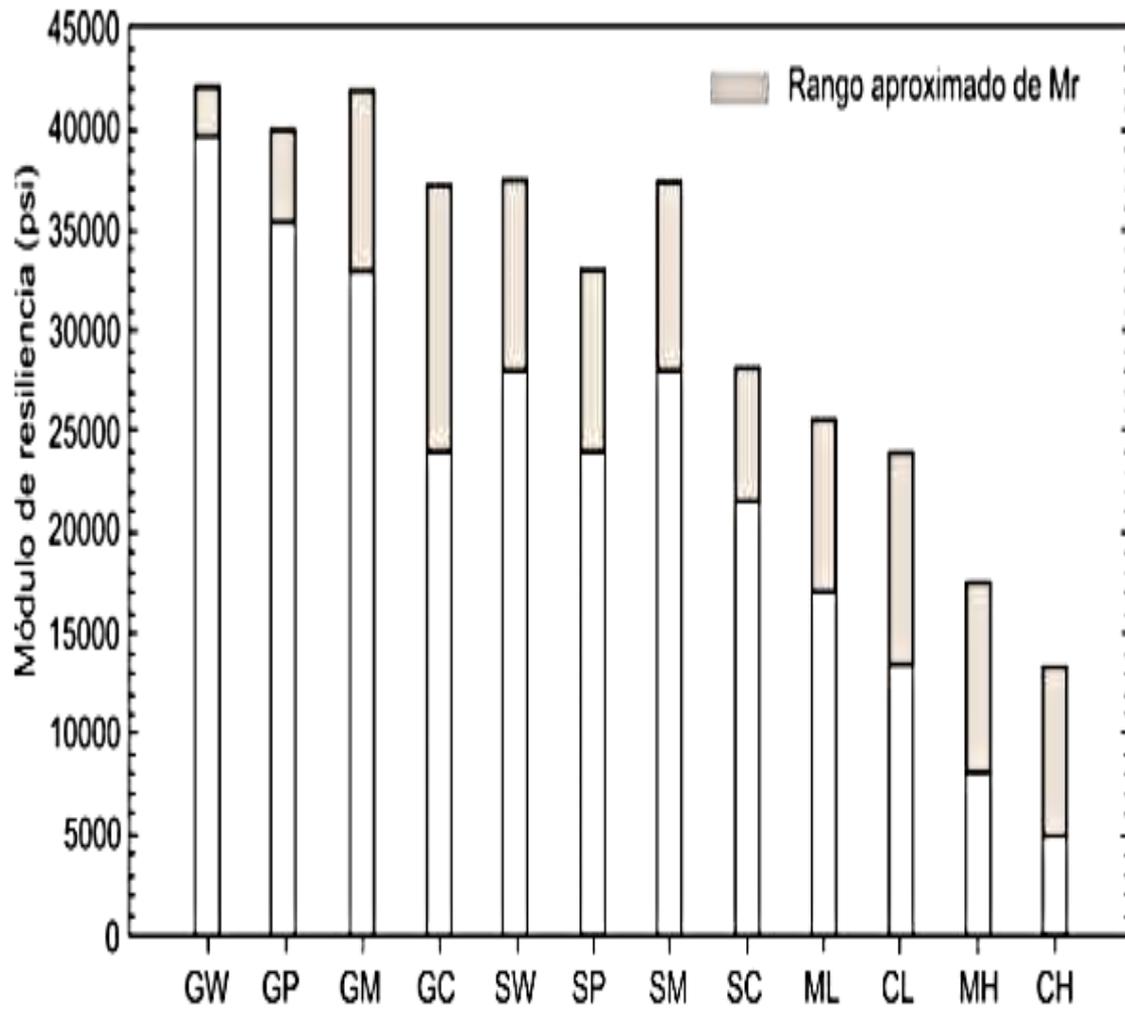


Ilustración 30

Valores típicos para módulos de resiliencia. Nótese aquí que el valor máximo corresponde aprox. A 43000 Psi
Información extraída de: Mokwa Y akin 2009, (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

2.3.2 Correlación entre Módulo Resiliente y coeficiente estructural para Sub-bases granulares.

La ecuación 22 presenta la relación entre el coeficiente a_3 y el módulo resiliente:

Ecuación 22

$$a_3 = 0.227 (\log_{10} E_{SB}) - 0.839$$

Donde:

a_3 Coeficiente estructural para Sub-base Granular

E_{SB} es el módulo de resiliencia del material.

(AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), menciona que para materiales granulares el módulo de resiliencia es afectado por los esfuerzos volumétricos en la capa objeto de estudio. Véase la ilustración 31 tomada de (Richardson, 1994):

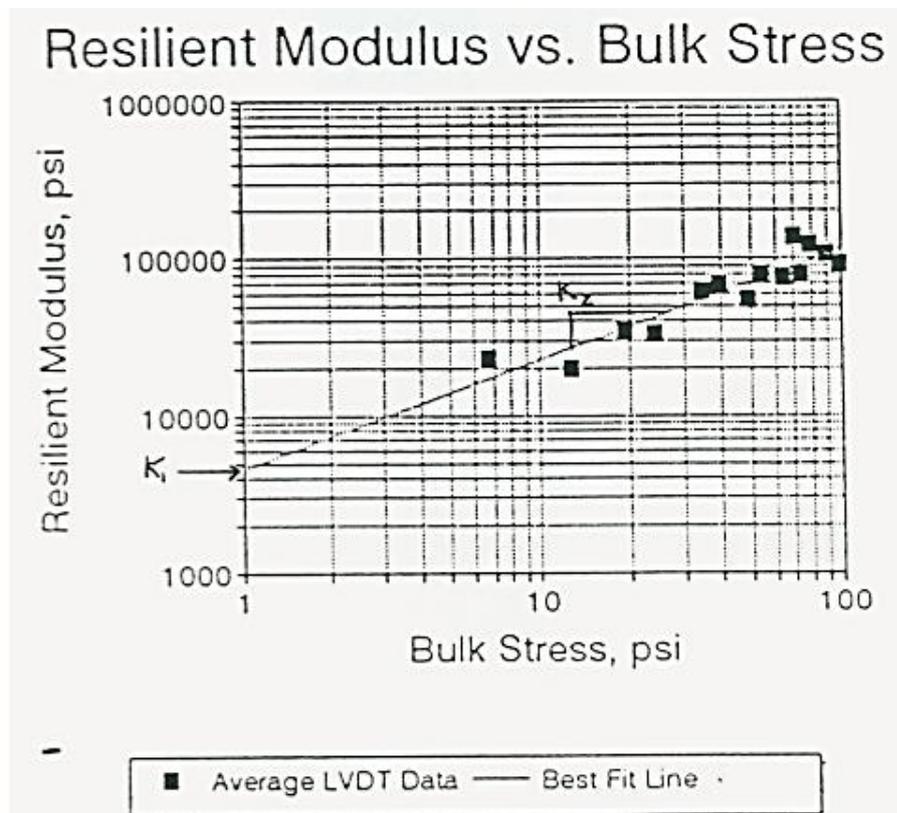


Ilustración 31

*Variación del módulo resiliente con los esfuerzos volumétricos.
Tomado de: (Richardson, 1994).*

En resumen, para poder determinar el Mr. de materiales granulares, se necesitará conocer los esfuerzos producidos en las capas de pavimento que se esté estudiando, así; estos esfuerzos podrían determinarse por medio de la teoría de la elasticidad. Existen estudios que demuestran la poca variación entre mediciones reales de campo con modelos teóricos (Teoría de la elasticidad). Ilustración 32. Whiffin y lister, 192 citado por Selvaraj que a su vez es citado por (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

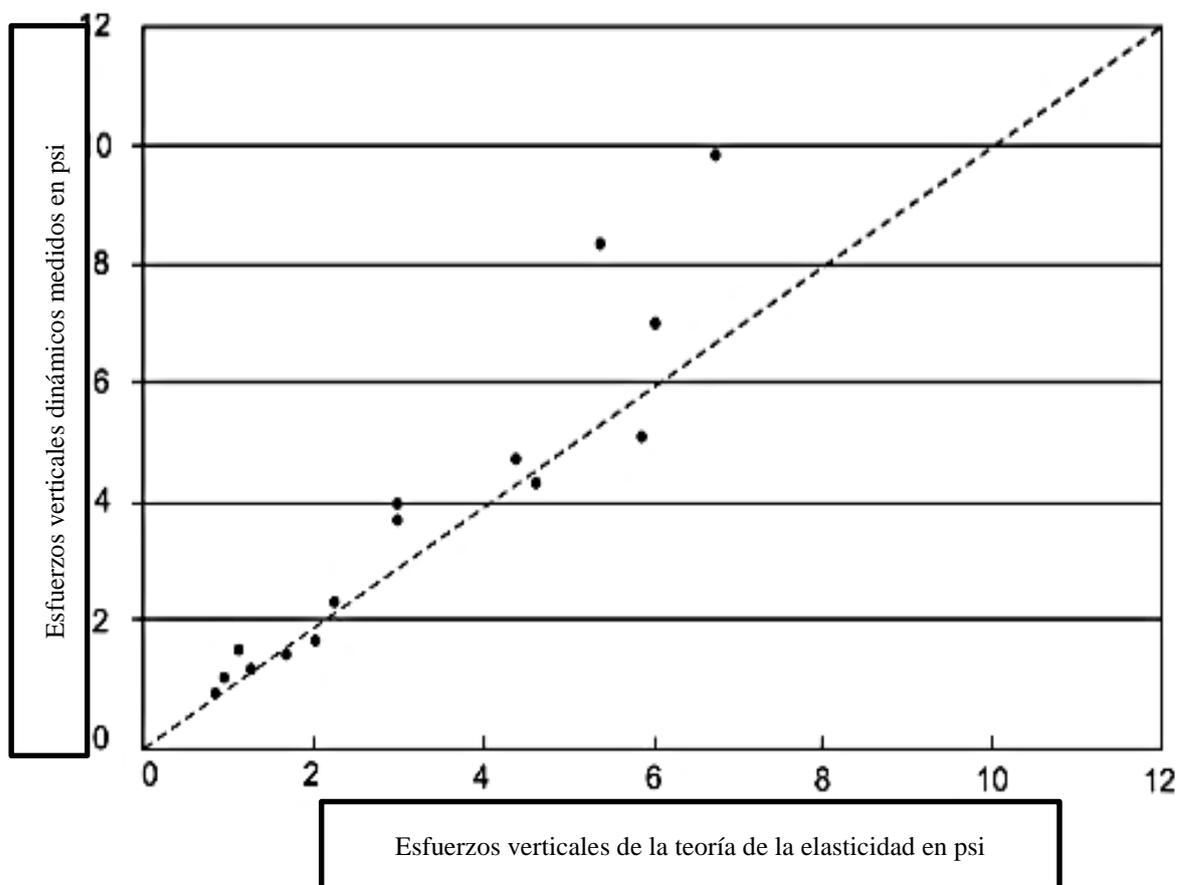


Ilustración 32

Información extraída de: Whiffin y lister, 192 citado por Selvaraj que a su vez es citado por (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

Se recomienda que se lleve a cabo investigaciones pertinentes en nuestro medio.

Para finalizar, se presenta la ecuación 23, Ullidtz (1987) (Vásquez Varela, 2014):

Ecuación 23

$$a3 = 0.23 * (\log_{10} (E_{SB} / 23Ksi)) + 0.15$$

En la cual el dominio está para valores de (Pulgadas):

$$0.06 \leq a_3 \leq 0.20$$

Considerando los valores comunes establecidos en 2.3.1 Se procede a presentar gráficas

Mr. Vs a₃, mediante la utilización de la Ecuación 22 y 23:

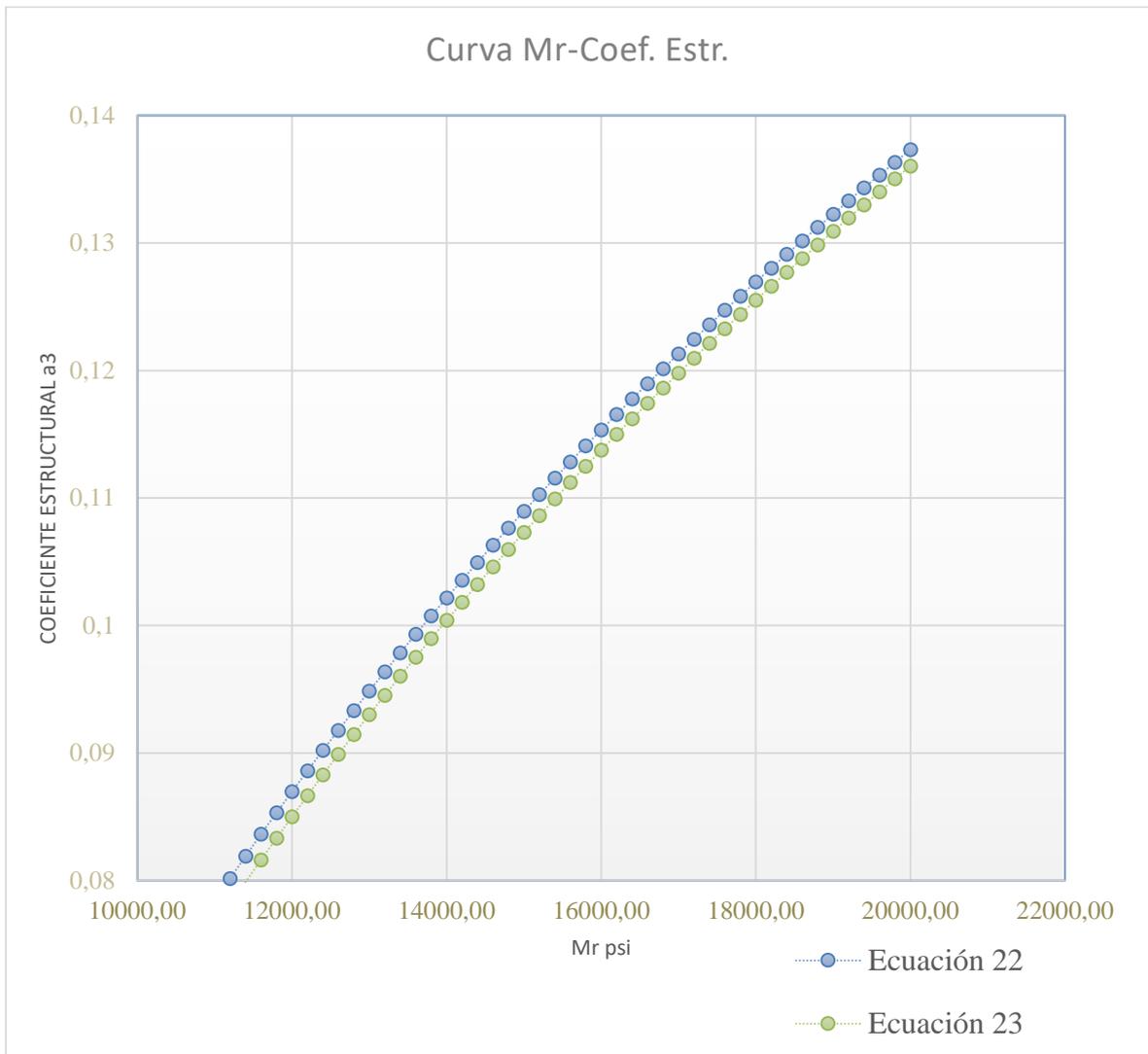


Ilustración 33
Gráfica de la ecuación 22 y 23.

Puede notarse la similitud entre las correlaciones realizados por AASHTO y Ullidtz (1987) (Vásquez Varela, 2014). A continuación, se presentan ecuaciones utilizadas para la determinación de coeficientes estructurales para base granular, la discusión expuesta en esta sección puede extenderse, también para el material base debido a que ambos son granulares.

2.3.3 Correlación entre Módulo Resiliente y coeficiente estructural para bases granulares no ligadas.

La ecuación 24 fue desarrollado por (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) y relaciona al valor de M_r con el valor de a_2 (coeficiente estructural) para capa de base de la siguiente manera:

Ecuación 24

$$a_2 = 0.249 (\log_{10} E_{SB}) - 0.977$$

Donde:

a_2 Coeficiente estructural para base Granular

E_{SB} es el módulo de resiliencia del material.

La ecuación 24, según los nomogramas de AASHTO (ilustración 28) oscilan entre los límites de 0.06 a 0.18. /pulgada

A continuación se presenta la ecuación para el cálculo de a_2 presentada por Ullidtz (1987) (Vásquez Varela, 2014):

Ecuación 25

$$a_2 = 0.25 * (\log_{10} (E_{SB} / 23Ksi)) + 0.11$$

Donde:

a_2 Coeficiente estructural para Sub-base Granular

E_{SB} es el módulo de resiliencia del material.

23Ksi Coeficiente, que es igual a 23 Ksi (Kilo-libra por pulgada cuadrada)

Los límites de valores para la ecuación 24 y 26, están comprendidas entre [0.06,0.18]/pulgada y [0.06,0.20]/pulgada; respectivamente. Para el caso de los materiales Base los módulos elásticos comunes, según (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) están en el orden de 10000 a 40000 Psi. (69 a 276 Mpa). Existe información en la literatura de valores de materiales

granulares que fluctúan entre 143-298 (Gudishala, 2004), aunque estos son para un determinado lugar (Específicos).

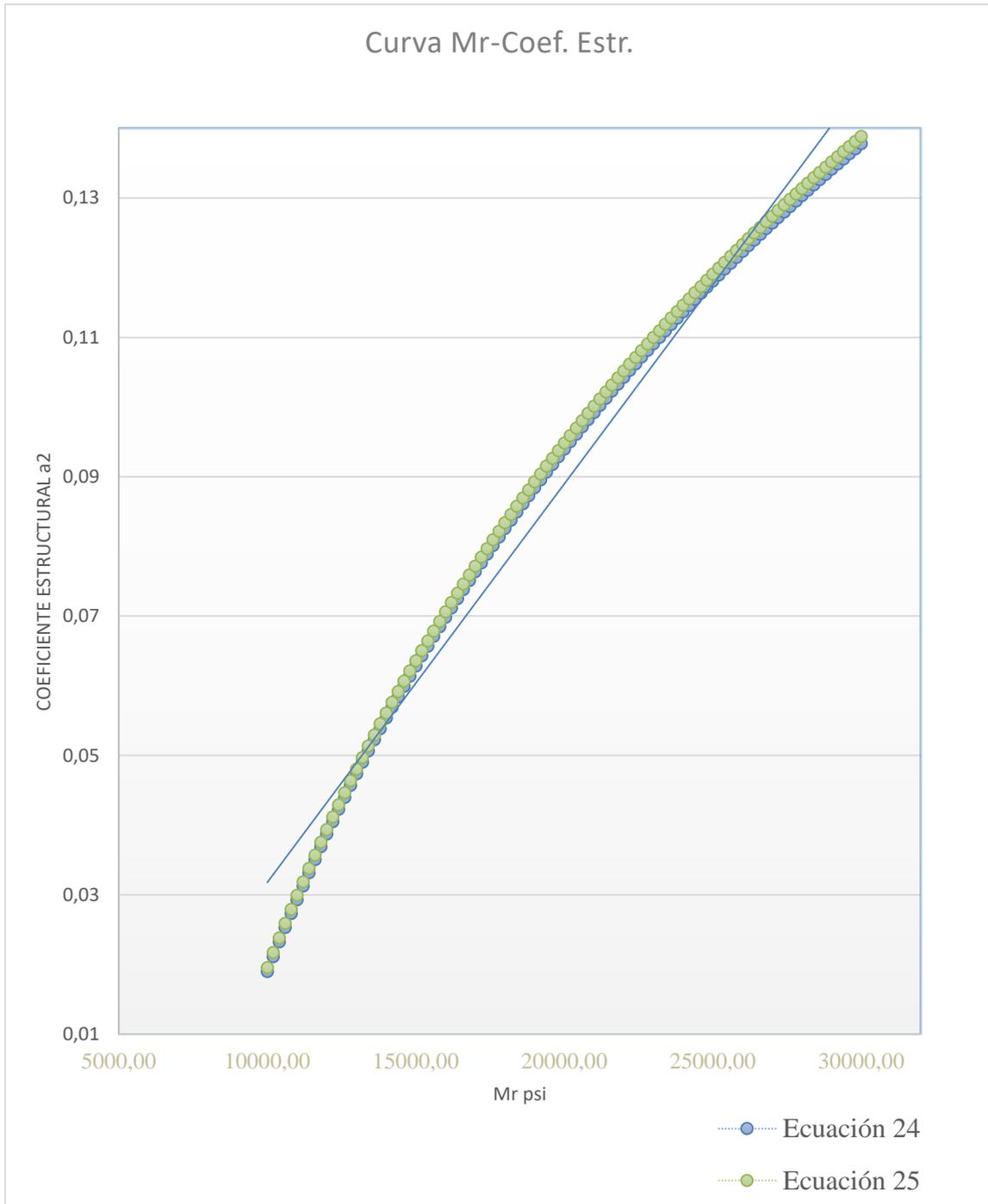


Ilustración 34
Gráficas ecuaciones 24 y 25.

2.4 Relación entre módulo resiliente y C.B.R

Como se ha hecho mención en párrafos anteriores, el M_r es un valor que ha reemplazado al del CBR en los últimos años⁴¹; a pesar de que este ensayo otorga resultados en función de comportamientos más realistas que el CBR; (como se dijo por la naturaleza de las cargas dinámicas), su realización requiere de equipos de alto costo, un ejemplo de esto es el denominado equipo de ensayo triaxial cíclico/dinámico, y claro; sin tomar en cuenta los costos de personal capacitado (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016). Por ello a lo largo de los años se han ido desarrollando útiles correlaciones entre C.B.R y módulo resiliente, el objetivo de esta sección es presentar algunas de las ecuaciones utilizadas. (Vásquez Varela, 2014), (Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016) han recopilado diversas correlaciones entre CBR y M_r :

Ecuación 26.
Shell (Heukelomm y Foster, 1960)

$$M_r(\text{psi}) = 1500\text{CBR}$$

$$M_r(\text{Mpa}) = 10.3\text{CBR}$$

Ecuación 27
Usace (Green y Hall. 1975)

$$M_r(\text{psi}) = 5409\text{CBR}^{0.711}$$

$$M_r(\text{Mpa}) = 38\text{CBR}^{0.711}$$

Ecuación 28
CSIR: Consejo de Investigaciones Científicas e Industriales de Suráfrica (Ayes,1997)

$$M_r(\text{psi}) = 3000\text{CBR}^{0.65}$$

$$M_r(\text{Mpa}) = 21\text{CBR}^{0.65}$$

⁴¹ De hecho, como se dijo; el procedimiento de ensayo oficial se promulgo en el año de 1992 por AASHTO.

Ecuación 29

Laboratorio de Investigación en Transporte y Carreteras (TRRL) (Lister & Powell, 1987)

$$M_r(\text{psi}) = 2555CBR^{0.64}$$

$$M_r(\text{Mpa}) = 17.62CBR^{0.64}$$

Ecuación 30

Departamento de Transporte (DOT) del Estado de Georgia (EE.UU.)

$$M_r(\text{PSI}) = 3116CBR^{0.478}$$

$$M_r(\text{Mpa}) = 21.5CBR^{0.478}$$

Ecuación 31

Ohio DOT (2008)

$$M_r(\text{psi}) = 1200CBR$$

Ecuación 32

Lotfi et al (1988), para $2\% < CBR < 21\%$

$$M_r(\text{ksi}) = k_1 * \sigma_d^{k_2}$$

Siendo:

$$k_1 = 10^{1.0016 + 0.043 * CBR}$$

$$k_2 = -\left(\frac{1.9557}{CBR} + 0.1705\right)$$

Ecuación 33

Manual de diseño de pavimentos para Bogotá. (IDU & Universidad de los Andes, 2000)

$$M_r(\text{Mpa}) = 5 CBR$$

$$M_r(\text{psi}) = 860 + 307 * q_u$$

$$q_u = 4.5CBR$$

Ecuación 34

Ecuación propuesta por AASHTO para suelos granulares⁴² (Torres Espinoza, 2010)

$$M_r(\text{psi}) = 4326 \ln(CBR) + 241$$

⁴² Se recomienda tener precaución al momento de establecer la ecuación a utilizar (Especialmente por temas de dominio). Esta sección es solamente para *presentar* algunas ecuaciones que relacionan el módulo resiliente con el CBR. Si el objetivo es para cálculos, verificar que algunas son para materiales finos, otras para gruesos; y no serán aplicables para todos los suelos, especialmente cuando El soporte californio de un suelo y otro son bastante lejanos. (Ejemplo: El suelo de sub-rasante contra el suelo de base).

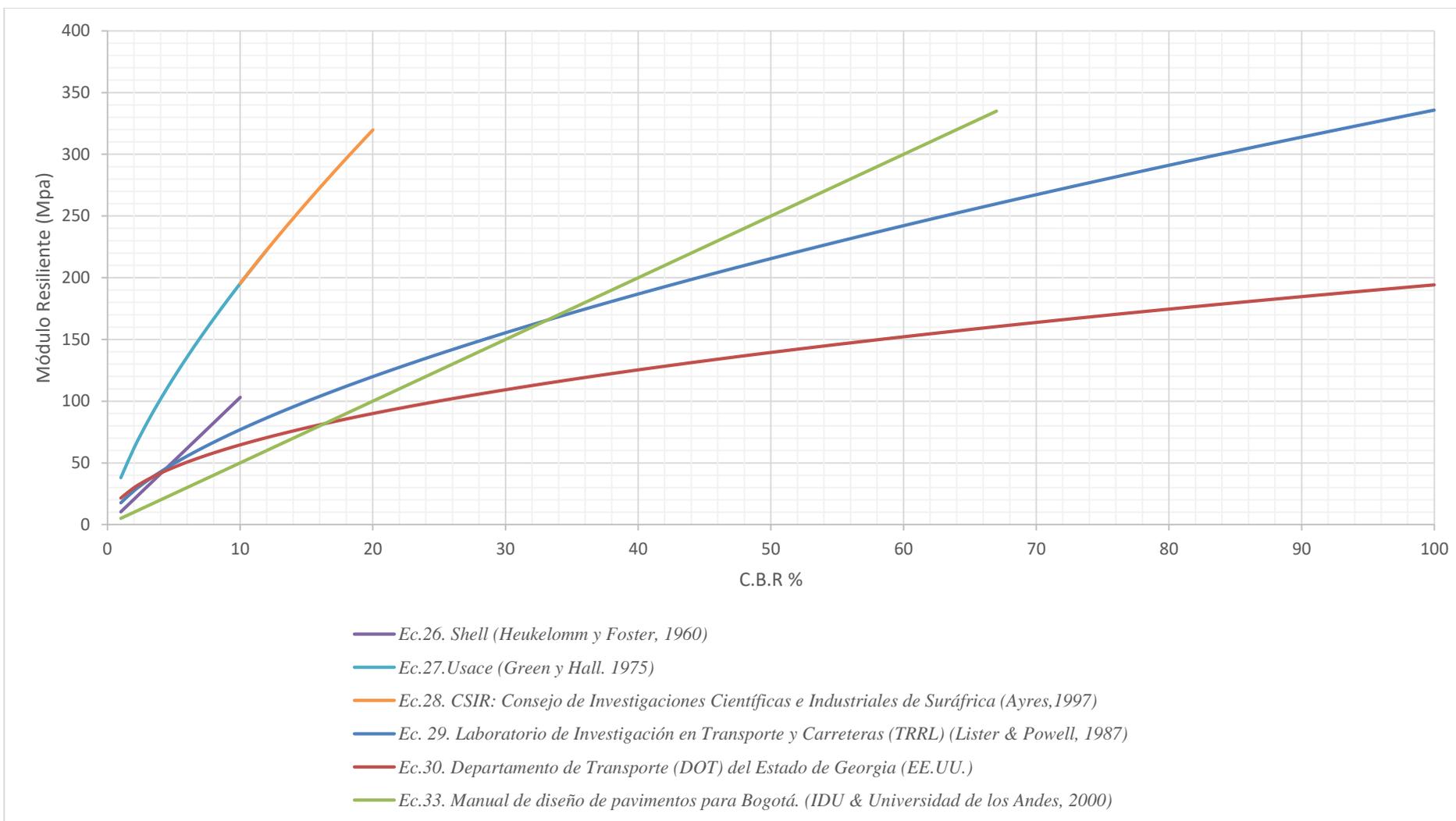


Ilustración 35
 Gráfica de ecuaciones que relacionan el módulo resiliente (Mpa) con el valor de C.B.R. Nótese la variación de dominios.

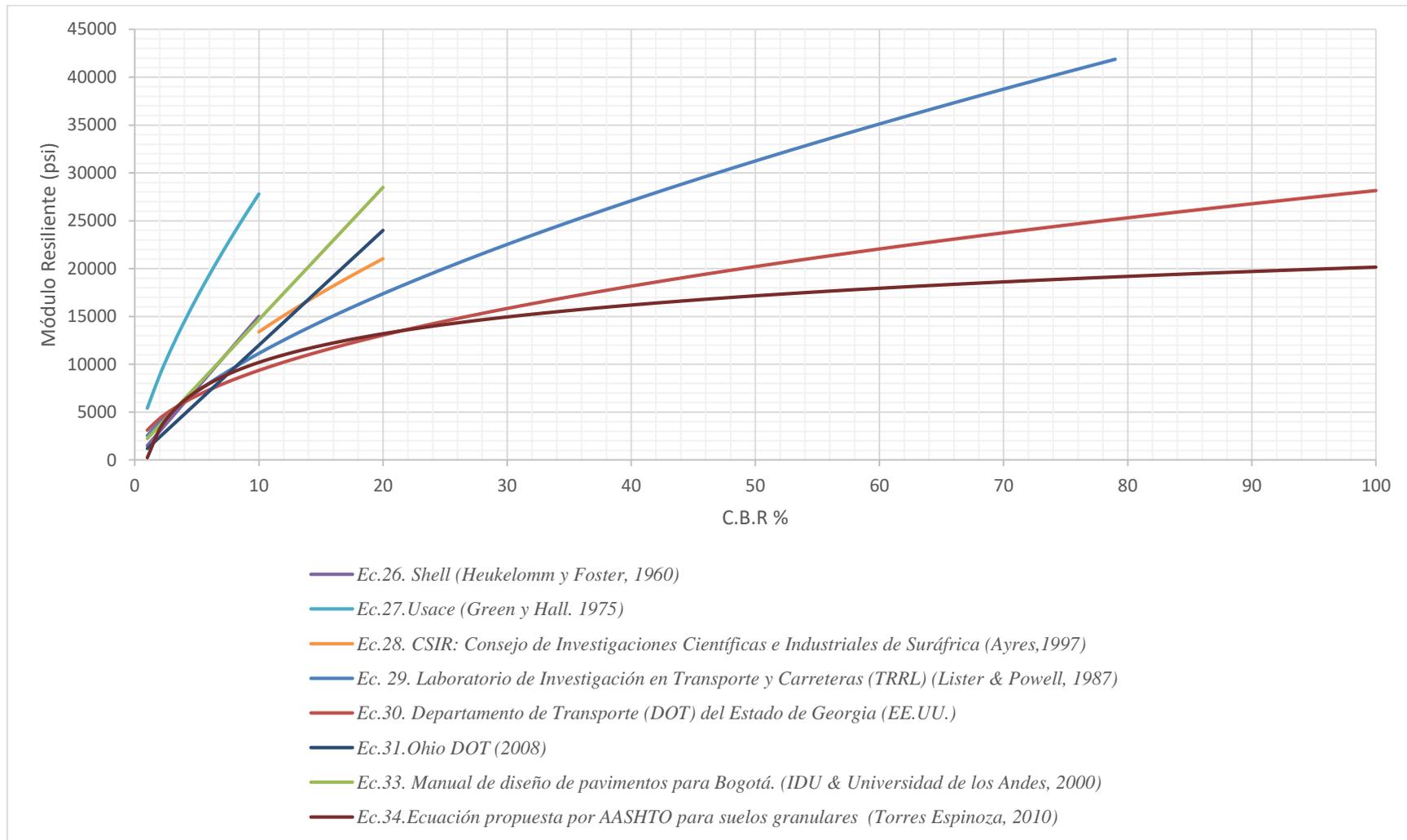


Ilustración 36

Gráfica de ecuaciones que relacionan el módulo resiliente (psi) con el valor de C.B.R. Nótese la variación de dominios

A continuación se presenta un cuadro de correlaciones que involucran CBR Gopalakrishnan y Thompson, 2007 (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016),

Tabla 15

Diversas correlaciones que involucran el valor de CBR. Información extraída de: CBR Gopalakrishnan y Thompson, 2007 (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

Relación	Referencia
$Mr(Ksi) = 1.42 CBR (Suelos CBR < 10\%)$	Heukelon y Klomp (1962)
$Mr(psi) = 5409CBR^{0.71}$	Cuerpo de Ingenieros E.E.U.U (Green y Hall, 1975)
$Mr(psi) = 3000CBR^{0.65}$	South African Council on Scientifica an Industrial Research
$CBR = 0.62 Su (psi)$	Black (1961) y Duncan y Buchignani (1976)
$Mr = 100 - 500Su;$ $Mr = 500 - 1500Su;$ Donde su: Resistencia al corte no drenado	
$Mr(psi) = 3116CBR^{0.67797}$	Webb y Campbell (1986) Departamento de transporte de Georgia
$Mr(psi) = 10^{(0.85log(CBR) + 2971)}$	Newcomb y Birgisson (1999) Departamento de transporte de Alabama
$Log Mr(ksi) = 1.0016 + 0.043(CBR) - 1.9557(log\sigma_d / CBR) - 0.1705log\sigma_d$	Lofti (1984) y Lofti etal (1988)

Como se puede ver, son diversas las correlaciones que existen entre CBR y el valor del módulo resiliente. (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016) mencionan que “Una de las desventajas de los modelos que han sido desarrollados para ciertos tipos de suelos, es que; cuando se han tratado de aplicar a otros se han obtenido desviaciones importantes” p.28



**CAPÍTULO TERCERO:
ESTUDIO DE MATERIALES GRANULARES USADOS EN
LA CIUDAD DE CUENCA**

3.1 Ensayos de materiales granulares.

Este capítulo resulta ser el más importante de la investigación; básicamente, el capítulo tres; tiene por objeto, presentar de manera detallada la obtención; así como la tabulación de valores de los insumos necesarios para la determinación de CE. La determinación de estos insumos es a través de procedimientos de laboratorio y de la utilización de un importante modelo matemático⁴³. Para la realización de estos ensayos se han tomado muestras representativas de los principales proveedores de materiales granulares de la ciudad⁴⁴. Como se mencionó en párrafos anteriores, el universo y el conjunto de muestreo será el mismo⁴⁵

3.1.1 Descripción del conjunto de muestreo.

Se ha procedido a tomar un determinado número de muestras de las minas/plantas procesadoras objetivo de estudio. Los valores se muestran en la tabla 16:

Tabla 16
Número de muestras tomadas de las diferentes minas.

	Mina "Roka Azul"	Mina "Vipesa"	Mina "Hormicroto"	Mina "Trelles"
Base	1	1	1	1
Sub-base	1	1	1	-

Las muestras presentadas en la tabla 16, han sido analizados en el laboratorio de suelos y materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca. Dicho sea de paso, dos laboratorios de la Ciudad han compartido⁴⁶ para los fines de este estudio, ensayos similares a los realizados⁴⁷. El número total de datos se presenta en la tabla 17.

⁴³ Ver: 3.1.5

⁴⁴ Y en cualquier otro lugar que se utilice material de los mismos proveedores.

⁴⁵ Ver: 1.5

⁴⁶ Se agradece la contribución de los ingenieros: Luis Mario Almache y Cristina Vintimilla.

⁴⁷ Algunos análisis compartidos son parciales, es decir no llegan a la determinación de CBR

Tabla 17

Información propia y recopilada de parámetros físicos de materiales granulares tipo Base y Sub-base

	Mina "Roka Azul"	Mina "Vipesa"	Planta procesadora "C"	Planta procesadora "D"
Ensayos de: Granulometría y límites de Atterberg	9	4	4	6
Proctor y C.B.R.	4	3	1	1

3.1.2 Clasificación y verificación de cumplimiento de materiales según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)

Diversos factores contribuyen a la variación de resultados de muestras de materiales sometidos a ensayos de laboratorio; la realización de análisis por jornadas de trabajo de acuerdo a lo especificado por (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013) es un aspecto que el técnico encargado no debe dejar pasar por alto. En esta sección se presenta los análisis de los ensayos realizados y compartidos, así como la clasificación de éstos según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013). Se considera la posibilidad de que las muestras obtenidas, *catalogadas/encasilladas* por los proveedores no encajen con la clasificación establecida por la normativa vigente, por incumplimiento de requisitos en cuanto a parámetros físicos y mecánicos. A continuación, se presentan análisis granulométricos y de consistencia de las muestras analizadas en laboratorio.

3.1.2.1 Con respecto a Sub-base

Planta procesadora "Roka Azul". Muestra #1.

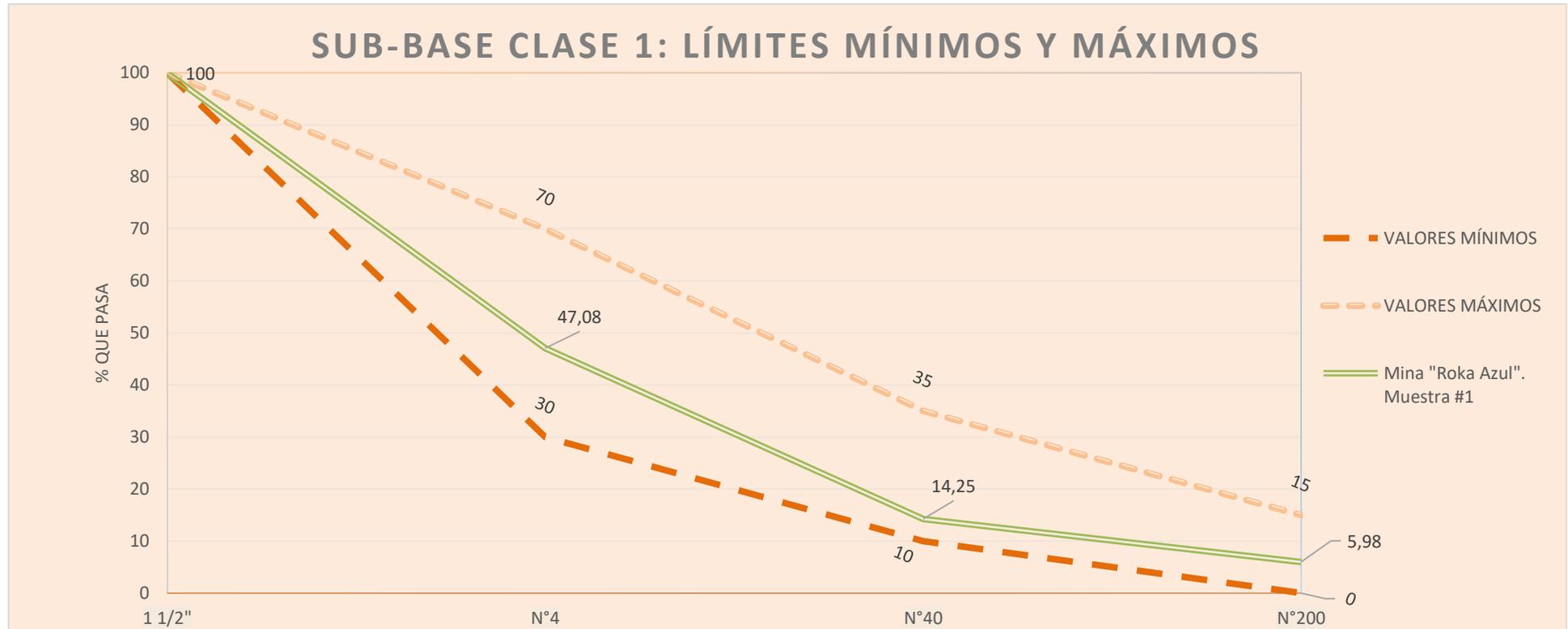


Ilustración 37
Análisis granulométrico de muestra 1 obtenida en Mina "Roka Azul"

Tabla 18. Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como sub-base granular.

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS			
ABRASIÓN	CBR>30%	Cumple: LL <= 25%	Cumple: IP<6%
	Sí	Sí, 25%.	Sí, 2.28.

Planta procesadora "Roka Azul". Muestra #2.



Ilustración 38
Análisis granulométrico de muestra 2 obtenida en mina "Roca Azul"

Tabla 19.
Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como sub-base granular.

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS			
ABRASIÓN	CBR>30%	Cumple: LL <= 25%	Cumple: IP<6%
	Sí	No, 30.58%.	No, 7.41

Planta procesadora "Roka Azul". Muestra #3.



Ilustración 39
Análisis granulométrico muestra 3 obtenida en mina "Roca Azul"

Tabla 20

Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como sub-base granular.

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS			
ABRASIÓN	CBR>30%	Cumple: LL <= 25%	Cumple: IP<6%
	No hay datos	No, 28.91%.	No, 7.06

Planta procesadora "VIPESA". Muestra #1.

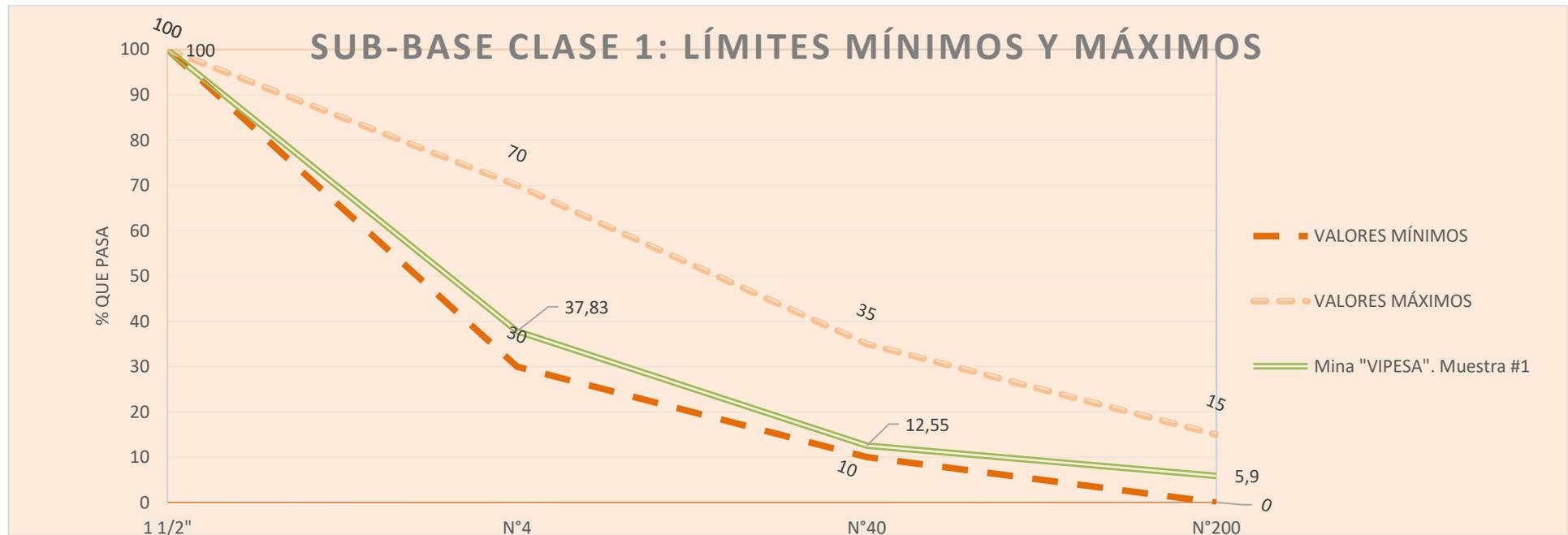


Ilustración 40
Análisis granulométrico de muestra 3 obtenida en planta procesadora "B"

Tabla 21
Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como sub-base granular

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS			
ABRASIÓN	CBR>30%	Cumple: LL <= 25%	Cumple: IP<6%
	Sí	Sí, 23%.	Sí, 5.76.

Planta procesadora "VIPESA". Muestra #2.

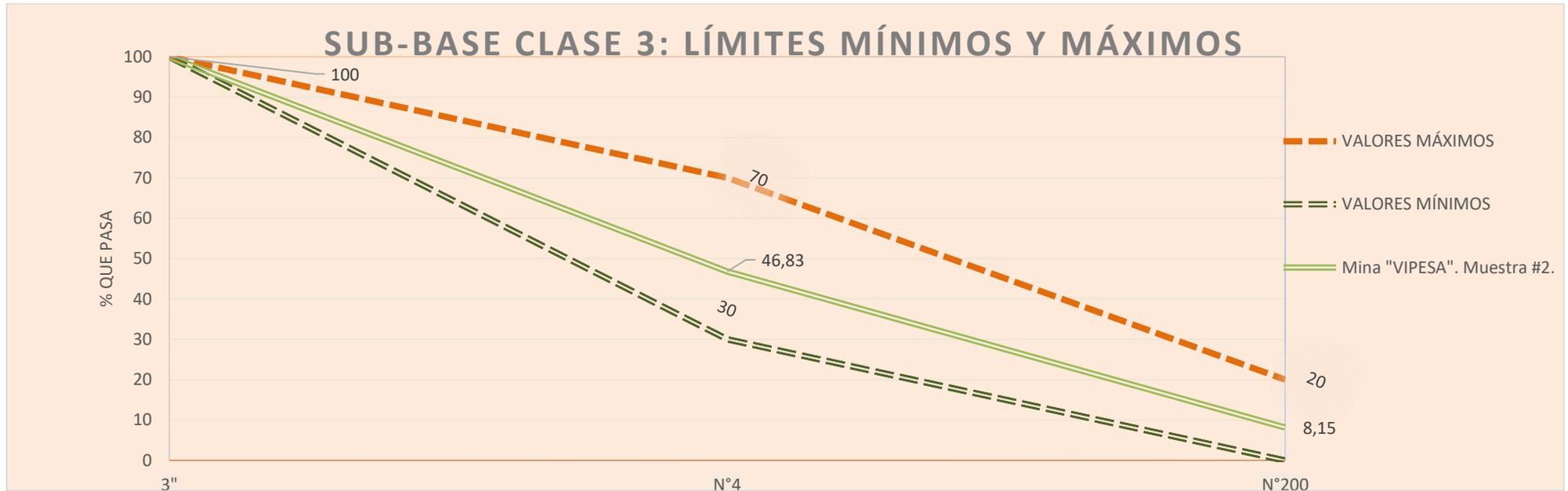


Ilustración 41
Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular

Tabla 22
Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como sub-base granular

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS			
ABRASIÓN	CBR>30%	Cumple: LL <= 25%	Cumple: IP<6%
	Sí	No, 26.17%.	5.54. Sí

Planta procesadora "Hormicroto". Muestra #1.

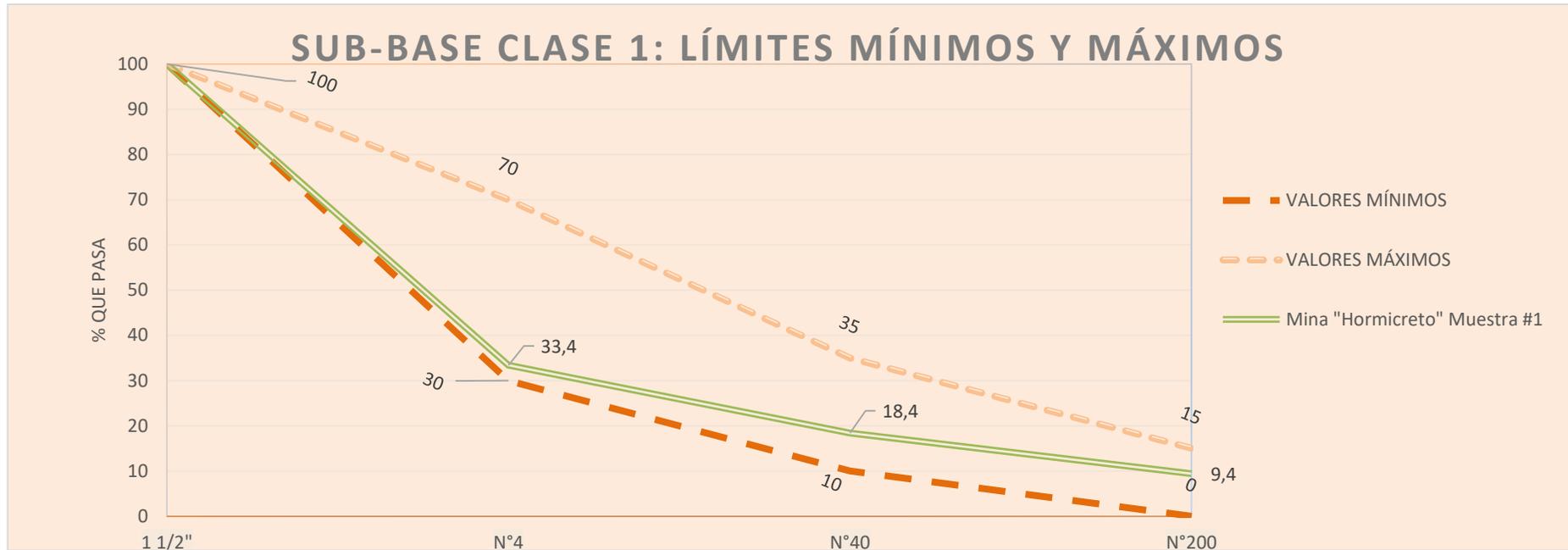


Ilustración 42

Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como sub-base granular

Tabla 23

Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como sub-base granular

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS			
ABRASIÓN	CBR>30%	Cumple: LL <= 25%	Cumple: IP<6%
	Sí	Sí 25.1%.	4.13. Sí



3.1.2.2 Con respecto Base:

Un análisis similar a lo expuesto en 3.1.2.1 se presenta a continuación. Existe ciertos aspectos a considerar en los materiales granulares que son *encasillados* como base, para ser *clasificados* como tal.

Planta procesadora "Roka Azul". Muestra #1.

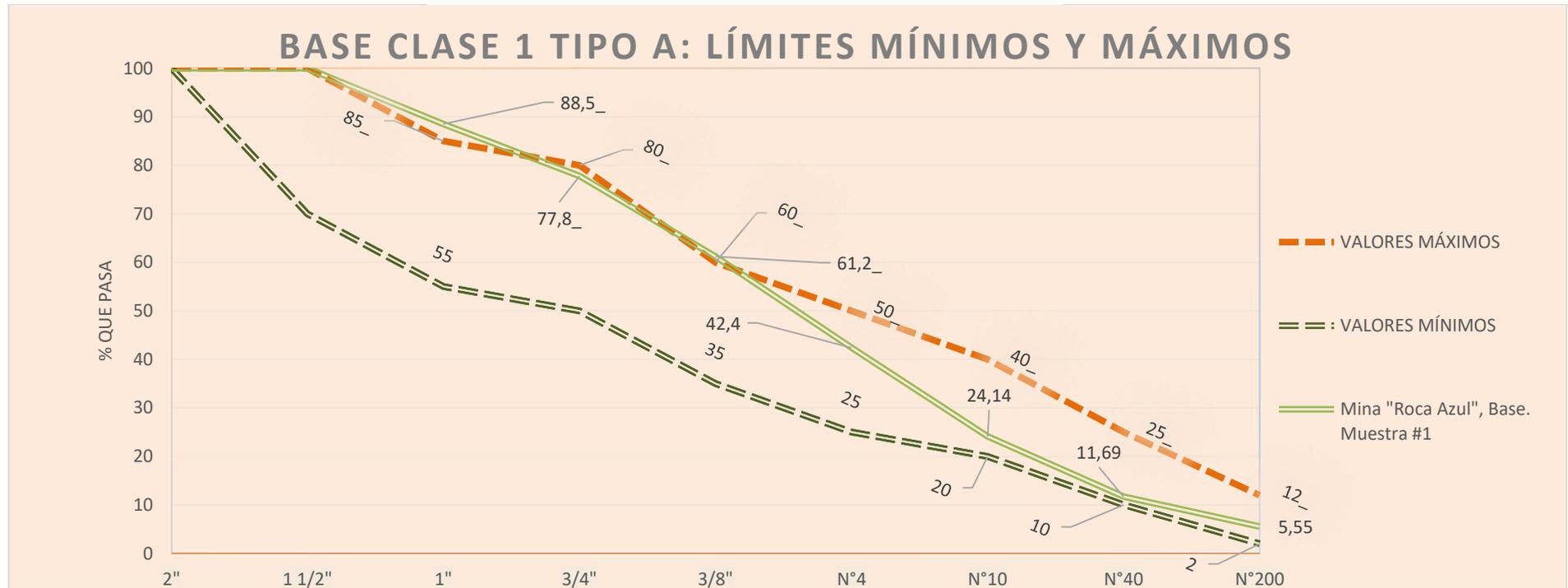


Ilustración 43
Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular

Tabla 24
Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como sub-base granular

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS				
ABRASIÓN	CBR>80%	EXCENTO DE ARCILLA	Cumple: LL <= 25%	Cumple: IP<6%
	No	Sí	Sí, NP	Sí, NP

Planta procesadora "Roka Azul". Muestra #2.



Ilustración 44
Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular

Tabla 25
Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como base granular

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS				
ABRASIÓN	CBR>80%	EXCENTO DE ARCILLA	Cumple: LL <= 25%	Cumple: IP<6%
	No	Sí	No, 25.35	Sí, 3.53

Planta procesadora "Roka Azul". Muestra #3.

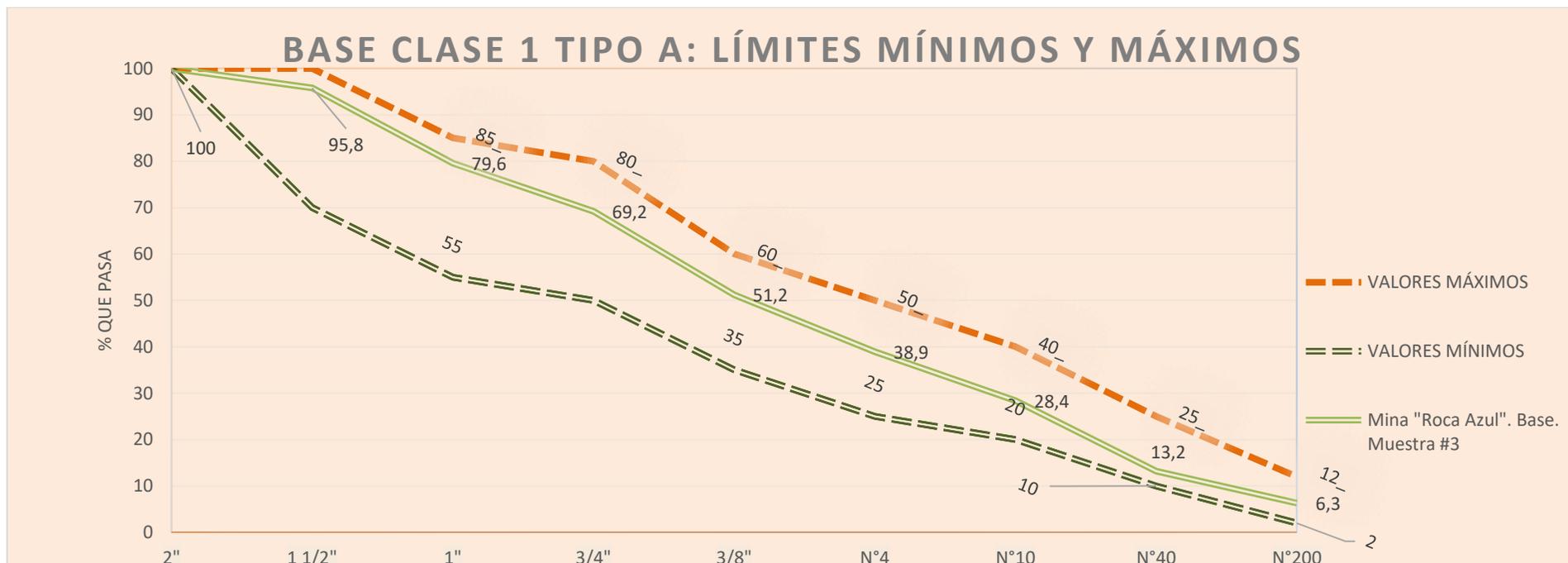


Ilustración 45
Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular

Tabla 26
Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como base granular

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS				
ABRASIÓN	CBR>80%	EXCENTO DE ARCILLA	Cumple: LL <= 25%	Cumple: IP<6%
	No hay datos.	Sí	No, 30,88	No, 8,73

Planta procesadora "Vipesa". Muestra #1.

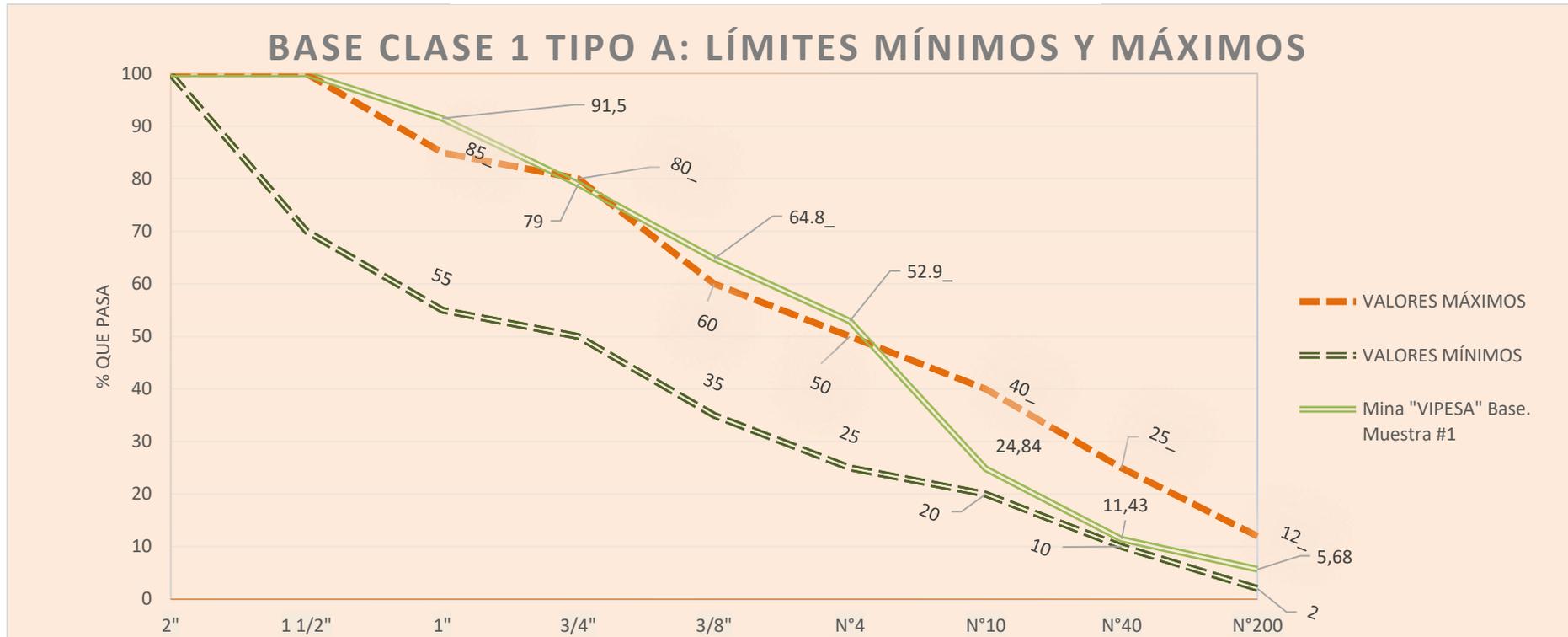


Ilustración 46

Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular

Tabla 27

Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como base granular

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS				
ABRASIÓN	CBR>80%	Exento de arcilla	Cumple: LL ≤ 25%	Cumple: IP<6%
	No	Sí	Sí, NP	Sí, NP

Planta procesadora "Hormicreto". Muestra #1.

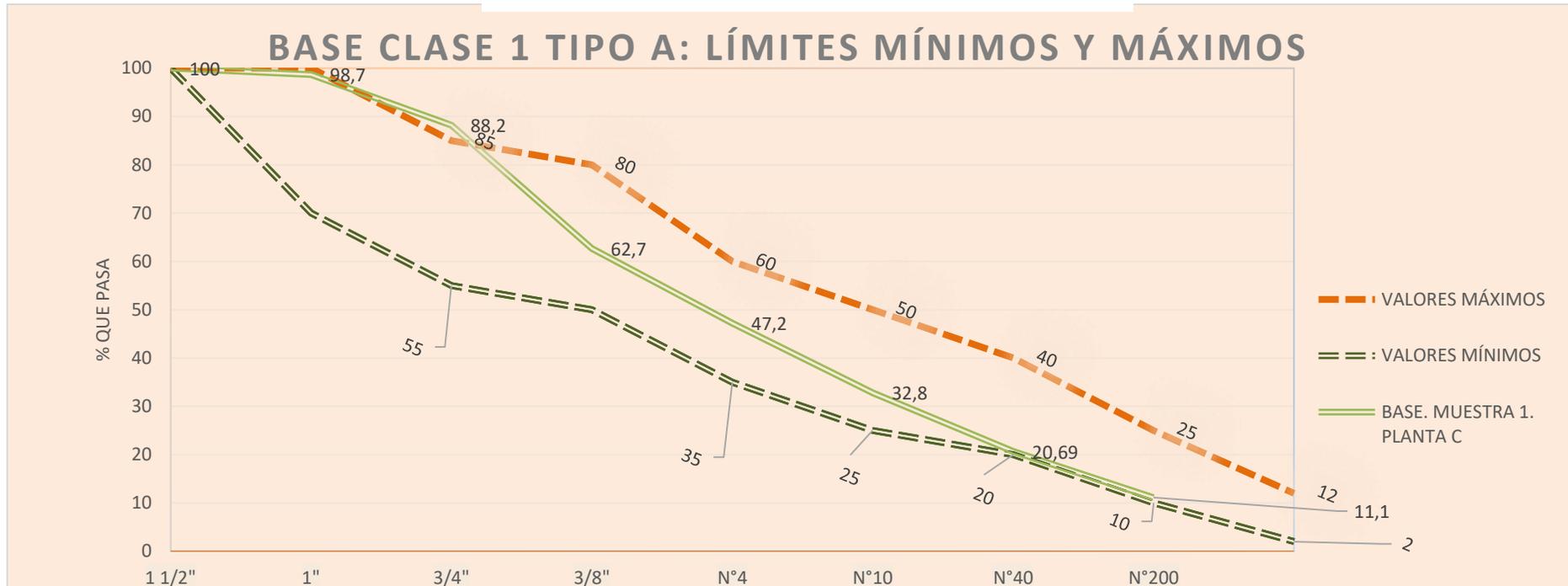


Ilustración 47
Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular

Tabla 28
Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como base granular

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS				
ABRASIÓN	CBR > 80%	Exento de arcilla	Cumple: LL ≤ 25%	IP < 6%
	No	Sí	SI. 24.5	SI. 4.40

Planta procesadora "Trelles". Muestra #1.

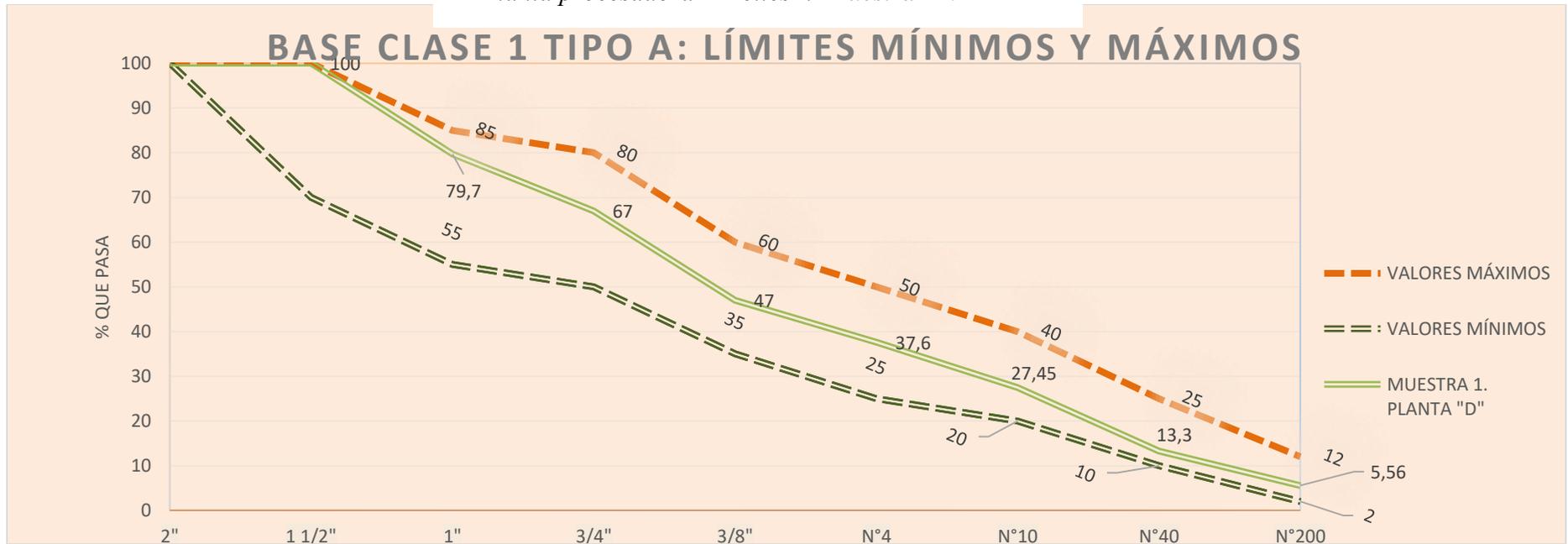


Ilustración 48
Requisitos granulométricos para que un suelo sea catalogado como base granular

Tabla 29
Requisitos comunes para que un suelo sea catalogado como base granular

VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO TRAS DIVERSOS ANÁLISIS				
ABRASIÓN	CBR > 80%	Exento de arcilla	Cumple: LL ≤ 25%	IP < 6%
	No	Sí	No. 27.5	Sí. 4.78

Del análisis anterior podemos observar que el 50% de los materiales granulares, tanto base como sub-base; **no cumplen** con los respectivos criterios de consistencia. En cuanto a los aspectos granulométricos; algunos materiales no están en su totalidad dentro de las fajas establecidas. No obstante, estos desfases se pueden considerar despreciables, con esto; la descripción de las clases tanto de bases como de sub-bases se establece en las tablas 30 y 31 respectivamente.

*Tabla 30
Análisis granulométrico de material Base: Clases según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)*

Clase	1a	1b	2	3	4
# Muestras	6	0	0	0	0

*Tabla 31
Análisis granulométrico de material Sub-base: Clases según (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)*

Clase	1	2	4
# Muestras	3	2	1

3.1.3 Determinación de valores aproximados de Mr a través de clasificación de materiales granulares SUCS y AASHTO según (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

Una de las maneras de establecer valores aproximados de módulos resilientes es a través de la clasificación AASHTO, y SUCS; consultando las ilustraciones 29 y 30 respectivamente, dicho esto, se procede a presentar la siguiente tabla, en el cual se establecen valores aproximados de módulos resilientes de los materiales granulares analizados en nuestra zona. Se cataloga esta información como suficientemente exacta para el cálculo de C.E.

3.1.3.1 En cuanto a materiales granulares base:

Tabla 32

Valores aproximados de módulos resilientes para materiales tipo Base en función de clasificación AASHTO.

Mat. Base	# Muestras	Clasificación AASHTO	Módulo resiliente (psi) [Mpa]
Mina "Roka Azul"	5	A3	(25000 - 35200), [172,4 – 242.7]
		A-1a(0)	(38500 - 42000), [265.5 – 289.58]
		A-2-4(0)	(28000 - 38000), [193 - 262]
		A-2-4(0)	(28000 - 38000), [193 - 262]
		A-1a.	(38500-42000) [265.5 – 289.58]
Planta "B"	2	A3	(25000 - 35200), [172.4 – 242.7]
		A-1-a	(38500 -42000), [265.5 – 289.58].
Planta "C"	1	A3	(25000 - 35200), [172.4 – 242.7].
Planta "D"	4	A-1(0)	(35000 - 42000), [242.7 – 289.58].
		A-1(0)	(35000 -42000), [242.7 – 289.58]
		A-1(0)	(35000 -42000), [242.7 – 289.58]
		A1 (0)	(35000 - 42000), [242.7 – 289.58]

Y También:

Tabla 33

Valores aproximados de módulos resilientes para materiales tipo Base según clasificación SUCS

Mat. Base	# Muestras	Clasificación SUCS	Mr rango aproximado (psi) [Mpa]
Planta "A"	6	GW	(40000 - 43000), [275.8 – 296.5]
		SW-SM	(28000 - 38000), [193 - 262]
		GW	(40000 - 43000) [275.8 – 296.5]
		GC	(25000 - 38000) [172 - 262]
		GC	(25000 - 38000) [172.4 - 262]
		GP-GM	(36000 - 40000), [248.2 – 275.8].
Planta "B"	2	SP	(25000 - 38000), [172 - 262]
		GW	(40000 - 43000), [275.8 – 296.5].
Planta "C"	1	SW	(28000- 38000), [193 - 262].
Planta "D"	4	GW-ML,	(40000 - 43000), [275.8 – 296.5];
		GM	(33000 - 43000) , [227.5 – 296.5]
		GM	(33000 - 43000), [227.5 – 296.5]
		GM	(33000 - 43000) [227.5 – 296.5].

Según los valores de las tablas 32 y 33, los rangos aproximados de M_r para los materiales granulares están en el orden de (25000 a 43000) en psi y de [172.4 – 296.5] en Mpa.

Comentario: Se prevé la heterogeneidad de los materiales granulares analizados de las diferentes minas, ya que a pesar de entrar en la clasificación de base, existen diversos parámetros que los hacen diferentes entre sí, tales como: Procedencia, elementos constitutivos⁴⁸ y demás aspectos. La ilustración 49 tiene por objeto presentar el rango de variación de módulos resilientes; mas no una comparación de materiales granulares, ya que como se dijo, para llevar acabo esto, los parámetros a analizar son varios.

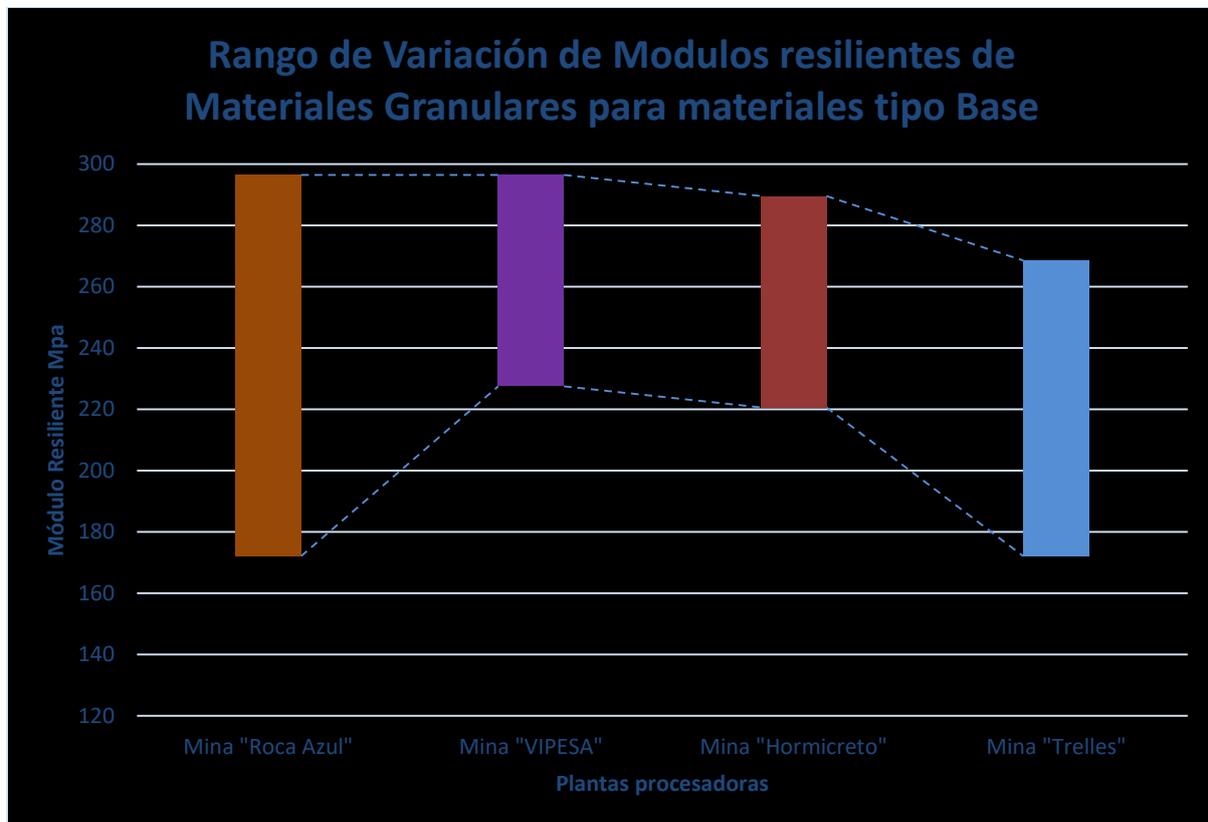


Ilustración 49

Rango de variación de M_r de materiales tipo base según información presentada por (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

⁴⁸ Por ejemplo, un pequeño porcentaje de limo de un material granular con respecto a otro, ya lo tornarían diferentes, sin perjuicio de que en el resto de parámetros existan igualdad, como se ve, la cantidad de variables a determinar para catalogar que un suelo sea igual que otro es bastante grande.

3.1.3.2 En cuanto a materiales granulares Sub-base:

Véase las tablas 34 y 35:

Tabla 34

Valores aproximados de módulos resilientes para materiales tipo Sub-base según clasificación AASHTO

Sub-base	# Muestras	Clasificación AASHTO	Mr rango aproximado (psi) [Mpa]
Planta "A"	4	A-2-4(0)	(28000 - 37000) [193 – 255.1]
		A-2-4(0)	(28000 - 37000) [193 – 255.1]
		A-2-4(0)	(28000 - 37000) [193 – 255.1]
		A-2-4(0)	(28000 - 37000) [193 – 255.1]
Planta "B"	2	A-1-B(0)	(35000- 40000) [241.3 – 275.8]
		A-2-4(0)	(28000- 37000) [193 – 255.1]
Planta "C"	2	A-1-B(0)	(35000 - 40000) [241.3 – 275.8]
		A-1-a	(38000 - 42000) [262 – 289.6]
Planta "D"	2	A-1	(35000-43000) [241.3 – 296.47]
		A-2-6(0)	(22000 -29000) [151.68 - 200]

Y, también:

Tabla 35

Valores aproximados de módulos resilientes para materiales tipo Sub-base según clasificación SUCS

Sub-base	# Muestras	Clasificación AASHTO	Mr rango aproximado (psi) [Mpa]
Planta "A"	4	GW-GM	(33000 - 43000), [227.5 – 296.5]
		GW-GC	(25000 - 43000), [172.4 – 296.5]
		GW-GM	(33000 - 43000), [227.5 – 296.5]
		GW-GM	(33000 - 43000), [227.5 – 296.5]
Planta "B"	2	GW-GM	(33000 - 43000), [227.5 – 296.5]
		GW-GM	(33000 - 43000), [227.5 – 296.5]
Planta "C"	2	GP-GM	(32000 - 43000), [220.6 – 296.5]
		GW	(33000 - 43000), [227.5 – 296.5]
Planta "D"	2	GC	(25000 - 38000), [172.4 – 262]
		GW-GC	(24000 - 38000), [165.5 - 262].

Según los valores de las tablas 34 y 35, los rangos aproximados de Mr. para los materiales granulares están en el orden de (25000 - 43000) en psi y de [172.4 – 296.5] en Mpa

Comentario: De la misma manera; (como en el comentario anterior), la ilustración 50 muestra el rango de variación de Mr. de materiales granulares de acuerdo a lo establecido por (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016) mediante la clasificación de Suelos SUCS o AASHTO. Se hace énfasis en que no es una comparación de materiales granulares como tal.

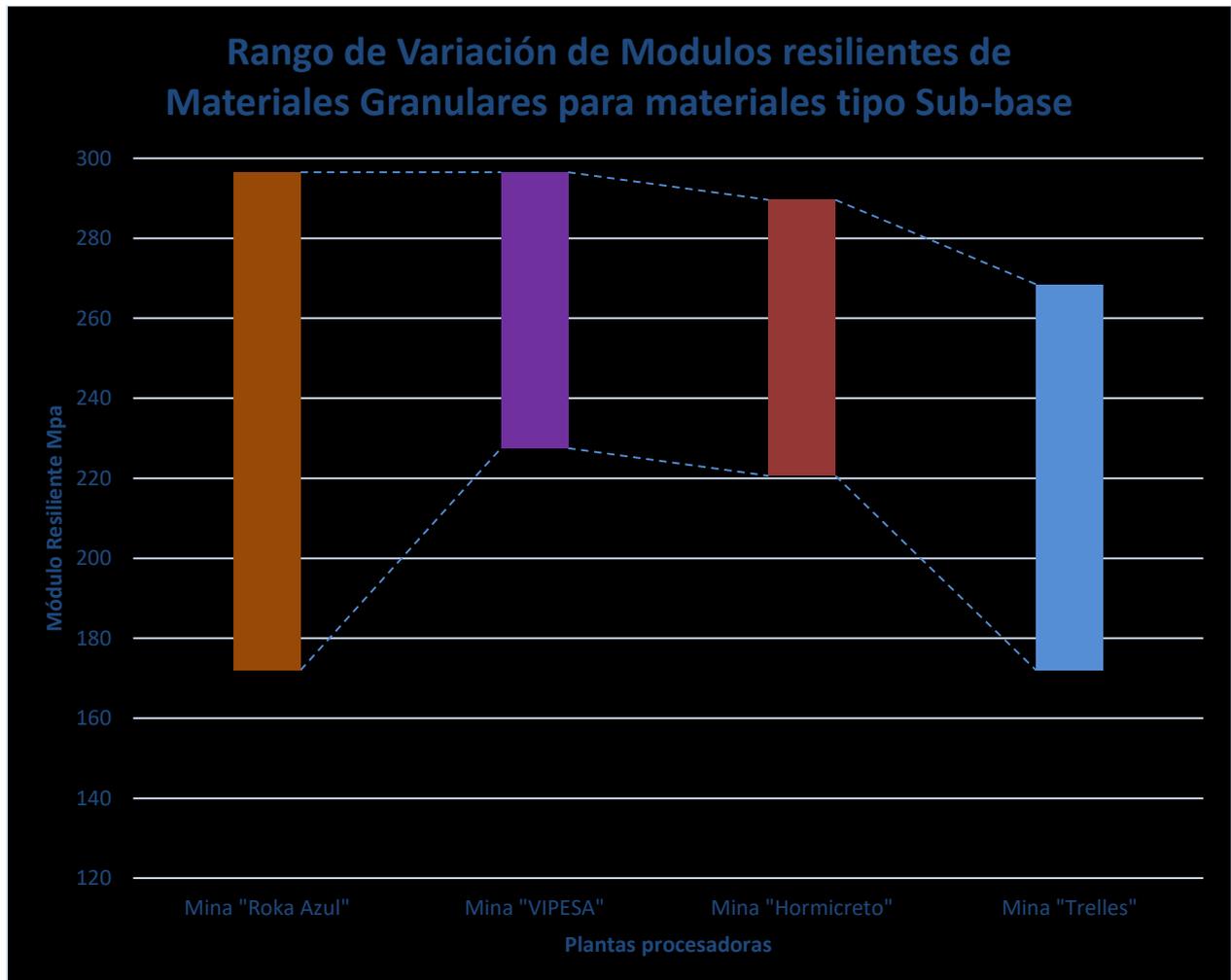


Ilustración 50
Rango de variación de Mr de materiales tipo base según información presentada por (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016)

3.1.4 Resultados: Valores de CBR de muestras.

Debido a que la metodología de obtención de C.B.R. es un tema bastante analizado en las asignaturas de Mecánica de Suelos y Pavimentos, se procederá directamente (Sin hacer una descripción detallada) a presentar los resultados obtenidos (Para mayor información acerca de

los ensayos remítase a anexos). Los resultados⁴⁹ de C.B.R de las muestras analizadas se presentan en las tablas 36 y 37.

3.1.4.1 Con respecto a los materiales base:

Véase tabla 34:

*Tabla 36
Valores de C.B.R para materiales granulares tipo Base.*

Base	C.B.R. %
Mina “Roka Azul” ⁵⁰	80
	60,70
Mina “Vipesa”	62
Mina “Hormicreteo”	72
Mina “Trelles”	49

Comentario: La variación de valores de C.B.R. de los materiales utilizados como base (Objeto de análisis de los 3 ensayos realizados y 3 recopilados) en la construcción de P.F. varían en el orden de 49 a 80 %, se recomienda realizar una investigación que confirme los resultados de C.B.R obtenidos en este estudio y que realice una recopilación de ensayos de esta naturaleza, con la finalidad de validar la información obtenida.

3.1.4.2 Con respecto a los materiales sub- base:

Véase la tabla 35:

⁴⁹ A más de los resultados obtenidos por el autor, se presentan otros; que han sido compartidos por algunos laboratorios de suelos y materiales de la Ciudad.

⁵⁰ El primer ensayo fue recopilado del trabajo realizado por estudiantes de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca, no confundir con la información presentada en las tablas 18 a 29.

Tabla 37
Valores de C.B.R para materiales granulares tipo Sub-base.

Sub-base	C.B.R %
Mina “Roka Azul”	80
	55
	37
Mina “Vipesa”	67.8
	72
Mina “Trelles”	62
Mina Trelles	-----

Comentario: La variación de valores de C.B.R. de los materiales utilizados como Sub-base (Objeto de análisis de los 3 ensayos realizados y 3 recopilados) en la construcción de pavimentos flexibles varían en el orden de 37 a 80 %, análogo al comentario anterior, se recomienda realizar una investigación que confirme los resultados de C.B.R obtenidos en este estudio y que realice una recopilación de ensayos de esta naturaleza, con la finalidad de validar la información obtenida.

3.1.5 Cálculo de Mr a través de parámetros físicos de los materiales granulares.

Utilizando las ecuaciones 14, 15 y 16 se ha procedido a obtener el valor del módulo resiliente para las muestras estudiadas⁵¹ (que son 7⁵² 3 de sub-base y 3 de base)

3.1.5.1 Con respecto al Material Sub-base

Los cálculos se resumen en la tabla 38:

Tabla 38
Cálculo de Mr. mediante las ecuaciones 14, 15 y 16 para materiales granulares tipo Sub-base

SUB-BASE	yd	% optima: w	Cu	% que pasa tamiz #200	k1	k2	Θ (Kg/cm ²)	q (Kg/cm ²)	Mr. (Kg/cm ²)	Mr. Mpa
Roca Azul	1995	0.115	55	0.0598	1596.60	0.42	1.12	0.91	2532.46	248.3
Vipesa	2150	0.094	100	0.059	1720.69	0.45	1.12	0.91	2533.51	248.4
Hormicreto	1970	0.145	200	0.09	1576.78	0.40	1.12	0.91	2818.6	276.4

⁵¹ Los parámetros de entrada se han obtenido mediante ensayos de laboratorio efectuado por el estudiante. Para más información acerca de estos ensayos remítase a anexos.

⁵² Se analizan solo las muestras estudiadas por el autor.

Recordando que los parámetros calculados corresponden a:

θ sumatoria de esfuerzos principales

q es el esfuerzo desviador

γ_d es la densidad seca

w es el contenido/cantidad de agua

ρ_a es la presión atmosférica

#200 es el porcentaje del material que pasa el tamiz No. 200 en un ensayo granulométrico.

C_u es el coeficiente de uniformidad.

Luego, como se aprecia, los valores obtenidos están dentro de los rangos establecidos mediante la clasificación AASHTO y SUCS; ilustraciones 29 y 30 extraídas de (Pérez Garcia, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016).

3.1.5.2 Con respecto al Material Base

Un razonamiento similar a lo expuesto en 3.1.5.1 se presente a continuación, la variante es que los parámetros de entrada corresponden a los materiales tipo Base de las minas/canteras analizadas. Los M_r se presentan en la tabla 39.

Tabla 39
Cálculo de M_r mediante las ecuaciones 14, 15 y 16 para materiales granulares tipo Base

BASE	γ_d	Humedad % optima: w	C_u	% que pasa tamiz #200	k_1	k_2	Θ (Kg/cm ²)	q (Kg/cm ²)	M_r (Kg/cm ²)	M_r Mpa
Roca Azul	2045	0.138	33	0.0555	1636.52	0.55	1.12	0.91	2984.2	292.65
Vipesa	2161	0.1009	110	0.0568	1729.51	0.38	1.12	0.91	2637.40	258.64
Hormicreteo	1992	0.137	120	0.111	1594.30	0.50	1.12	0.91	2916.8	286.04
Trelles	1965	0.138	212.5	0.0556	1572.78	0.49	1.12	0.91	2705.44	265.3

3.2 Correlación entre C.B.R. y Módulo resiliente de materiales granulares a través de regresión lineal.

Las ecuaciones 26 a 34, así como la tabla 15, presentan correlaciones entre módulos resilientes y valores de C.B.R. Como se ha mencionado, habrá que tener cuidado al utilizar estas ecuaciones, ya que han sido desarrolladas para diferentes tipos de suelos; y, de utilizarse con suelos diferentes a los estudiados, puede generarse *desviaciones importantes*. La correlación que aquí se presenta; sirve para establecer una comparación con las ecuaciones anteriormente mencionadas. El uso de esta ecuación en la práctica resulta aceptable, previa verificación de un técnico cualificado. Para efectos de precisión, se recomienda realizar un análisis que utilice más datos de entrada y procedimientos estadísticos detallados.

Tomando como eje horizontal los valores/magnitudes de CBR y eje vertical los valores/magnitudes de M_r , se procede a graficar los puntos y ajustarlos a una función, cuyo coeficiente de correlación sea superior a 0.6:

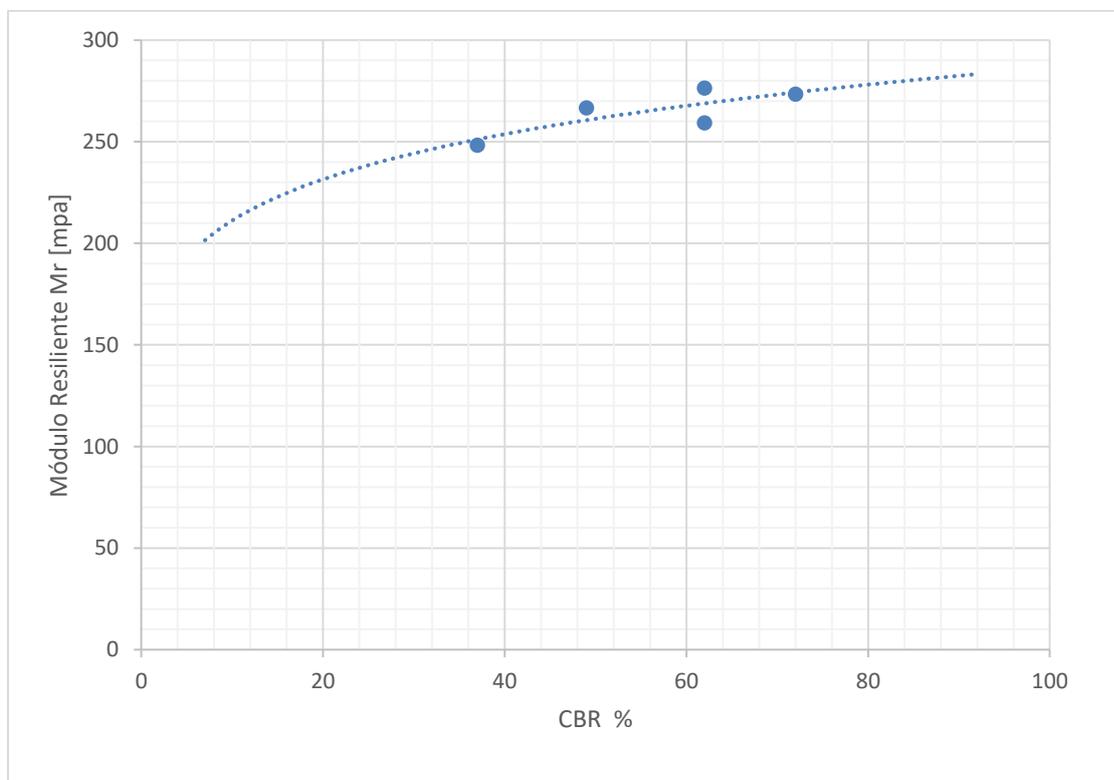


Ilustración 51
Gráfica M_r -CBR para materiales granulares estudiados.



De la ilustración 51⁵³ podemos obtener la siguiente ecuación⁵⁴:

Ecuación 35

$$Mr[Mpa] = 155.74 (CBR)^{0.1323}$$

La ecuación 35 se ajusta a los puntos graficados, de tal manera que su coeficiente de correlación corresponde a 0.64, para efectos de la presente investigación; este valor resulta aceptable.

⁵³ Algunos valores no se han tomado en cuenta, con el objeto de obtener un mayor coeficiente de co-relación.

⁵⁴ Nótese la similitud de la ecuación 35 con las ecuaciones 27, 28 y 30.



**CAPÍTULO CUARTO:
METODOLOGÍA Y RESULTADOS: OBTENCIÓN DE
COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE MATERIALES
GRANULARES**

4.1 Coeficientes estructurales del conjunto de muestras de Base Granular.

4.1.1 Aplicación de Fórmula AASHTO 93' que relaciona el valor de C.B.R. para la obtención de C.E.

Citando la ecuación 20 de este documento:

Ecuación 20

$$a_2 = 0.032 * CBR^{0.32}$$

Donde:

a_2 Coeficiente estructural para base granular

CBR es el valor de CBR en %. El cual ha sido tomado al 95% de la densidad máxima⁵⁵.

Podremos realizar un reemplazo de valores⁵⁶ y obtener el coeficiente estructural para la capa de base granular no ligada. Los resultados se a continuación:

Tabla 40
Rango de valores de coeficientes estructurales de base granular no ligada

Base	# Muestras	C.B.R%. (Valores de cada muestra)	C.E. (/cm)
Mina "Roka Azul"	2	60,70	0.0469
		80	0.0512
Mina "Vipesa"	1	62	0.0472
Mina "Hormicroto"	1	72	0.0495
Mina "Trelles"	1	49	0.0437

Luego, de la tabla 40; se establece que: Los valores de C.E. obtenidos a través de C.B.R., para bases no ligadas, utilizadas como insumo en la construcción de pavimentos flexibles; oscilan entre [0.0437-0.0512]

Ahora bien, se procederá a determinar los valores de C.E., esta vez; mediante la fórmula que relaciona C.E con módulo resiliente.

⁵⁵ Se ha tomado al 95%, ya que, tras consultar con expertos del área, se ha llegado a la conclusión de que difícilmente, en campo, se alcanzarán suelos con una densidad máxima del 100%.

⁵⁶ La obtención de estos valores también se puede hacer mediante el nomograma AASHTO (Ilustración 28 de este documento). Para la determinación, sitúe el valor de C.B.R. obtenido de su material granular base y trace una horizontal hasta que corte con la línea vertical "Structural Coefficient a_2 ", determine el valor según la escala establecida. No olvidar, que a pesar de que los C.E. son adimensionales, necesitan multiplicarse por un valor de longitud, para así obtener el número estructural de la estructural. Cerciórese de las unidades a usar.

4.1.2 Aplicación de Fórmula AASHTO 93' que relaciona el valor de módulo resiliente para la obtención de C.E.

Ahora procedemos a citar la ecuación 24, que relaciona el C.E. de base granular con el valor de Módulo Resiliente⁵⁷:

Ecuación 24

$$a_2 = 0.249 (\log_{10} E_{SB}) - 0.977$$

Donde:

a_2 Coeficiente estructural para base granular

E_{SB} es el módulo de resiliencia del material.

Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 41
Rango de valores de coeficientes estructurales de base granular no ligada

Base	# Muestras	Mr [mpa]	Mr (psi)	C.E. cm
Mina "Roka Azul"	1	292.65	42445.3	0.069
Mina "Vipesa"	1	258.64	37512.6	0.0640
Mina "Hormicreteo"	1	286.04	41480.8	0.068
Mina "Trelles"	1	265.3	38478.5	0.065

Como puede apreciarse, mediante la utilización de la ecuación 24 (Ver tabla 41); los coeficientes estructurales presentan un valor más elevado que los calculados por la ecuación 20 (Ver tabla 40), lo cual puede generar dudas, ya que normalmente, para un mismo material, los procesos de obtención de coeficientes estructurales, aunque tengan diferentes caminos, deben finalmente otorgar el mismo resultado. Se cree que esta variación puede darse debido a la precisión del parámetro módulo resiliente con respecto al C.B.R., esto tiene sentido ya que este último (Es decir, el C.B.R.) presentaría un valor mucho más *conservador* y por ende menor.

⁵⁷ El mismo criterio de la nota de pie de página 51 se aplica, la variante radica en que en vez de posicionarse en el eje de "C.B.R." lo deberá hacer en el que tiene por nombre "Resilient Modulus".

Otro aspecto importante a considerar son *los valores límite de las funciones* (ya sean máximos o mínimos), una breve discusión, al respecto; se presenta a continuación:

4.1.2.1 Alcance de la ecuación que relaciona M_r con a_2 , propuesta en la guía AASHTO 1993.

Como se mencionó en la sección 2.2.2., la ilustración 28 de este documento, presenta un nomograma tomado de AASHTO, que permite la obtención de C.E. para base, en función de ensayos de laboratorio; para efectos del presente apartado, se vuelve a presentar dicha ilustración:

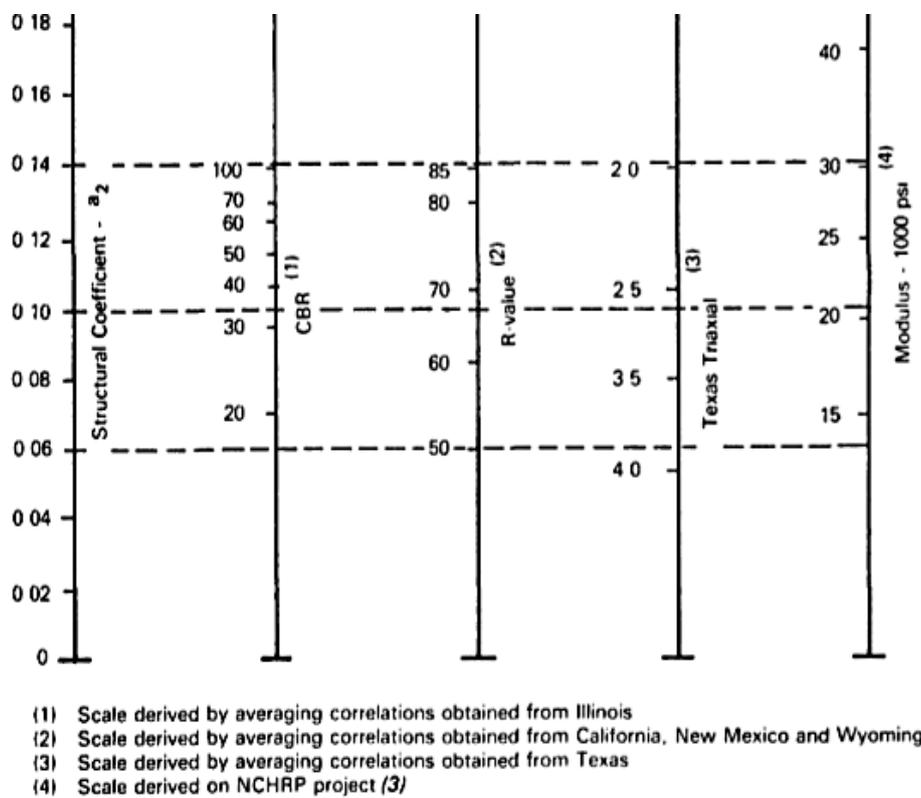


Figure 2.6. Variation in Granular Base Layer Coefficient (a_2) with Various Base Strength Parameters (3)

Ilustración 52. Nomogramas para la obtención de coeficientes estructurales para base granular. Tomado de: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

Como se puede ver; en el mencionado nomograma, existe un *rango o dominio*, de los parámetros a usar. Por ejemplo, para determinar C.E. por medio de un módulo resiliente, se puede utilizar como máximo, suelos, cuyo M_r sea cercano a los 40000 psi. Un desfase

importante⁵⁸, digamos un Mr. de 45000, puede conducir a resultados erróneos. No se sabe mucho de este aspecto, ya que la bibliografía pertinente no presenta discusiones al respecto.

El Mr., de la mina "Roca Azul" (Tabla 41), es de 42445.3 psi, con lo cual, otorga un C.E. de 0.069/cm (0.175 /in). Debido a la cercanía de este Mr., con respecto al límite máximo de 40000 psi, se podría considerar como válido. No así, como se verá para las sub-bases, los Mr. obtenidos, superan por mucho los valores máximos establecidos.

4.1.2.2. Presentación de resultados de C.E. para materiales base.

La variación de un coeficiente estructural de un mismo material, calculado con la ecuación 24, con respecto al calculado por la ecuación 20, se presenta a continuación:

*Tabla 42
Variación de C.E. obtenidos por las ecuaciones 20 y 24.*

Base	C.E. (cm) Insumo: C.B.R	C.E. (cm) Insumo: Mr.	Variación %
Mina "Roka Azul"	0.0512	0.069	25.8
Mina "Vipesa"	0.0472	0.064	26.25
Mina "Hormicreteo"	0.0495	0.068	27.21
Mina "Trelles"	0.0437	0.065	32.77

La variación promedio del valor de C.E. mediante el uso independiente de estas dos variables (Mr y C.B.R.) corresponde al 28%.

A pesar, de que el valor calculado de C.E. utilizando el módulo resiliente es superior a aquel, que utiliza el C.B.R.; por razones de seguridad, se decide adoptar aquellos obtenidos mediante este último parámetro de calidad de suelo (C.B.R.)

⁵⁸ Además de que, resultaría bastante difícil encontrar un material granular con un Mr. tan alto. No obstante, para el material sub-base; un suelo con un desfase importante de Mr. con respecto a los establecidos por AASHTO se ha dado, esto; se explica en las siguientes hojas.



Finalmente, Se puede concluir que: Los valores de C.E. obtenidos a través de C.B.R, tomados al 95% de la densidad máxima, para bases no ligadas, utilizadas como insumo en la construcción de pavimentos flexibles; oscilan entre [0.0437-0.0512]

4.1.3 Comparación con valores de C.E. recomendados por diversos autores.

Para finalizar, se presenta la comparación numérica entre C.E. obtenidos por algunos autores, con los determinados en este documento:

*Tabla 43
Comparación de Coeficientes estructurales calculados con los recomendados por algunos autores. Los coeficientes estructurales son de materiales granulares tipo Base.*

	C.E. calculados	AASHTO	(Rada & Witczak)	(Rada & Witczak)	Torres Espinoza, 2010
Rangos (cm)	[0.0437-0.0512]	[-,0.070]	[0.028,0.051]	[0.047-0.055]	[0.028-0.051]
Descripción	Materiales parcialmente triturados bien graduados	No da una descripción	gravas graduadas uniformemente y para agregados triturados graduados uniformemente	para gravas que presenten un grado de humedad menor al 40%	Suelos gravosos correctamente graduados

Como se puede apreciar en la tabla 43, los coeficientes estructurales obtenidos; están dentro del rango establecido por AASHTO. El límite inferior de valores es superior al límite mínimo establecido por (Rada & Witczak) y (Torres Espinoza, 2010), en cuanto que, el límite superior de valores es aceptablemente similar a los valores de los límites máximos que presentan estos dos autores.

4.2 Coeficientes estructurales del conjunto de muestras de Sub-Base Granular.

4.2.1 Aplicación de Fórmula AASHTO 93' que relaciona el valor de C.B.R. para la obtención de C.E.

Procedemos de manera similar que en el punto 4.1.1, en instancia primera citamos la ecuación 18 de este documento:

Ecuación 18

$$a_3 = 0.058 * CBR^{0,19}$$

a_3 Coeficiente estructural para sub-base granular

CBR es el valor de CBR^{59} en %

En la ecuación 18, se introduce el valor de C.B.R, para así; obtener el valor del coeficiente estructural para sub-base no ligada. No olvidar que este valor está dado para multiplicarse por un espesor en pulgadas; realizar las conversiones pertinentes de acuerdo a las ecuaciones a utilizar.

La siguiente tabla presenta los valores de C.E. para sub-bases no ligadas mediante la utilización de la ecuación 18 (Cuyo parámetro de entrada es el valor de C.B.R.)

*Tabla 44
Rango de valores de coeficientes estructurales de sub-base granular no ligada*

Sub-base	# Muestras	C.B.R%. (Valores de cada muestra)	C.E. (cm)
Mina "Roka Azul"	3	37	0.045
		55	0.0483
		80	0.053
Mina "Vipesa"	2	67.8	0.0508
		72	0.0515
Mina "Hormicroto"	1	62	0.05
Mina "Trelles"	No hay datos	No hay datos	No hay datos

⁵⁹ El valor de C.B.R. se tomará al 95% de la densidad máxima de los suelos granulares tipo sub-base.



Luego, de la tabla 43, se puede concluir que: Los valores de C.E. obtenidos a través de C.B.R., para sub-bases no ligadas, utilizadas como insumo en la construcción de pavimentos flexibles; oscilan entre [0.045-0.053]

4.2.2 Limitación de Fórmula AASHTO 93' que relaciona el valor de módulo resiliente para la obtención de C.E.

Así como en apartados anteriores, citamos la ecuación 22, que relaciona el módulo resiliente del material granular sub-base con su C.E. de la siguiente manera:

Ecuación 22

$$a_3 = 0.227 (\log_{10} E_{SB}) - 0.839$$

a_2 Coeficiente estructural para sub-base granular

E_{SB} es el módulo de resiliencia del material.

Antes de proceder al reemplazo, se verifica lo descrito en el punto 4.1.2.1, esta vez para materiales tipo sub-base, para ello citamos la ilustración 26:

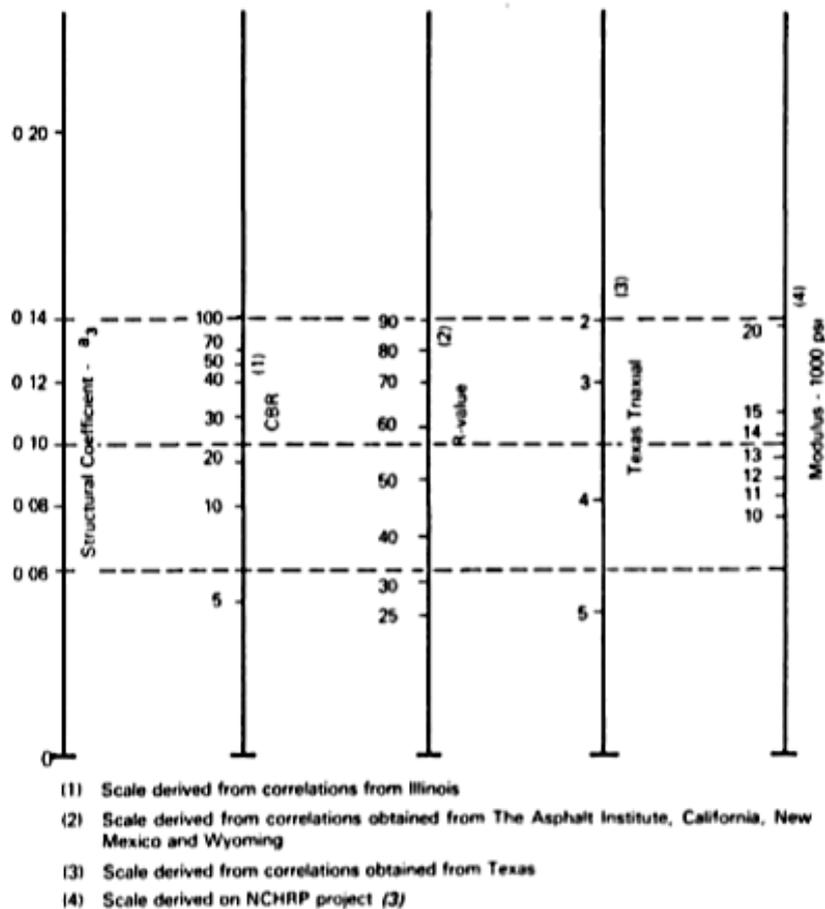


Figure 2.7. Variation in Granular Subbase Layer Coefficient (a_3) with Various Subbase Strength Parameters (J)

Ilustración 53

Relación de coeficientes estructurales de Sub-base granular con ensayos de laboratorio. Imagen extraída de: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

Como puede observarse, el alcance de la ecuación 22, representada como parte del nomograma de la ilustración 26; permite el uso de un valor de módulo resiliente, como mucho de 20000 psi, este valor está muy por debajo de los determinados para el material sub-base granular estudiado, ver tabla 45.

Tabla 45

Rango de valores de modulos resilientes de sub-base granular no ligada

Base	# Muestras	Mr [mpa]	Mr (psi)
Mina "Roka Azul"	1	248.3	36012.87
Mina "Vipesa"	1	248.4	36027.4
Mina "Hormicroto"	1	276.4	40088.43
Mina "Trelles"	No hay datos	No hay datos	No hay datos

Debido a esto, no se puede determinar los C.E. para materiales tipo sub-base mediante la utilización de módulo resiliente.

4.2.3 Comparación con valores de C.E. recomendados por diversos autores.

Finalmente, se presenta un cuadro, similar a la tabla 43; que permite establecer una comparación entre los C.E. obtenidos, con los dados por algunos autores:

Tabla 46
Comparación de Coeficientes estructurales calculados con los recomendados por algunos autores.

	C.E. calculados	AASHTO	(Rada & Witczak)	Torres Espinoza, 2010
Rangos (cm)	[0.045-0.053]	[-,0.055]	[0.028,0.051]	[0.035,0.043]
Descripción	Materiales parcialmente triturados. bien graduados.	No da una descripción	gravas graduadas uniformemente y para agregados triturados graduados uniformemente	Arena-Grava graduada uniformemente.

Análogo a lo comentado en 4.1.3, se puede apreciar en la tabla 46, que los coeficientes estructurales obtenidos, están dentro del rango recomendado por AASHTO, el límite máximo (0.053) es superior a los límites máximos recomendados por (Rada & Witczak), aunque por otro lado, a diferencia de 4.1.3, son mayores al límite superior e inferior, de los rangos recomendados por (Torres Espinoza, 2010), con lo cual se deduce que los materiales tanto base y sub-base utilizados como inusmo en la construcción de pavimentos en la ciudad de Cuenca presentan un comportamiento y calidad mejor, que *los valores medios obtenidos* por estos autores.



CAPÍTULO QUINTO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1.- Conclusiones

Este documento ha presentado la metodología y procedimientos de obtención, así como los resultados de coeficientes estructurales, para materiales granulares utilizados en la construcción de pavimentos flexibles, en la Ciudad de Cuenca. Para esto, se consiguieron muestras de base y sub-base vial de las principales plantas procesadoras o minas/canteras; que proveen materiales de este tipo, a las empresas constructoras de caminos emplazadas en el Cantón Cuenca, y; tras una serie de pasos a seguir; y demás procesos⁶⁰, finalmente se obtuvieron estos mencionados coeficientes estructurales.

De este trabajo investigativo se ha podido concluir que:

- I. No existe un conocimiento sustancial acerca de los valores/magnitudes de módulos resilientes de materiales granulares.
- II. Los ensayos de modulos resilientes son muy poco realizados en la República del Ecuador debido a su alto costo.
- III. Los módulos resilientes de ciertos materiales granulares tipo base y sub-base estudiados, son superiores a los establecidos por AASHTO
- IV. Las fórmulas que relacionan M_r con coeficiente estructural a_2 (C.E. de capa base) y a_3 (C.E. de capa sub-base) necesitan revisarse y discutirse, ya que han sido desarrolladas con un dominio muy limitado.
- V. El valor calculado de a_2^{61} utilizando como insumo el C.B.R. es menor que aquel que utiliza como insumo el Módulo resiliente⁶², para un mismo material. Lo mismo se puede establecer para a_3 (C.E. de sub-base)

⁶⁰ Procesos que están descritos en (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

⁶¹ C.E. de material base

⁶² Un valor de módulo resiliente, que esté dentro del dominio de valores establecido por AASHTO, claro está.



- VI. No existe una diferencia sustancial importante entre los coeficientes estructurales de materiales granulares tipo base, recomendados en la Metodología AASHTO 93 con los determinados en este trabajo investigativo.
- VII. No existe una diferencia sustancial importante entre los coeficientes estructurales de materiales granulares tipo sub-base, recomendados en la Metodología AASHTO 93 con los determinados en este trabajo investigativo.
- VIII. Los coeficientes estructurales de materiales tipo base y sub-base, que se utilizan en la Ciudad de Cuenca están cerca de los valores límite del rango de coeficientes estructurales para materiales granulares establecidos en la metodología de diseño de pavimentos flexibles AASHTO 93.

5.2.- Recomendaciones:

Se recomienda lo siguiente:

- I. El valor de M_r es un parámetro poco conocido en nuestro medio y debe estudiarse al detalle; en las asignaturas concernientes al diseño de carreteras y caminos.
- II. Analizar y obtener C.E., para otros materiales a más de los granulares no ligados.
- III. Realizar una investigación que determine un modelo matemático que relacione el Valor de M_r con el de C.B.R para materiales granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca.
- IV. Analizar el por qué, el rango recomendado por AASHTO de módulos resilientes, es limitado; especialmente con lo que a material tipo sub-base se refiere.
- V. Analizar el parámetro denominado “Esfuerzos volumétricos”; que es insumo principal, para el cálculo de módulo resiliente mediante modelaciones matemáticas.
- VI. Investigar acerca de instrumentos que permiten medir esfuerzos y deformaciones en las capas/espesores de las estructuras de pavimentos flexibles.
- VII. Investigar acerca de los modelos que emplean la teoría de la elasticidad para determinar los esfuerzos y deformaciones en las capas de las estructuras de pavimentos flexibles.
- VIII. Tener precaución al momento de hacer uso de ecuaciones que relacionen C.B.R. con módulo resiliente, especialmente por temas de dominio de la función; ya que ciertas funciones han sido desarrolladas para rangos de C.B.R específicos.
- IX. Llevar a cabo un proyecto similar en otra área de estudio.
- X. Obtener, siguiendo metodologías similares a las establecidas en este proyecto investigativo; coeficientes estructurales para materiales granulares ligados con cemento.



- XI. Hacer uso de los coeficientes estructurales determinados en este trabajo investigativo, en el diseño de pavimentos flexibles que han de construirse dentro del Cantón Cuenca.



Bibliografía

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (1993). *AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES*.
- Bilbao, D. R. (2014). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS ENTRE EL PAVIMENTO RÍGIDO Y PAVIMENTO FLEXIBLE*. Tesis, Quito. Recuperado el 30 de Marzo de 2018
- Core, B., Ceylan, H., & Harrington, D. (05 de 2005). Implementing the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: Implementation Plan. *Digital repository of IOWA State University*, 11.
- Corredor M., G. (2010). *Maestría en Vías Terrestres Módulo III Diseño de Pavimentos I*. Managua: Sección para Delegados de la Cámara de Construcción.
- Escobar, F. (2013). *Diseño de Pavimentos método AASHTO*,. Universidad politécnica Santiago Mariño, Carácas .
- Escuela de Caminos de Montaña. (2006). *Curso de actualización de diseño estructural de Caminos. Método AASHTO '93*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan.
- Gudishala, R. (2004). *Development of resilient modulus prediction models for base and subgrade pavement layers from in situ devices test results*. Lousiana: Louisiana State University LSU Digital Commons.
- Higuera Sandoval, C. H. (2011). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras*. Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica publicaciones.
- Hiltunen, D. (2014). SYNTHESIS/LITERATURE REVIEW FOR DETERMINING STRUCTURAL LAYER COEFFICIENTS (SLC) OF BASES. *Florida Department of Transportation 605 Suwannee Street, MS 30 Tallahassee, FL 32399*, 1-33.
- Hiltunen, D. R. (2014). *SYNTHESIS/LITERATURE REVIEW FOR DETERMINING STRUCTURAL LAYER COEFFICIENTS (SLC) OF BASES*. University of Florida, DEPARTMENT OF CIVIL & COASTAL ENGINEERING UNIVERSITY OF FLORIDA. University of Florida.



- Jiménez Acuña, M. (2009). *IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN BASES GRANULARES PARA PAVIMENTOS*. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.
- Limaymanta Mendoza, M. F., & Guitérrez Lázares, W. (2009). Ensayo de Modulo Resiliente. *Ingeniería Civil del Consejo departamental de loreto del Coelgio de Ingenieros del Perú*, 1-11.
- Maldonado, C. (2016). *Bases y Subbases-Asignatura de Pavimentos*. Cuenca.
- Masrur, M. (Enero de 2016). Lab Testing on Recycled Base Materials. *ResearchGate*, 2-33.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial-Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (Vol. 3)*. Quito.
- Olidis, C., & David, H. (2004). Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures Is your Agency Ready? *Solis and Materiales Session*, 1-13. Recuperado el 20 de Marzo de 2018
- Pérez García, N., Garnica Anguas, P., Curiel Iñiguez, N. P., & Ruiz Sanginez, M. J. (2016). *Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación*. Queretaro.
- Rada, G., & Witczak, M. (s.f.). Material Layer Coefficients of Unbound Granular Materials from Resilient Modulus. *Transportation Research Record 852*, 1-7.
- Richardson, D. (1994). Determination of AASHTO Layer Coefficients for Granular Materials by Use of Resilient Modulus. *Civil, Architectural and Environmental Engineering Faculty Research & Creative Works*, 1-12.
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. (24 de Septiembre de 2007). COMPORTAMIENTO RESILIENTE DE MATERIALES GRANULARES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES: ESTADO DEL CONOCIMIENTO. *Revista Ingenierías*, 6(11), 65-90.
- Sanchez Sabogal, F. (2016). *Diseño de pavimento asfálticos para calles y carreteras. Módulo 12*. Colombia.
- Subagio, S., Rachman, A., Mardiyah, S., & Cahyanto, T. (2005). MULTI-LAYER PAVEMENT STRUCTURAL ANALYSIS USING METHOD OF EQUIVALENT



THICKNESS CASE STUDY: JAKARTA – CIKAMPEK TOLL ROAD. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 55-65.

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

Vásquez Varela, L. R. (14 de Julio de 2014). *SCRIBD*. Recuperado el 30 de Marzo de 2018, de <https://es.scribd.com/document/353726649/AASHTO-Guide-for-the-Design-of-Pavement-Structures-RIGIDOS>



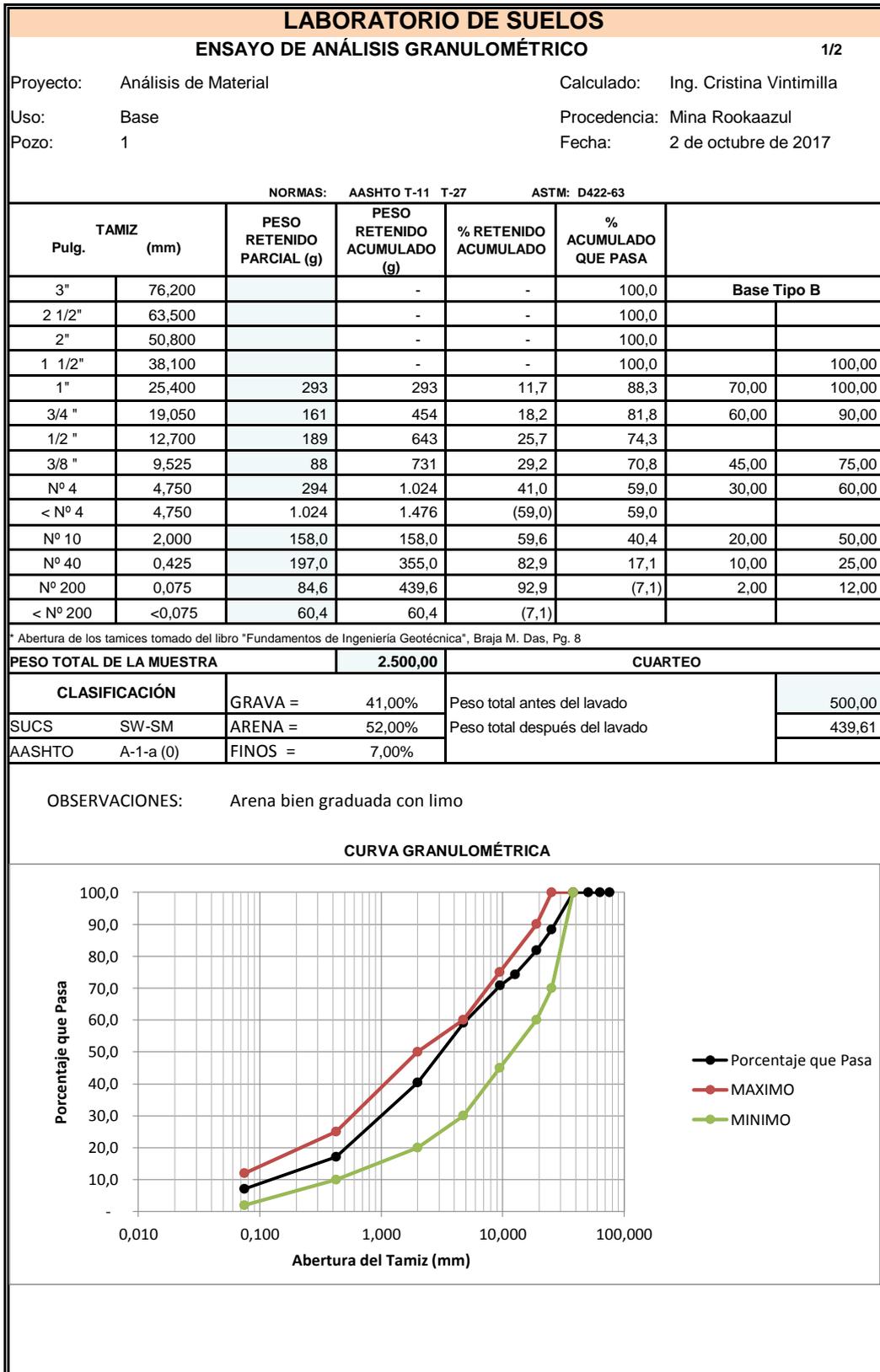
ANEXOS

1 RECOPIACIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS EN ALGUNOS LABORATORIOS DE SUELOS Y MATERIALES DE LA CIUDAD DE CUENCA

Material: Base

Mina: Roca Azul

Contiene: Granulometría, Límites, Proctor, C.B.R.



LABORATORIO DE SUELOS																		
						2/2												
Proyecto:	Análisis de Material																	
Uso:	Base		Calculado: Ing. Cristina Vintimilla															
Pozo:	1		Procedencia: Mina Rookaazul		Fecha: 02/10/2017													
HUMEDAD NATURAL																		
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO												
10	----	41,08	39,89	16,64	5,12	5,09												
2	----	43,70	42,38	16,76	5,15													
7	----	43,28	42,01	16,58	4,99													
LIMITE LIQUIDO																		
3	10	32,31	28,99	17,23	28,23	25,35												
12	16	32,03	28,85	16,88	26,57													
14	24	29,93	27,24	16,76	25,67													
20	36	28,19	25,96	16,77	24,27													
6	48	27,86	25,78	16,83	23,24													
LIMITE PLASTICO																		
4	----	18,78	18,48	17,11	21,90	21,83												
16	----	19,30	18,86	16,91	22,56													
11	----	19,06	18,69	16,93	21,02													
<div style="text-align: center;"> HUMEDAD vs # DE GOLPES. </div> <table border="1"> <caption>Datos del Gráfico: Humedad vs # de Golpes</caption> <thead> <tr> <th># de Golpes</th> <th>% de Humedad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10</td> <td>28,23</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>26,57</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>25,67</td> </tr> <tr> <td>36</td> <td>24,27</td> </tr> <tr> <td>48</td> <td>23,24</td> </tr> </tbody> </table>							# de Golpes	% de Humedad	10	28,23	16	26,57	24	25,67	36	24,27	48	23,24
# de Golpes	% de Humedad																	
10	28,23																	
16	26,57																	
24	25,67																	
36	24,27																	
48	23,24																	
Límite Líquido a 25 golpes =		25,35%	Índice de plasticidad =		3,53													

LABORATORIO DE SUELOS								
ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)								
PROYECTO:	Análisis de Material	POZO N°.	1					
UBICACIÓN:	Mina Rookaazul	FECHA:	3 de octubre de 2017					
		REALIZADO POR:	Ing. Cristina Vintimilla					
ASSHTO T180-70(modificado)								
MOLDE N°. 1								
PESO	6736 gramos	NUMERO DE CAPAS : 5						
VOLUMEN	2.105 cm 3.	NUMERO DE GOLPES POR CAPA: 56						
DIÁMETRO	15 cm.	PESO DEL MARTILLO : 4,55 Kilos.						
		ALTURA DE CAIDA DEL MARTILLO: 45,72 cm.						
DENSIDAD								
MUESTRA N°	1	2	3	4				
PESO SUELO + MOLDE	10921,05	11306,72	11460,98	11352,09				
DENSIDAD HÚMEDA	1,988	2,171	2,245	2,193				
DENSIDAD SECA	1,967	2,029	1,971	1,904				
% DE HUMEDAD								
TARRO N°	10	17	13	8	7	9	5	6
PESO HÚMEDO +TARRO	47,39	44,68	40,02	41,06	48,35	44,45	43,99	42,99
PESO SECO +TARRO	47,06	44,39	38,55	39,45	44,50	41,06	40,52	39,46
PESO TARRO	16,64	17,74	17,36	16,62	16,58	16,73	16,94	16,83
% DE HUMEDAD	1,08	1,09	6,94	7,05	13,79	13,93	14,72	15,60
PROMEDIO % HUMEDAD	1,09		6,99		13,86		15,16	
Relación Humedad Densidad								
MÁXIMA DENSIDAD SECA	2,050	g/cm³						
% OPTIMO DE HUMEDAD	9,60%							
OBSERVACIONES.								

LABORATORIO DE SUELOS						
ENSAYO DE RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR. (ASTM D1883-73)						
PROYECTO:	Análisis de Material			DISTURBADA:	No	
SECTOR:	Mina Rookaazul			CLASE DE SUELOS:	Arena bien graduada con limo	
POZO N°:	1			FECHA:	4 de octubre de 2017	
				REALIZADO POR:	Ing. Cristina Vintimilla	
DENSIDAD						
PESO DEL MARTILLO: 4.55 kilos ALTURA DE CAÍDA : 45,72 cm.						
Molde No.	1		2		3	
Numero de capas	5		5		5	
# de golpes por capa	56		25		10	
	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO
Peso muestra+molde Gr.	10851	10930	10810	10950	10292	10448
Peso molde Gr.	6072	6072	6302	6302	6037	6037
Peso muestra Gr.	4779	4858	4508	4648	4255	4411
Volumen muestra cm³.	2068	2068	2085	2085	2068	2068
Densidad húmeda kg/M³.	2,311	2,350	2,162	2,229	2,058	2,133
Densidad seca kg/M³.	2,088	2,111	1,954	1,964	1,857	1,865
CONTENIDO DE AGUA ANTES DEL ENSAYO						
Tarro No.	8	20	6	9	16	4
Peso húmedo + tarro (gr.)	40,24	45,58	40,19	40,78	45,09	46,62
Peso seco + tarro (gr.)	38,01	42,74	37,97	38,44	42,33	43,74
Peso tarro (gr.)	16,62	16,77	16,83	16,73	16,91	17,11
Contenido de humedad %	10,43	10,94	10,50	10,78	10,86	10,81
Promedio humedad %	10,68		10,64		10,84	
CONTENIDO DE AGUA DESPUES DEL ENSAYO						
Tarro No.	16	20	4	5	8	19
Peso húmedo + tarro (gr.)	45,21	41,74	42,13	47,90	47,06	45,26
Peso seco + tarro (gr.)	42,30	39,23	39,17	44,21	43,21	41,68
Peso tarro (gr.)	16,91	16,77	17,11	16,94	16,62	16,76
Contenido de humedad %	11,46	11,18	13,42	13,53	14,48	14,37
Promedio humedad %	11,32		13,47		14,42	
Agua absorbida %	1,65		3,11		3,67	
OBSERVACIONES:						

LABORATORIO DE SUELOS**ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)**

PROYECTO: Análisis de Material

MUESTRA N°.

0

SECTOR: Mina Rookaazul

FECHA:

4 de octubre de 2017

POZO N°: 1

REALIZADO POR:

Ing. Cristina Vintimilla

molde 1			expansión 0,1 %			CBR
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	
min.	pulg.	dial	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0,0			
0,5	25	623	198,3			
1	50	1681	535,1			
1,5	75	2699	859,1			
2	100	3758	1196,2	1196,2	1000	119,6
3	150	5675	1806,4			
4	200	7446	2370,1			
5	250	8686	2764,8			
6	300	9250	2944,4			
8	400	10265	3267,5			
10	500	10896	3468,3			

molde 2			expansión 0,1 %			CBR
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	
min.	pulg.	dial	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0,0			
0,5	25	465	148,0			
1	50	1080	343,8			
1,5	75	1653	526,2			
2	100	2167	689,8	689,8	1000	69,0
3	150	3102	987,4			
4	200	3879	1234,7			
5	250	4573	1455,6			
6	300	5280	1680,7			
8	400	6579	2094,2			
10	500	7881	2508,6			

molde 3			expansión 0,1 %			CBR
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	
min.	pulg.	dial	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0,0			
0,5	25	243	77,4			
1	50	489	155,7			
1,5	75	705	224,4			
2	100	920	292,9	292,9	1000	29,3
3	150	1378	438,6			
4	200	1809	575,8			
5	250	2193	698,1			
6	300	2554	813,0			
8	400	3184	1013,5			
10	500	3745	1192,07			

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)

PROYECTO: Análisis de Material

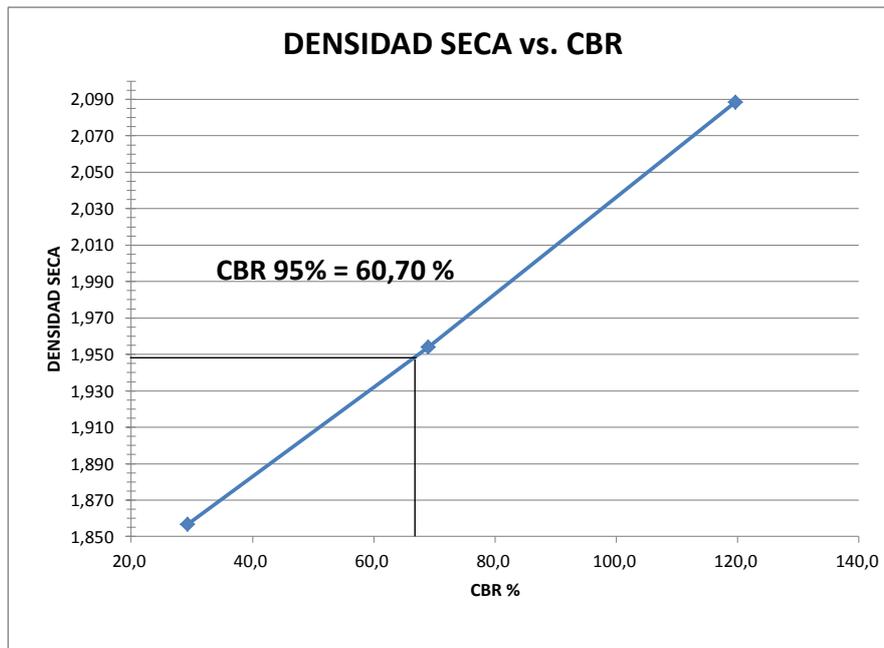
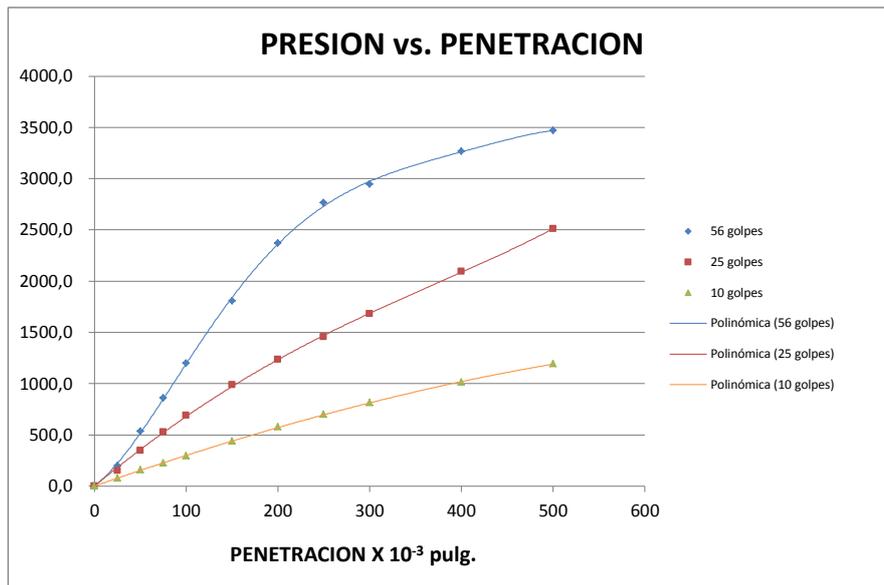
MUESTRA N°. 1

SECTOR: Mina Rookaazul

FECHA: 4 de octubre de 2017

POZO N°: 1

REALIZADO POR: Ing. Cristina Vintimilla



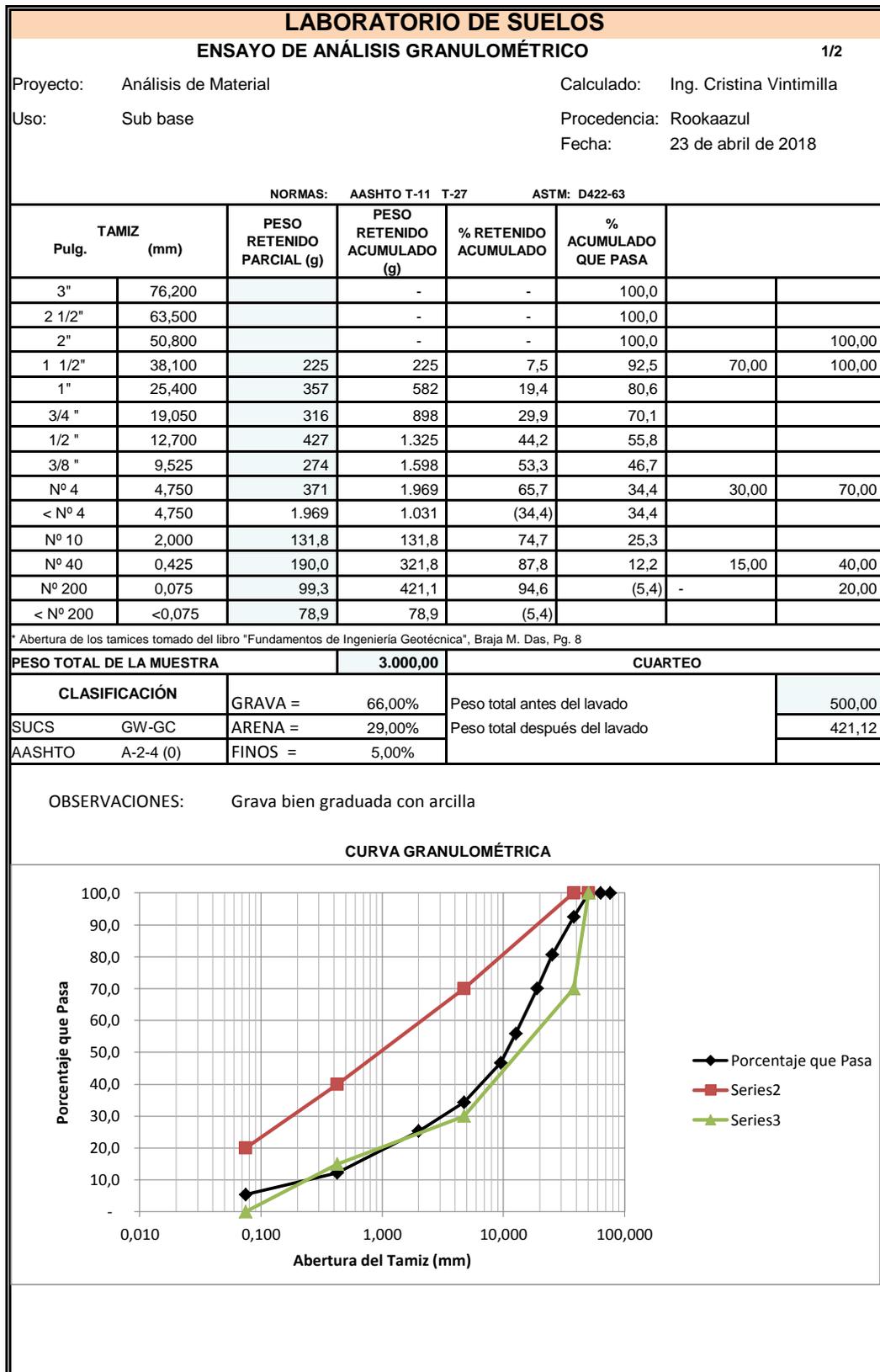
ING. CRISTINA VINTIMILLA
SENESCYT 1007-05-605320

Material: Base
 Mina: Roca Azul
 Contiene: Granulometría, Límites.

LABORATORIO DE SUELOS							
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							1/2
Proyecto: Análisis de Material			Calculado: Ing. Cristina Vintimilla				
Uso: Base Tipo II			Procedencia: Rookaazul				
			Fecha: 23 de abril de 2018				
NORMAS: AASHTO T-11 T-27 ASTM: D422-63							
TAMIZ Pulg.	(mm)	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76,200		-	-	100,0		
2 1/2"	63,500		-	-	100,0		
2"	50,800		-	-	100,0		
1 1/2"	38,100	126	126	4,2	95,8		100,00
1"	25,400	486	612	20,4	79,6	70,00	100,00
3/4 "	19,050	313	925	30,8	69,2	60,00	90,00
1/2 "	12,700	379	1.304	43,5	56,5		
3/8 "	9,525	160	1.464	48,8	51,2	45,00	75,00
Nº 4	4,750	369	1.833	61,1	38,9	30,00	60,00
< Nº 4	4,750	1.833	1.167	(38,9)	38,9		
Nº 10	2,000	135,4	135,4	71,6	28,4	20,00	50,00
Nº 40	0,425	194,9	330,4	86,8	13,2	10,00	25,00
Nº 200	0,075	88,5	418,9	93,7	(6,3)	2,00	12,00
< Nº 200	<0,075	81,1	81,1	(6,3)			
* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8							
PESO TOTAL DE LA MUESTRA			3.000,00		CUARTEO		
CLASIFICACIÓN		GRAVA =	61,00%		Peso total antes del lavado		500,00
SUCS	GW-GC	ARENA =	33,00%		Peso total después del lavado		418,88
AASHTO	A-2-4 (0)	FINOS =	6,00%				
OBSERVACIONES: Grava bien graduada con arcilla							
CURVA GRANULOMÉTRICA							
<p>El gráfico muestra la curva granulométrica con el eje Y etiquetado como 'Porcentaje que Pasa' (de 0 a 100) y el eje X etiquetado como 'Abertura del Tamiz (mm)' (logarítmico, de 0,010 a 100,000). Se observan tres series de datos: 'Porcentaje que Pasa' (línea negra con diamantes), 'Series2' (línea roja con cuadrados) y 'Series3' (línea verde con triángulos). Las series 2 y 3 parecen ser versiones desplazadas o alternativas de la curva principal.</p>							

LABORATORIO DE SUELOS																			
							2/2												
Proyecto:		Análisis de Material																	
Uso:		Base Tipo II			Calculado: Ing. Cristina Vintimilla														
				Procedencia: Rookaazul															
				Fecha: 23/04/2018															
HUMEDAD NATURAL																			
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO	Especificaciones Técnicas MTOP												
4	----	35,40	33,77	17,11	9,78	9,64													
1	----	33,72	32,20	16,63	9,76														
10	----	34,74	33,19	16,64	9,37														
LIMITE LIQUIDO																			
18	10	31,36	27,96	17,48	32,44	30,88	25												
13	16	31,38	28	17,36	31,77														
7	24	29,57	26,49	16,58	31,08														
19	35	29,28	26,37	16,76	30,28														
12	45	30,98	27,75	16,88	29,71														
LIMITE PLASTICO																			
2	----	18,51	18,20	16,76	21,53	22,16													
15	----	18,38	18,12	16,98	22,81														
5	----	18,54	18,25	16,94	22,14														
INDICE DE PLASTICIDAD						8,73	6												
<div style="text-align: center;"> HUMEDAD vs # DE GOLPES. </div> <table border="1"> <caption>Datos del gráfico de humedad vs golpes</caption> <thead> <tr> <th># DE GOLPES</th> <th>% DE HUMEDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10</td> <td>32,44</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>31,77</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>31,08</td> </tr> <tr> <td>35</td> <td>30,28</td> </tr> <tr> <td>45</td> <td>29,71</td> </tr> </tbody> </table>								# DE GOLPES	% DE HUMEDAD	10	32,44	16	31,77	24	31,08	35	30,28	45	29,71
# DE GOLPES	% DE HUMEDAD																		
10	32,44																		
16	31,77																		
24	31,08																		
35	30,28																		
45	29,71																		

Material: Sub-base
 Mina: Roca Azul
 Contiene: Granulometría, Límites de Atterberg.



LABORATORIO DE SUELOS																			
							2/2												
Proyecto: Análisis de Material																			
Uso: Sub base		Calculado: Ing. Cristina Vintimilla																	
		Procedencia: Rookaazul																	
		Fecha: 23/04/2018																	
HUMEDAD NATURAL																			
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO	Especificacion es Técnicas Municipio de Cuenca												
3	----	38,01	35,91	17,23	11,24	10,96													
17	----	36,10	34,30	17,74	10,87														
16	----	37,70	35,68	16,91	10,76														
LIMITE LIQUIDO																			
8	12	30,04	26,8	16,62	31,83	30,58	30												
9	17	28,96	26,05	16,73	31,22														
14	26	29,35	26,40	16,76	30,60														
11	36	29,21	26,38	16,93	29,95														
20	46	29,29	26,44	16,77	29,47														
LIMITE PLASTICO																			
1	----	18,08	17,80	16,63	23,93	23,17													
6	----	18,33	18,06	16,83	21,95														
10	----	18,21	17,91	16,64	23,62														
INDICE DE PLASTICIDAD						7,41	9												
<div style="text-align: center;"> HUMEDAD vs # DE GOLPES. </div> <table border="1"> <caption>Datos del gráfico: HUMEDAD vs # DE GOLPES</caption> <thead> <tr> <th># DE GOLPES</th> <th>% DE HUMEDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12</td> <td>31,83</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>31,22</td> </tr> <tr> <td>26</td> <td>30,60</td> </tr> <tr> <td>36</td> <td>29,95</td> </tr> <tr> <td>46</td> <td>29,47</td> </tr> </tbody> </table>								# DE GOLPES	% DE HUMEDAD	12	31,83	17	31,22	26	30,60	36	29,95	46	29,47
# DE GOLPES	% DE HUMEDAD																		
12	31,83																		
17	31,22																		
26	30,60																		
36	29,95																		
46	29,47																		

Material: Sub-base
 Mina: Roca Azul
 Contiene: Granulometría, Límites de Atterberg, Proctor, CBR

LABORATORIO DE SUELOS							
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Proyecto: Análisis de Material				Calculado: Ing. Cristina Vintimilla			
Uso: Sub base				Procedencia: Mina Rookaazul			
Pozo: 1				Fecha: 30 de mayo de 2017			
Muestra: 1							
NORMAS: AASHTO T-11 T-27 ASTM: D422-63							
TAMIZ Pulg.	(mm)	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76,200		-	-	100,0		
2 1/2"	63,500		-	-	100,0		
2"	50,800		-	-	100,0	100,00	
1 1/2"	38,100	102	102	4,1	95,9	70,00	100,00
1"	25,400	274	377	15,1	84,9		
3/4 "	19,050	265	642	25,7	74,3		
1/2 "	12,700	518	1.159	46,4	53,6		
3/8 "	9,525	207	1.367	54,7	45,3		
Nº 4	4,750	251	1.617	64,7	35,3	30,00	70,00
< Nº 4	4,750	1.617	883	(35,3)	35,3		
Nº 10	2,000	122,8	122,8	73,4	26,6		
Nº 40	0,425	162,0	284,8	84,8	15,2	15,00	40,00
Nº 200	0,075	153,5	438,3	95,6	(4,4)	-	20,00
< Nº 200	<0,075	61,7	61,7	(4,4)			
* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8							
PESO TOTAL DE LA MUESTRA			2.500,00		CUARTEO		
CLASIFICACIÓN		GRAVA =	65,00%		Peso total antes del lavado		500,00
SUCS	GW	ARENA =	31,00%		Peso total después del lavado		438,29
AASHTO	A-1-a (0)	FINOS =	4,00%				
OBSERVACIONES: Grava bien graduada con arena							
CURVA GRANULOMÉTRICA							
ING. CRISTINA VINTIMILLA SENESCYT 1007-05-605320							

LABORATORIO DE SUELOS																			
Proyecto:		Análisis de Material																	
Uso:		Sub base		Calculado:			Ing. Cristina Vintimilla												
Pozo:		1		Procedencia:			Mina Rookaazul												
Muestra:		1		Fecha:			30/05/2017												
HUMEDAD NATURAL																			
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO	Especificaciones Técnicas Municipio de Cuenca												
20	----	44,38	41,75	16,77	10,53	10,62													
13	----	47,92	45,05	17,36	10,36														
2	----	44,70	41,94	16,76	10,96														
LIMITE LIQUIDO																			
9	11	28,56	25,99	16,73	27,75	25,63	30												
7	16	28,87	26,27	16,58	26,83														
19	24	27,60	25,36	16,76	26,05														
12	35	27,80	25,63	16,88	24,80														
10	46	29,84	27,31	16,64	23,71														
LIMITE PLASTICO																			
6	----	18,56	18,21	16,83	25,36	25,06													
5	----	18,65	18,31	16,94	24,82														
17	----	19,39	19,06	17,74	25,00														
INDICE DE PLASTICIDAD						0,57	9												
<div style="text-align: center;"> HUMEDAD vs # DE GOLPES. </div> <table border="1"> <caption>Datos del Gráfico: Humedad vs # de Golpes</caption> <thead> <tr> <th># de Golpes</th> <th>% de Humedad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11</td> <td>27,75</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>26,83</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>26,05</td> </tr> <tr> <td>35</td> <td>24,80</td> </tr> <tr> <td>46</td> <td>23,71</td> </tr> </tbody> </table>								# de Golpes	% de Humedad	11	27,75	16	26,83	24	26,05	35	24,80	46	23,71
# de Golpes	% de Humedad																		
11	27,75																		
16	26,83																		
24	26,05																		
35	24,80																		
46	23,71																		

LABORATORIO DE SUELOS								
ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)								
PROYECTO:	Análisis de Material	POZO N°.	1					
UBICACIÓN:	Sub base Rookaazul	FECHA:	30 de mayo de 2017					
		REALIZADO POR:	Ing. Cristina Vintimilla					
ASSHTO T180-70(modificado)								
MOLDE N°. 1								
PESO	6736 gramos	NUMERO DE CAPAS : 5						
VOLUMEN	2.105 cm 3.	NUMERO DE GOLPES POR CAPA: 56						
DIÁMETRO	15 cm.	PESO DEL MARTILLO : 4,55 Kilos.						
		ALTURA DE CAIDA DEL MARTILLO: 45,72 cm.						
DENSIDAD								
MUESTRA N°	1	2	3	4				
PESO SUELO + MOLDE	10721,42	11147,91	11560,8	11538,11				
DENSIDAD HÚMEDA	1,893	2,096	2,292	2,281				
DENSIDAD SECA	1,877	1,985	2,043	2,004				
% DE HUMEDAD								
TARRO N°	44	39	8	11	12	7	17	19
PESO HÚMEDO +TARRO	65,08	56,09	62,76	59,30	49,71	58,28	63,59	63,45
PESO SECO +TARRO	64,61	55,68	60,34	57,04	46,11	53,77	58,05	57,75
PESO TARRO	8,16	8,01	16,62	16,93	16,88	16,58	17,74	16,76
% DE HUMEDAD	0,83	0,86	5,54	5,63	12,32	12,13	13,74	13,91
PROMEDIO % HUMEDAD	0,85		5,58		12,22		13,82	
Relación Humedad Densidad								
MÁXIMA DENSIDAD SECA	2,055		g/cm³					
% OPTIMO DE HUMEDAD	10,60%							
OBSERVACIONES.								

LABORATORIO DE SUELOS						
ENSAYO DE RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR. (ASTM D1883-73)						
PROYECTO:	Análisis de Material		DISTURBADA:	No		
SECTOR:	Rookaazul		CLASE DE SUELOS:	Grava bien graduada con arena		
POZO Nº:	1		FECHA:	31 de mayo de 2017		
MUESTRA Nº.	1		REALIZADO POR:	Ing. Cristina Vintimilla		
DENSIDAD						
PESO DEL MARTILLO: 4.55 kilos ALTURA DE CAÍDA : 45,72 cm.						
Molde No.	1		2		3	
Numero de capas	5		5		5	
# de golpes por capa	56		25		10	
	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO
Peso muestra+molde Gr.	11753	12472	11599	11743	11061	11257
Peso molde Gr.	6988	6988	7138	7138	6884	6884
Peso muestra Gr.	4765	5484	4461	4605	4177	4373
Volumen muestra cm³.	2068	2068	2085	2085	2068	2068
Densidad húmeda kg/M³.	2,305	2,652	2,139	2,208	2,020	2,115
Densidad seca kg/M³.	2,074	1,955	1,927	1,890	1,821	1,828
CONTENIDO DE AGUA ANTES DEL ENSAYO						
Tarro No.	16	20	15	1	14	10
Peso húmedo + tarro (gr.)	34,95	39,53	36,02	37,48	33,81	34,44
Peso seco + tarro (gr.)	33,14	37,26	34,13	35,42	32,10	32,72
Peso tarro (gr.)	16,91	16,77	16,98	16,63	16,76	16,64
Contenido de humedad %	11,15	11,08	11,02	10,96	11,15	10,70
Promedio humedad %	11,12		10,99		10,92	
CONTENIDO DE AGUA DESPUES DEL ENSAYO						
Tarro No.	9	5	11	17	7	8
Peso húmedo + tarro (gr.)	38,39	40,57	42,6	49,25	46,95	41,88
Peso seco + tarro (gr.)	35,31	32,21	38,87	44,74	43,24	38,13
Peso tarro (gr.)	16,73	16,94	16,93	17,74	16,58	16,62
Contenido de humedad %	16,58	54,75	17,00	16,70	13,92	17,43
Promedio humedad %	35,66		16,85		15,67	
Agua absorbida %	15,09		3,23		4,69	
OBSERVACIONES:						

LABORATORIO DE SUELOS**ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)**

PROYECTO: Análisis de Material

MUESTRA N°.

1

SECTOR: Rookaazul

FECHA:

31 de mayo de 2017

POZO N°: 1

REALIZADO POR:

Ing. Cristina Vintimilla

molde 1			expansión 0,2 %			
TIEMPO	PENETRA CION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dial	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0,0			
0,5	25	1196	380,7			
1	50	2393	761,7			
1,5	75	3100	986,8			
2	100	4051	1289,5	1289,5	1000	128,9
3	150	5246	1669,9			
4	200	6544	2083,0			
5	250	7580	2412,8			
6	300	7956	2532,5			
8	400	9350	2976,2			
10	500	10530	3351,8			

molde 2			expansión 0,3 %			
TIEMPO	PENETRA CION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dial	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0,0			
0,5	25	682	217,1			
1	50	1276	406,2			
1,5	75	1819	579,0			
2	100	2246	714,9	714,9	1000	71,5
3	150	3504	1115,4			
4	200	4573	1455,6			
5	250	5588	1778,7			
6	300	6423	2044,5			
8	400	7122	2267,0			
10	500	8400	2673,8			

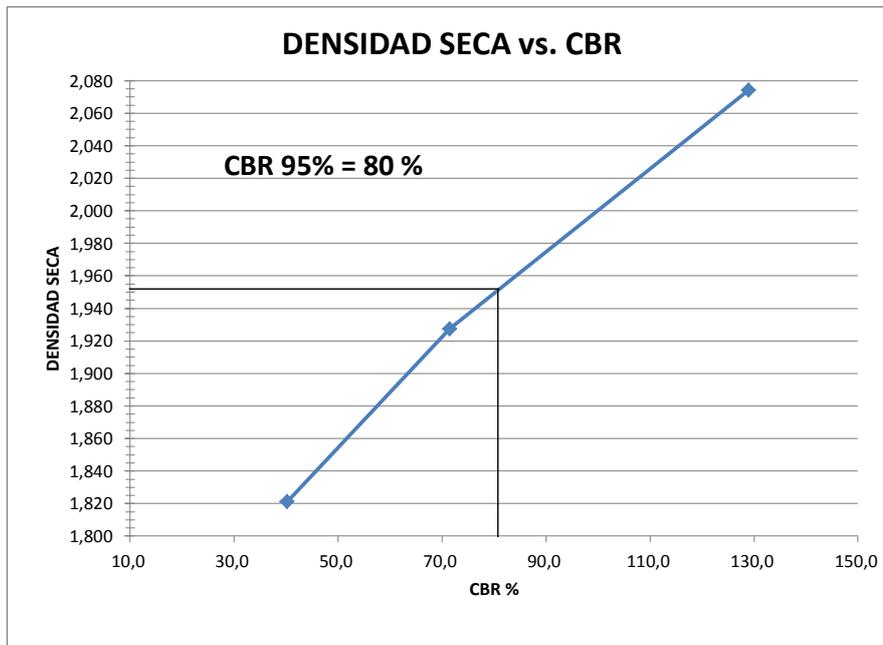
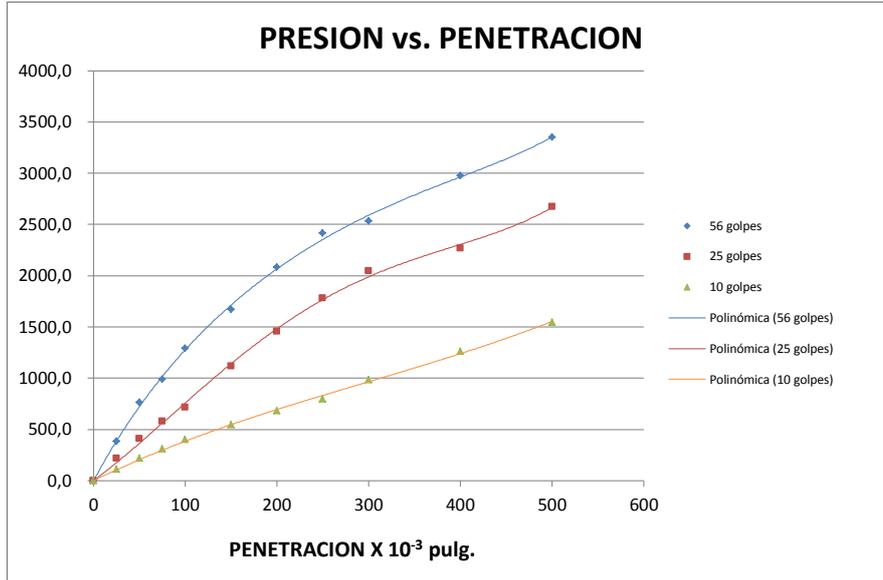
molde 3			expansión		0,1 %	
TIEMPO	PENETRA CION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dial	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0,0			
0,5	25	342	108,9			
1	50	675	214,9			
1,5	75	972	309,4			
2	100	1263	402,0	402,0	1000	40,2
3	150	1708	543,7			
4	200	2143	682,1			
5	250	2499	795,5			
6	300	3087	982,6			
8	400	3955	1258,9			
10	500	4853	1544,76			

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)

PROYECTO: Análisis de Material
SECTOR: Rookaazul
POZO N°: 1

MUESTRA N°. 1
FECHA: 31 de mayo de 2017
REALIZADO POR: Ing. Cristina Vintimilla



ING. CRISTINA VINTIMILLA
SENESCYT 1007-05-605320

Material: Sub-base
 Mina: Roca Azul
 Contiene: Granulometría, Límites de Atterberg, Proctor, CBR

CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
 CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



Estudio de Suelos, material sub base pavimento rigido

LABORATORIO DE SUELOS

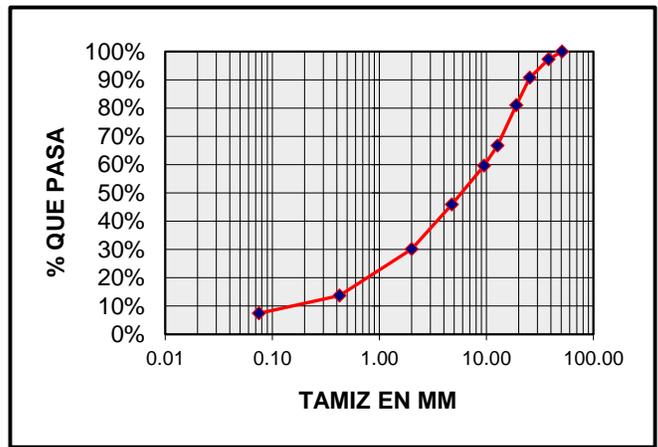
Ing. Luis Mario Almache

Proyecto: Pavimentación rigida de Prolongación de la Altiplano entre absc 0 + 000 y absc 0 + 142
Localización: Cantón
Fecha: Julio del 2017
Tipo de material: Sub Base
Contratista: Ing. Hermel López
Fiscalizador: Ing. Cesar Maldonado

COORDENADAS UBICACIÓN
 WGS84
 Norte Este

ENSAYO DE GRANULOMETRIA NORMAS: AASHTO T-11 T-27 ASTM: D422-63

TAMIZ		P. RET.	P. RET.	%	%
M.M.	U.S	PARC. (GR.)	ACUM. (GR.)	RET.	PASA
76.200	3 "				
63.500	2 1/2 "				
50.800	2 "	0.00	0.00	0.00%	100.00%
38.100	1 1/2 "	465.00	465.00	2.70%	97.30%
25.400	1 "	1128.00	1593.00	9.26%	90.74%
19.050	3/4 "	1672.00	3265.00	18.98%	81.02%
12.700	1/2 "	2451.00	5716.00	33.22%	66.78%
9.525	3/8 "	1234.00	6950.00	40.40%	59.60%
4.750	No. 4	2355.00	9305.00	54.08%	45.92%
Pasa No. 4		8745.00	7899.53		
2.000	No. 10	309.80	309.80	34.30%	30.17%
0.425	No. 40	325.00	634.80	70.27%	13.65%
0.075	No. 200	122.50	757.30	83.84%	7.42%
Fondo					
TOTAL			17204.53		



COMPONENTES	
GRAVA G =	54.08%
ARENA S =	38.49%
FINOS F =	7.42%

CLASIFICACION DEL SUELO	
SUCS:	GW - GM
AASHTO:	A - 2 - 4 (0)
IG:	0
Descripción:	Suelo gravoso - arenoso con limo
Características de material:	Sub Base

ING. LUIS MARIO ALMACHE
 REG. SENECYT: 1007-14-86052072

CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



Estudio de Suelos, material sub base pavimento rigido

LABORATORIO DE SUELOS
Ing. Luis Mario Almache

Proyecto: Pavimentación rigida de Prolongación de la Altiplano entre absc 0 + 000 y absc 0 + 142
Localización: Cantón Cuenca
Fecha: Julio del 2017
Tipo de material: Sub Base
Contratista: Ing. Hermel López
Fiscalizador: Ing. Cesar Maldonado

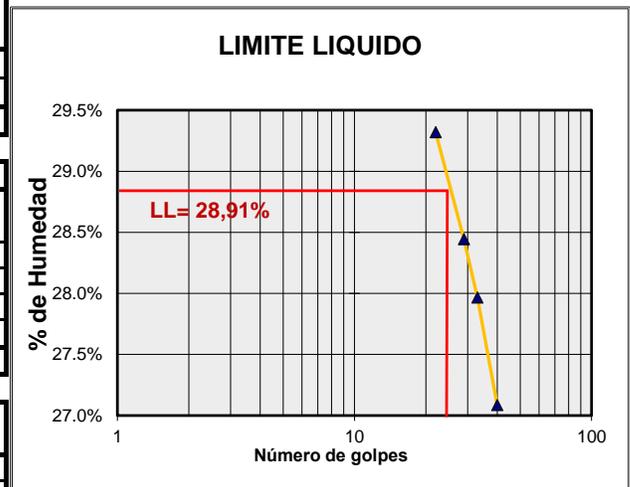
COORDENADAS UBICACIÓN
WGS84
Norte Este

ENSAYO LIMITES DE ATTERBERG

HUMEDAD NATURAL	TARRO N°	PESO HUM.(GR.)	PESO SECO. (GR.)	PESO CAPS.(GR.)	% HUMEDAD
	.01	170.32	159.05	53.68	10.70%
	.015	174.85	163.19	54.32	10.71%
Humedad natural					10.70%

LIMITE LIQUIDO					
TARRO N°	NUMERO GOLPES	PESO HUM.(GR.)	PESO SECO. (GR.)	PESO CAPS.(GR.)	% HUMEDAD
25	40	56.96	49.43	21.63	27.09%
11	33	54.96	47.77	22.06	27.97%
22	29	52.41	46.40	25.27	28.44%
13	22	48.92	42.76	21.75	29.32%
Límite Líquido					28.91%

LIMITE PLASTICO	TARRO N°	PESO HUM.(GR.)	PESO SECO. (GR.)	PESO CAPS.(GR.)	% HUMEDAD
	.05	15.70	15.08	12.22	21.68%
	10	15.04	14.52	12.16	22.03%
	.04	15.20	14.68	12.35	22.32%
	302	17.73	17.20	14.72	21.37%
Límite Plástico					21.85%



INDICE DE PLASTICIDAD 7.06%

% W_{nat}	10.70%
Lim Líqui =	28.91%
Lim Plást =	21.85%
IP =	7.06%

ING. LUIS MARIO ALMACHE
REG. SENEYCYT: 1007-14-86052072

CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



Estudio de Suelos, material sub base pavimento rígido

LABORATORIO DE SUELOS

Ing. Luis Mario Almache

Proyecto: Pavimentación rígida de Prolongación de la Altiplano entre absc 0 + 000 y absc 0 + 142
Localización: Cantón Cuenca
Fecha: Julio del 2017
Tipo de material: Sub Base
Contratista: Ing. Hermel López
Fiscalizador: Ing. Cesar Maldonado

COORDENADAS UBICACIÓN
WGS84
Norte Este

ENSAYOS DE COMPACTACION DE SUELOS

Volumen del molde (cc): 2172
Peso del molde (gr): 5955
Normativa: AASHTO T 180-70 (MODIFICADO)

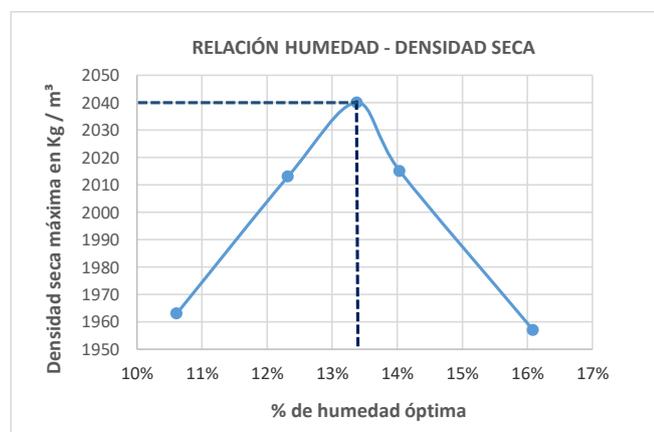
No. DE CAPAS	5				
MOLDE No.	1	2	3	4	5
MOLDE +SUELO HUM. (GR)	10,867	10,979	10,947	10,889	10,671
PESO MOLDE (GR)	5,955	5,955	5,955	5,955	5,955
PESO SUELO HUMEDO (GR)	4,912	5,024	4,992	4,934	4,716
VOLUMEN MOLDE (CM3)	2,172	2,172	2,172	2,172	2,172
DENSIDAD HUMEDA (KG/M3)	2,262	2,313	2,298	2,272	2,171

MOLDE No.	1	2	3	4	5
P. CAPSULA+SUELO HUM	138.42	162.56	159.21	174.76	112.30
P. CAPSULA+SUELO SECO	129.00	148.54	145.54	157.21	105.69
PESO CAPSULA	52.59	43.79	48.20	48.16	43.36
PORCENTAJE DE HUMEDAD	12.32%	13.38%	14.04%	16.09%	10.61%

DENSIDAD SECA (KG/M3)	2,013	2,040	2,015	1,957	1,963
-----------------------	-------	-------	-------	-------	-------

DENSIDAD SECA MÁXIMA (KG/M3)	2,040
------------------------------	-------

HUMEDAD OPTIMA	13.40%
----------------	--------

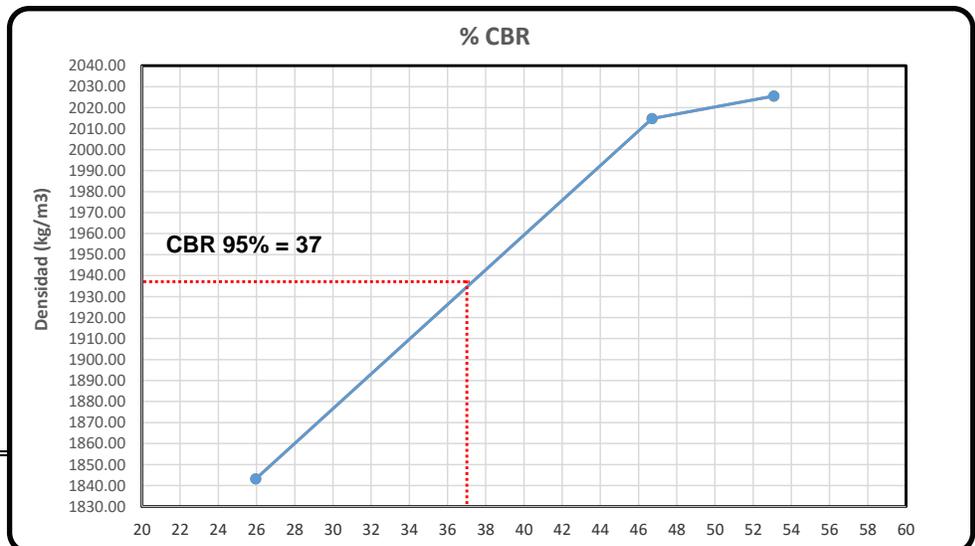
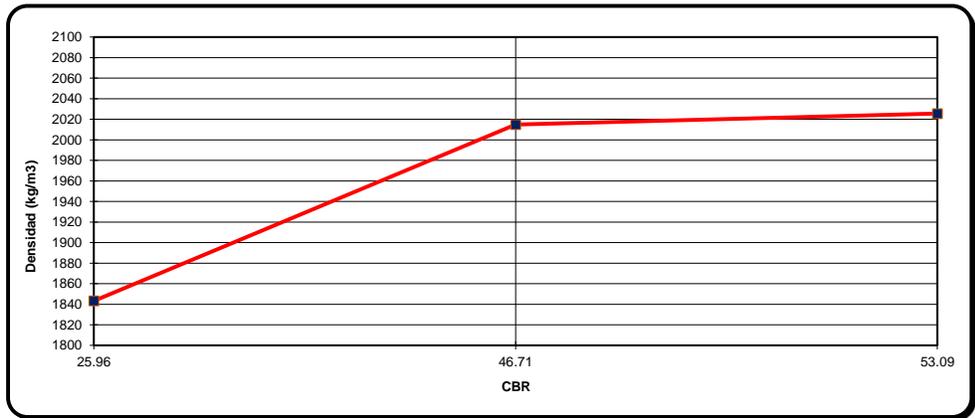
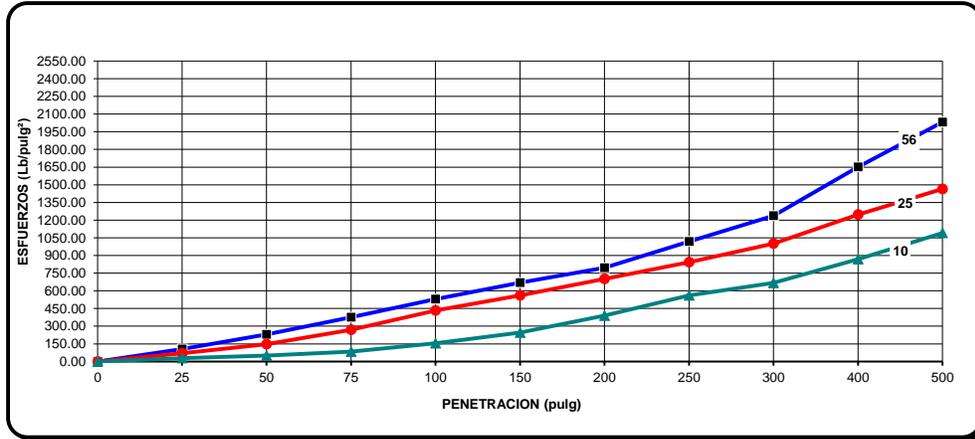


ING. LUIS MARIO ALMACHE
REG. SENECYT: 1007-14-86052072

CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



LABORATORIO DE SUELOS
Ing. Luis Mario Almache



Material: Sub-base
 Mina: VIPESA-SAN MARTÍN
 Contiene: Granulometría, Límites de A tterberg, Proctor, CBR

CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
 CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



Estudio de Suelos, material sub base pavimento rigido

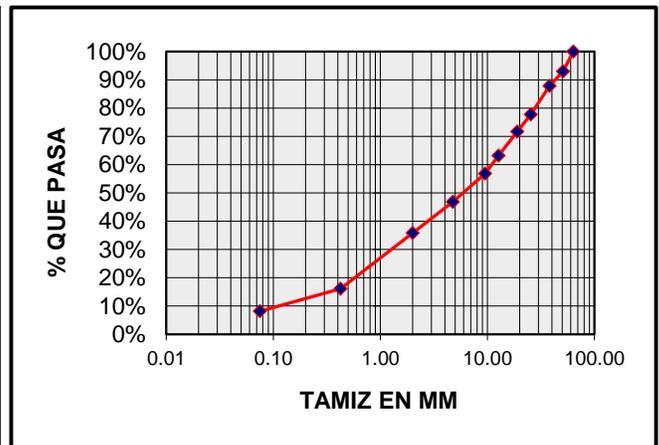
LABORATORIO DE SUELOS
Ing. Luis Mario Almache

Proyecto: Pavimentación de la Calle Luis A. Palacios, entre Av. Condor y ABS 0+129
Localización: Cantón
Fecha: Julio del 2017
Tipo de material: Sub Base
Contratista: Ing. Miltón Vintimilla
Fiscalizador: Ing. Cesar Maldonado

COORDENADAS UBICACIÓN
 WGS84
 Norte Este

ENSAYO DE GRANULOMETRIA NORMAS: AASHTO T-11 T-27 ASTM: D422-63

TAMIZ		P. RET.	P. RET.	%	%
M.M.	U.S	PARC. (GR.)	ACUM. (GR.)	RET.	PASA
76.200	3 "				
63.500	2 1/2 "	0.00	0.00	0.00%	100.00%
50.800	2 "	1487.50	1487.50	7.02%	92.98%
38.100	1 1/2 "	1089.00	2576.50	12.16%	87.84%
25.400	1 "	2142.00	4718.50	22.26%	77.74%
19.050	3/4 "	1283.00	6001.50	28.32%	71.68%
12.700	1/2 "	1796.00	7797.50	36.79%	63.21%
9.525	3/8 "	1345.00	9142.50	43.14%	56.86%
4.750	No. 4	2126.00	11268.50	53.17%	46.83%
Pasa No. 4		10344.00	9926.34		
2.000	No. 10	225.50	225.50	23.50%	35.83%
0.425	No. 40	403.30	628.80	65.53%	16.15%
0.075	No. 200	163.90	792.70	82.61%	8.15%
Fondo					
TOTAL			21194.84		



COMPONENTES	
GRAVA G =	53.17%
ARENA S =	38.69%
FINOS F =	8.15%

CLASIFICACION DEL SUELO	
SUCS:	GW - GM
AASHTO:	A - 2 -4 (0)
IG:	0
Descripción:	Suelo gravoso - arenoso con limo
Características de material:	Sub Base

ING. LUIS MARIO ALMACHE
 REG. SENECYT: 1007-14-86052072

CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



Estudio de Suelos, material sub base pavimento rígido

LABORATORIO DE SUELOS
Ing. Luis Mario Almache

Proyecto: Pavimentación de la Calle Luis A. Palacios, entre Av. Condor y ABS 0+129
Localización: Cantón Cuenca
Fecha: Julio del 2017
Tipo de material: Sub Base
Contratista: Ing. Miltón Vintimilla
Fiscalizador: Ing. Cesar Maldonado

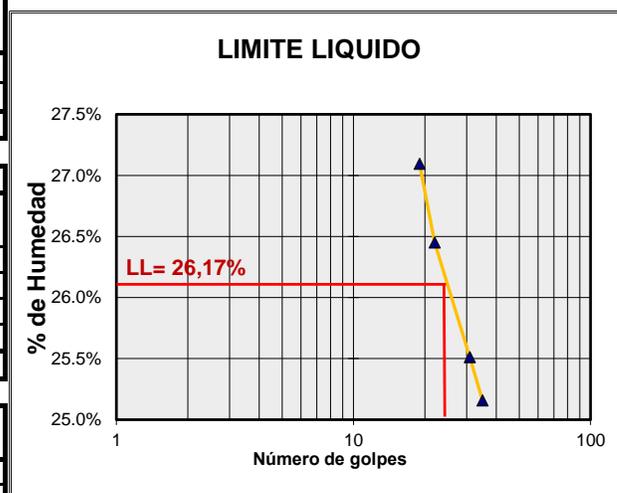
COORDENADAS UBICACIÓN
WGS84
Norte Este

ENSAYO LIMITES DE ATTERBERG

HUMEDAD NATURAL	TARRO N°	PESO HUM.(GR.)	PESO SECO. (GR.)	PESO CAPS.(GR.)	% HUMEDAD
	G.13	173.57	168.75	52.74	4.15%
022	154.03	149.88	52.47	4.26%	
Humedad natural					4.21%

LIMITE LIQUIDO					
TARRO N°	NUMERO GOLPES	PESO HUM.(GR.)	PESO SECO. (GR.)	PESO CAPS.(GR.)	% HUMEDAD
11	35	55.73	48.96	22.05	25.16%
13	31	49.94	44.21	21.75	25.51%
25	22	49.12	43.37	21.63	26.45%
22	19	54.54	48.30	25.27	27.10%
Límite Líquido					26.17%

LIMITE PLASTICO	TARRO N°	PESO HUM.(GR.)	PESO SECO. (GR.)	PESO CAPS.(GR.)	% HUMEDAD
	10	15.82	15.19	12.16	20.79%
302	18.27	17.65	14.72	21.16%	
4	15.43	14.91	12.35	20.31%	
5	15.06	14.58	12.21	20.25%	
Límite Plástico					20.63%



INDICE DE PLASTICIDAD 5.54%

% W_{nat}	4.21%
Lim Líquí =	26.17%
Lim Plást =	20.63%
IP =	5.54%

ING. LUIS MARIO ALMACHE
REG. SENECYT: 1007-14-86052072

CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



Estudio de Suelos, material sub base pavimento rígido

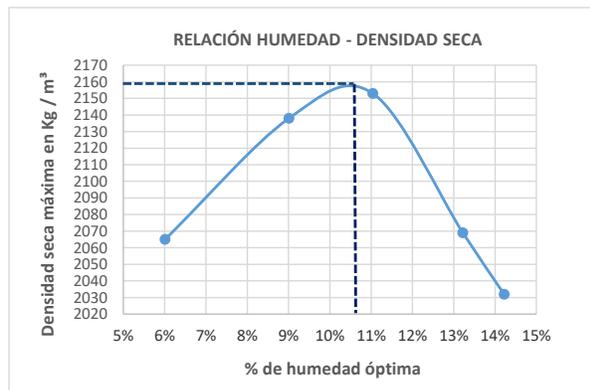
LABORATORIO DE SUELOS
Ing. Luis Mario Almache

Proyecto: Pavimentación de la Calle Luis A. Palacios, entre Av. Condor y ABS 0+129
Localización: Cantón Cuenca
Fecha: Julio del 2017
Tipo de material: Sub Base
Contratista: Ing. Miltón Vintimilla
Fiscalizador: Ing. Cesar Maldonado

COORDENADAS UBICACIÓN
WGS84
Norte Este

ENSAYOS DE COMPACTACION DE SUELOS

Volumen del molde (cc):	2172				
Peso del molde (gr):	5953				
Normativa:	AASHTO T 180-70 (MODIFICADO)				
No. DE CAPAS	5				
MOLDE No.	1	2	3	4	5
MOLDE +SUELO HUM. (GR)	11,041	11,145	11,015	10,707	10,994
PESO MOLDE (GR)	5,953	5,953	5,953	5,953	5,953
PESO SUELO HUMEDO (GR)	5,088	5,192	5,062	4,754	5,041
VOLUMEN MOLDE (CM3)	2,172	2,172	2,172	2,172	2,172
DENSIDAD HUMEDA (KG/M3)	2,343	2,390	2,331	2,189	2,321
MOLDE No.	1	2	3	4	5
P. CAPSULA+SUELO HUM	176.64	153.38	146.70	161.94	171.03
P. CAPSULA+SUELO SECO	161.65	143.36	138.64	155.77	155.71
PESO CAPSULA	48.27	52.58	49.14	53.21	47.98
PORCENTAJE DE HUMEDAD	13.22%	11.04%	9.01%	6.01%	14.22%
DENSIDAD SECA (KG/M3)	2,069	2,153	2,138	2,065	2,032
DENSIDAD SECA MÁXIMA (KG/M3)	2,160				
HUMEDAD OPTIMA	10.70%				



ING. LUIS MARIO ALMACHE
REG. SENECYT: 1007-14-86052072

CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



Estudio de Suelos, material sub base pavimento rígido

LABORATORIO DE SUELOS Ing. Luis Mario Almache

Proyecto Pavimentación de la Calle Luis A. Palacios, entre Av. Condor y ABS 0+129
Localización: Cantón Cuenca
Fecha: Julio del 2017
Tipo de material: Sub Base
Contratista: Ing. Milton Vintimilla
Fiscalizador: Ing. Cesar Maldonado

COORDENADAS UBICACIÓN
WGS84
Norte Este

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA C.B.R (ASTM D1883-73) MUESTRA REMOLDEADA

MOLDE Nº	1.2					
NUMERO DE CAPAS	5		5		5	
NUMERO DE GOLPES POR CAPA	56		25		10	
	ANTES DE SATURACION	DESPUES DE SATURACION	ANTES DE SATURACION	DESPUES DE SATURACION	ANTES DE SATURACION	DESPUES DE SATURACION
PESO MUESTRA+ MOLDE (gr)	12,088	12,153	11,358	11,447	12,272	12,377
PESO DEL MOLDE (gr)	6,518	6,518	6,032	6,032	6,977	6,977
PESO MUESTRA HUMEDA (gr)	5,570	5,635	5,326	5,415	5,295	5,400
VOLUMEN DE LA MUESTRA (gr/cm ³)	2,406	2,412	2,406	2,430	2,406	2,416
PESO VOL. HUMEDO (kg/m ³)	2,315	2,336	2,214	2,228	2,201	2,235
PESO VOL. SECO (kg/m ³)	2,101	2,113	2,012	2,015	1,979	2,003

CONTENIDO DE AGUA (Antes de saturación)

TARRO Nº	.026	.034	.022	.032	.015	.02
P.TARRO + MUESTRA HUMEDA	172.19	148.21	152.20	146.13	146.51	146.65
P. TARRO + MUESTRA SECA	161.11	138.57	143.18	136.80	137.23	137.12
PESO DEL AGUA	11.08	9.64	9.02	9.33	9.28	9.53
PESO DEL TARRO	52.73	43.94	52.46	44.24	54.34	52.28
PESO MUESTRA SECA	108.38	94.63	90.72	92.56	82.89	84.84
CONTENIDO DE HUMEDAD	10.22	10.19	9.94	10.08	11.20	11.23
HUMEDAD PROMEDIO	10.21		10.01		11.21	

CONTENIDO DE AGUA (después de saturación)

TARRO Nº	.026	.032	.020	.015	.022	.034
P.TARRO + MUESTRA HUMEDA	150.42	138.23	155.93	146.73	142.76	145.13
P. TARRO + MUESTRA SECA	141.12	129.23	146.01	137.90	133.39	134.62
PESO DEL AGUA	9.30	9.00	9.92	8.83	9.37	10.51
PESO DEL TARRO	52.70	44.25	52.27	54.33	52.46	43.94
PESO MUESTRA SECA	88.42	84.98	93.74	83.57	80.93	90.68
CONTENIDO DE HUMEDAD	10.52	10.59	10.58	10.57	11.58	11.59
HUMEDAD PROMEDIO	10.55		10.57		11.58	

CBR PARA EL 100% **81.19**
 CBR PARA EL 95% DE LA M.D.S **67.80**

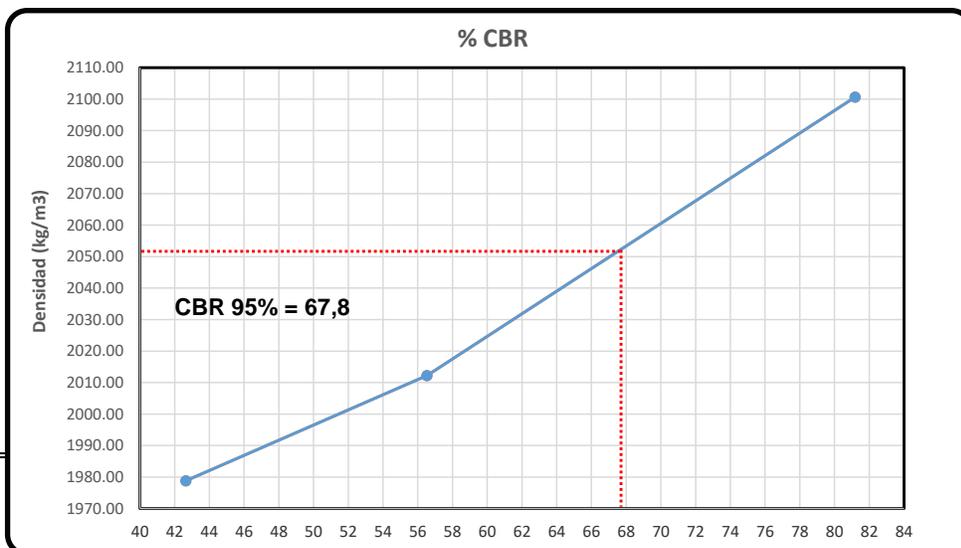
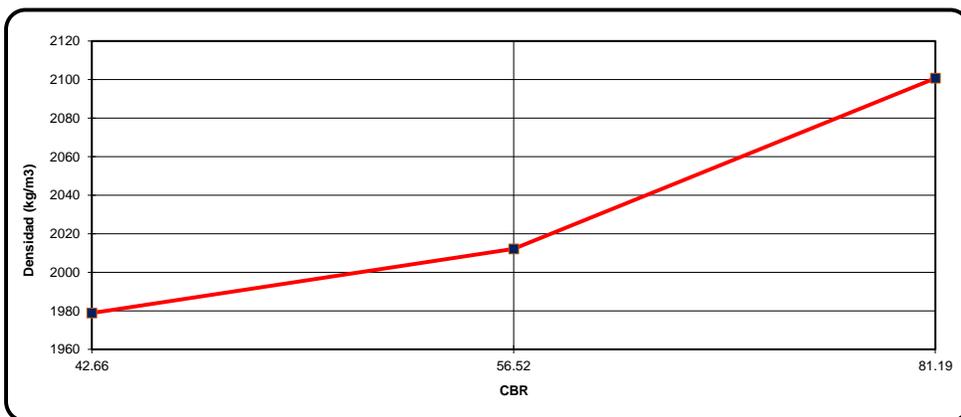
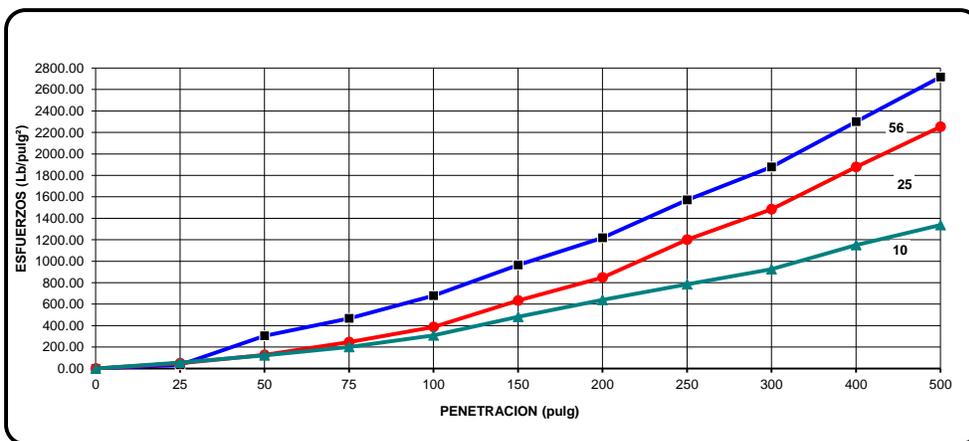
ING. LUIS MARIO ALMACHE
 REG. SENEYC: 1007-14-86052072

CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



LABORATORIO DE SUELOS

Ing. Luis Mario Almache



CONSULTORÍAS GEOLÓGICAS - GEOTÉCNICAS - GEOFÍSICAS
CONSTRUCCIÓN Y FISCALIZACIÓN DE OBRAS



Estudio de Suelos, material sub base pavimento rígido

LABORATORIO DE SUELOS Ing. Luis Mario Almache

Proyecto: Pavimentación de la Calle Luis A. Palacios, entre Av. Condor y ABS 0+129

Localización: Cantón Cuenca

Fecha: Julio del 2017

Tipo de material: Sub Base

Contratista: Ing. Milton Vintimilla

Fiscalizador: Ing. Cesar Maldonado

COORDENADAS UBICACIÓN
WGS84
Norte Este

Altura del molde : 5 pulg
Área del pistón : 3,1 pulg

ENSAYO C.B.R. (DATOS DE ESPONJAMIENTO Y PENETRACION)

MOLDE Nº (56 GOLPES)											
TIEMPO SATURAC. (días)	LECTURA DIAL PULG.	ALTURA MUESTRA PULG.	ESPONJAMIENTO		PENETRAC pulg.	CARGA Lb		PRESIONES Lb/pulg ²	PRESIONES CORREGI. Lb/pulg ²	PRESIONES STANDARD Lb/pulg ²	VALORES C.B.R
			PULG.	%							
0	0.0000	5.000	0.00	0.00	0	0.0	0	0.00			
1	0.0110	5.011	0.01	0.22	25	15.0	106	34.16			
2	0.0110	5.011	0.01	0.22	50	162.0	945	304.78			
3	0.0110	5.011	0.01	0.22	75	250.0	1447	466.78			
4	0.0130	5.013	0.01	0.26	100	365.0	2103	678.49	678.49	1000	67.85
5	0.0130	5.013	0.01	0.26	150	520.0	2988	963.83			
6	0.0130	5.013	0.01	0.26	200	658.0	3775	1217.88	1217.88	1500	81.19
7	0.0130	5.013	0.01	0.26	250	850.0	4871	1571.34			
8	0.0130	5.013	0.01	0.26	300	1017.0	5824	1878.78	1878.78	1900	98.88
9	0.0130	5.013	0.01	0.26	400	1246.0	7131	2300.35			
10	0.0130	5.013	0.01	0.26	500	1472.0	8421	2716.40			

MOLDE Nº (25 GOLPES)											
TIEMPO SATURAC. (días)	LECTURA DIAL mm.	ALTURA MUESTRA mm.	ESPONJAMIENTO		PENETRAC pulg.	CARGA Lb		PRESIONES Lb/pulg ²	PRESIONES CORREGI. Lb/pulg ²	PRESIONES STANDARD Lb/pulg ²	VALORES C.B.R
			mm.	%							
0	0.0000	5.0000	0.0000	0.0000	0	0.0	0	0.00			
1	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	25	23.0	152	48.89			
2	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	50	66.0	397	128.05			
3	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	75	130.0	762	245.87			
4	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	100	207.0	1202	387.62	387.62	1000	38.76
5	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	150	341.0	1966	634.30			
6	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	200	457.0	2628	847.85	847.85	1500	56.52
7	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	250	648.0	3718	1199.47			
8	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	300	802.0	4597	1482.98	1482.98	1900	78.05
9	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	400	1017.0	5824	1878.78			
10	0.0500	5.0500	0.0500	1.0000	500	1220.0	6983	2252.49			

MOLDE Nº (10 GOLPES)											
TIEMPO SATURAC. (días)	LECTURA DIAL mm.	ALTURA MUESTRA mm.	ESPONJAMIENTO		PENETRAC pulg.	CARGA Lb		PRESIONES Lb/pulg ²	PRESIONES CORREGI. Lb/pulg ²	PRESIONES STANDARD Lb/pulg ²	VALORES C.B.R
			mm.	%							
0	0.0000	5.0000	0.0000	0.0000	0	0.0	0	0.00			
1	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	25	27.0	174	56.25			
2	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	50	63.0	380	122.52			
3	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	75	105.0	620	199.84			
4	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	100	164.0	956	308.46	308.46	1000	30.85
5	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	150	258.0	1493	481.51			
6	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	200	344.0	1983	639.83	639.83	1500	42.66
7	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	250	423.0	2434	785.26			
8	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	300	499.0	2868	925.17	925.17	1900	48.69
9	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	400	621.0	3564	1149.77			
10	0.0200	5.0200	0.0200	0.4000	500	723.0	4146	1337.54			

ING. LUIS MARIO ALMACHE
REG. SENEYC: 1007-14-86052072

2. CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE LAS MINAS/CANTERAS OBJETO DE ESTUDIO EN BASE A ENSAYOS REALIZADOS POR EL AUTOR Y ESTUDIANTES DE LA ASIGNATURA DE PAVIMENTOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Material: Sub-base

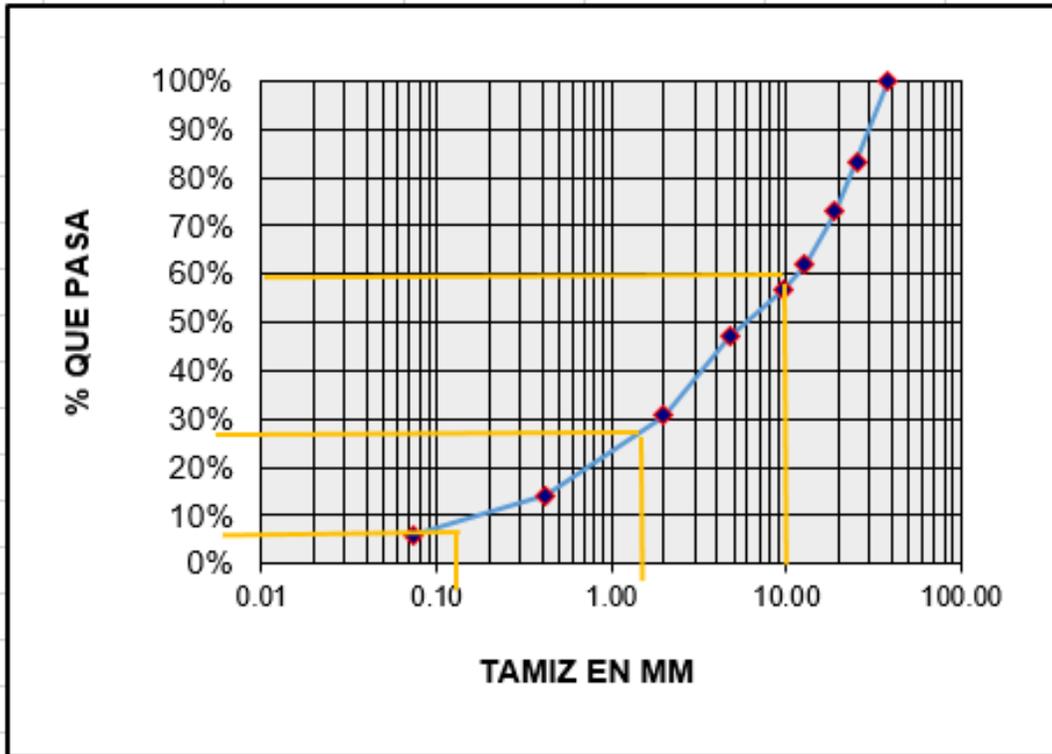
Mina: Roca Azul

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 1

Análisis granulométrico:

Tamiz #	Abert. mm	% que pasa
1 1/2"	38.1	100%
1"	25.4	83.3%
3/4"	19.1	73.0%
1/2"	12.7	61.8%
3/8"	9.52	56.5%
N°4	4.76	47.1%
10	2	30.70%
40	0.42	14.25%
200	0.074	5.98%



Obtención D10, D30 y D60 de gráfica de granulometría:

D10	0.2
D30	2
D60	11

Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura:

Cu	55
Cc	1.81818182

Estados de consistencia:

Límite líquido %	25
Límite plástico	22.72
Índice de plasticidad	2.28

Clasificación de suelos:

SUSCS:

GW - GM

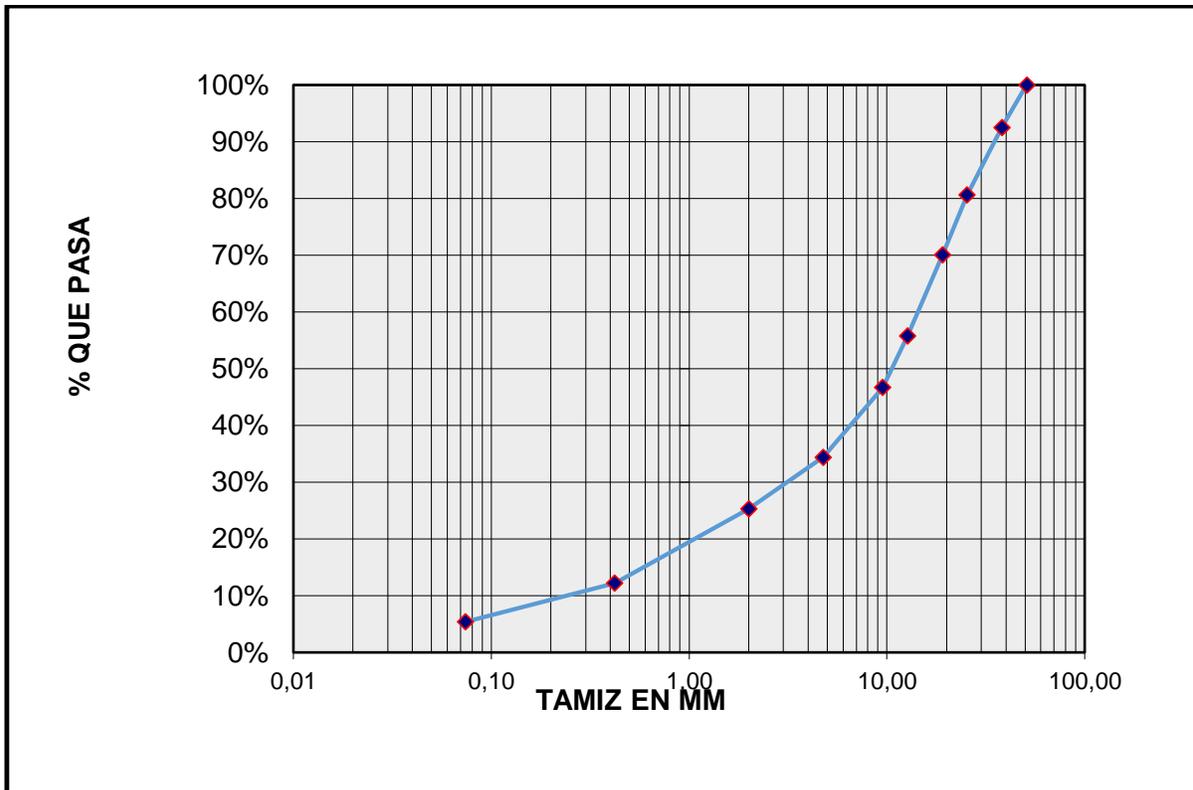
ASSHTO:

A-2-4(0)*Conclusión: Gravas bien graduados con limo de baja plasticidad.*Material: Sub-baseMina: Roca AzulContiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 2

Análisis granulométrico:

tamiz no	abert. Mm	% que pasa
2"	50.8	100%
1 1/2"	38.1	93%
1"	25.4	81%
3/4"	19.1	70%
1/2"	12.7	56%
3/8"	9.52	47%
Nº4	4.76	34%
10	2	25%
40	0.42	12%
200	0.074	5%



Estados de consistencia:

Límite Líquido	30.58
Límite Plástico	23.17
Índice de Plasticidad	7.41

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GC

AASHTO:

A-2-4(0)

Conclusión: Gravas bien graduadas con arcilla

Material: Sub-base

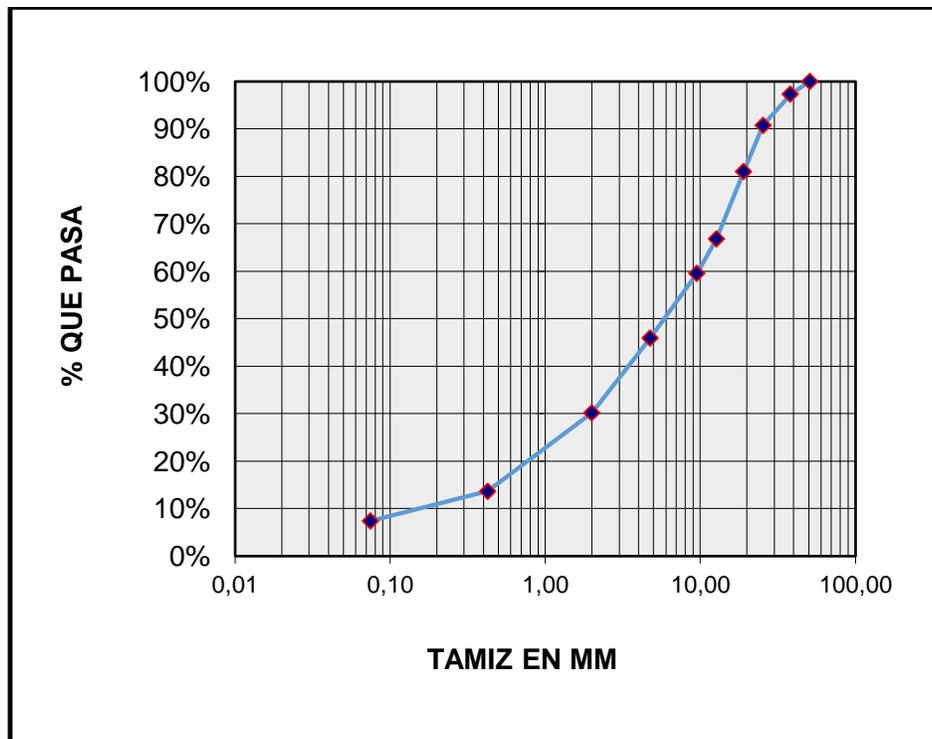
Mina: Roca Azul

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 3

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. mm	% q pasa
2 "	50.800	100.00%
1 1/2 "	38.100	97.30%
1 "	25.400	90.74%
3/4 "	19.050	81.02%
1/2 "	12.700	66.78%
3/8 "	9.525	59.60%
No. 4	4.750	45.92%
No. 10	2.000	30.17%
No. 40	0.425	13.65%
No. 200	0.075	7.42%



Estados de consistencia:

LL%	28.91
LP%	21.85
IP%	7.06

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GM

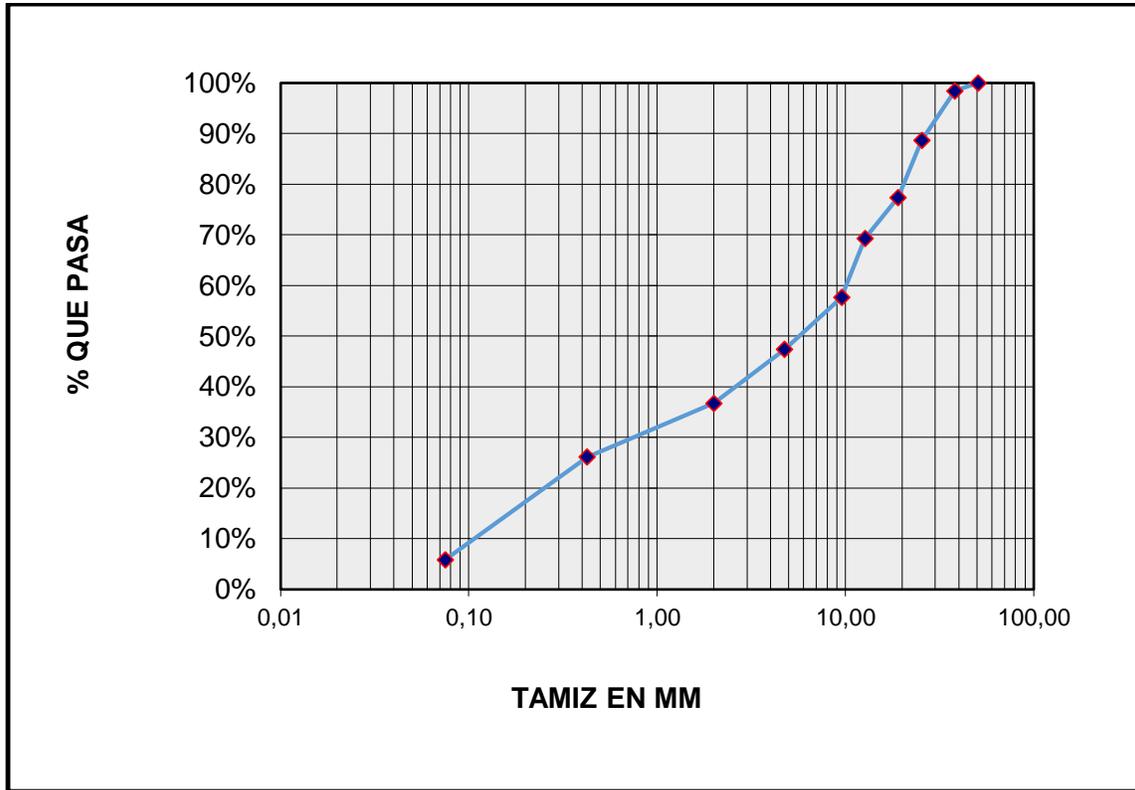
AASHTO:

A-2-4(0)*Conclusión: Gravas bien graduados con limo de baja plasticidad.*Material: Sub-baseMina: Roca AzulContiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 4

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. mm	% q pasa
2 "	50.800	100.00%
1 1/2 "	38.100	98.41%
1 "	25.400	88.67%
3/4 "	19.050	77.41%
1/2 "	12.700	69.28%
3/8 "	9.525	57.66%
No. 4	4.750	47.39%
No. 10	2.000	36.77%
No. 40	0.425	26.16%
No. 200	0.075	5.88%



Estados de consistencia:

LL%	27.830%
LP%	21.150%
IP%	6.680%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GM

AASHTO:

A-2-4(0)

Conclusión: Gravas bien graduados con limo de baja plasticidad.

Material: Sub-base

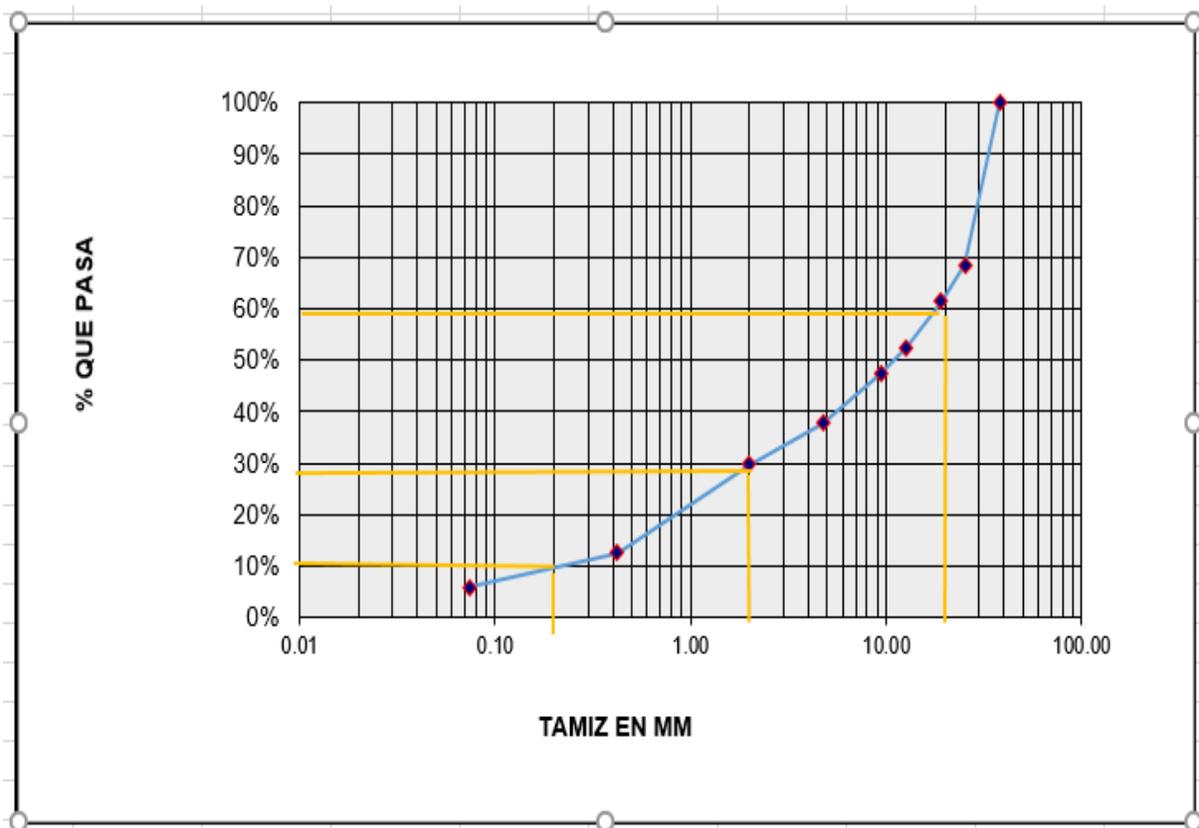
Mina: VIPESA-SAN MARTÍN

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 5

Análisis granulométrico:

tamiz no	abert. Mm	% q pasa
1 1/2"	38.1	100%
1"	25.4	68.6%
3/4"	19.1	61.4%
1/2"	12.7	52.5%
3/8"	9.52	47.4%
N°4	4.76	37.8%
10	2	29.77%
40	0.42	12.55%
200	0.074	5.90%



D10, D30 Y D60 obtenido de la gráfica de granulometría:

D10	0.2
D30	2
D60	20

Coefficientes de Uniformidad y de Curvatura:

Cu	100
Cc	1

Estados de consistencia:

LL	22.8%
LP	17.04%
IP	5.7600%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GM

AASHTO:

A-1-B (0)

Conclusión: Gravas bien graduados con limo de baja plasticidad.

Material: Sub-base

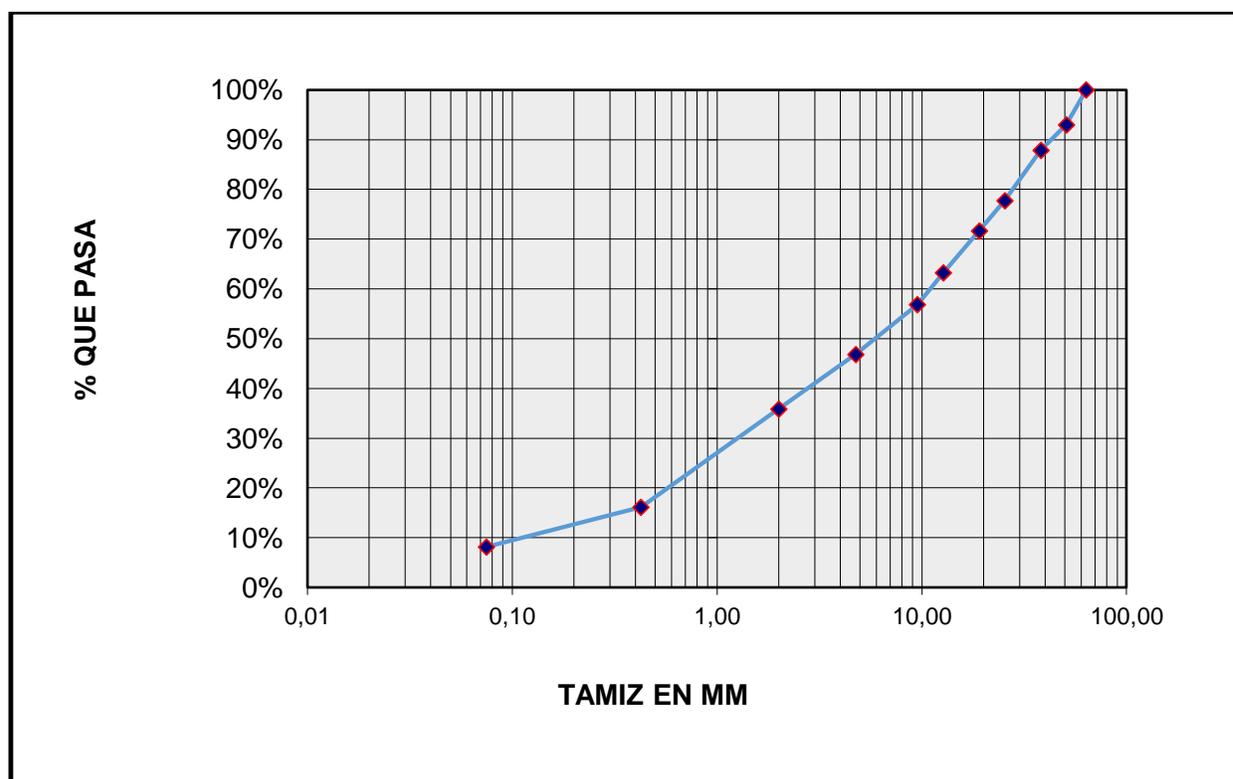
Mina: VIPESA-SAN MARTÍN

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 6

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. Mm	% q pasa
2 1/2 "	63.500	100.00%
2 "	50.800	92.98%
1 1/2 "	38.100	87.84%
1 "	25.400	77.74%
3/4 "	19.050	71.68%
1/2 "	12.700	63.21%
3/8 "	9.525	56.86%
No. 4	4.750	46.83%
No. 10	2.000	35.83%
No. 40	0.425	16.15%
No. 200	0.075	8.15%



Estados de consistencia:

LL	26.17%
LP	20.63%
IP	5.5400%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GM

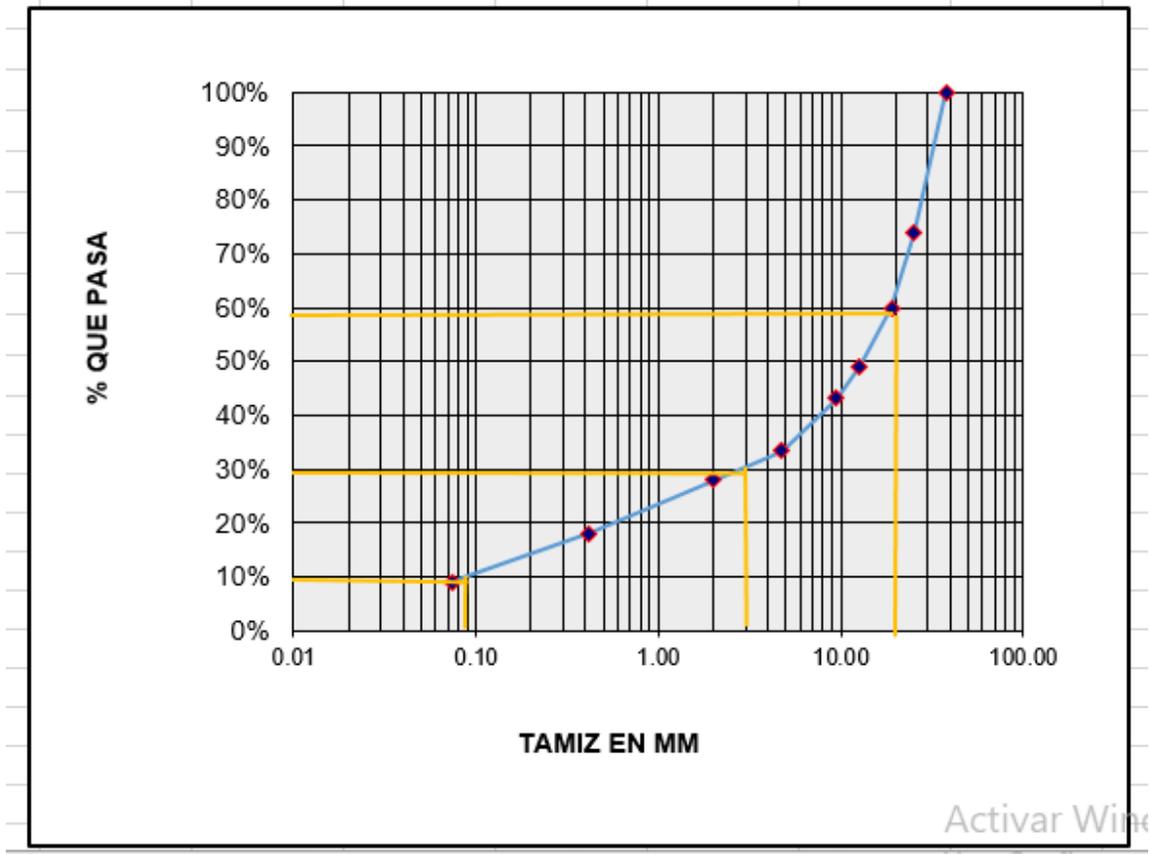
AASHTO:

A-2-4 (0)*Conclusión: Gravas bien graduados con limo de baja plasticidad.*Material: Sub-baseMina: HORMICRETOContiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 6

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. Mm	% que pasa
1 1/2"	38.1	100%
1"	25.4	73.98%
3/4"	19.1	59.89%
1/2"	12.7	49.06%
3/8"	9.52	43.13%
Nº4	4.76	33.37%
10	2	28.00%
40	0.42	18.00%
200	0.074	9.00%



Determinación D10, D30 Y D60 de gráfica de granulometría:

D10	0.1
D30	3
D60	20

Estados de consistencia:

LL	25.1%
LP	20.97%
IP	4.13%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GP-GM

AASHTO:

A-1-B (0)

Conclusión: Gravas mal graduados con limo de baja plasticidad.

Material: Sub-base

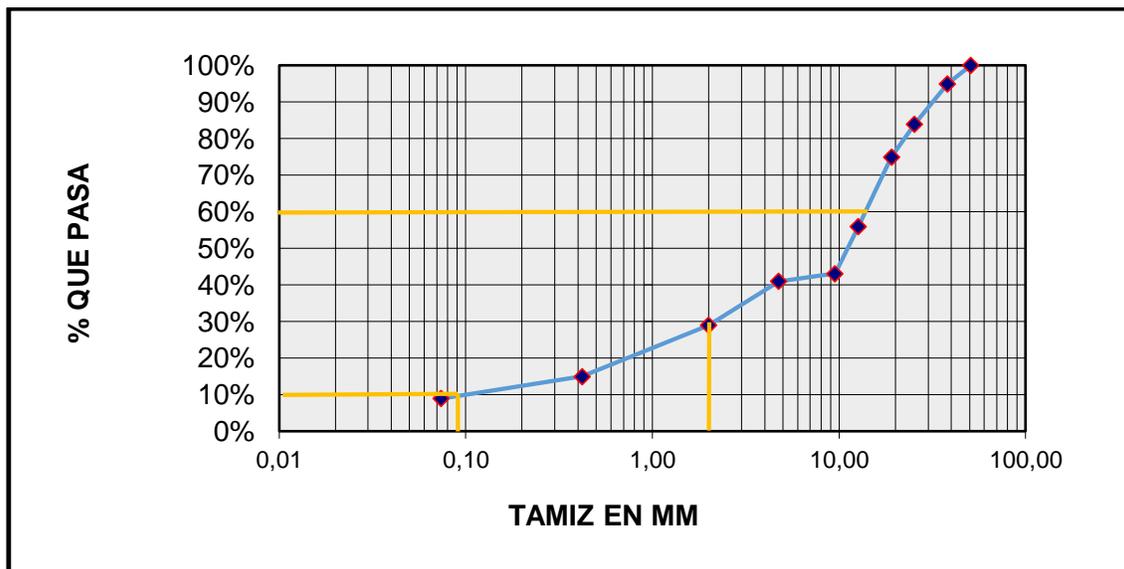
Mina: HORMICRETO

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 7

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. Mm	% que pasa
2"	50.8	100%
1 1/2"	38.1	95%
1"	25.4	84.00%
3/4"	19.1	75.00%
1/2"	12.7	56.00%
3/8"	9.52	43.13%
Nº4	4.76	41.00%
10	2	29.00%
40	0.42	15.00%
200	0.074	9.00%



Determinación: D10, D30 y D60 de gráfica anterior:

D10	0.097
D30	2
D60	14

Estados de consistencia:

NP

Coefficiente de Uniformidad y Curvatura:

Cu	144.3299
Cc	2.9455081

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW

AASHTO:

A-1-a (0)

Conclusión: Gravas bien graduadas

Material: Sub-base

Mina: Sr. Trelles

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 7

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. Mm	% que pasa
2'''	50.8	100%
1 1/2"	38.1	98.92%
1"	25.4	89.59%
3/4"	19.1	76.95%
1/2"	12.7	67.7%
3/8"	9.52	56.2%
Nº4	4.76	47.4%
10	2	36.76%
40	0.42	26.15%
200	0.074	5.80%

Estados de consistencia:

LL	26.15%
LP	21.23%
IP	4.92%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GC

AASHTO:

A-1-(0)

Conclusión: Gravas limosas

Material: Sub-base

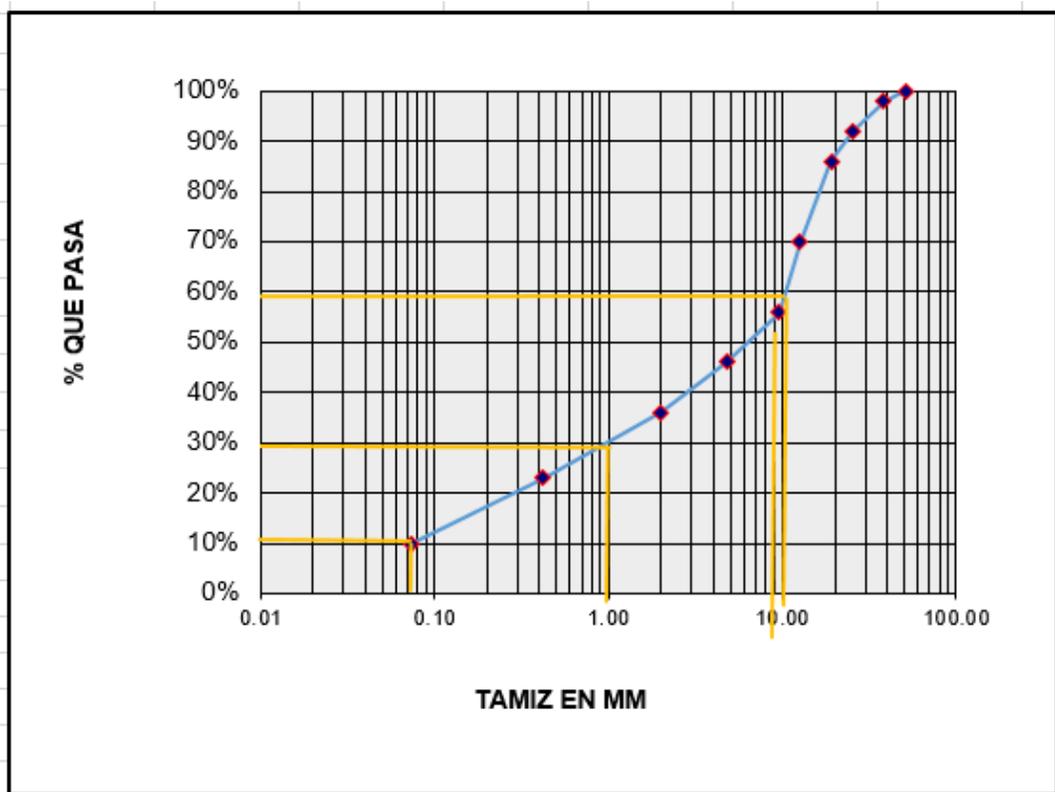
Mina: Sr. Trelles

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 8

Análisis granulométrico:

tamiz no	abert. Mm	% que pasa
2'''	50.8	100%
1 1/2"	38.1	98.00%
1"	25.4	92.00%
3/4"	19.1	86.00%
1/2"	12.7	70.0%
3/8"	9.52	56.0%
Nº4	4.76	46.0%
10	2	36.00%
40	0.42	23.00%
200	0.074	10.00%



Determinación: D10, D30 y D60 de gráfica anterior:

D10	0.07
D30	1.1
D60	12

Estados de consistencia:

LL	29.06%
LP	18.03%
IP	11.03%

Coeficiente de Uniformidad y Curvatura:

Cu	171
Cc	1.44

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GC

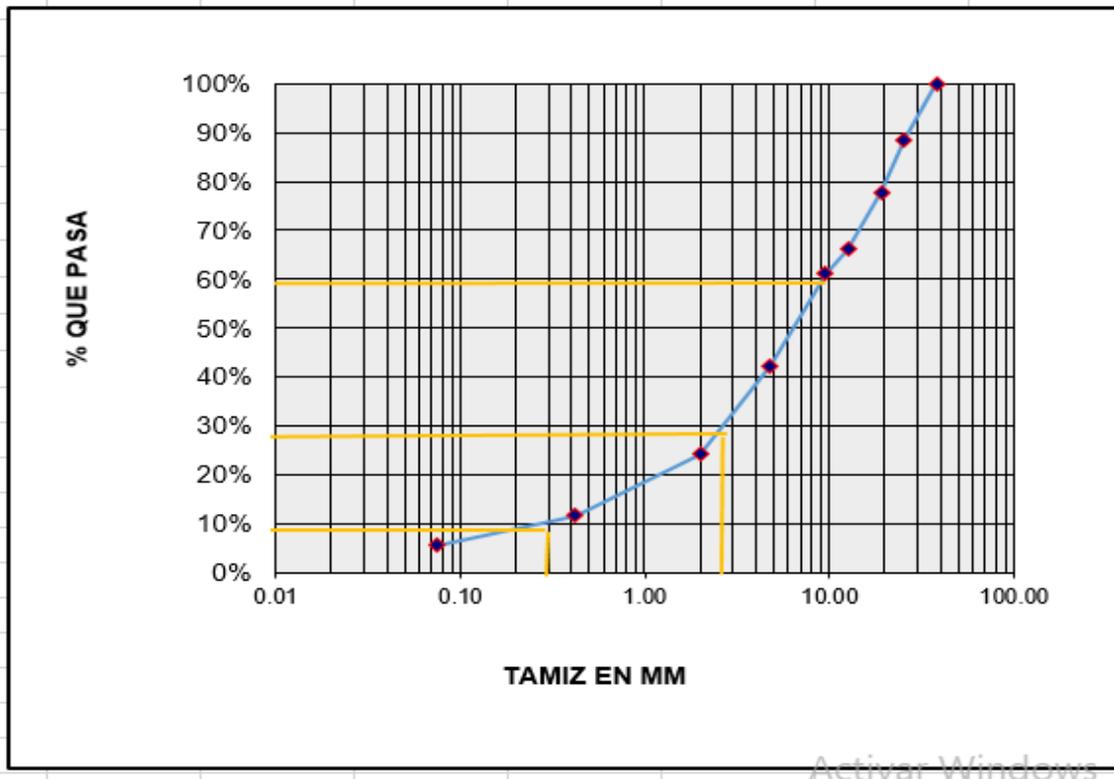
AASHTO:

A-2-6 (0)*Conclusión: Gravas arcillosas bien graduadas*Material: BaseMina: "Roka Azul"Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 8

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. Mm	% que pasa
1 1/2"	38.1	100%
1"	25.4	88.5%
3/4"	19.1	77.8%
1/2"	12.7	66.1%
3/8"	9.52	61.2%
Nº4	4.76	42.4%
10	2	24.14%
40	0.42	11.69%
200	0.074	5.55%



D10, D30, D60, Coeficiente de Uniformidad y Curvatura:

D10	0.3
D30	1.7
D60	10
Cu	33.333333
Cc	0.9633333

Estados de consistencia:

NP

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW

AASHTO:

A-3 (0)

Conclusión: Gravas bien graduadas

Material: Base

Mina: "Roka Azul"

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 9

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. Mm	% que pasa
1 1/2"	38.1	100.00%
1"	25.4	88.30%
3/4"	19.1	81.80%
1/2"	12.7	74.30%
3/8"	9.52	70.80%
Nº4	4.76	59.00%
10	2	40.40%
40	0.42	17.10%
200	0.074	7.10%

Estados de consistencia:

LL	25.35%
LP	21.830%
IP	3.5200%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

SW-SM

AASHTO:

A-1-a (0)

Conclusión: Arenas bien graduadas con presencia de limo de baja plasticidad.

Material: Base

Mina: "Roka Azul"

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 10

Análisis granulométrico:

tamiz no	abert. Mm	% que pasa
2"	50.8	100.00%
1 1/2"	38.1	95.80%
1"	25.4	79.60%
3/4"	19.1	69.20%
1/2"	12.7	56.50%
3/8"	9.52	51.20%
N°4	4.76	61.10%
10	2	28.40%
40	0.42	13.20%
200	0.074	6.30%

Estados de Consistencia:

LL	30.880%
LP	22.160%
IP	8.720%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GC

AASHTO:

A-2-4 (0)

Conclusión: Gravas bien graduadas con presencia de arcillas.

Material: Base

Mina: "Roka Azul"

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 11

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. Mm	% que pasa
2 "	50.800	100.00%
1 1/2 "	38.100	98.73%
1 "	25.400	88.97%
3/4 "	19.050	77.62%
1/2 "	12.700	67.36%
3/8 "	9.525	58.09%
No. 4	4.750	47.60%
No. 10	2.000	36.94%
No. 40	0.425	26.28%
No. 200	0.075	5.90%

Estados de consistencia:

LL	26.900%
LP	20.070%
IP	6.830%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GC

AASHTO:

A-2 (0)

Conclusión: Gravas con presencia de arcilla

Material: Base

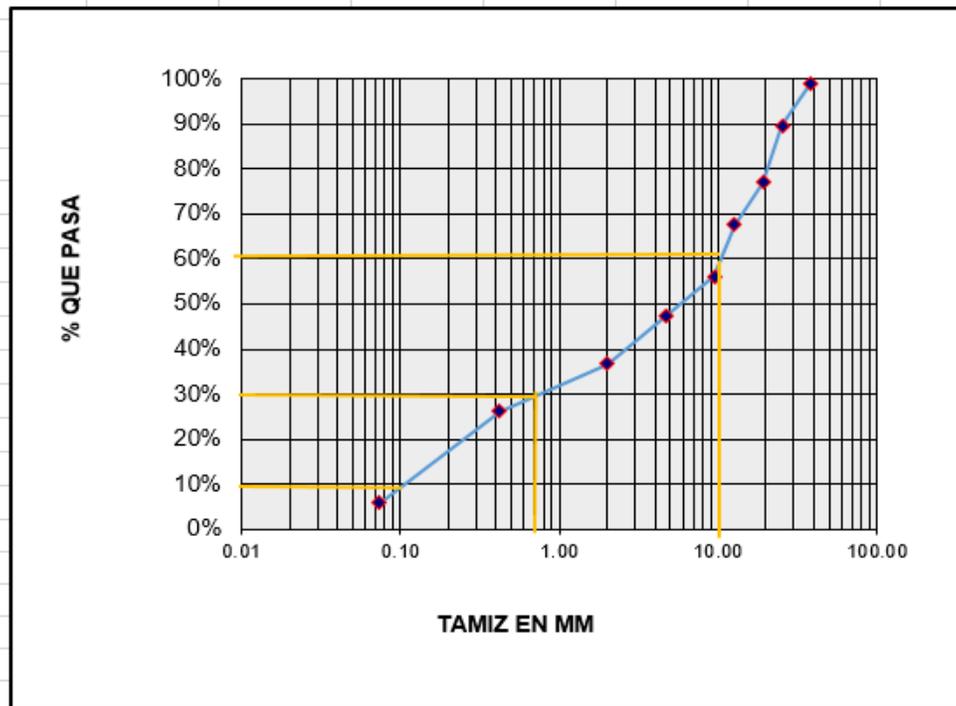
Mina: “VIPESA-SAN MARTÍN”

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 12

Análisis granulométrico:

tamiz no	abert. Mm	% que pasa
1 1/2"	38.1	100.00%
1"	25.4	91.50%
3/4"	19.1	79.00%
1/2"	12.7	68.70%
3/8"	9.52	64.80%
Nº4	4.76	52.90%
10	2	24.84%
40	0.42	11.43%
200	0.074	5.68%



D10, D30 y, D60:

D10	0.1
D30	0.7
D60	11

Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura:

Cu	110
Cc	0.4454545

Estados de consistencia:

NP

Clasificación de Suelos:

SUCS:

SP

AASHTO:

A-3 (0)

Conclusión: Arenas mal graduadas sin presencia de limo y arcilla.

Material: Base

Mina: "VIPESA-SAN MARTÍN"

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 13

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. Mm	% que pasa
1 1/2 "	38.100	100.00%
1 "	25.400	89.00%
3/4 "	19.050	76.00%
3/8 "	9.525	54.00%
No. 4	4.750	39.00%
No. 10	2.000	18.00%
No. 40	0.425	8.00%
No. 200	0.075	4.00%

Estados de consistencia:

NP

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW

AASHTO:

A-1-a (0)

Conclusión: Gravas bien graduadas

Material: Base

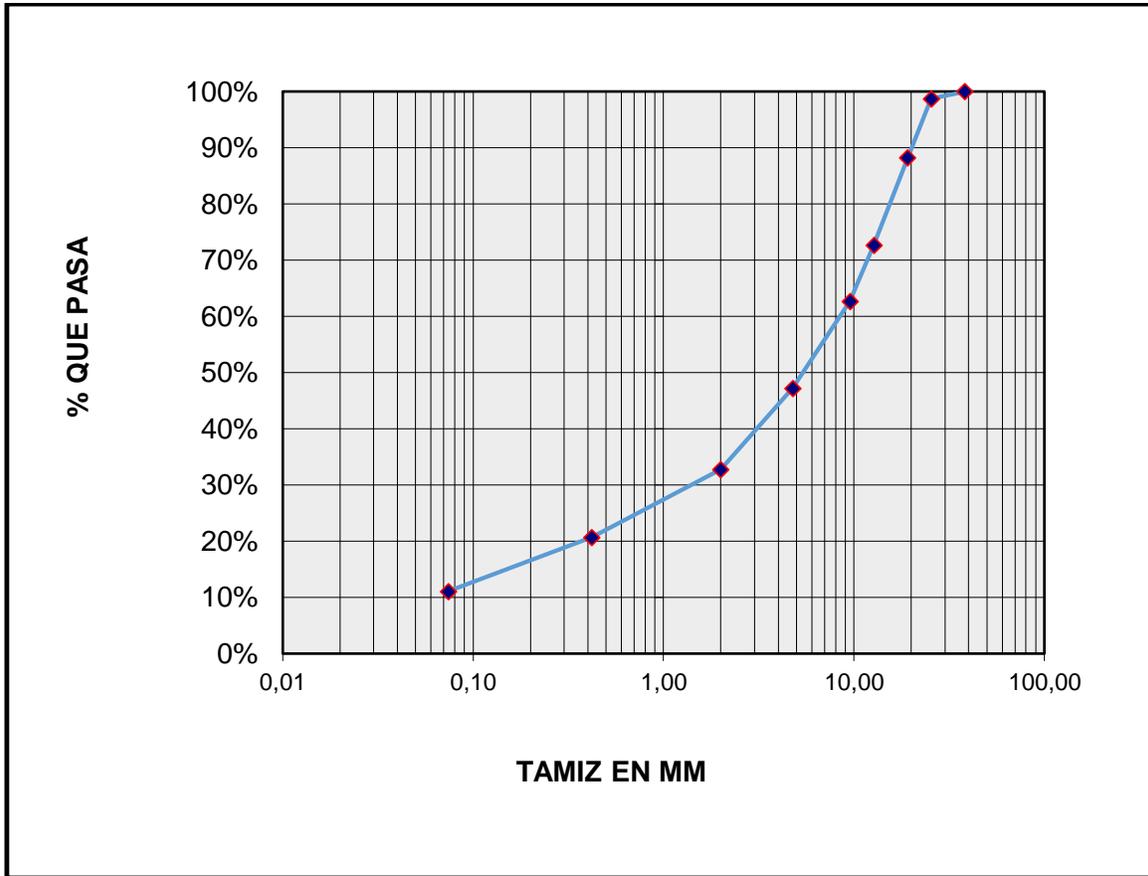
Mina: "Hormicroto"

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 14

Análisis granulométrico:

tamiz no	abert. mm	% que pasa
1 1/2"	38.1	100.00%
1"	25.4	98.70%
3/4"	19.1	88.20%
1/2"	12.7	72.70%
3/8"	9.52	62.70%
Nº4	4.76	47.20%
10	2	32.80%
40	0.42	20.69%
200	0.074	11.10%



Determinación D10, D30 y, D60 en función de gráfica anterior:

d60	9
d10	0.075
d30	1.20

Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura:

Cu	120
Cc	2.1333333

Estados de Consistencia:

LL	24.500%
LP	20.160%
IP	4.400%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GM

AASHTO:

A-1-b (0)

Conclusión: Gravas bien graduadas con limo de baja plasticidad

Material: Base

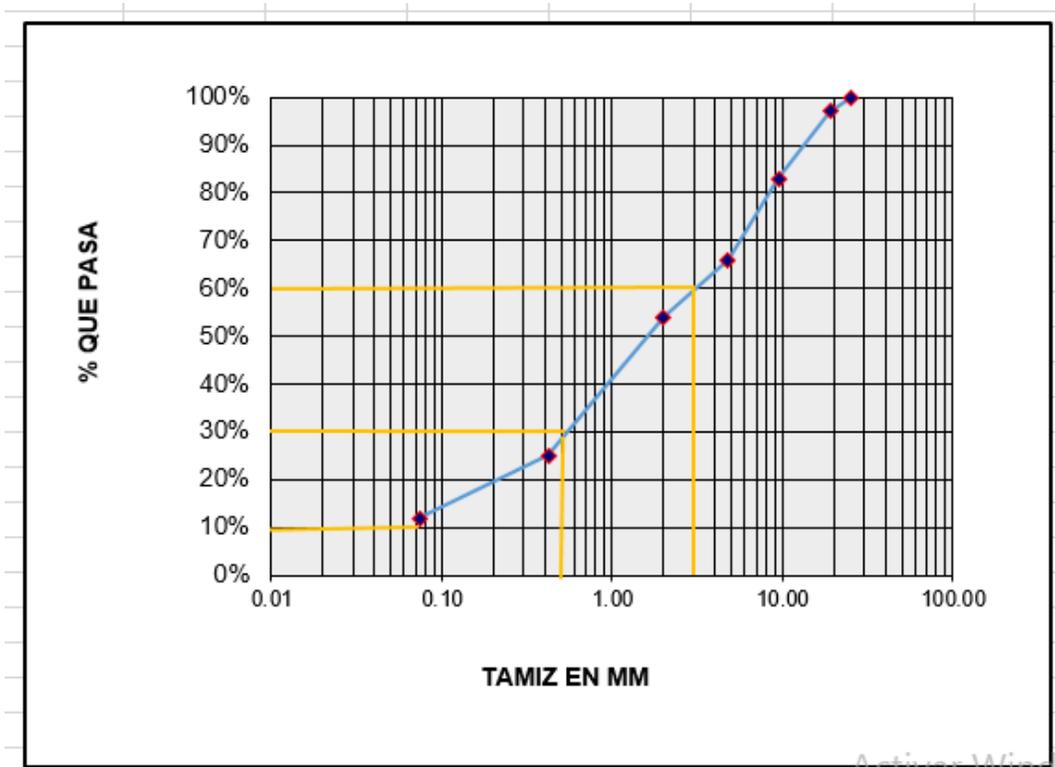
Mina: "Hormicroto"

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 15

Análisis granulométrico:

tamiz #	abert. mm	% que pasa
1 1/2"	38.1	100%
1"	25.4	100%
3/4"	19.1	97%
3/8"	9.52	83%
Nº4	4.76	66%
10	2	54%
40	0.42	25%
200	0.074	12%



Determinación D10, D30 y, D60 en función de gráfica anterior:

d60	3
d10	0.075
d30	0.5

Coefficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura:

Cu	40
Cc	4.11

Estados de Consistencia:

NP

Clasificación de Suelos:

SUCS:

SW

AASHTO:

A-3 (0)

Conclusión: Arenas bien graduadas sin presencia de plasticidad.

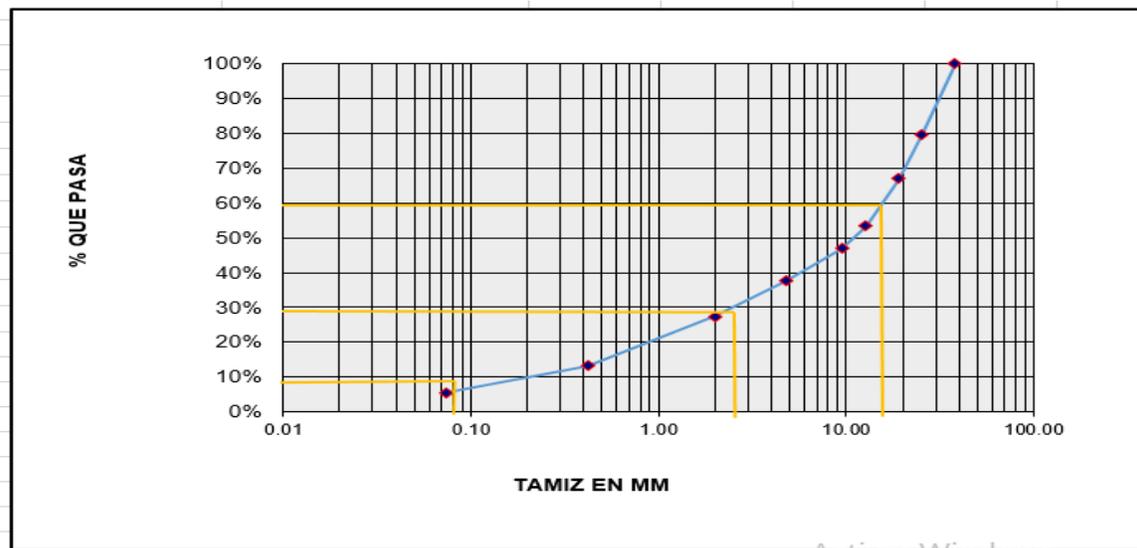
Material: Base

Mina: Sr. Trelles

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 16

tamiz #	abert. Mm	% q pasa
1 1/2"	38.1	100%
1"	25.4	79.7%
3/4"	19.1	67.0%
1/2"	12.7	53.4%
3/8"	9.52	47.0%
Nº4	4.76	37.6%
10	2	27.45%
40	0.42	13.30%
200	0.074	5.56%



Determinación D10, D30 y, D60 en función de gráfica anterior:

d60	17
d10	0.08
d30	2.5

Coefficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura:

Cu	212
Cc	4.6

Estados de Consistencia:

LL	27.5%
LP	22.72%
IP	4.78%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-ML

AASHTO:

A-1 (0)

Conclusión: Gravas bien graduadas con presencia de limos de baja plasticidad.

Material: Base

Mina: Sr. Trelles

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 17

Análisis Granulométrico:

tamiz #	abert. Mm	% que pasa
2"		100%
1 1/2"	38.1	92.00%
1"	25.4	86.00%
3/4"	19.1	80.00%
1/2"	12.7	72.00%
3/8"	9.52	63.00%
Nº4	4.76	46.00%
10	2	38.00%
40	0.42	26.00%
200	0.074	11.00%

Estados de Consistencia:

LL	29.850%
LP	20.880%
IP	8.970%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GM

AASHTO:

A-1 (0)

Conclusión: Gravas bien graduadas con presencia de limos de baja plasticidad.

Material: Base

Mina: Sr. Trelles

Contiene: Granulometría, Límites, clasificación de suelos: Método SUCS Y AASHTO

Análisis # 18

Análisis Granulométrico:

tamiz no	abert. Mm	% que pasa
2"		100%
1 1/2"	38.1	97.81%
1"	25.4	88.83%
3/4"	19.1	80.61%
1/2"	12.7	70.28%
3/8"	9.52	58.38%
N°4	4.76	48.28%
10	2	37.47%
40	0.42	26.65%
200	0.074	5.99%

Estados de Consistencia:

LL	23.890%
LP	20.620%
IP	3.270%

Clasificación de Suelos:

SUCS:

GW-GM

AASHTO:

A-1 (0)

Conclusión: Gravas bien graduadas con presencia de limos de baja plasticidad.



PERMISO DEL AUTOR DE TESIS PARA SUBIR AL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Christian Miguel Pacheco Rodríguez**, portador de la cédula de ciudadanía N° **010548353-1**, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE MATERIALES GRANULARES UTILIZADOS EN LA CIUDAD DE CUENCA”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 del 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, 31 de julio de 2018

.....
Christian Miguel Pacheco Rodríguez

C.I.: **010548353-1**