



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

TEMA:

Investigación bibliográfica y aplicación de método para encontrar correlación entre módulo resiliente de materiales granulares comercializados en el Cantón Cuenca

Autor:

Michael Alonso Bravo Cabrera

Director:

Ing. Luis Mario Almache Sánchez. Msc.

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

CUENCA- ECUADOR

Marzo – 2019



DECLARACIÓN:

Yo, Michael Alonso Bravo Cabrera; 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.

Michael Bravo

Autor: Michael Alonso Bravo Cabrera

C.I. 1750539437



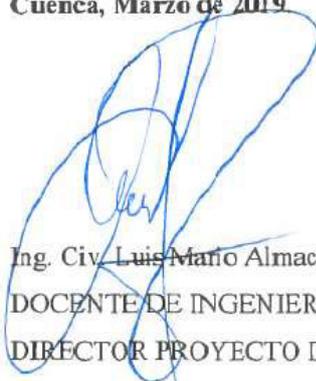
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

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

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación denominado **“INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA Y APLICACIÓN DE MÉTODO PARA ENCONTRAR CORRELACIÓN ENTRE MÓDULO RESILIENE DE MATERIALES GRANULARES COMERCIALIZADOS EN EL CANTÓN CUENCA”**, realizado por BRAVO CABRERA MICHAEL ALONSO ha sido revisado y orientado durante su ejecución, por lo que certificó que el presente documento, se sujeta a las normas éticas de investigación, por lo que está expedito para su sustentación.

Cuenca, Marzo de 2019



Ing. Civ. Luis Mario Almache Sánchez. Msc.
DOCENTE DE INGENIERÍA CIVIL
DIRECTOR PROYECTO DE TITULACIÓN



DEDICATORIA

A mi familia por ser un pilar fundamental en todo mi camino. A mis hijos por llenarme de paz y de alegría. A Dios nuestro señor por permitir que cada meta sea cumplida.



EPÍGRAFE

“Dios usó hermosas matemáticas en la creación del mundo”.

Paul Dirac



AGRADECIMIENTO

A mis hijos por la fuerza que de ellos recibo, a mi familia por todo su apoyo porque desde pequeño me enseñaron el valor de la educación, a cada uno de mis docentes que con paciencia me han transmitido sus conocimientos a lo largo de mi vida profesional.



LISTA DE ABREVIATURAS

E.T.E.: Equipo triaxial estático.

E.T.D.: Equipo triaxial dinámico.

M.r.: Modulo/s resiliente/s

CBR: Valor soporte california

LED: Laboratorios de ensayos dinámicos.



RESUMEN

Las redes viales terrestres constituyen sectores estratégicos de la economía de las naciones, éstas, día a día se encuentran en constante crecimiento y son fundamentales para el desarrollo de los pueblos. Investigaciones referentes a sus métodos de diseño y construcciones, son desarrolladas constantemente definiendo el comportamiento de los elementos constitutivos de los pavimentos frente a las cargas de diseño, a los fenómenos de intemperismo, temperaturas extremas, entre otros.

A menudo, estos comportamientos debido a los fenómenos descritos son expresados mediante variables que toman distintos valores en función de la localización de la red vial. Estos valores numéricos son obtenidos tras la realización de ensayos de laboratorio que simulen las condiciones a las que serán sometidos los elementos estructurales constituyentes del pavimento durante su periodo de diseño.

Este proyecto de investigación, está orientado a determinar una relación entre las variables del valor del M. r. y el valor de CBR para materiales granulares comercializados en la ciudad de Cuenca, para ello se siguió dos directrices: La primera, encaminada al enfoque de literatura existente que guarde sustancial afinidad con los materiales granulares, con los procedimientos utilizados para determinar el valor del M.r., así como expresiones matemáticas afines. La segunda, orientada a la determinación de las propiedades físico mecánicas de muestras de materiales granulares, ejecutando ensayos de laboratorio amparados en la normas vigentes. Estas metodologías permitieron determinar los valores de los módulos resilientes y capacidades de resistencia al cortante de los materiales analizados.

Los resultados obtenidos posibilitaron generar procedimientos estadísticos de regresión exponencial para encontrar un modelo que permite determinar el valor del M.r. a través de CBR para materiales granulares comercializados en Cuenca.

PALABRAS CLAVE: MÓDULO RESILIENTE, CBR, PAVIMENTOS FLEXIBILES, MÉTODOLÓGÍA AASHTO, ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO, CORRELACIÓN, REGRESIÓN ESTADÍSTICA, LABORATORIO DE SUELOS, CICLOS DE CARGA.



ABSTRACT

The terrestrial road networks constitute strategic sectors of the economy of the nations, these, day by day are in constant growth and are fundamental for the development of people. Research concerning its design methods and constructions, are constantly developed defining the behavior of the constituent elements of the pavements in front of design loads, weathering phenomena, extreme temperatures, among others.

Often, these behaviors due to the phenomena described are expressed by variables that take different values depending on the location of the road network. These numerical values are obtained after carrying out laboratory tests that simulate the conditions to which the constituent structural elements of the pavement will be submitted during its design period.

This research project is aimed at determining a relationship between the variables of the value of M_r and the value of CBR for granular materials marketed in the city of Cuenca, for this two guidelines were followed: The first one, aimed at the approach of existing literature that keeps substantial affinity with granular materials, with the procedures used to determine the value of M_r , as well as related mathematical expressions. The second, aimed at determining the physical and mechanical properties of samples of granular materials, performing laboratory tests covered by current standards. These methodologies allowed determining the values of the resilient modules and shearing strength capacities of the materials analyzed.

The obtained results made it possible to generate statistical procedures of exponential regression to find a model that allows determining the value of M_r through CBR for granular materials marketed in Cuenca.

KEYWORDS: RESILIENT MODULE, CBR, FLEXIBLE PAVEMENTS, AASHTO METHODOLOGY, CYCLICAL TRIAXIAL TRIAL, CORRELATION, STATISTICAL REGRESSION, SOIL LABORATORY, CARGO CYCLES.



TABLA DE CONTENIDOS

Introducción.....	1
Objetivos.....	2
Planteamiento de la investigación.....	3
Justificación.....	3
1 CAPÍTULO PRIMERO: El Módulo de Resiliencia y Valor soporte de california:	
Antecedentes y Estado del Arte.....	5
1.1 Usos del término resiliencia en la ingeniería de pavimentos.	6
1.2 Definición formal de módulo resiliente.	7
1.3 Breve descripción de métodos de obtención de M.r.	11
1.3.1- Módulo resiliente para suelos granulares.....	11
1.4 Protocolos AASHTO para la determinación del módulo de resiliencia.	12
1.4.3 Esfuerzos y ciclos de carga.	17
1.5 Factores que afectan el módulo de resiliencia.	19
1.6 Análisis y discusión de los módulos resilientes de las capas que componen los materiales granulares de pavimento flexible y rígido.	23
1.7 Valores típicos de M.r.	24
1.8 El valor soporte de California (CBR).....	27
1.8.1 Definición formal de valor soporte de California	27
1.8.2 Procedimientos de obtención de valor soporte de california	28
1.8.3 Requisitos mínimos de CBR que debe cumplir un material granular para pavimentos según Norma Ecuatoriana Vial 2012.	30
1.9 Variables y procedimientos de ensayo para la obtención de valor soporte california.....	32
2 CAPÍTULO SEGUNDO: Ensayos para la obtención de CBR Y Módulos resilientes.	34
2.1 Muestro de materiales.	35
2.2 Características granulométricas de materiales muestrales.....	37
2.2.1 Categorización de materiales según Norma Vial Ecuatoriana 2013.....	42
2.3 Propiedades Índice.....	51
2.4 Clasificación del suelo.	55
2.5 Ensayo Proctor Modificado.....	61
2.5.1 Densidad máxima.....	61
2.5.2 Humedad óptima	63
2.6 Metodología de obtención.	63
2.7 CBR de materiales granulares	64
2.7.1 Tabulación de resultados.	64
2.7.2 Gráficas de CBR material Base.....	66
2.7.3 Graficas de CBR material Sub-base.....	70
3 CAPÍTULO TERCERO: Metodología de obtención de la magnitud de M.r.	74
3.1 Viabilidad de obtención de módulo resiliente mediante equipos triaxiales	75
3.1.1 Descripción de equipo triaxial cíclico y su función.	76



3.2 Protocolos a seguir y descripción de procedimientos.....	81
3.2.1 Protocolos a seguir.....	81
3.2.2 Descripción de procedimientos.....	82
3.3 Viabilidad de pruebas de módulo resiliente en equipo triaxial.....	85
3.4 Determinación de módulo resiliente a partir de otras propiedades de los suelos	86
3.4.1 M.r. a través del valor relativo de soporte y valor de resistencia R.	86
3.4.2 M.r. a través de propiedades físicas y constantes no lineales de los materiales.....	89
4 CAPÍTULO CUATRO: Metodología de obtención de Correlación entre CBR y Mr:	
Resultados y consideraciones finales.....	94
4.1 Algunas correlaciones entre valor de CBR y M. r.....	95
4.1.1 Gráfica de funciones [SI].....	97
4.2 Resultados de muestras analizadas en laboratorio y cálculo de valores de M. r.....	101
4.2.1 Descripción y metodologías a aplicar	101
4.2.2 Resultados de ensayos obtenidos en laboratorio y estudios recopilados.....	103
4.2.3 Cálculo de módulo resiliente a través de estados de consistencia, clasificación de suelos y ecuaciones AASHTO	123
4.2.4 Modulo resiliente para suelos tipo AASHTO A3 según la ecuación de Ping y Ling, 2007.	131
4.2.5 Aplicación de ecuación de Rahim & George (2005)	134
4.2.6 Dominios M.r.	137
4.2.7 Dominios CBR.....	138
4.3 Aplicación de procesos estadísticos y correlación entre M. r. y CBR	140
4.3.1 Discusión.....	140
4.3.2 Cuadro de valores y obtención de fórmula	141
4.3.3 Ajuste de curva: Procedimiento estadístico	143
4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:.....	151
4.4.1 CONCLUSIONES:.....	151
4.4.3 RECOMENDACIONES	152
BIBLIOGRAFÍA	153
ANEXOS	157

ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Deformación plástica y resiliente en un ciclo de carga	7
Ilustración 2 Ciclos de histéresis presentados en el material.....	9
Ilustración 3.....	10
Ilustración 4 Evolución del módulo de resiliencia con el número de ciclos para esfuerzos verticales	12
Ilustración 5 Influencia del esfuerzo desviador en el módulo resiliente.....	16
Ilustración 6 Evolución del módulo resiliente con el esfuerzo.....	17
Ilustración 7 Onda la carga sinusoidal	18
Ilustración 8 Valores del M.R. para variaciones en el contenido de humedad.....	20
Ilustración 9 Variación del módulo resiliente con esfuerzo	21
Ilustración 10 Valores típicos de M.r. para suelos clasificados con el sistema AASHTO.....	25
Ilustración 11 Valores típicos de M.r. para suelos clasificados con el sistema SUCS	26



Ilustración 12 El Cantón Cuenca (Color amarillo) pertenece a la Provincia del Azuay.....	36
Ilustración 13 Plantas procesadoras/ proveedoras de materiales granulares para la construcción de pavimentos. Fuente: Google Earth 2018	36
Ilustración 14 Grafico de las curvas granulométricas.....	41
Ilustración 15 Faja granulometrica subbase clase 1.....	43
Ilustración 16 Faja granulométrica subbase clase 2.....	44
Ilustración 17 Faja granulométrica subbase clase 3.....	45
Ilustración 18 Faja granulometrica Base clase 1	47
Ilustración 19 Faja granulometrica Base clase 2	48
Ilustración 20 Faja granulometrica Base clase 3	50
Ilustración 21 Faja granulometrica Base clase 4	51
Ilustración 22 Estados del suelo, límites de plasticidad	52
Ilustración 23 Grafico de ensayo Proctor estándar y ensayo Proctor modificado.....	62
Ilustración 24 Base Hormicreto.....	66
Ilustración 25 Base Rockazul.....	67
Ilustración 26 Base Trelles.....	68
Ilustración 27 Base Vipesa	69
Ilustración 28 Subbase Hormicreto	70
Ilustración 29 Subbase Rockazul	71
Ilustración 30 Subbase Vipesa.....	72
Ilustración 31 Esquema de naturaleza de cargas en las estructuras.....	76
Ilustración 32 Esquema de estructura de pavimento sometida a ciclos de cargas. Parte I. Extraído de: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)	77
Ilustración 33 Esquema de estructura de pavimento sometida a ciclos de cargas. Parte II. Extraído de: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)	77
Ilustración 34 Esquema de estructura de pavimento sometida a ciclos de cargas. Parte III. Extraído de: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)	78
Ilustración 35 Equipo triaxial dinámico moderno. Imagen extraída de: (Ayala Velasco, 2013)	80
Ilustración 36 Detalla de cámara triaxial y complementos. Imagen extraída de: (LanammeUCR, 2009)	81
Ilustración 37 Gráfica de deformaciones vs aplicación de número de ciclos. Imagen extraída de: (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016).....	84
Ilustración 38 Acumulación de deformación plástica bajo cargas repetidas. Brown,1994 (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)	88
Ilustración 39 Esfuerzos en un elemento diferencial de la estructura de pavimento. Imagen extraída directamente de: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)	90
Ilustración 40 Gráfica de funciones: CBR contra valor de módulo resiliente en unidades del SI	97
Ilustración 41 Fuente: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)	99
Ilustración 42 Variación del módulo resiliente a lo largo de las abscisas de construcción de una red vial. Funte: (Martha Herrera-Montealegre, 2014).....	99
Ilustración 43 Gráfica de funciones: CBR contra valor de módulo resiliente en unidades inglesas.....	100
Ilustración 44 Gráfica de granulometría de muestra 1 en formato semilogarítmico.....	104



Ilustración 45 Gráfica de granulometría de muestra 2 en formato semilogarítmico.....	105
Ilustración 46 Gráfica de granulometría de muestra 3 en formato semilogarítmico.....	106
Ilustración 47 Gráfica de granulometría de muestra 4 en formato semilogarítmico.....	107
Ilustración 48 Gráfica de granulometría de muestra 5	108
Ilustración 49 Gráfica de granulometría de muestra 6	109
Ilustración 50 Gráfica de granulometría de muestra 7	110
Ilustración 51 Gráfica de granulometría de muestra 8	111
Ilustración 52 Gráfica de granulometría de muestra 9	112
Ilustración 53 Gráfica de muestra 10.....	113
Ilustración 54 Gráfica de muestra 11.....	114
Ilustración 55 Gráfica de granulometría de muestra 12.....	115
Ilustración 56 Gráfica de granulometría de muestra 13.....	116
Ilustración 57 Clasificación de suelos AASHTO y número de muestras de cada tipología	126
Ilustración 58 Clasificación de suelos SUCS y número de muestras de cada tipología.....	127
Ilustración 59 Comportamiento de la ecuación AASHTO que describe l relación entre módulo resiliente, esfuerzo volumétrico y parámetros K1 y k2.	128
Ilustración 60 Gráficas de ecuaciones con constantes funciones de clasificaciones de suelos SUCS y AASHTO de las muestras analizadas y recopiladas.....	130
Ilustración 61 Imagen extraída de: https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/fuerzas/mecanica-de-suelos-permeabilidad	131
Ilustración 62 Fuente: (Angelone, Garibay, & Casaux, Septiembre, 2006). Las unidades corresponden a cm/s.....	132
Ilustración 63 Gráfica módulo resiliente contra Cc de materiales granulares. Ecuación de Ping y Ling 2006.	132
Ilustración 64 Gráfica módulo resiliente contra w de materiales granulares. Ecuación de Ping y Ling 2006.	133
Ilustración 65 Gráfica módulo resiente contra parámetro k1 de la ecuación de Rahim y George 2005 ...	135
Ilustración 66 Valor de M. r. contra valor de k2. Ecuación de Rahim y George 2005.....	136
Ilustración 67 Diferentes coeficientes de correlación. Imagen extraída de: http://vivaelsoftwarelibre.com/coeficiente-de-correlacion-en-r/	141
Ilustración 68 Comparación entre pares coordenados con ecuación determinada mediante regresión cuadrática.....	148
Ilustración 69 Comparación de estudios similares con los realizados en esta investigación.....	149

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1	58
Ecuación 2	62
Ecuación 3	65
Ecuación 4. Fuente: (Rondón & Reyes, 2007).....	65
Ecuación 5. Ecuación de Heukelom y Klomp que determina el módulo resiliente a través del valor relativo de soporte.....	86



Ecuación 6. Desarrollada por el instituto del asfalto. (Rubio Moreno, 2005)	87
Ecuación 7. Determinación de módulo resiliente a través de constantes no lineales de regresión. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002), (Higuera Sandoval, 2011).....	89
Ecuación 8. Determinación de módulo resiliente a través de constantes no lineales de regresión. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002), (Higuera Sandoval, 2011).....	90
Ecuación 9. Esfuerzo volumétrico. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002).....	90
Ecuación 10 Relación para materiales granulares. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002).....	92
Ecuación 11. Ping y Ling 2007, (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016).....	93
Ecuación 12. (Montealegre Herrera, 2014). Correlación generada para suelos finos.	95
Ecuación 13. Ecuación desarrollada por el instituto de Asfalto. Fórmula extraída de los estudios de (Montealegre Herrera, 2014).....	95
Ecuación 14. Ecuación General AASHTO.....	96
Ecuación 15 Consejo de Investigaciones Científicas e Industriales de Suráfrica (Ayres,1997).	96
Ecuación 16 Laboratorio de Investigación en Transporte y Carreteras (Lister & Powell, 1987)	96
Ecuación 17 Departamento de Transporte del Estado de Georgia (EE.UU.).....	96
Ecuación 18 Ohio EEUU (2008).....	96
Ecuación 19 Manual de diseño de pavimentos para Bogotá. (IDU & Universidad de los Andes, 2000).....	97
Ecuación 20 Ecuación propuesta por AASHTO para suelos granulares (Torres Espinoza, 2010).....	97
Ecuación 21.....	102
Ecuación 22.....	102
Ecuación 23.....	102
Ecuación 24. Ecuación obtenida siguiendo los estándares AASHTO y las investigaciones de Rada y Witzzak (1981) (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)	129
Ecuación 25. Ecuación obtenida siguiendo los estándares AASHTO y las investigaciones de Hicks y Finn (1973).....	129
Ecuación 26. Ecuación obtenida siguiendo los estándares AASHTO y las investigaciones de Monismith y Witzzak (1980)	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipo de onda utilizada y frecuencia de carga en los protocolos AASHTO (suelos finos)	13
Tabla 2 Estado de esfuerzos aplicados en los protocolos de AASHTO.....	13
Tabla 3 Protocolo SHRP P46 (Resilient Modulus for unbound granular Base/Subbase materials and subgrade soil)	14
Tabla 4 Valores de M.r. para suelos según New Hampshire	24
Tabla 5 Tabla sobre valores de M.r. para suelos según New Hampshire.....	24
Tabla 6 Recomendaciones de material tipo base	32
Tabla 7 Muestreo de materiales granulares	37
Tabla 8 Formato ensayo de granulometría.....	38



Tabla 9 Clasificación por el tamaño de agregado	38
Tabla 10 Clasificación por el tamaño de agregado	39
Tabla 11 Clasificación por el tamaño de agregado	39
Tabla 12 Porcentaje en peso que pasa a través de la malla cuadrada.....	42
Tabla 13 Base clase 1	46
Tabla 14 Base clase 2	48
Tabla 15 Base clase 3	49
Tabla 16 Base clase 4	50
Tabla 17 Límites líquidos, plásticos e índices de plasticidad	54
Tabla 18 Sistema unificado de clasificación de suelos.....	57
Tabla 19 Clasificación de los Suelos por el sistema AASHTO	59
Tabla 20 Clasificación subbase plantas procesadoras	60
Tabla 21 Clasificación base plantas procesadoras.....	60
Tabla 22 Densidades secas máximas para humedad optima. Fuente: Autor.....	64
Tabla 23 Información extraída de: (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)	80
Tabla 24 Protocolo SHRP P46. “Modulos resilientes para base y sub-base granular.” Extraído de (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016).....	82
Tabla 25 Secuencia de aplicación de esfuerzos desviadores y de confinamiento. El ciclo 0 corresponde al pre-acondicionamiento expuesto en literales anteriores. Información extraída de: (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)	85
Tabla 26 Valores de K1 y k2 recopilados de las investigaciones realizadas por Rada y Witczak (1981) (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)	91
Tabla 27 Valores de K1 y k2 recopilados de las información de (Shook et al, 1982) (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)	91
Tabla 28 Análisis granulométrico 1.....	104
Tabla 29 Análisis granulométrico 2.....	105
Tabla 30 Análisis granulométrico 3.....	106
Tabla 31 Análisis granulométrico 4.....	107
Tabla 32 Granulometría 5.....	108
Tabla 33 Granulometría 6.....	109
Tabla 34 Granulometría 7.....	110
Tabla 35 Granulometría 8.....	111
Tabla 36 Granulometría 9.....	112
Tabla 37 Granulometría de muestra 10.....	113
Tabla 38 Granulometría de muestra 11.....	114
Tabla 39 Granulometría de muestra 12.....	115
Tabla 40 Granulometría de muestra 13.....	116
Tabla 41. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	117
Tabla 42. Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.....	117
Tabla 43. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	117
Tabla 44. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	117



Tabla 45. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	117
Tabla 46. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	118
Tabla 47 Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	118
Tabla 48. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	118
Tabla 49. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	118
Tabla 50. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	118
Tabla 51 Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.....	118
Tabla 52. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	118
Tabla 53. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	119
Tabla 54. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	119
Tabla 55. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	119
Tabla 56 Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.....	119
Tabla 57. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	119
Tabla 58. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	119
Tabla 59 Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.....	119
Tabla 60. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	120
Tabla 61. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	120
Tabla 62 Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	120
Tabla 63. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	120
Tabla 64. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	120
Tabla 65. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	120
Tabla 66 Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.....	120
Tabla 67. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	121
Tabla 68 Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	121
Tabla 69. Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.....	121
Tabla 70. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	121
Tabla 71. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	121
Tabla 72. Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.....	121
Tabla 73 Clasificación de suelos según SUCS	121
Tabla 74. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.	122
Tabla 75. Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.....	122
Tabla 76 Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO	122
Tabla 77 Algunos parámetros físicos de materiales granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca obtenidos a través de ensayos en laboratorio y recopilaciones.	123
Tabla 78 Clasificación de suelos y número de muestras analizadas y recopiladas	126
Tabla 79 Cálculo de módulo resiliente a través de la Ecuación de Rahim y George 2005	137
Tabla 80 Dominios de modulos resilientes de materiales granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca	137
Tabla 81 Rangos de valores de modulos resislientes determinados.	138
Tabla 82 Valores de CBR obtenidos en ensayos de laboratorio y recopilados. Fuente: El Autor.	138



Tabla 83. Valores de Mr vs CBR	142
Tabla 84. Cambio de variable aplicado a función exponencial. Se ha utilizado logaritmos base 10.	144
Tabla 85. Sumatoria de datos obtenidos.	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de procesos de un equipo triaxial.....	79
---	----



Introducción

Una de las principales debilidades en cuanto a los procedimientos de evaluación¹ de pavimentos flexibles o rígidos, frente a cargas de tránsito y fenómenos de intemperismo² es el poco conocimiento de las características mecánicas de los materiales granulares constitutivos que se utilizan en la construcción de pavimentos en la ciudad de Cuenca. En gran parte es debido al conocimiento limitado ocasionado por la falta de personal capacitado y laboratorios adecuados, así como de investigaciones bibliográficas o experimentales, que otorguen metodologías para la realización de ensayos pertinentes. Esto resulta especialmente cierto, en el ámbito de la determinación de parámetros mecánicos tales como módulos resilientes, módulos elásticos, coeficientes de Poisson, entre otros. Por lo general, lo que se suele hacer es adoptar valores 'pre-establecidos' en libros de texto de diseño de pavimentos, los cuales, en efecto, son valores aproximados; no obstante, resulta conveniente que éstos sean determinados a partir de los insumos granulares que se comercializan en el Cantón Cuenca. A este punto, se puede notar, que los objetivos de realizar estudios para la obtención fija de estos parámetros, no son tan factibles de llevar a la realidad debido a que se requiere de presupuestos altos, de equipos sofisticados o sencillamente, existen métodos simplificados que dan solución al problema, pero que sin embargo no se conocen. Por ello, resulta imprescindible recurrir a métodos estadísticos y algebraicos que otorguen la posibilidad de obtener estos parámetros, en función de ensayos menos costosos y de amplio conocimiento en nuestro medio. El estudio a realizarse, está enfocado, en primera instancia en una investigación bibliográfica basada en la recopilación de metodologías para la obtención del módulo resiliente de materiales granulares. Aquí se discutirán aspectos como: tipos de metodologías, procedimientos de ensayos, protocolos de aplicación, alcance, costos, entre

¹ Deformaciones, comportamiento; serviciabilidad, entre otros.

² Es decir, variabilidad climática, lluvias, vientos, etc.



otros. Esta parte del proyecto tendrá por objeto presentar un estado del arte completo, de tal manera que el lector pueda conocer y solventar sus dudas en cuanto a la determinación de módulos resilientes. Posterior a ello, de las recopilaciones efectuadas en la parte primera se discutirá y recomendará un método de determinación de módulos resilientes, de tal manera que su ejecución y viabilidad esté al alcance de personal, laboratorios y empresas constructoras/diseñadoras de carreteras. Finalmente se mostrará un ejemplo aplicativo; éste consistirá en la determinación del módulo resiliente para materiales granulares, específicamente base y subbase, presentando una correlación del módulo resiliente con el valor de CBR³ mediante la aplicación de métodos estadísticos de regresión, pudiendo ser lineales o cuadráticos y se comparará ésta, con correlaciones establecidas por otros autores.

Objetivos

Objetivo general: Realizar una investigación bibliográfica y aplicación de método para encontrar correlación entre módulo resiliente de materiales granulares comercializados en el Cantón Cuenca

Objetivos específicos:

- I. Presentar una descripción teórica del módulo resiliente como parámetro de calidad de los suelos, así como también la obtención del mismo.
- II. Encontrar diversos parámetros físicos y mecánicos de los materiales estudiados mediante la utilización del laboratorio de mecánica de materiales y suelos de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca.

³ Valor soporte califonia.



- III. Establecer una correlación entre CBR y módulo resiliente de los materiales granulares provenientes de las plantas procesadoras que se comercializan en la Ciudad de Cuenca mediante métodos estadísticos de regresión a partir de ensayos de laboratorio.

Planteamiento de la investigación

El problema radica en el poco o nulo conocimiento de:

- El parámetro “módulo resiliente” y su significado como característica mecánica de los suelos. Se debería responder a preguntas tales como: ¿Qué es?, ¿Para qué sirve?, ¿Cuál es su importancia?
- Procesos, metodologías, materiales, métodos y protocolos a seguir, para la obtención del parámetro denominado “Modulo resiliente”.

El siguiente trabajo estará dividido en dos grupos: Teórico-bibliográfico y aplicativo. Con respecto a la primera parte, se realizará una investigación bibliográfica a profundidad acerca del parámetro: módulo resiliente, la cual estará enfocada en otorgar, a más de una descripción teórica completa, los métodos de obtención de este parámetro para, luego recomendar aquel, que, por su simplicidad y alcance, pueda ser aplicado en nuestro medio. Finalmente se presentará un ejemplo de aplicación de este método. Se procederá a la determinación del módulo resiliente de materiales granulares comercializados en el Cantón Cuenca.

Haciéndose necesario la realización de un proyecto de titulación que este enfocado a gestionar estos dos aspectos.

Justificación

En el ámbito de la mecánica de suelos y pavimentos, se le conoce como resiliencia a la capacidad de un material de recuperarse luego de haber sufrido una modificación inicial



(deformación) A medida que un material granular se recupera guardando sus *características físicas y mecánicas iniciales* se podría decir que es más resiliente.

El módulo resiliente de materiales granulares ha venido siendo un tema importante en el ámbito de la tecnología de pavimentos. Este importante valor es utilizado para entender el comportamiento dinámico de los materiales frente a cargas repetidas, en lo que, a su vez, puede estimarse las deformaciones recuperables y no recuperables frente al paso de una carga. Pudiendo caracterizar de esta manera la calidad de cada material. Sin embargo, en nuestro medio no existe un adecuado análisis teórico-práctico a fondo⁴. Por ello, resulta necesario la realización de un proyecto investigativo bibliográfico y aplicativo, que se enfoque ampliamente en el análisis de módulos resilientes como parámetro de calidad de los suelos, que presente metodologías de obtención y que además genere un ejemplo de aplicación del método o métodos más viables e realizarse en nuestro medio.

⁴ El ensayo de módulo resiliente a menudo requiere la utilización de equipo triaxial dinámico, sin embargo, autores plantean correlaciones entre módulos resilientes y parámetros de fácil obtención como por ejemplo a través de la energía de compactación o propiedades físicas del material, de cualquier modo, esta información es aún desconocida. Proporcionar información pertinente a esto, es uno de los objetivos específicos de esta investigación.



1 CAPÍTULO PRIMERO: El Módulo de Resiliencia y Valor soporte de california: Antecedentes y Estado del Arte



1.1 Usos del término resiliencia en la ingeniería de pavimentos.

(Moreno Rubio, 2005) señala que “La metodología actual para diseño de pavimentos utilizada por el método AASHTO⁵ considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales constitutivos de la sección de una carretera es el parámetro denominado módulo resiliente. “p.29.

En el estudio de los materiales constitutivos de una estructura de pavimento⁶ se debe tener en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que son transmitidas por el tráfico, teniendo presente también el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales. “Se ha realizado varios estudios tanto a escala natural como en probetas utilizadas en el laboratorio que han servido de información confiable para ver el comportamiento de esfuerzo – deformación de los materiales que constituyen un pavimento” (Elliott & Sam)

La función principal de la estructura de un pavimento es proporcionar un elemento resistente que transmita a los materiales granulares⁷ y subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito que actúan sobre la estructura. Estos materiales están en función de las características propias del mismo para ello se realiza el ensayo triaxial, en donde se toma en cuenta el parámetro de módulo resiliente o también conocido como modulo elástico, el cual relaciona las sollicitaciones de cargas aplicadas con las deformaciones recuperables, esta deformación recuperable es conocida como resiliencia. Seed et al 1955 (Rondón & Reyes, 2007)

(Anguas, Pérez, & Gómez, 2001) Menciona que en un pavimento las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea, mientras que a las deformaciones que permanecen después de que haya pasado la carga deformadora se las denomina plásticas estando en función del porcentaje de humedad.

⁵ *American Association of State Highway and Transportation Officials*

⁶ *Rigido y flexible*

⁷ *Base y subbase*

1.2 Definición formal de módulo resiliente.

Para la determinación del concepto de módulo resiliente primero debemos tener claro cuál es el comportamiento de los suelos que conforman la fundación como la estructura de pavimento los mismos que presentan un comportamiento elastoplástico. Los pulsos de cargas generados por los vehículos producen deformaciones en las diferentes capas que no son recuperables en su totalidad. (Rojas Quintero, 2014)

La ilustración 1 muestra las deformaciones de recuperación instantánea o resiliente una vez que haya culminado la carga dinámica, así como las deformaciones que continúan generándose dentro del material.

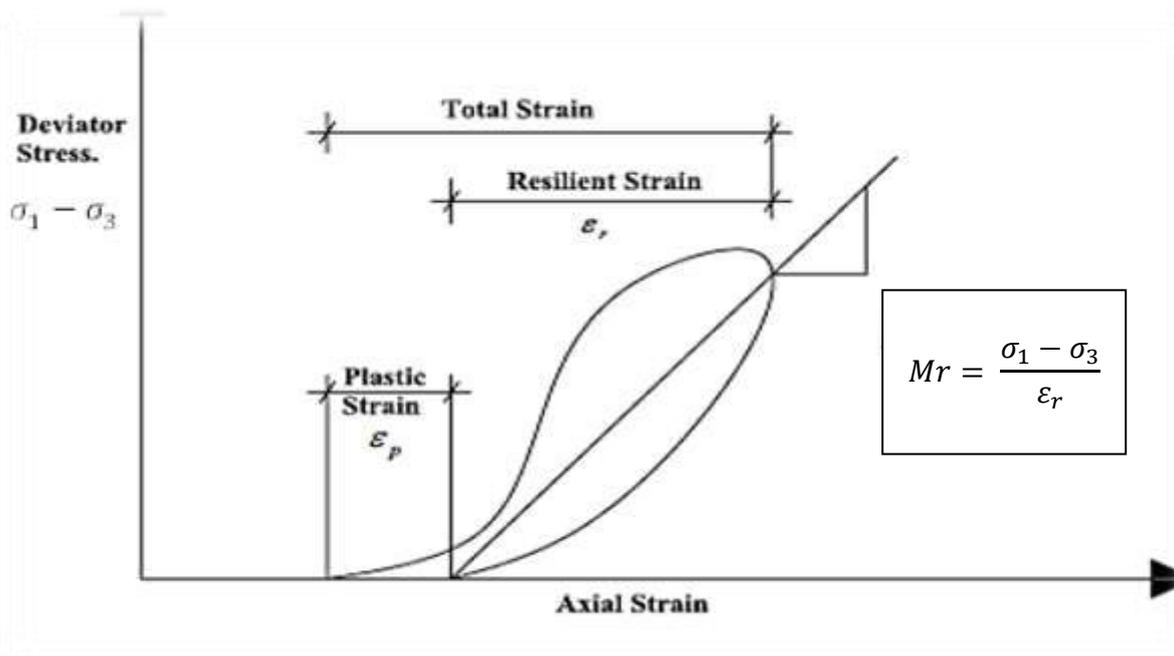


Ilustración 1
Deformación plástica y resiliente en un ciclo de carga

Fuente: Khasawneh

En la ilustración presentada se puede apreciar que a medida que aumenta el esfuerzo desviador aumenta la deformación axial que dentro del rango elástico será recuperable obteniendo con ello la magnitud módulo resiliente, que de acuerdo al autor estará determinado de la siguiente manera:



$$Mr = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_r}$$

Donde,

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

ϵ_r = Deformación resiliente o elastica

O también puede ser representado de la forma:

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}}$$

Donde,

σ_d = *Esfuerzo desviador*

ϵ_{axial} = *Deformacion recuperable*

“Sin embargo, bajo cierto número de ciclos de carga y descarga el comportamiento presentado se dice que es elástico ya que las deformaciones tienden a recuperarse a la totalidad y las deformaciones permanentes son muy bajas en comparación con las resilientes” (Rojas Quintero, 2014).

“La energía provocada por los ciclos de carga se disipa, generando menor histéresis⁸ en la relación esfuerzo-deformación del material para cierto número de ciclos; aproximadamente después de 200 ciclos el módulo elástico se vuelve constante”⁹, es decir, la respuesta es lineal como se presenta en la ilustración 2, llega un momento en que toda la deformación que presenta el suelo es recuperable, con ello se define el M.r.¹⁰ del material.

⁸ Es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

⁹ Tomado de Drumm, et al, 1990

¹⁰ Módulo resiliente

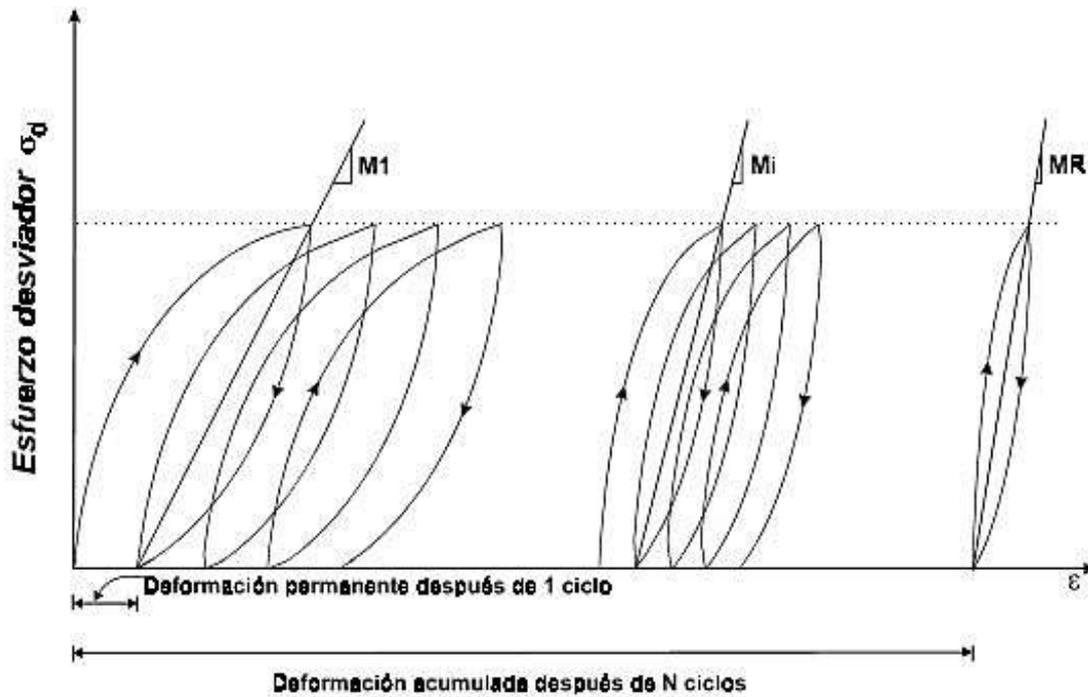


Ilustración 2
Ciclos de histéresis presentados en el material

Fuente: (Garnica Anguas, Pérez García, & Gómez López, *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*, 2001)

En 1955, Hveem desarrolló el tema “comportamiento resiliente de los pavimentos”. El propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes; Seed y sus colegas de la Universidad de California siguieron lo establecido por Hveem. Desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo de resiliencia. (Anguas, Pérez, & Gómez, 2001)

(Elliott & Sam) Define el M.r. como una propiedad material fundamental que es similar en concepto al módulo de elasticidad. Es decir, el módulo resiliente es una relación de esfuerzo-deformación. Sin embargo, difiere del módulo de elasticidad en que se determina a partir de una prueba de compresión triaxial de carga repetida (la "compresión no confinada" es utilizada por algunos investigadores) y se basa solo en la parte elástica o recuperable.

Además, el M.r. es un parámetro que proporciona una mejor evaluación de calidad de los materiales constitutivos que formaran parte de la estructura de pavimento incluyendo los

suelos de subrasante, bajo una variedad de condiciones ambientales a los que se encuentren expuestos, así como también al estado de esfuerzos que simulen la realidad de la situación a la que será sometido el pavimento.

(Guitierrez & Marlene, IQuitos 2003) Explica que el módulo resiliente va estrechamente ligado a realizar ensayos triaxiales cíclicos los cuales se determinan en un laboratorio de mecánica de suelos adecuado; la ilustración 3 muestra cómo actúa la presión de confinamiento σ_3 y el esfuerzo desviador σ_d sobre la muestra, las cuales pretenden simular diferentes estados de esfuerzos provocadas por el paso de cargas vehiculares sobre la estructura de pavimento.

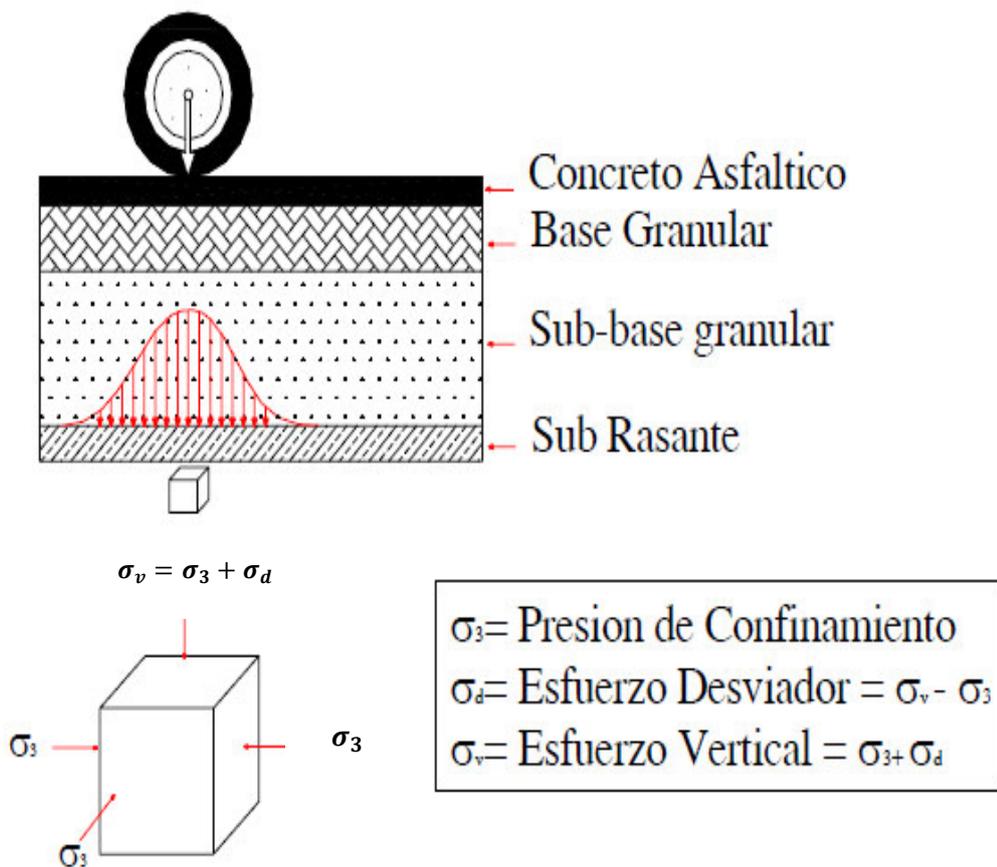


Ilustración 3

Estado de esfuerzos provocados en la subrasante por el paso de un vehículo en movimiento

Fuente: Ensayo del módulo resiliente de XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil - IQuitos 2003



(Elliott & Sam) Establece que la prueba de módulo de resiliencia está diseñada para simular el comportamiento de los suelos y materiales granulares cuando se somete a una carga de tráfico en un sistema de pavimento. En consecuencia, la preparación de la muestra, el acondicionamiento y las pruebas se llevan a cabo para simular las condiciones de campo, el método estándar de prueba es prescrito por AASHTO T-274 el cual ha sufrido varias modificaciones que se detallaran más adelante.

1.3 Breve descripción de métodos de obtención de M.r.

1.3.1- Módulo resiliente para suelos granulares

Se puede considerar dos tipos: (Anguas, Pérez, & Gómez, 2001)

- I. Factores inherentes al tipo de material y sus características.
- II. Nivel de esfuerzos aplicado, duración del pulso de carga y el procedimiento de prueba general.

Este tiene relación con las características y el tipo de material que influyen de acuerdo a la naturaleza del sector, tipo de suelo y el tamaño de los agregados. Para estos ensayos se tuvieron en cuenta algunos de los materiales como calizas, areniscas granito y riolita que son materiales para la construcción de bases y subbases dentro de las carreteras de Oklahoma, USA. (Anguas, Pérez, & Gómez, 2001)

La ilustración 4, indica el aumento en razón directa al nivel del esfuerzo aplicado a muestras granulares de igual granulometría sometidas a diferentes esfuerzos cíclicos. Esto indica que el M.r. en un material granular es entonces dependiente del nivel de esfuerzos aplicado y no se le puede considerar como una propiedad intrínseca del material. (Anguas, Pérez, & Gómez, 2001).

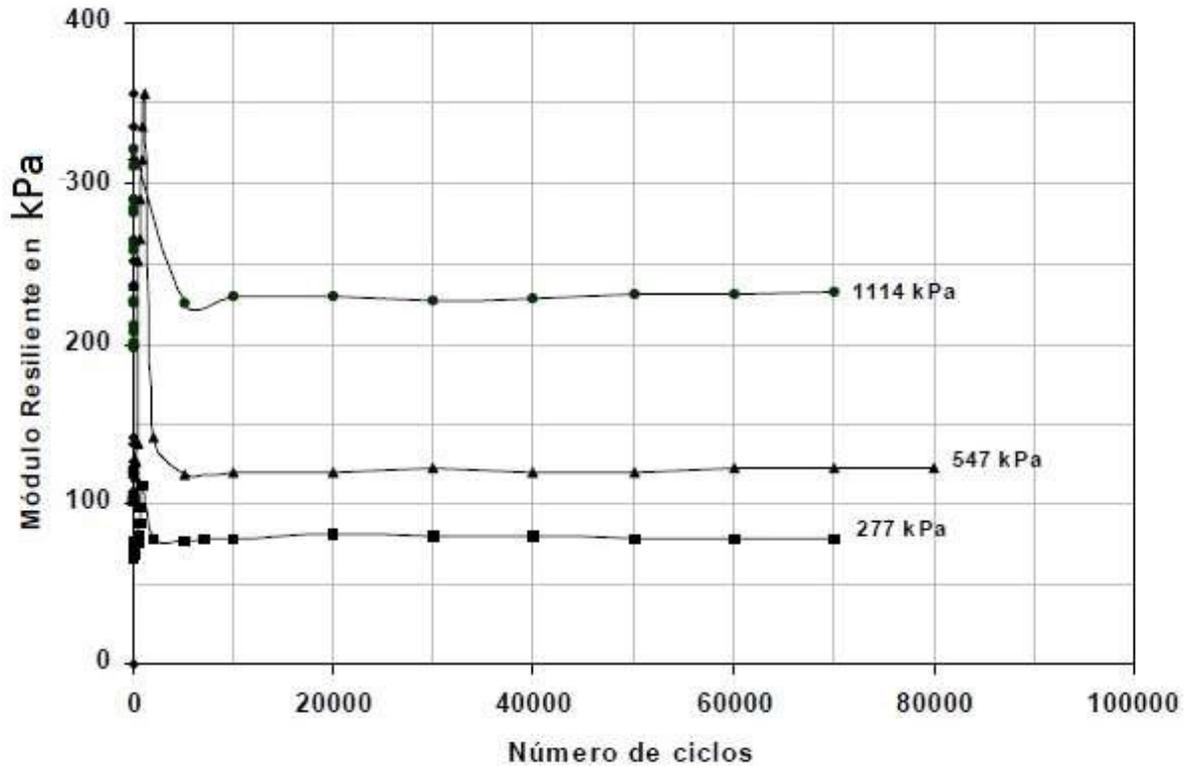


Ilustración 4
Evolución del módulo de resiliencia con el número de ciclos para esfuerzos verticales

Fuente: (Anguas, Pérez, & Gómez, 2001)

1.4 Protocolos AASHTO para la determinación del módulo de resiliencia.

Para la determinación del módulo de resiliencia se ocupa el método *AASHTO T307-99*, el cual describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos, para llegar a la utilización de este método se tuvo que pasar por varias modificaciones que se detallaran a continuación.

(García, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016) Indica que la primera versión de método *AASHTO T274-82* fue muy criticada porque está prueba duro 5 horas, en la cual el nivel de cargas es severo por lo que este puede fallar de acuerdo a la tapa de acondicionamiento.



De igual forma, este método tuvo algunas modificaciones de acuerdo al tiempo que duraba cada una de estas pruebas. En el año de 1992 se adoptó el nombre de *método de prueba SHRP¹¹ P46*, al cual se lo denominó *AASHTO T274-92*. Luego de un tiempo actualizaron este método por el *AASHTO T307-99* siendo esta la versión usada en la actualidad.

En la tabla 1 se presenta el tipo de onda utilizada y frecuencia de carga para los protocolos AASHTO mencionados anteriormente para suelos finos.

Tabla 1 Tipo de onda utilizada y frecuencia de carga en los protocolos AASHTO (suelos finos)

Fuente: (García, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016)

	T-274-82	T-292-91	T-294-94	T-307-99
Señal aplicada	Seno, haversine, rectangular y triangular	Rectangular y triangular	Haversine	Haversine
Duración de la carga (s)	0.1	0.1 a 1.0	0.1	0.1
Duración del ciclo (s)	1.0 a 3.0	1.0 a 3.0	1.0	1.0 a 3.0

En la tabla 2 se puede observar también la variación de los estados de esfuerzo en cuanto al esfuerzo desviador (σ_d) y presión de confinamiento para los diferentes protocolos ASSTHO que fueron modificados incluyendo el número de ciclos de carga y descarga.

Tabla 2 Estado de esfuerzos aplicados en los protocolos de AASHTO

Fuente: (García, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016)

Procedimiento de prueba	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	Número de ciclos
T274-82	7	41, 21, 0	200
	14	41, 21, 0	200
	28	41, 21, 0	200
	55	41, 21, 0	200
	69	41, 21, 0	200
T-292-91	21, 34, 48, 69, 103	21	50
T294-94	14, 28, 41, 55, 69	41	100
	14, 28, 41, 55, 69	21	100
	14, 28, 41, 55, 69	0	100
T307-99	14, 28, 41, 55, 69	41	100
	14, 28, 41, 55, 69	28	100
	14, 28, 41, 55, 69	14	100

¹¹ Resilient Modulus for Urbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soil



En la tabla 3 se muestran las características a cumplirse de los materiales consideradas en el método de prueba *SHRP P46* para realizar el ensayo al cual se lo denomino *ASSTHO T274-94* para materiales granulares y de subrasante, siendo estos materiales en los que se basa esta investigación.

Tabla 3 Protocolo *SHRP P46* (*Resilient Modulus for unbound granular Base/Subbase materials and subgrade soil*)

Fuente: (García, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016)

Tipo de material	Características	Duración de aplicación de carga	Duración del ciclos	Localización de LVDTs	Espécimen	Método para reconstituir muestras	No de capas del espécimen
I	Menos del 70% pasa la malla 70. 20% máximo de material que pasa la malla 200	0.1 s	1 s	Fuera de la cámara triaxial	15 cm de diámetro	Vibratorio	5
II	Suelos con clasificación A-4, A-5, A-6, A-7, A-1-b, A-2 y A-3				7.1 cm de diámetro	Estático	

Dentro de este capítulo se va a dar a conocer de qué se trata el método *AASHTO T 307-99*, este es el único método de ensayo en laboratorio que es recomendado y disponible para determinar el módulo resiliente en materiales granulares, conocido como el método triaxial dinámico o de carga repetida.

Debemos tener en cuenta que para la realización del ensayo triaxial dinámico “Las muestras pueden ser especímenes sin estabilizar que pueden tener una densidad natural (extraídas del sitio de compactación) o con la densidad obtenida en el laboratorio (re compactados).” (Acuña, Julio 2009)

El método *AASHTO T – 307* tiene definido dos tipos de materiales en los cuales se pueden realizar este tipo de ensayo:

- I. Todo material que no esté estabilizado, que cumpla con las siguientes condiciones:
 - Pasar menos del 70% por el tamiz de 2.0 mm (Nº 10)



- Pasar menos del 20% por el tamiz de 0.075 mm (N° 200)
- Tener un índice de plasticidad de 10 o menos
- Este material debe ser compactado en un molde de 152 mm de diámetro

II. Material que no cumple con las condiciones descritas anteriormente en el material de tipo I; para este tipo de materiales se debe compactar en moldes de 71 a 86 mm de diámetro.

La aplicación del M.r. es bastante simple, pero su uso se viene a complicar cuando en los estudios de CBR¹² no existe un valor único para el suelo sino que existen un número infinito de valores que puede tomar esto dependiendo de las condiciones a las que se someta la prueba. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

Es por ello que se puede concluir que el valor apropiado del M.r. debe ser determinado para las condiciones que corresponden a la condición final a la que será sometido el suelo y de acuerdo con el nivel de esfuerzo (no implicaría tener un número de vehículos máximo, más bien un *camión de diseño*¹³) que son aplicados por los vehículos que circulan sobre la vía, de esta manera se obtendrá un valor de M.r. más acertado.

A continuación, se presenta algunos componentes que forman parte del protocolo para determinar el módulo de resiliencia.

1.4.1 El equipo triaxial dinámico

“Además del ensayo dinámico realizado en el equipo triaxial para la determinación del módulo de resiliencia, existen algunos tipos de ensayos NO destructivos como el ensayo de

¹² Valor soporte california

¹³ Estableciendo como la carga máxima a la que se somete un elemento de material granular.

DEFLECTÓMETRO de impacto que permite correlacionar sus resultados con los parámetros característicos del suelo”. (Guitierrez & Marlene, IQuitos 2003)

1.4.2 El esfuerzo desviador

Diferentes autores han venido realizando por el estudio del esfuerzo desviador debido al efecto directo que tiene el mismo sobre el módulo resiliente, como se mencionó anteriormente a medida que se incrementa el ensayo cíclico el módulo comienza a disminuir hasta llegar a obtener un valor constante, esta constante definida como M.r.

De acuerdo a la norma el ensayo triaxial, aplica un esfuerzo desviador repetido de magnitud, duración y frecuencia fija; cada una de las muestras es sometido a tres presiones de confinamiento diferentes entre los siguientes valores 41.4, 27.6, 13.8 kPa. (Guitierrez & Marlene, IQuitos 2003)

Además, el esfuerzo desviador es de gran influencia sobre el módulo de materiales finos en este caso podría ser las arcillas como se observa en la ilustración 5 el módulo resiliente disminuye a medida que el esfuerzo aumenta a diferentes presiones.

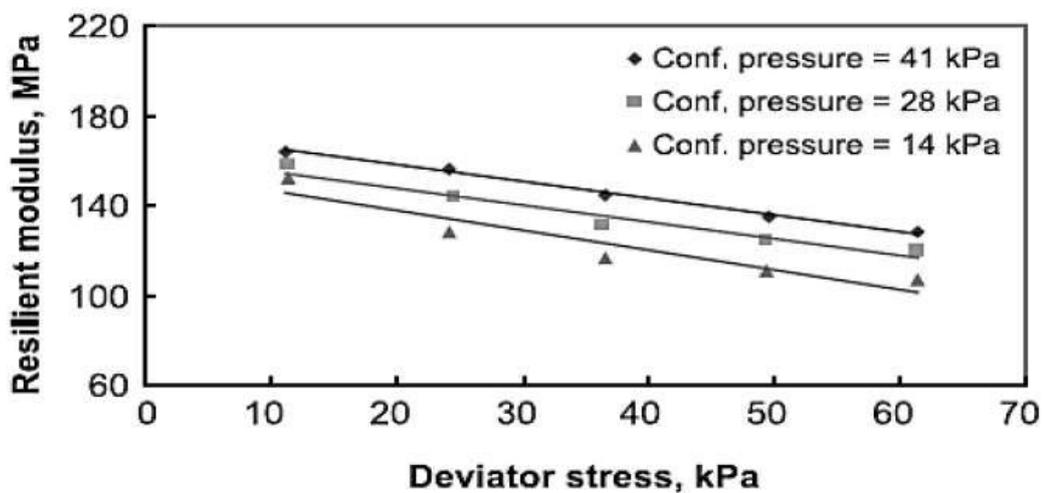


Ilustración 5 Influencia del esfuerzo desviador en el módulo resiliente

Fuente; Rahim & George, 2005

Por el contrario, se puede observar en la ilustración 6 que en los materiales granulares el M.r. aumenta por el incremento del esfuerzo contrario a suelos finos, de acuerdo a un estudio realizado por (Zaman, et al, 1994) en materiales diferentes como: calizas, areniscas, granito y riolita.

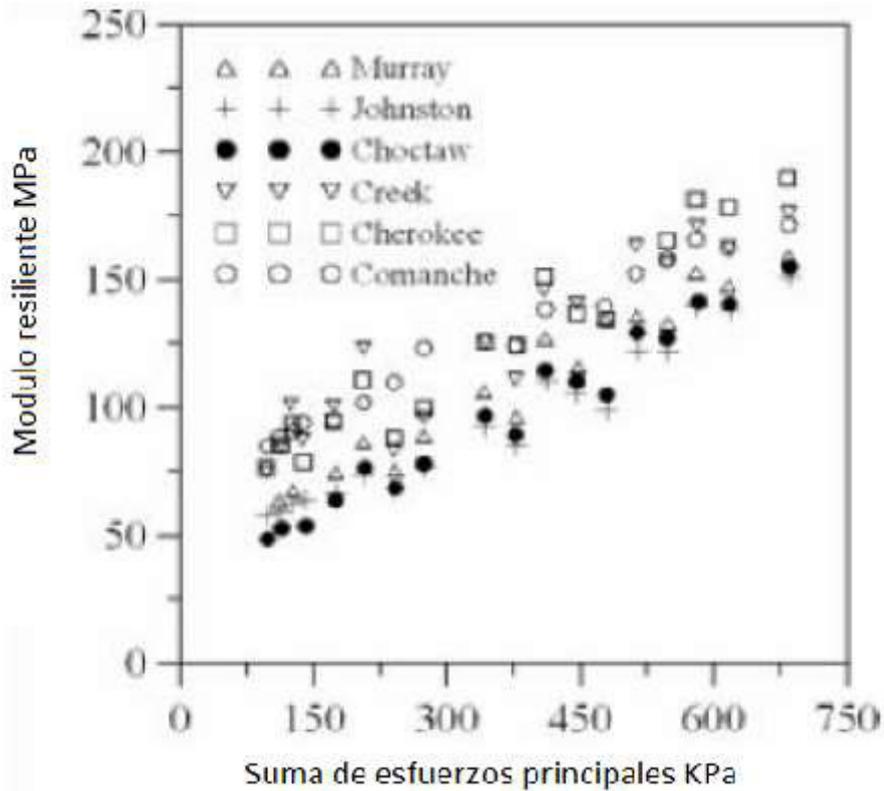


Ilustración 6 Evolución del módulo resiliente con el esfuerzo

Fuente: Zaman, et al, 1994

1.4.3 Esfuerzos y ciclos de carga.

Los ciclos de carga que son aplicados a la muestra de ensayo, son realizados a través de ondas sinusoidales en la cual su tiempo de aplicación es de 0.1 segundos, luego viene un tiempo de descanso o descarga de 0.9 segundos entre cada uno de los ciclos, hasta completar así el número de ciclos que propone la Norma respectiva para el ensayo.

(Brown, 1996) “Observo, como la deformación máxima se presenta donde el esfuerzo aplicado tiene mayor magnitud”. La magnitud y la duración de un esfuerzo que genera el

paso de los vehículos sobre la estructura de pavimento dependen de la velocidad como del tránsito promedio diario que existe sobre la vía. Estos parámetros ayudan a determinar el ciclo de aplicación de los esfuerzos en el equipo triaxial.

“Al encontrar que la deformación vertical de la estructura aumenta con la profundidad y en cambio la magnitud de carga disminuye, varios autores, Barksdale 1971, Grainfer y Lister 1962, McLean 1974, estudiaron el comportamiento de varios tipos de onda, como lo son las ondas triangulares y las ondas cuadradas”¹⁴

Realizando diferentes investigaciones de acuerdo al tipo de ondas, diferentes velocidad y profundidades realizaron un estándar de la onda sinusoidal, ya que debemos tomar en cuenta que los parámetros mencionados anteriormente para realizar el ensayo triaxial no son constantes y los tiempos de pulsación que representan las ondas trianguladas y cuadradas varían desde la mayor a menor respectivamente, realizando una comparación entre la onda sinusoidal y las diferentes velocidades del estudio. (Guitierrez & Marlene, IQuitos 2003)

En la ilustracion 7 se puede apreciar la carga sinusoidal con el tiempo de aplicación de la carga de 0.1 segundos, luego su descanso de 0.9 segundos que se formarían durante un ciclo de carga.

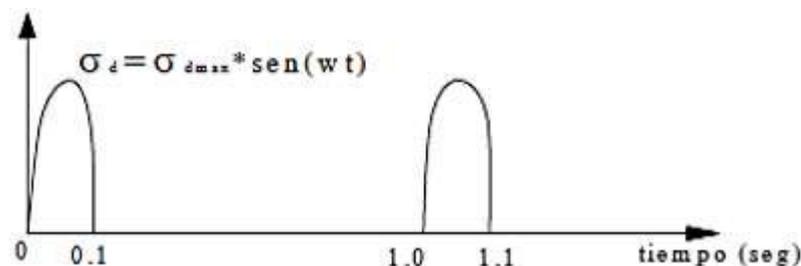


Ilustración 7
Onda la carga sinusoidal

Fuente: Lymaimanta Mendoza & Gutiérrez Lazares, 2003

¹⁴ Tomado de la tesis Rojas Quinteros



1.4.4 Breve análisis de los estados de esfuerzo utilizados en la determinación de M.r. mediante ensayos triaxiales dinámicos.

(Salas, 2011) Afirma que el esfuerzo cortante en los suelos es el aspecto más importante dentro de la ingeniería geotécnica, “para el diseño de pavimentos este ensayo se ve influenciado de forma indirecta por la resistencia al cortante de los suelos, ya sea en el análisis de la estabilidad de un talud o en el diseño de las fundaciones que soportan el pavimento, específicamente la subrasante.”

En los ensayos de carga dinámica se pueden variar las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales sobre la muestra del suelo de ahí su nombre de ensayo triaxial, efectuando mediciones sobre sus características mecánicas y resistencia al corte en forma acertada y completa.

1.5 Factores que afectan el módulo de resiliencia.

A continuación, se menciona algunos factores que afectan al Módulo de resiliencia en cuanto a su magnitud, como se mencionó anteriormente el módulo resiliente será variante inclusive en un mismo material dependiendo del estado de esfuerzos al que sea sometido, entre los factores que afectan el M.r. está también el esfuerzo desviador. (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)

- I. Contenido de humedad:** Este factor afecta directamente a la masa unitaria seca máxima, por su contenido de agua dentro de los materiales. Los diferentes estados que se puede encontrar el material ya sea húmedo o seco, provocan diferentes variaciones en cuanto a las deformaciones resilientes.

En la ilustración 8 se muestra una comparación de estudios realizados con materiales granulares de Oklahoma donde se procedió a realizar una granulometría con un contenido de agua $\pm 2\%$ de la óptima de compactación. Como un resultado de este ensayo se encontró la disminución del módulo resiliente en la granulometría fina por debajo de las otras dos debido al contenido de humedad. (Garcia, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016)

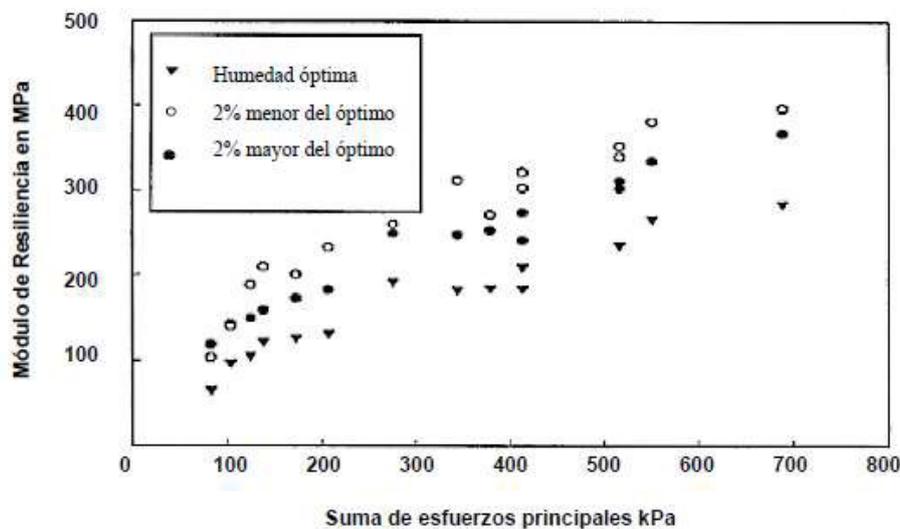


Ilustración 8 Valores del M.R. para variaciones en el contenido de humedad

Fuente: (Garcia, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016)

II. Masa unitaria seca máxima: Este factor se determina a través del ensayo de compactación del material en laboratorio de suelos, el mismo genera una mayor rigidez y a su vez aumenta el Módulo Resiliente (M.r.). Para una estructura de pavimento el volumen de agua varía de acuerdo al tiempo, este factor depende del contenido de humedad que se encuentre dentro del suelo ya que puede estar tanto seco como húmedo y está relacionado con el contenido de agua óptimo. (Anguas, Pérez, & Gómez, 2001)

III. Módulo resiliente en suelos granulares: (Rojas Quintero, 2014) Señala que para los suelos granulares, el tamaño de la partícula, la granulometría, el contenido de humedad y la masa unitaria influyen en el valor del M.r., el mismo solo depende del esfuerzo aplicado debido a su poca plasticidad y su magnitud aumenta para mayores esfuerzos desviadores como ya se había mencionado.

IV. Influencia del esfuerzo: Varios autores han demostrado que el valor del módulo resiliente (M.r.), depende principalmente de la presión de confinamiento y mantiene una relación de proporcionalidad directa con la suma de los esfuerzos, la misma que genera el crecimiento del módulo en materiales granulares como se muestra en la ilustración 9. (Anguas, Pérez, & Gómez, 2001) (Rondón & Reyes, 2007)

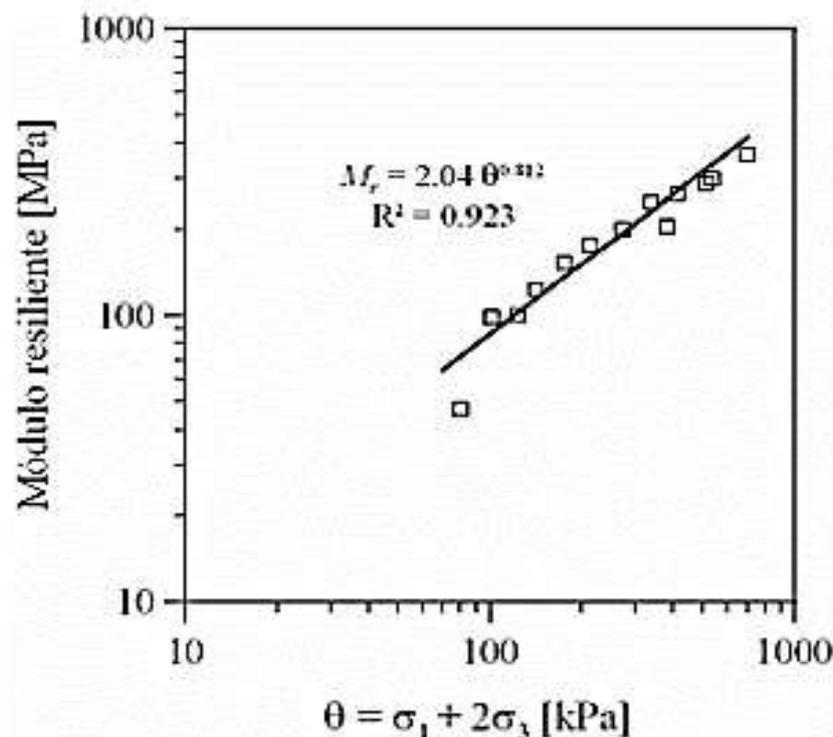


Ilustración 9
Variación del módulo resiliente con esfuerzo

Fuente: Heydinger et al, 1996



V. **Influencia de la granulometría, tamaño máximo, cantidad de finos y forma de**

la partícula: Entre mayor presencia de finos en un material granular la rigidez tiende a disminuir, el conocimiento que se tiene sobre los materiales bien graduados usualmente tiene la más alta resistencia mecánica con contenidos de finos por debajo del 9%. Barksdale & Hicks 1973, realizaron ensayos cíclicos sobre materiales triturados y parcialmente triturados, reportan que el módulo disminuyó con el aumento de finos para el caso del material parcialmente triturado, y aumento para el caso del material totalmente triturado.

Sweere 1990 concluye que, dependiendo del tipo del material y granulometría escogida, el tamaño del espécimen puede influir en las mediciones del módulo resiliente. El reporto que la rigidez en ensayos triaxiales cíclicos con especímenes de 40cm de diámetro presenta en algunos materiales, alrededor del 70% el valor de rigidez cuando se realiza el mismo ensayo en especímenes de 15cm de diámetro. Similar observación es reportada por Janoo & Bayer 2001 para el caso de un material de diferente angularidad (100 – 50 – 0% del material triturado). Ellos obtuvieron sobre especímenes con diámetro de 15cm módulos entre 35 – 50% más altos que aquellos obtenidos sobre especímenes con diámetro de 30 cm. Observaron que la angularidad de las partículas tiene una leve influencia sobre la respuesta resiliente, pero los resultados de los ensayos cuando se emplean especímenes de 30cm de diámetro son contradictorios a aquellos que se emplean especímenes de 15cm” (Salas, 2011)



1.6 Análisis y discusión de los módulos resilientes de las capas que componen los materiales granulares de pavimento flexible y rígido.

Estos nuevos conceptos en el diseño de pavimentos analizan y estudian el comportamiento elástico de los pavimentos. En realidad a los pavimentos no se consideraban elásticos por presentar deformación permanente con cada carga que se aplica sobre ellos; sin embargo con las investigaciones y ensayos pertinentes se demostró que tras varios ciclos de carga los materiales se endurecen y solo se producen en ellos una deformación recuperable, esta deformación se la conoce como resiliencia. (Rondón & Reyes, 2007) (Anguas, Pérez, & Gómez, 2001)

Dentro de las diferentes metodologías que se utilizan para el diseño de pavimentos¹⁵ se toma en cuenta un parámetro muy importante que lleva por nombre módulo resiliente como la base para la caracterización del comportamiento de suelos y materiales granulares. Este parámetro debe ser tomado en cuenta dentro del diseño con sumo cuidado ya que de este dependen también los factores que influyen en el diseño de pavimentos. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

(AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993) Describe los procedimientos que se debe seguir para el diseño de pavimentos, el cual se basa principalmente en encontrar el número estructural para que el pavimento pueda soportar el nivel de carga solicitado.

Sin embargo en el mismo, el valor del M.r. es tomado en base al valor de CBR que si bien es casi exacto el valor apropiado de módulo resiliente debería ser determinado para las condiciones que corresponden a la condición final del suelo y de acuerdo con el nivel de esfuerzos aplicados por los vehículos que circularan dentro del pavimento a través del ensayo triaxial dinámico.

¹⁵ Rígido, flexible y articulado.



Los materiales granulares y la subrasante tienen un comportamiento no lineal y el módulo de elasticidad o resiliente varia con el nivel de esfuerzos aplicados y las condiciones de carga, el cual se obtiene con una prueba triaxial dinámica.

1.7 Valores típicos de M_r.

(Garcia, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016) Muestran valores típicos de módulos resilientes para subrasantes en New Hampshire (USA) presentados en la tabla 4 y 5, estos valores fueron tomados bajo las condiciones de humedad óptima y densidad seca máxima.

Tabla 4
Valores de M_r para suelos según New Hampshire

Fuente: (Garcia, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016)

Descripción del suelo	W _{opt} (%)	Densidad (kg/m ³)	M _r efectivo (MPa)
Limo con algo de arena fina. Algo de grava de fina a gruesa. Algo de arena de gruesa a media	9.0	2050	45
Arena fina, algo de limo	14.5	1714	62
Grava de fina a gruesa y pequeñas cantidades de arena fina	9.5	1730	265
Arena de gruesa a media, pequeñas cantidades de arena fina	13.6	1642	26
Limo arcilloso	23.5	1618	21

Tabla 5 Tabla sobre valores de M_r para suelos según New Hampshire

Fuente: (Garcia, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016)

Tipo de suelo	Pasa malla No. 200, %	W _{opt} (%)	Peso volumétrico seco máximo (kN/m ³)	M _r (MPa)
SW	10.0	6.9	20.97	89.7
SW	10.0	7.8	20.70	92.5
CL-ML	60.7	6.4	20.77	71.8
SP-SM	8.9	9.3	19.05	67.6
SP-SM	7.3	6.3	21.68	92.5
SW-SM	7.2	8.6	19.81	82.8
SM	11.3	10.0	19.27	91.1
SC	20.8	6.1	21.18	90.4

(Pérez García, Garnica Anguas, Curiel Iñiguez, & Ruiz Sanginez, 2016) Ha recopilado registros de valores comunes de módulos resilientes que se presentan en la ilustración 11 y 12 para suelos según la clasificación AASHTO y SUCS que varían en un rango desde 40000Psi como máxima magnitud hasta 5000Psi, esta información fue reportada por Mokwa y Akin 2009.

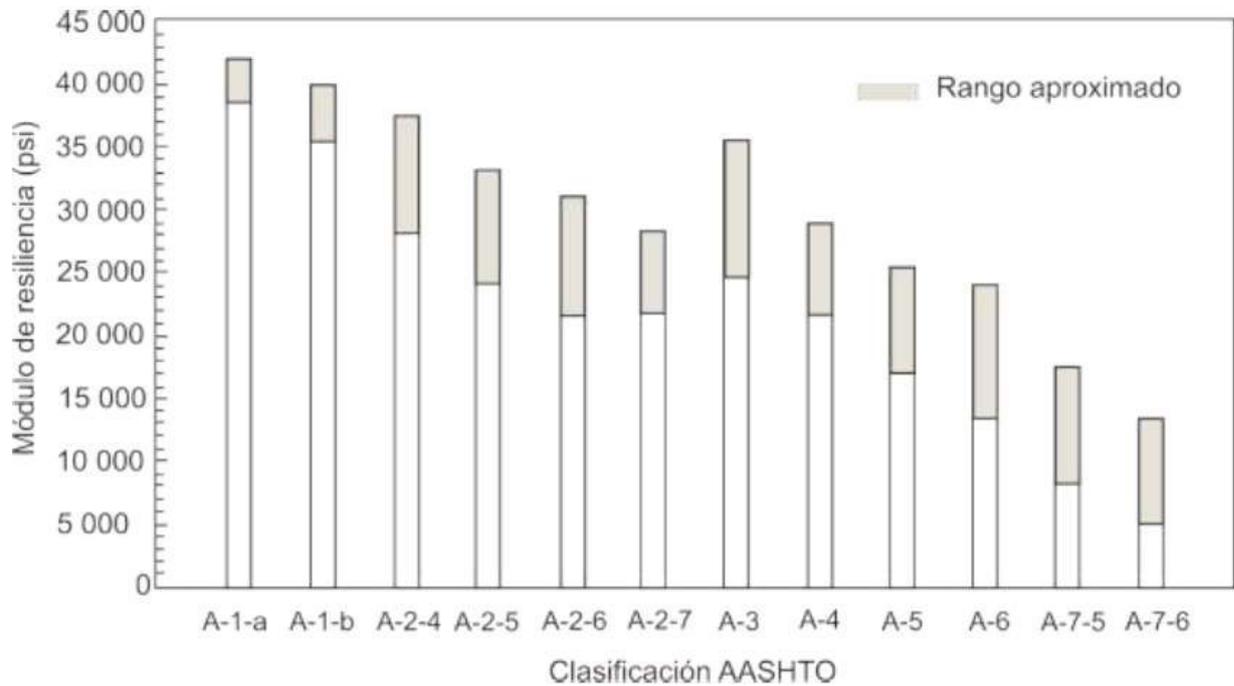


Ilustración 10
Valores típicos de M.r. para suelos clasificados con el sistema AASHTO

Fuente: (Garcia, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016)

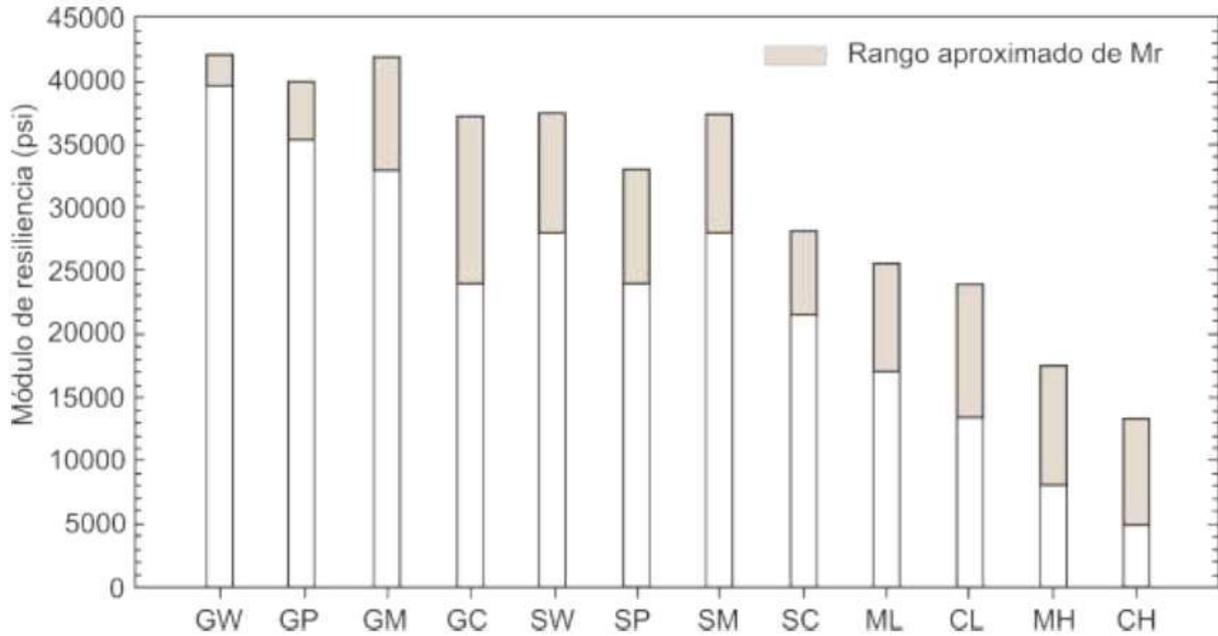


Ilustración 11 Valores típicos de M.r. para suelos clasificados con el sistema SUCS

Fuente: (García, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016)

(García, Anguas, Rufino, Iniguez, & Sanguinez, 2016) Menciona al respecto de los datos recopilados que existen gran cantidad de modelos para determinar el módulo de resiliencia, pero es importante reconocer que algunos no fueron adecuadamente documentados, lo cual puede conducir a realizar extrapolaciones fuera de rango de calibración, reduciendo la confiabilidad.

De aquí parte el objetivo de la presente investigación ya que por lo general para diseños en nuestro país los valores de M.r. son tomados de tablas establecidas por otros países siendo lo adecuado que cada país determine sus propios modelos que sean adecuados tanto para suelos y materiales granulares que se utilizan o comercialicen en el país así como también para las condiciones de carga que rigen en el mismo.



1.8 El valor soporte de California (CBR).

1.8.1 Definición formal de valor soporte de California

El CBR tiene como finalidad medir la capacidad de soporte de los suelos y agregados compactados en laboratorio de suelos, con una humedad óptima y diferentes niveles de energía de compactación.

Mide la resistencia del suelo en ensayo de laboratorio a través de la penetración de un pistón de 3 pulg² de área en una probeta de 15cm de diámetro y 12.5cm de altura aproximadamente¹⁶ con una velocidad de 1.27 mm/min. La fuerza requerida para forzar el pistón dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración que son registradas por medio de un deformímetro. Estas fuerzas se comparan con las necesarias para producir iguales penetraciones en una muestra patrón que es una piedra partida bien graduada, el cual mide en porcentaje, el cual es muy variable 2 a 3% para arcillas plásticas a 70% o más para materiales granulares de buena calidad. (Rondón & Reyes, 2007)

El CBR¹⁷ sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, subbase, y base de pavimentos. Este estudio mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidades controladas, permitiendo obtener un % de la relación de soporte del suelo.

Los ensayos de CBR se realizan sobre muestras compactadas con un contenido de humedad óptimo obtenido previamente del ensayo de compactación Proctor modificado, antes de realizar el ensayo de penetración las probetas se saturan durante 4 días para simular las condiciones de trabajo más desfavorables y para determinar su posible expansión (comúnmente en materiales plásticos). Para este ensayo se necesitan tres probetas

¹⁶ Las dimensiones exactas son obtenidas en laboratorio con ayuda de un calibrador.

¹⁷ También es conocido como el valor relativo soportante (VRS)



normalizadas con diferentes energías de compactación que incluyen 56, 25 y 12 golpes respectivamente.

El material con el que se va a realizar el ensayo debe contener una cantidad pequeña de material que pase por el tamiz de 50 mm y que quede retenido en el tamiz 20 mm.

1.8.2 Procedimientos de obtención de valor soporte de california

Para realizar este procedimiento de obtención de valor soporte de california necesitamos equipo y materiales que a continuaciones se presentan:

Equipo y materiales:

- I. Tres muestras de 5500 gr.
- II. Tres moldes de acero.
- III. Equipo de carga.
- IV. Disco espaciador.
- V. Pistón de 10lb.
- VI. Sobrecarga.
- VII. Balanza.
- VIII. Tarros para muestra de humedad.
- IX. Cucharón.
- X. Aceite.
- XI. Probetas.
- XII. Papel filtro.
- XIII. Enrasador.
- XIV. Martillo de caucho.



Procedimiento:

- I. Para la prueba de CBR se realizarán 3 ensayos con muestras de 5500gr cada una, los mismo recibirán tres diferentes tipos de energía de compactación dentro de un molde de 15cm de diámetro y 12.5cm de altura aproximadamente.
- II. A través del ensayo Proctor modificado se determina la densidad seca máxima y la humedad óptima. Esta humedad óptima será la necesaria para la realización del ensayo de CBR.
- III. Antes de realizar el ensayo los moldes deben ser adecuados colocando papel filtro antes de la muestra, luego se procede a poner el material previamente pesado y con la cantidad de agua que simula la humedad requerida para proceder a compactarlo, los golpes para la compactación serán repartidos por toda la superficie en 3 capas dentro del molde.
- IV. Una vez realizado la compactación se procede a enrasar toda la superficie para quitar el exceso de material, luego de lo cual se procede a pesar el material.
- V. Terminado el proceso los moldes serán llevados a una piscina de agua donde serán sumergidos por 4 días, en el cual se procederá a tomar la lectura manométrica diaria para medir la cantidad de esponjamiento de la muestra.
- VI. Luego de este tiempo se retira las muestras del agua y se las deja secar para luego realizar el ensayo de penetración; el molde es llevado al equipo que tiene la función de medir las cargas ejercidas sobre el suelo y al costado del equipo se van viendo las deformaciones de la muestra.
- VII. Terminado el ensayo de penetración se ve como se ha dado la carga sobre la muestra, conforme se fueron disminuyendo los golpes al momento de realizar la compactación, todas las muestras tendrán la misma penetración, pero diferente carga que genera esa penetración.



VIII. Este mismo procedimiento se llevó a cabo con las demás muestras diferenciada por la energía de compactación durante el ensayo; se deberá obtener de igual manera muestras de humedad del material antes de ser sumergido y después del ensayo de penetración.

1.8.3 Requisitos mínimos de CBR que debe cumplir un material granular para pavimentos según Norma Ecuatoriana Vial 2012.

Los ensayos más importantes en la ejecución de bases y subbases son los relacionados con la capacidad portante de suelo conocido como CBR que debe garantizar los requerimientos necesarios para considerar un material granular y con la drenabilidad¹⁸ de las capas granulares, esto relacionado con el índice de plasticidad.

La capacidad portante es el dato fundamental en casi todos los métodos y por ello debe comprobarse en la capa ejecutada para verificar las condiciones iniciales de cálculo que rigen el diseño de la fundación, interpretando adecuadamente los datos de CBR en función de la densidad, humedad, profundidad del punto de ensayo.

1.8.3.1 Subbases

Se denomina subbase a la capa granular localizada entre la subrasante y la base granular en los pavimentos flexibles, y a la capa que normalmente debe colocarse inmediatamente debajo de un pavimento rígido”. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013), la subbase también podrá ser clasificada en función de su calidad en tres clases de 1ª a 3ª y su utilización dependerá de la especificación en el tipo de proyecto.

¹⁸ Los materiales granulares deben cumplir con índices bajos de plasticidad para no provocar hinchamientos o asentamientos en la estructura debido a la acumulación de agua



(Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) Indica los requerimientos¹⁹ que debe cumplir los materiales granulares para ser considerados, en el caso de la subbase:

- I. Los agregados que se emplean deberán tener un coeficiente de desgaste máximo de 50% de acuerdo con el ensayo de abrasión de los Ángeles.
- II. La porción que pase por el tamiz N°40 deberá tener un índice de plasticidad menor que 6.
- III. Limite líquido máximo de 25.
- IV. CBR igual o mayor a 30%.

1.8.3.2 Bases

(Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) Describe a la base como un material compuesto por agregados triturados total o parcialmente o cribados, estabilizados con agregado fino procedente de la trituración, o suelos finos seleccionados; que se encuentra en el caso de pavimentos flexibles inmediatamente superior a la capa de subbase y debajo de la capa de pavimento.

De igual manera según sus características de agregados y distribución granulométrica que definirán su calidad podrán ser clasificados de 1ª a 4ª clase, los requerimientos que deben cumplir para ser considerados como material base son los siguientes: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

¹⁹ Características del material granular



- I. El límite líquido de la fracción que pase el tamiz N° 40 deberá ser menor de 25.
- II. El índice de plasticidad deberá ser menor de 6.
- III. Desgaste por abrasión de los agregados será menor del 40%.
- IV. CBR deberá ser igual o mayor al 80%.

Si bien es cierto los requerimientos para cumplir como material base son algo más exigentes a comparación del material subbase sin embargo el uso de cada uno de ellos dependerá como se mencionó anteriormente de las especificaciones del proyecto a ser usadas, además de esto en la tabla 6 se puede observar recomendaciones dadas por la NEVI-12²⁰ para el uso de material base según su clase.

Tabla 6 Recomendaciones de material tipo base

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

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	> 50.000
BASE CLASE 2	Carreteras de 2 hasta 6 carriles con un ancho mínimo por carril de 3.65m. Se incluye franja central desde 2 a 4m.	2 a 6	8.000 – 50.000
BASE CLASE 3	Vías internas de urbanizaciones con bajo nivel de tráfico	2 a 4	1.000 – 8.000
BASE CLASE 4	Caminos vecinales	2	<1.000

1.9 Variables y procedimientos de ensayo para la obtención de valor soporte califonia

De acuerdo con las diferentes entidades que se encargan de realizar estudios de diseño de pavimentos, la mayoría no cuentan con el equipo apropiado para realizar las pruebas de módulo resiliente debido a los altos costos del equipo y en algunos otros casos de no existir los equipos necesarios para la realización del ensayo por lo que se ha desarrollado innumerables investigaciones para establecer correlaciones entre las diferentes características una de ellas valor soporte califonia.

²⁰ Normativa ecuatoriana vial



En el capítulo segundo se presenta cada uno de los procedimientos que se utilizan para realizar el ensayo de CBR que mide la capacidad portante del suelo. La realización del ensayo CBR en esta investigación será de gran importancia debido a que es una de las características del material con las que se podrá realizar las debidas correlaciones para obtener el valor de módulo resiliente posiblemente los valores más acercados a la realidad.

(Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013) Enumera los ensayos que se deben realizar previo la obtención del CBR para materiales granulares entre los cuales tenemos los siguientes:

- I. Granulometría.
- II. Límites de Atterberg.
- III. Densidad máxima (Ensayo proctor modificado)
- IV. CBR.

Dentro del siguiente capítulo se realizarán los ensayos antes enumerados a las muestras recolectadas de las plantas procesadoras en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Cuenca con el objetivo de antes verificar el cumplimiento de los materiales granulares como base y subbase y luego clasificar los materiales según el método más conveniente con el fin encontrar valores de módulo resiliente adecuados según sus características físico mecánicas.



2 CAPÍTULO SEGUNDO: Ensayos para la obtención de CBR Y Módulos resilientes.



2.1 Muestro de materiales.

En cuanto a la delimitación espacial, la realización de la segunda parte de este proyecto requiere una cierta cantidad de muestras de materiales granulares. Los cuáles serán ensayados mediante el método más propicio determinado en la primera parte. Dichas muestras se obtendrán tras una socialización a los miembros encargados de las plantas procesadoras más representativas que provean a la Ciudad de Cuenca, tanto en términos de cercanía como de frecuencia de adquisición.

Resulta importante aclarar que los materiales no necesariamente provienen de lugares dentro del territorio del Cantón Cuenca, para este estudio; ello se considera de poca trascendencia²¹.

La zona de estudio como tal, comprende el Cantón Cuenca, si bien es cierto la investigación bibliográfica-teórica a realizarse se basará en estudios de otros países, la aplicación del método de determinación de módulos resilientes más idóneos para materiales granulares será realizada como un ejemplo de aplicación y se utilizarán insumos²² comercializados en el cantón Cuenca.

No obstante, este estudio se puede extender a lugares cercanos donde se usen materiales granulares de las plantas procesadoras estudiadas. La ilustración 12 muestra el área de estudio correspondiente a la presente investigación.

²¹ Lo realmente importante, es la adquisición de estos materiales por parte de empresas dedicadas a la construcción de pavimentos.

²² Materiales granulares: base y subbase

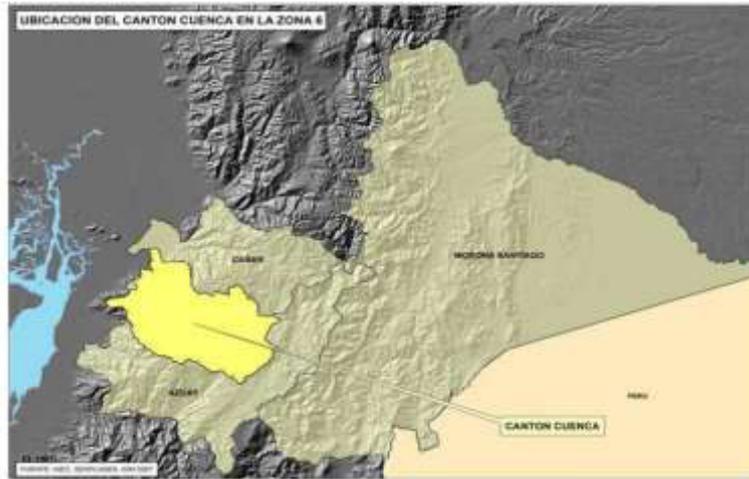


Ilustración 12 El Cantón Cuenca (Color amarillo) pertenece a la Provincia del Azuay.

Fuente: http://app.sni.gov.ec/snmlink/sni/Portal%20SNI%202014/FICHAS%20F/0101_CUENCA_AZUAY.pdf

El conjunto universo presentado en la ilustración 13, constituye las cuatro plantas procesadoras principalmente proveedoras a las empresas constructoras de pavimentos del Cantón Cuenca. De aquí se procederá a tomar muestras de materiales granulares para determinar ciertas propiedades mecánicas y físicas, parámetros que son indispensables para las modelaciones o ecuaciones que otorgan como resultado, el valor de módulo resiliente.



*Ilustración 13 Plantas procesadoras/ proveedoras de materiales granulares para la construcción de pavimentos.
Fuente: Google Earth 2018*



Para realizar los ensayos de CBR se tomaron siete muestras de materiales granulares provenientes de las plantas procesadoras indicadas anteriormente, se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 Muestreo de materiales granulares

Fuente: Autor

FUENTE	MATERIAL	
	BASE	SUBBASE
PLANTA PROCESADORA ROCKAZUL	1	1
PLANTA PROCESADORA VIPESA	1	1
PLANTA PROCESADORA HORMICRETO	1	1
PLANTA PROCESADORA TRELLES	1	0

2.2 Características granulométricas de materiales muestrales.

Se puede definir como granulometría a la distribución de diferentes tamaños de las partículas de un árido. Para obtener esta distribución se pasa el material por una serie de tamices²³, la tabla 8 muestra el número de tamiz en pulgadas y la abertura en mm usado en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Cuenca, tamices que ayudaran a ver la graduación correspondiente de los materiales.

²³ Elementos de marco metálico con una malla de abertura variable para retener material



Tabla 8 Formato ensayo de granulometría

Fuente: Laboratorio Universidad Católica de Cuenca

	ABERTURA	PESO RET.	RET. ACUM.	%	%	%
TAMIZ N°	MM.	GM.	GM.	RETENIDO	PASA	ESPECIF.
3"	76.2					
2 1/2"	63.5					
2"	50.8					
1 1/2"	38.1					
1"	25.4					
3/4"	19.1					
1/2"	12.7					
3/8"	9.52					
N°4	4.76					
PASA No4						
10	2					
40	0.42					
200	0.074					
FONDO						
TOTAL						

Además de esto existen clasificaciones de suelos según el tamaño de sus partículas que definirán el contenido ya sea de grava, arenas, limos y arcillas entre las cuales están las siguientes:

- I. Clasificación Internacional: Esta desarrollada en Suecia. Véase tabla 9

Tabla 9 Clasificación por el tamaño de agregado

Fuente: (Juarez & Rico, 2005)

Tamaño en mm				
2	0.2	0.02	0.002	0.0002
Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	Ultra-Arcilla (coloides)



- II. Clasificación M.I.T.: *Esta* Clasificación es propuesta por G. Gilboy y fue adoptada por el Massachusetts Institute of Technology. Véase tabla 10

Tabla 10 Clasificación por el tamaño de agregado

Fuente: (Juarez & Rico, 2005)

Tamaño en mm								
2	0.6	0.2	0.06	0.02	0.006	0.002	0.0006	0.0002
Gruesa	Media	Fina	Grueso	Medio	Fino	Gruesa	Media	Fina (Coloides)
ARENA			LIMO			ARCILLA		

- III. Clasificación utilizada desde el año 1936 en Alemania, la misma está realizada por Kopecky. Véase tabla 11

Tabla 11 Clasificación por el tamaño de agregado

Fuente: (Juarez & Rico, 2005)

MATERIAL	CARACTERISTICA	TAMAÑO EN mm
Piedra	-----	Mayor de 70mm
Grava	Gruesa	30 a 70
	Media	5 a 30
	Fina	2 a 5
Arena	Gruesa	1 a 2
	Media	0.2 a 1
	Fina	0.1 a 0.2
Polvo	Grueso	0.05 a 0.1
	Fino	0.02 a 0.05
Limo	Grueso	0.006 a 0.02
	Fino	0.002 a 0.006
Arcilla	Grueso	0.0006 a 0.002
	Fina	0.0002 a 0.0006
Ultra Arcilla	-----	0.00002 a 0.0002

“Solamente en suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de lo referente a las propiedades físicas del



material; en efecto, la experiencia incide que los suelos gruesos bien graduados, o sea con amplia gama de tamaños, tienen comportamiento ingenieril más favorable, en lo que atañe a algunas importantes, que los suelos de granulometría muy uniforme” (Juarez & Rico, 2005). Además para la correcta clasificación de un suelo se debe obtener constantes resultantes de los ensayos de granulometría, estas constantes son:

- I. Coeficiente de uniformidad
- II. Coeficiente de curvatura
- III. Porcentaje de gravas
- IV. Porcentaje de arenas
- V. Porcentaje de finos
- VI. Limite liquido
- VII. Limite plástico
- VIII. Índice de plasticidad

Para obtener las características granulométricas de los materiales granulares se realizó el siguiente proceso de ensayo en el laboratorio:

- I. Del material granular extraído de la cantera se procede a tomar una muestra adecuada que sea representativa no mayor a 20 kilogramos para realizar el ensayo.
- II. El material pesado será colocado en la tamizadora por un tiempo de 10 minutos, tiempo adecuado para graduar el material del ensayo.
- III. Transcurrido 10 minutos se procede a retirar los tamices; el material retenido en cada uno de ellos será pesado para obtener la distribución granulométrica respectiva representada en porcentajes que retienen cada tamiz, producto de este proceso se obtendrá la curva granulométrica del material.

Los ensayos de granulometría realizados a las muestras recolectadas de las plantas procesadoras serán adjuntados como anexos junto con los demás ensayos realizados en laboratorio (Granulometría, límites de Atterberg, Proctor Modificado, CBR). (Véase Anexos).

Con el porcentaje de suelo retenido en cada uno de los tamices se construye la gráfica semilogarítmica, en el eje de las ordenadas se coloca el porcentaje en peso de la muestra retenida en los tamices y en el eje de las abscisas se coloca el valor del logaritmo de la abertura de los tamices en milímetros. (Juarez & Rico, 2005). La ilustración 14 muestra los tipos de curvas granulométricas que podrán presentarse en las gráficas según el tipo de suelo, en el caso de nuestro proyecto las muestras recolectadas deberán obedecer²⁴ a fajas granulométricas dadas por la Normativa Ecuatoriana Vial que serán presentadas más adelante:

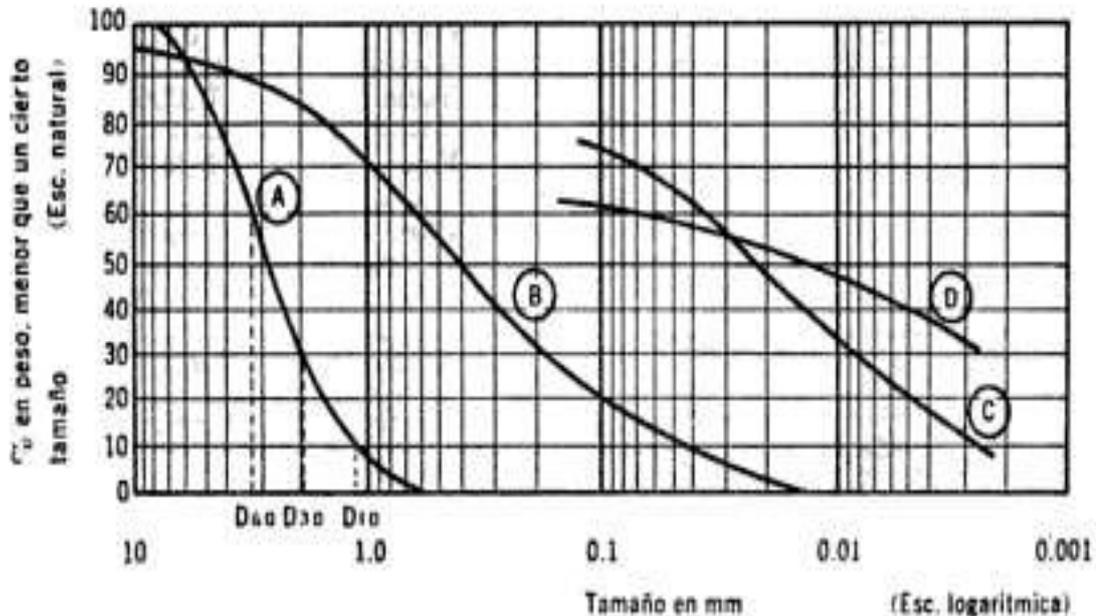


Ilustración 14 Grafico de las curvas granulométricas

Fuente: (Juarez & Rico, 2005)

²⁴ Deben estar graduada uniformemente dentro de los límites establecidos



Donde,

A: Arena muy uniforme

B: Suelo bien graduado

C y D: Arcilla a través del método del hidrómetro²⁵

2.2.1 Categorización de materiales según Norma Vial Ecuatoriana 2013

2.2.1.1. Subbases

Como se mencionó en el capítulo anterior la NEVI-12 clasifica los materiales granulares según su calidad desde 1ª a 3ª clase, la tabla 12 muestra la clasificación del material subbase según la distribución del tamaño de sus partículas, más adelante se muestran las fajas granulométricas correspondientes a cada clase:

Tabla 12 Porcentaje en peso que pasa a través de la malla cuadrada

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

TAMIZ		SUBBASE CLASE 1		SUBBASE CLASE 2		SUBBASE CLASE 3	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
3 ^o	76.2 mm						100
2 ^o	50.4 mm	-	-		100		-
1 ½ ^o	38,1 mm		100	70	100		-
Nº 4	4.75 mm	30	70	30	70	30	70
Nº 40	0.425 mm	10	35	15	40		-
Nº 200	0.075 mm	0	15	0	20	0	20

(Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) Muestra además de la clasificación por distribución de partículas los requerimientos que deben cumplir los agregados para formar parte de estos grupos.

²⁵ En la ingeniería civil, el hidrómetro se emplea para analizar la composición química del suelo.

Subbase Clase 1: Construidas con agregados obtenidos por trituración de roca o gravas, donde por lo menos el 30% del agregado deberá obtenerse de este proceso, además de esto deberá estar graduado uniformemente dentro de los límites indicados para la granulometría Clase 1 correspondiente a la ilustración 15 que será la faja granulométrica respectiva. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)

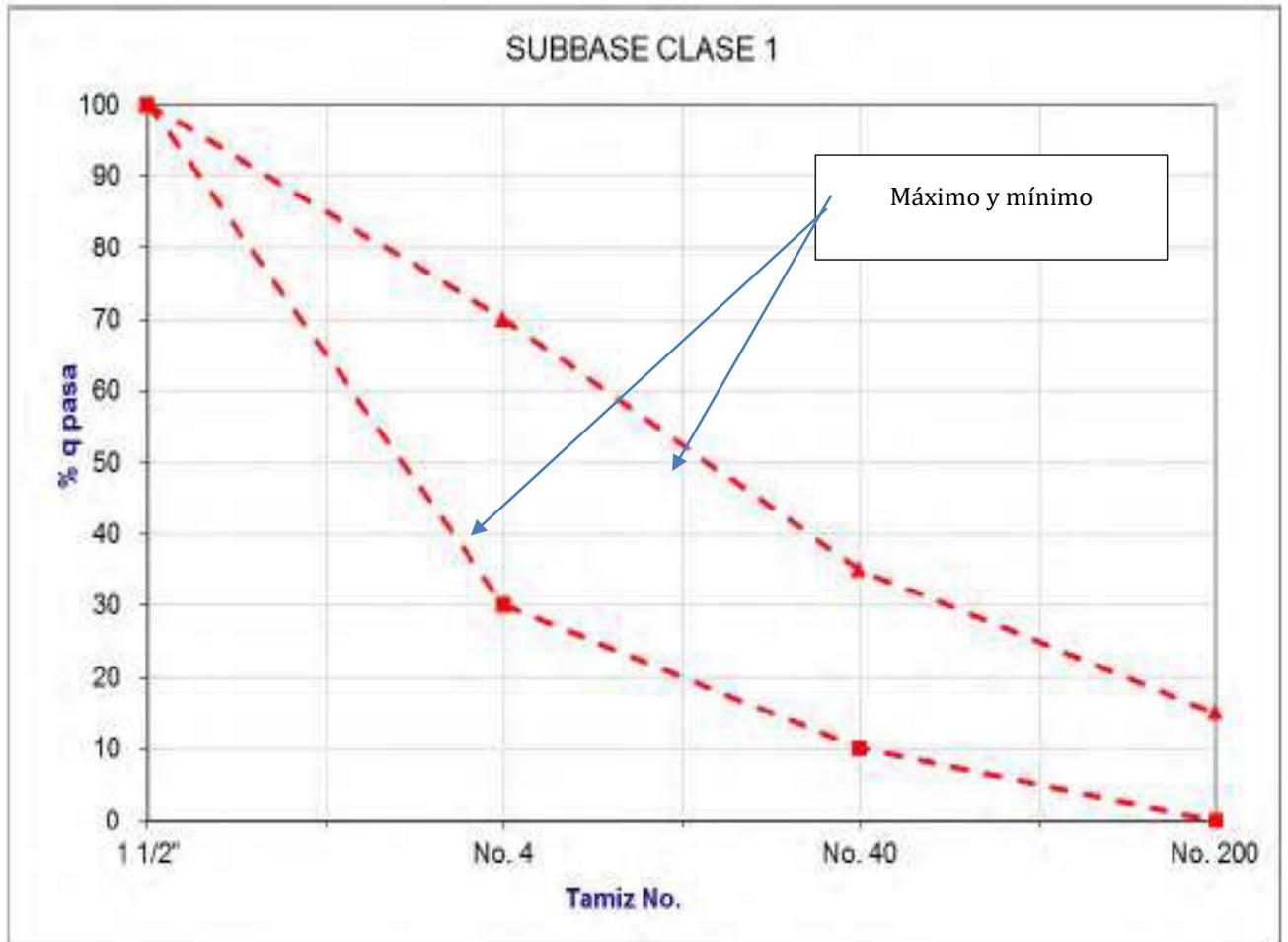


Ilustración 15 Faja granulométrica subbase clase 1

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

Subbase clase 2: Construidos con agregados obtenidos mediante trituración o cribado en yacimientos de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas que deberán estar graduados uniformemente dentro de la respectiva faja granulométrica mostrada en la ilustración 16. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

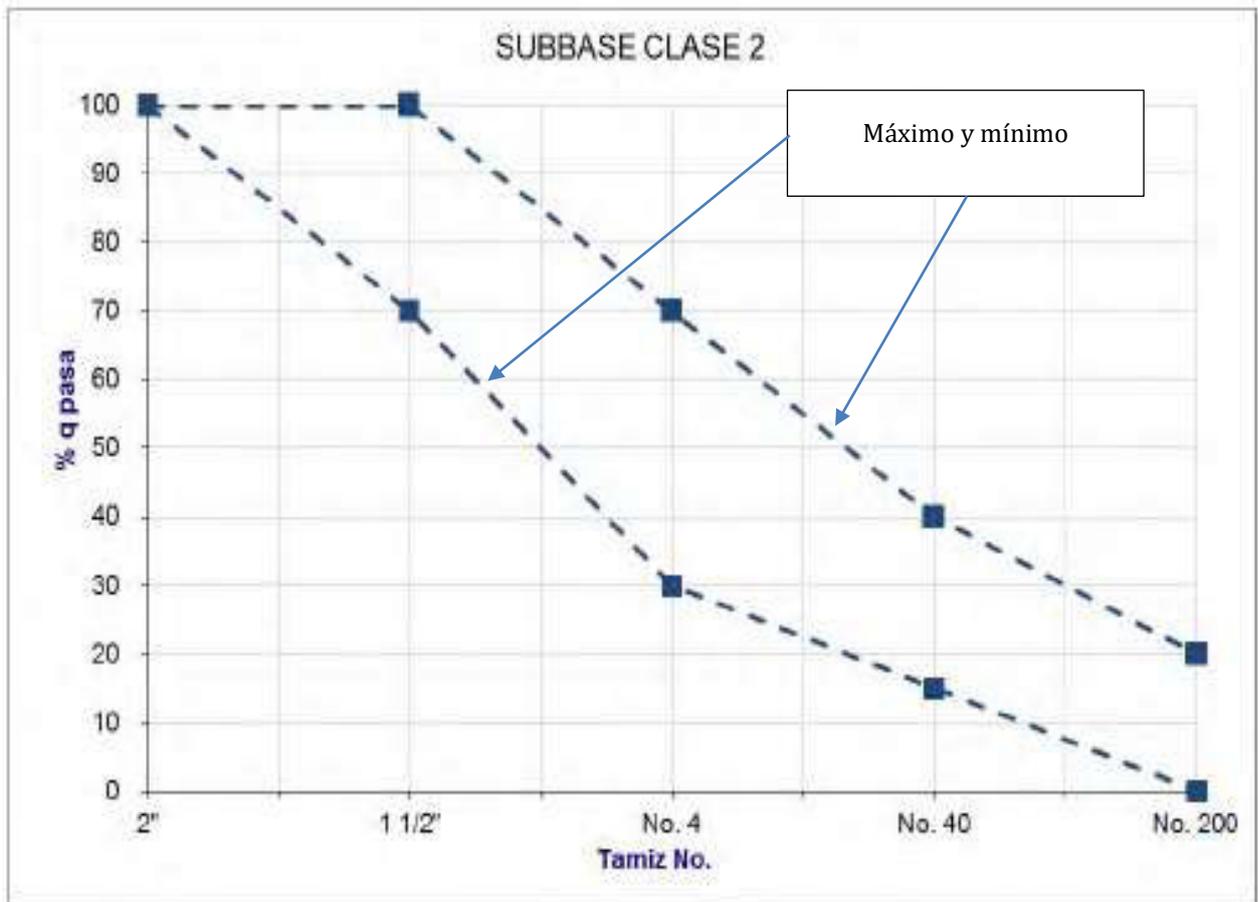


Ilustración 16 Faja granulométrica subbase clase 2

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

Subbase clase 3: Subbases constituidas con agregados naturales y procesados que estén dentro de la respectiva faja granulométrica mostrada en la ilustración 17. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

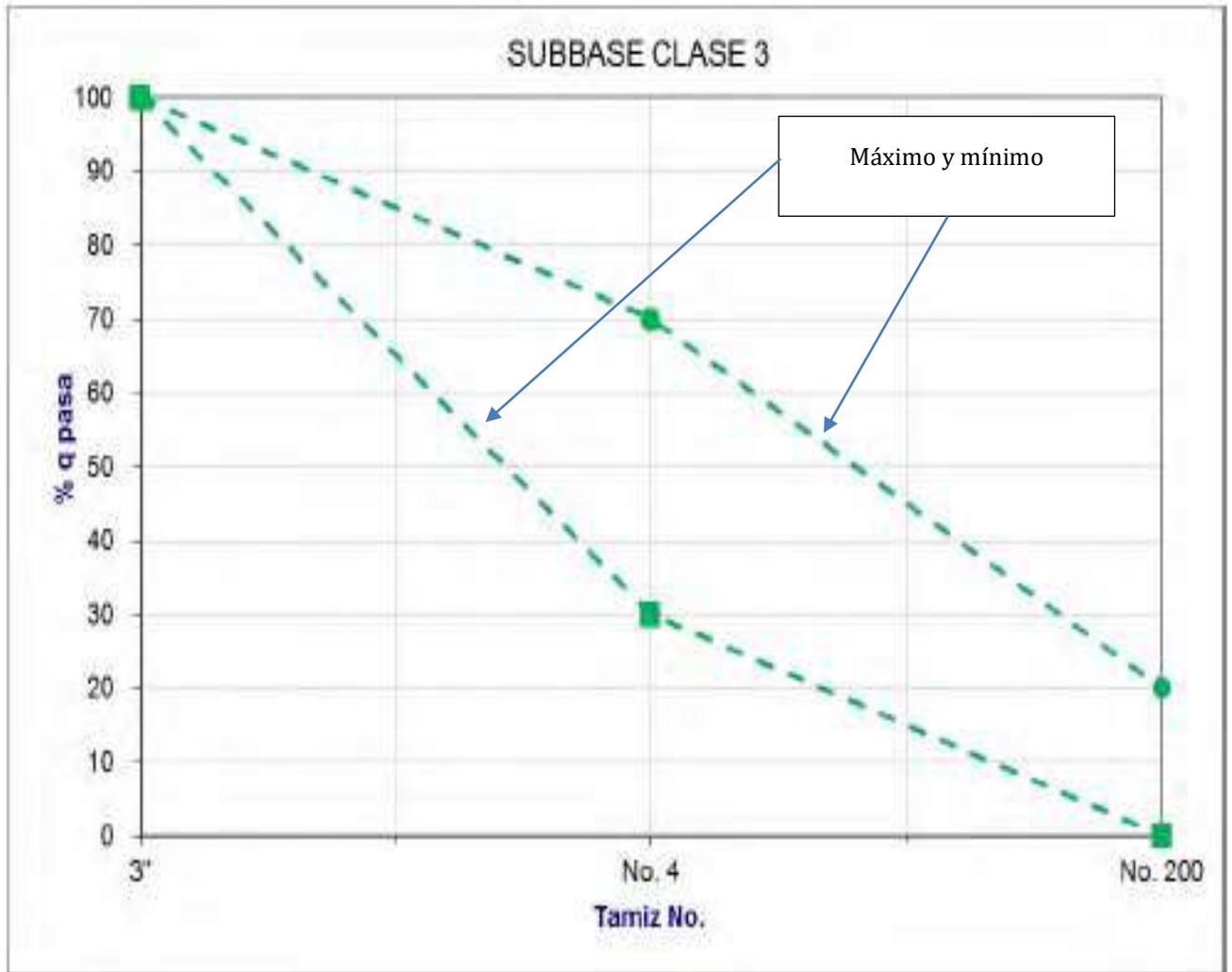


Ilustración 17 Faja granulométrica subbase clase 3

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

2.2.1.2. Bases

(Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) Menciona que los agregados del material base deberán ser elementos limpios, sólidos y resistentes exentos de polvo, suciedad, arcilla u otras materias extrañas haciendo de estos requerimientos más amplios que el material subbase, de igual manera indica una clasificación que va de 1ª a 4ª clase donde sus agregados deberán cumplir los siguientes requerimientos y distribución granulométrica.



Base clase 1: Material granular constituido por agregados gruesos y finos, que deben ser triturados en un 100%, que pueden pertenecer a dos tipos A o B dependiendo de la distribución granulométrica mostrada en la tabla 13, de igual manera la ilustración 18 muestra las fajas granulométricas respectivas . (Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador, 2013)

Tabla 13 Base clase 1

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

TAMIZ		BASE CLASE 1 TIPO A		BASE CLASE 1 TIPO B	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
2''	50 mm		100		100
1 ½''	37.5 mm	70	100	70	100
1''	25 mm	55	85	60	90
¾''	19 mm	50	80	45	75
3/8''	9.5 mm	35	60	30	60
Nº 4	4.75 mm	25	50	20	50
Nº 10	2 mm	20	40	10	25
Nº 40	0.425 mm	10	25	2	12
Nº 200	0.075 mm	2	12		

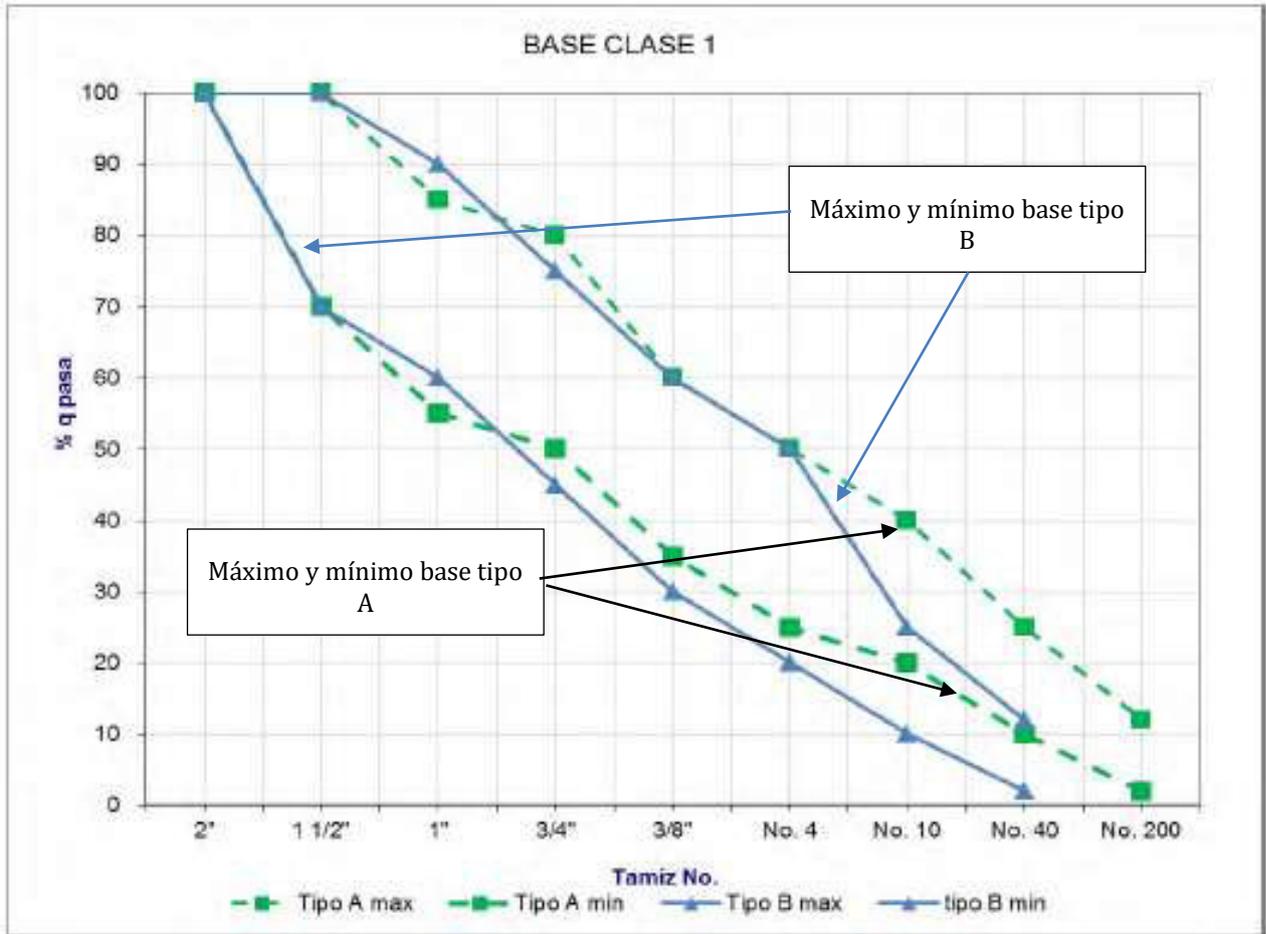


Ilustración 18 Faja granulométrica Base clase 1

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

Base clase 2: Para pertenecer a este grupo el material base deberá estar constituida por roca o base triturada en al menos un 50% de su peso, la tabla 14 muestra la distribución granulométrica que debe cumplir el material y la ilustración 19 su respectiva faja granulométrica. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

Tabla 14 Base clase 2

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 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
Nº 4	4.75 mm	25	55
Nº 10	2 mm	15	45
Nº 40	0.425 mm	5	25
Nº 200	0.075 mm	0	10

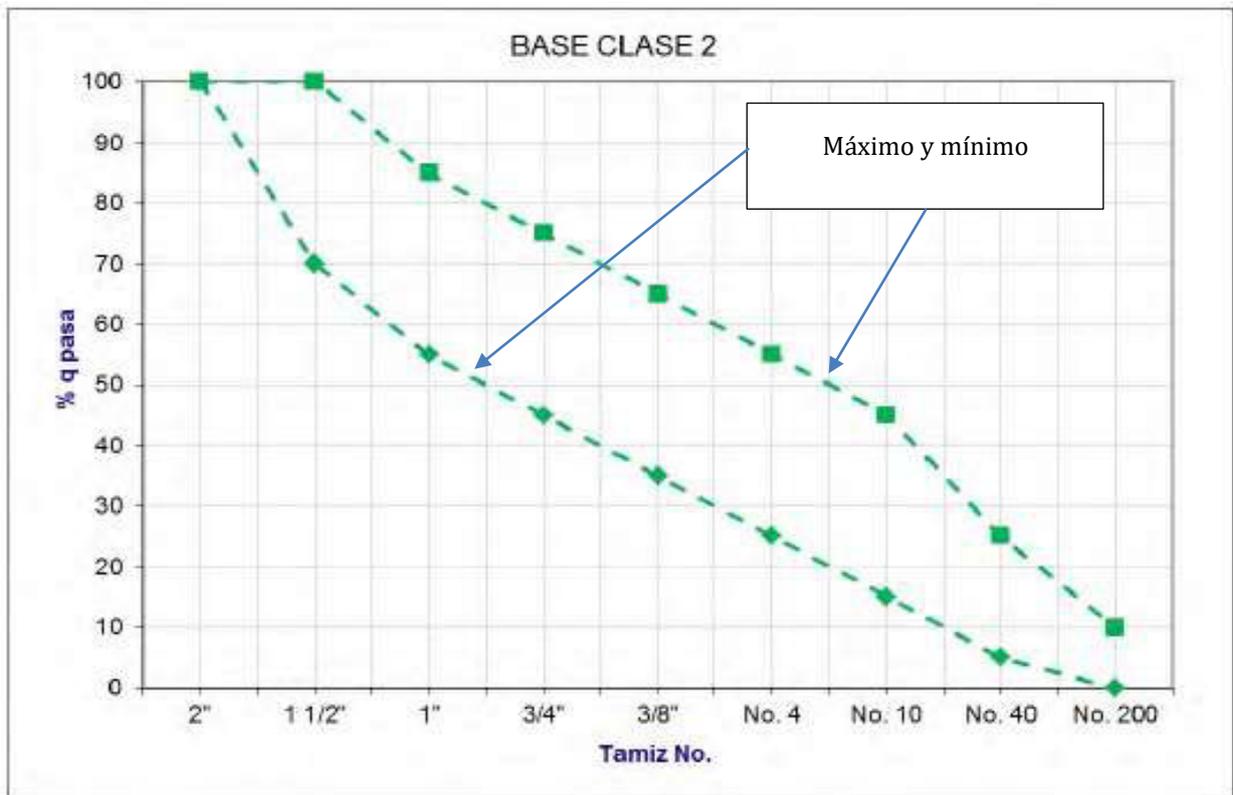


Ilustración 19 Faja granulométrica Base clase 2

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)



Base clase 3: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) establece que este material será constituido por fragmentos de toca o grava triturados equivalentes a un 25% de su peso, la tabla 15 muestra la distribución granulométrica que debe cumplir el material y la ilustración 20 su respectiva faja granulométrica.

Tabla 15 Base clase 3

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

TAMIZ		BASE CLASE 3	
		Mín.	Máx.
2''	50 mm		100
1''	25 mm	70	100
¾''	19 mm	60	90
3/8''	9.5 mm	40	75
Nº 4	4.75 mm	30	60
Nº 10	2 mm	15	45
Nº 40	0.425 mm	10	30
Nº 200	0.075 mm	0	15

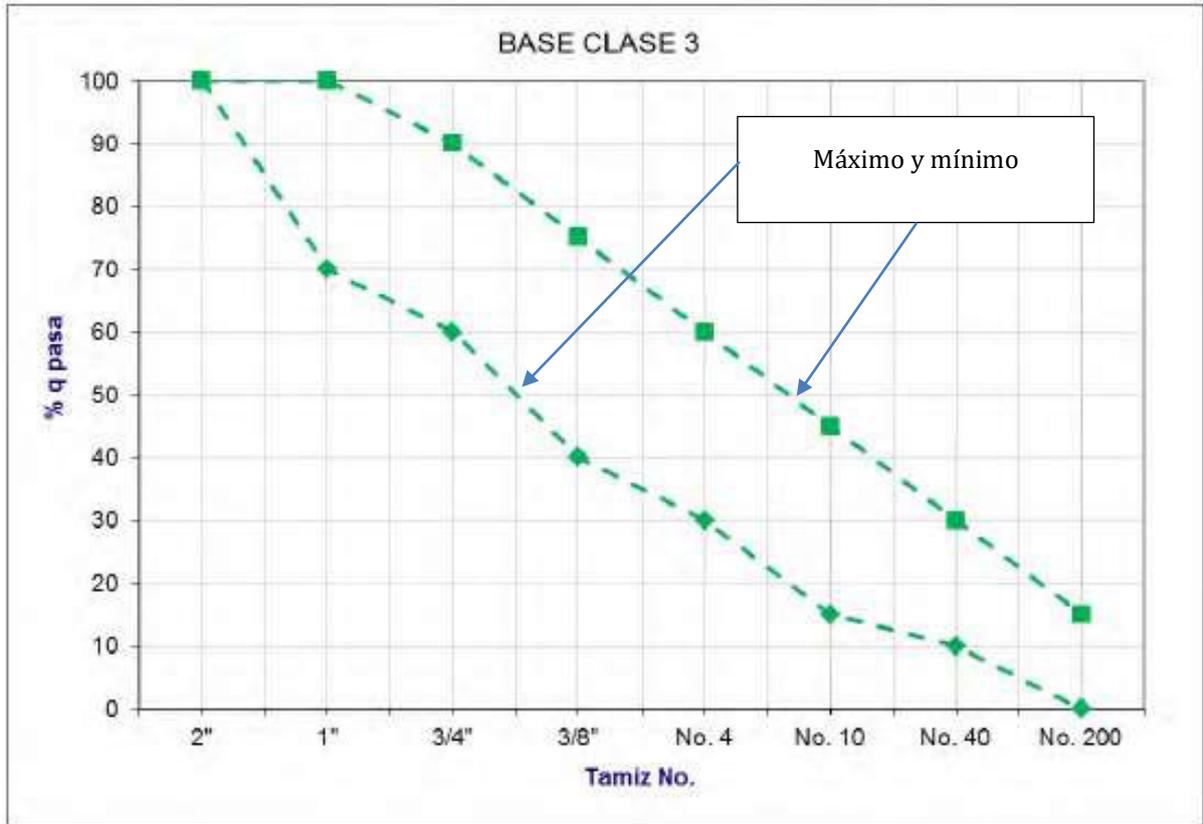


Ilustración 20 Faja granulométrica Base clase 3

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

Base clase 4: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013) Referente a la base clase 4 de material base solamente hace mención a que sus agregados deben ser obtenidos de trituración o cribado de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas, la tabla 16 muestra la distribución granulométrica que debe cumplir el material y la ilustración 21 su respectiva faja granulométrica.

Tabla 16 Base clase 4

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

TAMIZ		BASE CLASE 4	
		Mín.	Máx.
2"	50 mm		100
1"	25 mm	60	90
Nº 4	4.75 mm	20	50
Nº 200	0.075 mm	0	15

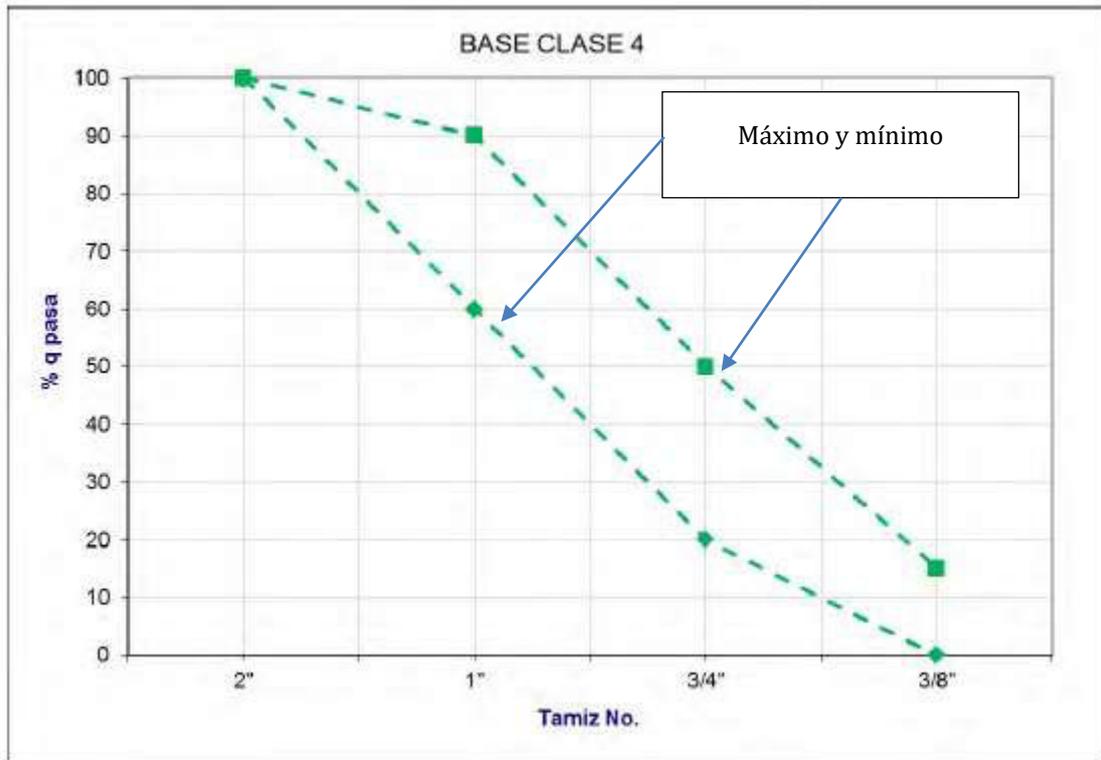


Ilustración 21 Faja granulométrica Base clase 4

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2013)

2.3 Propiedades Índice.

Las propiedades índices de los suelos brindan la identificación y clasificación del suelo en estudio. Las principales son:

- I. Relación de vacíos
- II. Porosidad
- III. Límites de Atterberg
- IV. Contenido de humedad
- V. Gravedad específica
- VI. Densidad
- VII. Granulometría

De las propiedades ante dichas serán de mayor interés en esta investigación la realización de los límites de Atterberg importantes para determinar límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, propiedades que servirán más adelante para la respectiva clasificación de los suelos.

Límites de Atterberg: La consistencia que tiene un suelo es la relativa facilidad con la que se puede deformar un suelo. “Atterberg, un escultor sueco, observo en 1911 cuatro estados de consistencia: estado líquido, plástico, sólido y semisólido” presentados en la ilustración 22 (Caterpillar). Estos límites ayudan a clasificar el suelo como es influenciado por la presencia del agua, es decir cuantificar la plasticidad del suelo.

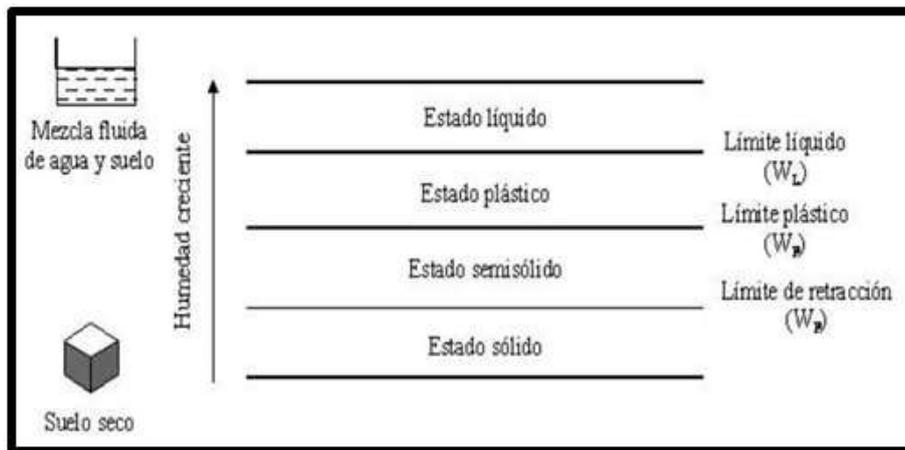


Ilustración 22 Estados del suelo, límites de plasticidad

Fuente: <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Aridos1.pdf>

Límite líquido (LL): Esta propiedad se la define como el contenido de humedad con el cual el suelo deja de ser líquido y pasa a plástico. Este límite es obtenido a través de la chuchara de Casagrande (Cuando los suelos alcanzan porcentajes de humedad mayores al límite líquido, su comportamiento será el de un fluido viscoso) el mismo consiste en dejar caer la copa metálica sobre la superficie de madera un número determinado de veces, los datos que



podemos obtener de este ensayo son el límite líquido, índice de flujo y el primer parámetro para determinar el índice de plasticidad. (Duque Escobar & Escobar Potes, 200)

- I. Para realizar este ensayo se procede a preparar el material con una determinada humedad, se coloca una parte de este en la cazuela y se lo va extendido sobre toda la superficie de la misma, procurando que no quede ningún tipo de aire dentro de ella, debe tener una profundidad máxima de 10mm, con el ranurador se realiza una pasada desde arriba hacia abajo la misma debe ser lo más recta y uniforme posible.
- II. Luego se procede a mover la manija de la cazuela contando el número de golpes hasta que la ranura cierre, se toma partes de la muestra de cada lado y se procede a colocarla en un recipiente, con el fin de obtener las humedades respectivas al número de golpes.
- III. Con este ensayo de límite líquido se determina el contenido de humedad en porcentaje correspondiente a los 25 golpes en la recta resultante del ensayo.

Límite plástico (LP): Se define como límite plástico al contenido de humedad con el cual el suelo deja de ser plástico y pasa a un estado semi plástico. (Caterpillar)

- I. Para realizar este ensayo se define antes la cantidad de humedad del material, con el mismo se procede a utilizar para realizar unos rollitos de un diámetro aproximado de 3mm, el mismo fue propuesto por Terzaghi.
- II. Se debe tener presente que el ensayo se completara cuando se presentan grietas a lo largo de los rollitos.
- III. El procedimiento se lo debe hacer por al menos cuatro ocasiones y debemos tomar parte de la muestra de los rollitos para obtener humedades.



Índice de plasticidad: Es la diferencia entre el límite líquido y límite plástico. Para obtener el índice de plasticidad se aplica la siguiente fórmula: (Juarez & Rico, 2005)

$$IP = LL - PL$$

Dónde:

IP = Índice de plasticidad

LL = Limite Liquido

PL = Limite Plástico

Con los resultados obtenidos de los ensayos de granulometría y límites de Atterberg podrá clasificar las muestras obtenidas de las plantas procesadoras. A continuación, en la tabla 17 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el laboratorio de la Universidad Católica de Cuenca referente a límites líquidos, plásticos e índices de plasticidad de los diferentes materiales granulares. Los datos completos serán adjuntados como anexos. (Véase anexos)

Tabla 17 Límites líquidos, plásticos e índices de plasticidad

Fuente: Autor

PLANTAS PROCESADORAS	LIMITE LIQUIDO %	LIMITE PLASTICO %	INDICE PLASTICIDAD %
BASE ROCKAZUL	N/P	N/P	N/P
SUBBASE ROCKAZUL	25.25	22.72	2.53
BASE VIPESA	N/P	N/P	N/P
SUBBASE VIPESA	22.8	17.04	5.76
BASE HORMICRETO	24.5	20.1	4.4
SUBBASE HORMICRETO	25.1	20.97	4.13
BASE TRELLES	27.8	22.72	5.08

Es importante hacer notar que para materiales granulares bajo la normativa ecuatoriana vial NEVI-12 mencionada en el capítulo 1, los valores de limite liquido no deben ser mayores a



25 y el índice de plasticidad menor a 6, esto debido a que dichos materiales van a formar parte de la capa de rodadura de una estructura que soportara cargas dinámicas conjuntamente con condiciones de clima variable, la misma que al estar en contacto con el agua deberá portarse como un material permeable para evitar deformaciones o hinchamientos que participaran en el deterioro de la estructura.

2.4 Clasificación del suelo.

De acuerdo a la complejidad y prácticamente la infinita variedad con que lo suelos se presentan dentro de la naturaleza, todo tipo de sistematización que se vaya realizando debe tener su proceso de clasificación completa. “Es evidente que un sistema de clasificación que pretenda cubrir hoy las necesidades correspondientes, debe estar basado en las propiedades mecánicas de los suelos, por ser estas lo fundamental para las aplicaciones ingenieriles” (Juarez & Rico, 2005). Para propósitos de ingeniería existen dos tipos de clasificación de suelos. El método SUCS²⁶ cubre gran parte de suelos gruesos y finos, los cuales se distinguen por el tamizado de la malla N° 200, esta clasificación se usa para casi toda la ingeniería geotécnica.

Un suelo se considera grueso si tiene más del 50% de sus agregados de tamaño grande, y fino si más de la mitad de sus partículas son finas. Para tener una idea clara de que es un suelo grueso se lo definirá a continuación:

Suelo grueso: El símbolo de cada uno de los grupos está formado por dos letras mayúsculas, que hacen referencia a las iniciales del nombre. Gravas y suelos predominantes se lo representa con la letra G; mientras que las arenas y suelos arenosos con la letra S. (Juarez & Rico, 2005).

²⁶ Sistema unificado de clasificación de suelos



Gravas y arenas se subdividen en cuatro tipos detallados a continuación:(Véase tabla 18)

- I. Material completamente limpio, bien graduado se lo representa con la letra W, la combinación que se presenta es GW y SW.
- II. Materiales casi limpios de finos, mal graduado se lo representa con la letra P, la combinación que se presenta es GP y SP.
- III. Materiales con cantidad apreciable de finos no plásticos se los representa con la letra M, la combinación que se presenta es GM y SM.
- IV. Materia con cantidad apreciable de finos plásticos se los representa con la letra C, la combinación que se presenta es GC y SC.

A continuación la tabla 18 expone un esquema del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Tabla 18 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Fuente: Ing. Iván Matus Lazo, Ing. Marvin Blanco

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio				Clasificación de suelos		
				Símbolo de grupo	Nombre del grupo	
 <p>GRUESOS</p>	<p>Suelos de partículas gruesas mas del 50% es retenido en la malla No. 200</p>	<p>Gravas Mas del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4</p>	<p>Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200</p>	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada
			<p>Gravas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200</p>	$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada
		<p>Gravas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200</p>	<p>IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad</p>	GM	Grava limosa	
			<p>IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad</p>	GC	Grava arcillosa	
			<p>Cumple los criterios para GW y GM</p>	GW-GM	Grava bien graduada con limo	
			<p>Cumple los criterios para GW y GC</p>	GW-GC	Grava bien graduada con arcilla	
		<p>Arenas El 50% o mas de la fracción gruesa pasa la malla No. 4</p>	<p>Arenas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200</p>	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada
			<p>Arenas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200</p>	$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada
			<p>IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad</p>	SM	Arena limosa	
			<p>IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad</p>	SC	Arena arcillosa	
	<p>Arenas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200</p>	<p>Cumple los criterios para SW y SM</p>	SW-SM	Arena bien graduada con limo		
		<p>Cumple los criterios para SW y SC</p>	SW-SC	Arena bien graduada con arcilla		
		<p>Cumple los criterios para SP y SM</p>	SP-SM	Arena mal graduada con limo		
		<p>Cumple los criterios para SP y SC</p>	SP-SC	Arena mal graduada con arcilla		
 <p>FINOS</p>	<p>Suelos de partículas finas El 50% o mas pasa la malla No. 200</p>	<p>Limos y arcillas Limite Liquido menor que 50</p>	<p>Inorgánicos</p>	<p>IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"</p>	CL	Arcilla de baja plasticidad
			<p>Orgánicos</p>	<p>IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"</p>	ML	Limo de baja plasticidad
		<p>Limos y arcillas Limite Liquido mayor que 50</p>	<p>Orgánicos</p>	<p>Limite liquido - secado al horno < 0.75 limite liquido - no secado</p>	OL	Arcilla orgánica Limo orgánico
			<p>Inorgánicos</p>	<p>IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"</p>	CH	Arcilla de alta plasticidad
	<p>IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"</p>			MH	Limo de alta plasticidad	
	<p>Orgánicos</p>		<p>Limite liquido - secado al horno < 0.75 limite liquido - no secado</p>	OH	Arcilla orgánica Limo orgánica	
	<p>Suelos altamente orgánicos</p>	<p>Principalmente materia orgánica de color oscuro</p>			PT	Turba



También existe la clasificación de los suelos que es conocido como: “*Sistema de clasificación de la AASHTO*”, usado generalmente para la construcción de carreteras y terraplenes, la tabla 19 muestra esta clasificación donde se considera siete grupos básicos de suelos los cuales se encuentran numerados desde el *A-1* hasta el *A-7* dentro de estos grupos presentan subdivisiones. Para saber el tipo de suelo al que pertenece un material solo es necesario tener el análisis granulométrico y los límites de Atterberg como se mencionó anteriormente, es necesario ubicar la posición exacta dentro del grupo por lo que es necesario establecer el índice de grupo que viene dado por la siguiente ecuación: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

Ecuación 1

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(wl - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde,

IG: Índice de grupo²⁷.

F: Porcentaje que pasa por 0.08mm, expresado en números enteros basado solamente en el material que pasa por 80mm.

Wl: Limite líquido.

IP: Índice de plasticidad.

²⁷ El índice de grupo de un suelo es un valor de 0 a 20 que representa la calidad de un material, entre más alto sea el valor del índice de grupo de un suelo menor será su valor como uso para subrasante. Los materiales granulares de alta calidad poseerán un valor del índice de grupo de 0.

Tabla 19 Clasificación de los Suelos por el sistema AASHTO

Fuente: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (igual o menor del 35% pasa el tamiz N° 200)							Materiales Limo - Arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
SUB - GRUPOS	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-6
% que pasa el Tamiz N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características del Material que pasa el tamiz N° 40											
Límite Líquido			NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidad	6 máx.	6 máx.	NO PLÁSTICO	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de Material	fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno						Regular a Deficiente				

NOTA: El índice de plasticidad de los suelos A-7-5 es igual o menor que su Límite Líquido 30, el de los A-7-6 mayor que su Límite Líquido (fig. 1) se halla indicada la relación entre el LL e IP de los materiales finos. Dicho de otro modo, el grupo A-7 es subdividido en A-7-5 ó A-7-6 dependiendo del Límite Plástico (L.P.)
Si el LP \geq 30, la clasificación es A-7-6
Si el LP < 30, la clasificación es A-7-5

A continuación, en la tabla 20 y 21 se presenta la clasificación de los materiales granulares de las plantas procesadoras estudiadas en los métodos mencionados anteriormente:

Tabla 20 Clasificación subbase plantas procesadoras

Fuente: Autor

PLANTA PROCESADORA	CLASIFICACION	
	SUCS	ASSTHO
ROCKAZUL	GW-GM	A-2-4(0)
VIPESA	GW-GM	A-1-b(0)
HORMICRETO	GP-GM	A-1-b(0)

Tabla 21 Clasificación base plantas procesadoras

Fuente: Autor

PLANTA PROCESADORA	CLASIFICACION	
	SUCS	ASSTHO
ROCKAZUL	GW	A-1-b (0)
VIPESA	GM	A-1-b (0)
HORMICRETO	GW-GM	A-1-b(0)
TRELLES	GW-ML	A-1-b(0)



2.5 Ensayo Proctor Modificado

El ensayo Proctor se realiza para determinar la humedad óptima, a la cual un suelo alcanzará su máxima compacidad es decir la mayor densidad seca máxima. La humedad es importante pues aumentando o disminuyendo su cantidad, en el suelo se pueden alcanzar mayores o menores densidades en un mismo suelo, la razón de esto es que el agua llena los espacios del suelo ocupados por aire, permitiendo una mejor acomodación de las partículas, lo que a su vez va a permitir una compactación óptima. Sin embargo, un exceso de agua podría provocar el efecto contrario, haciendo con esto que las partículas disminuyan su capacidad de compactación. (Duque Escobar & Escobar Potes, 200)

Las carreteras o estructuras necesitan una base estable donde asentarse debido a que un suelo mal compactado podría significar el colapso de una estructura bien diseñada, la densidad del suelo forma parte crucial en la construcción, dentro de la Normativa Ecuatoriana Vial las densidades máximas donde se va a asentar las fundaciones deben cumplir con los requerimientos establecidos en la misma dependiendo del material.

2.5.1 Densidad máxima

Durante la segunda guerra mundial, los nuevos y pesados equipos de aviación pasaron a exigir densidades de subrasante en las aeropistas, mayores que el 100 % del Proctor Estándar. Se introdujo entonces el ensayo de compactación modificado (Proctor modificado, ensayo modificado AASHTO, o ensayo de compactación modificado) en el que se utiliza una mayor energía de compactación. El ensayo de compactación modificado aplica una energía nominal de compactación al suelo de 2710 kJ/m³ lo que representa cerca de 5 veces la energía de compactación del ensayo estándar produciendo un incremento entre un 5 y un 10% de la densidad y una disminución en la humedad óptima. (Guía de Laboratorio: Compactación y CBR)

En la ilustración 23 se muestra las curvas de compactación de un ensayo estándar y de un ensayo modificado, el cual indica como para un mismo material ensayado el óptimo proctor tendrá menor densidad y mayor humedad para el caso del ensayo estándar, mientras que el ensayo modificado tendrá la mayor densidad con menor cantidad de agua.

Los valores γ_1 y γ_2 representan en la gráfica la densidad seca máxima de cada uno, siendo los valores óptimos de humedad d_1 y d_2 respectivamente.

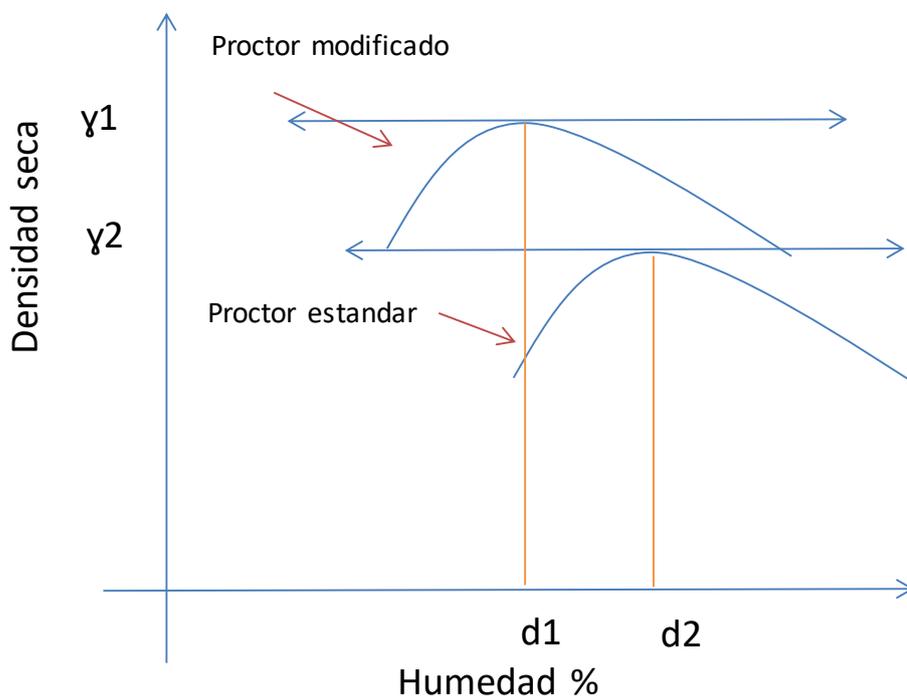


Ilustración 23 Gráfico de ensayo Proctor estándar y ensayo Proctor modificado

Fuente: Ensayo de Humedad óptima (Modificado)

La densidad seca máxima se la expresa en función de la densidad húmeda y el contenido de humedad: (Juarez & Rico, 2005)

Ecuación 2

$$g_d = \frac{g_f}{1 + w}$$

Dónde,

g_f : Densidad húmeda



g_d : Densidad seca

w : contenido de humedad.

2.5.2 Humedad óptima

La humedad óptima es el contenido de agua que permite obtener una densidad máxima mediante su compactación, Debido a que las condiciones en campo no reúnen las condiciones ideales del laboratorio, a la compactación se le asigna un porcentaje de la densidad seca que se determina en el laboratorio. Tal porcentaje varía entre el 90 y el 100%. (Caterpillar)

La humedad en exceso sobre lubrica el suelo y lo hace inestable. La poca humedad reduce la cohesión y evita que las partículas se organicen fácilmente para lograr un estado más denso.

Para cada tipo de suelo existe un contenido de humedad ideal para alcanzar la máxima densidad posible por medio de la cantidad adecuada de energía de compactación. El ensayo Proctor se desarrolló como medio para definir el contenido óptimo de humedad con base en los esfuerzos de compactación seleccionados. (U. S. Department of transportation federal highway administration , March 1990)

2.6 Metodología de obtención.

En la presente investigación el Proctor Modificado dará la magnitud de la densidad seca máxima con la humedad óptima, las mismas que serán de gran importancia para la realización del ensayo de CBR debido a que la probeta del ensayo con mayor energía de compactación deberá llegar a tener la densidad seca máxima obtenida en el ensayo.

Para la obtención de la densidad seca máxima se realizará el siguiente proceso en laboratorio:

- I. El ensayo de proctor modificado consiste en compactar 5 muestras de 5500gr obtenidas en laboratorio con una mezcla de finos y gruesos (cantidades calculadas previamente), donde cada muestra tendrá la misma energía de compactación, pero diferente humedad.

- II. La energía de compactación transferida en este ensayo será de 56 golpes en 5 capas, de cada muestra se tomará 2 tarritos para muestras de humedad que tendrán que colocarse en el horno durante 24 horas.
- III. Con los pesos y humedades de cada ensayo obtendremos 5 densidades con 5 humedades que serán graficadas en una curva parabólica con la cual obtendremos la humedad óptima correspondiente a la densidad seca máxima.

A continuación, se presenta en la tabla 22 un resumen de los ensayos realizados en el laboratorio de la Universidad Católica de Cuenca a los materiales granulares de las plantas procesadoras estudiadas, los ensayos detallados serán anexados al final de esta investigación.

(Véase anexos)

Tabla 22 Densidades secas máximas para humedad óptima.

Fuente: Autor

PLANTAS PROCESADORAS	HUMEDAD OPTIMA %	DENSIDAD SECA MAXIMA KG/M3
BASE ROCKAZUL	12.8	2050
SUBBASE ROCKAZUL	11.5	1995
BASE VIPESA	10.09	2161
SUBBASE VIPESA	9.8	2160
BASE HORMICRETO	13.7	1992
SUBBASE HORMICRETO	14.5	1970
BASE TRELLES	13.8	1965

2.7 CBR de materiales granulares

2.7.1 Tabulación de resultados.

En el capítulo anterior se dio una breve descripción de la obtención de CBR en el laboratorio de la Universidad Católica de Cuenca, en este capítulo se presenta la tabulación de los datos recopilados así como la obtención del valor de CBR de dichos materiales granulares, los datos del ensayo se anexaran al final de la investigación. (Véase anexos)



Para el ensayo de penetración de CBR se usa la ecuación del Ring la cual transforma la lectura del Dial(x) en carga (y), la misma dividida para el área del pistón, dicho sea de paso, la ecuación varía para cada equipo en este sería la ecuación usada en la Universidad Católica de Cuenca.

Ecuación 3

$$y = 5.7069x + 20.29^{28}$$

Con las presiones obtenidas se realiza una gráfica donde las abscisas corresponderán a la penetración en pulgadas vs las presiones en las ordenadas, dicha grafica representa una curva que de ser sin cambios de pendiente no habrá correcciones, de lo contrario se trazara una tangente en el punto de cambio de pendiente obteniendo un nuevo origen para corregir dichas presiones.

Las presiones más representativas serán las correspondiente al 0.1, 0.2 y 0.3 pulgadas de penetración, donde el valor de CBR vendrá representado de la siguiente manera:

Ecuación 4. Fuente: (Rondón & Reyes, 2007)

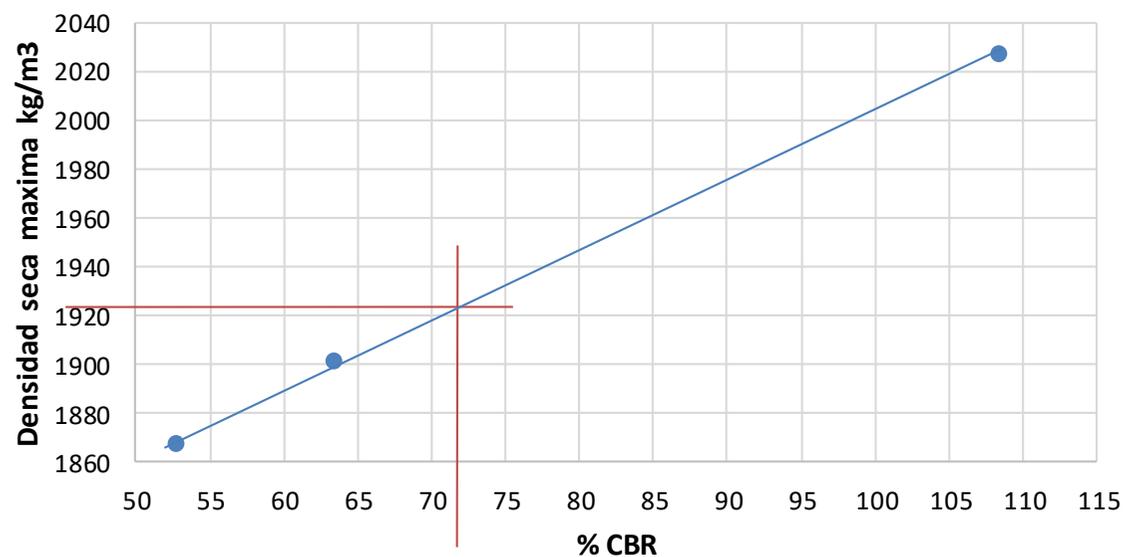
$$\%CBR = \frac{\text{presiones corregidas}}{\text{presiones estandar}} * 100$$

La grafica correspondiente al CBR obtenido de las muestras granulares serán mostradas a continuación, la gráfica tendera a una recta que pasa por 3 puntos, donde el eje de las abscisas corresponde al CBR calculado al 0.2 pulgadas de penetración vs la densidad seca máxima correspondientes a cada uno de los moldes ensayados.

²⁸ Ecuación de ring

2.7.2 Gráficas de CBR material Base.

C.B.R

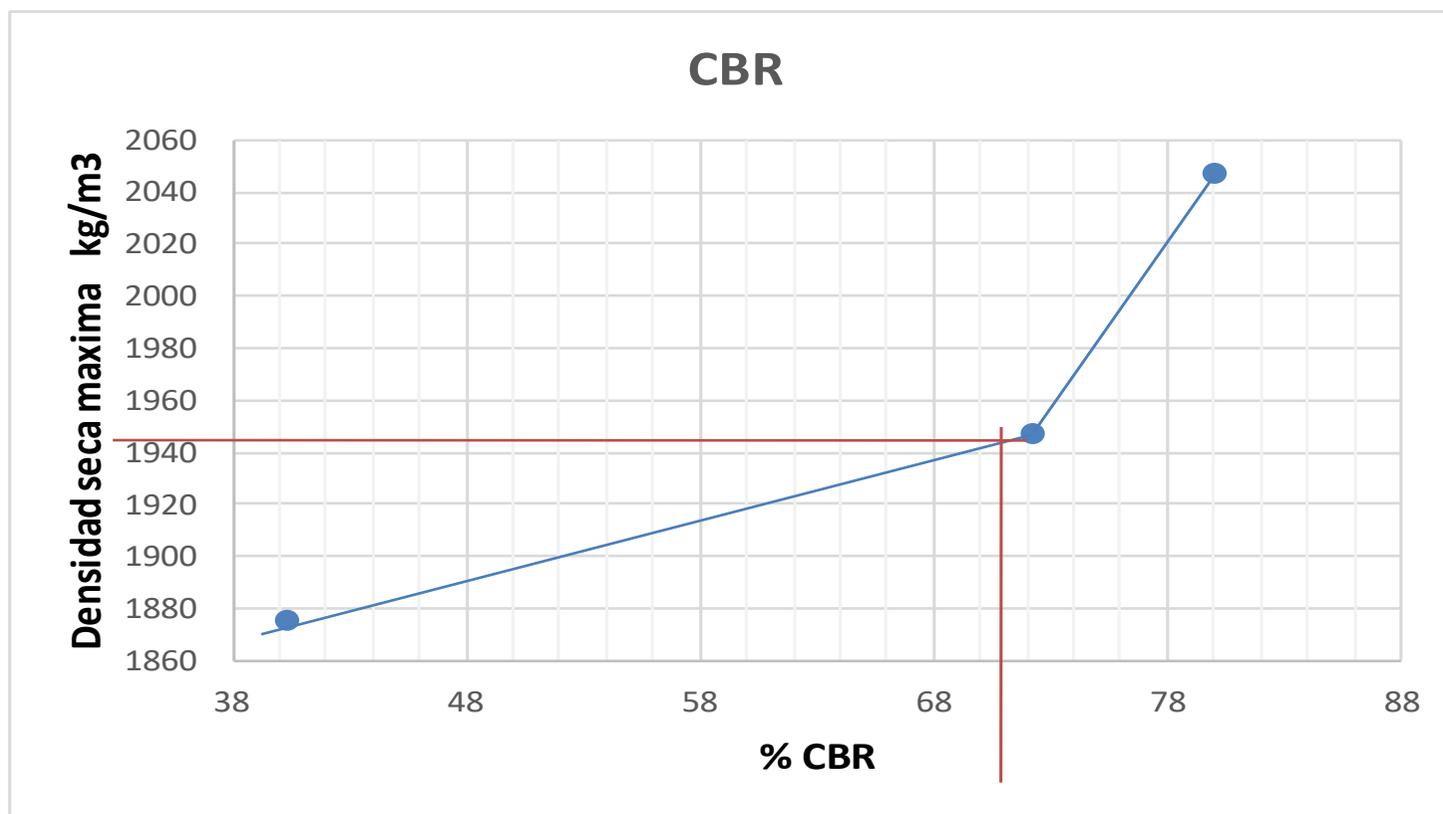


GOLPES	CBR	γd
56	108.33	2027
25	63.333	1902
10	52.596	1868

95% 1926.1
CBR= 72%

Ilustración 24 Base Hormicreto

Fuente: Autor

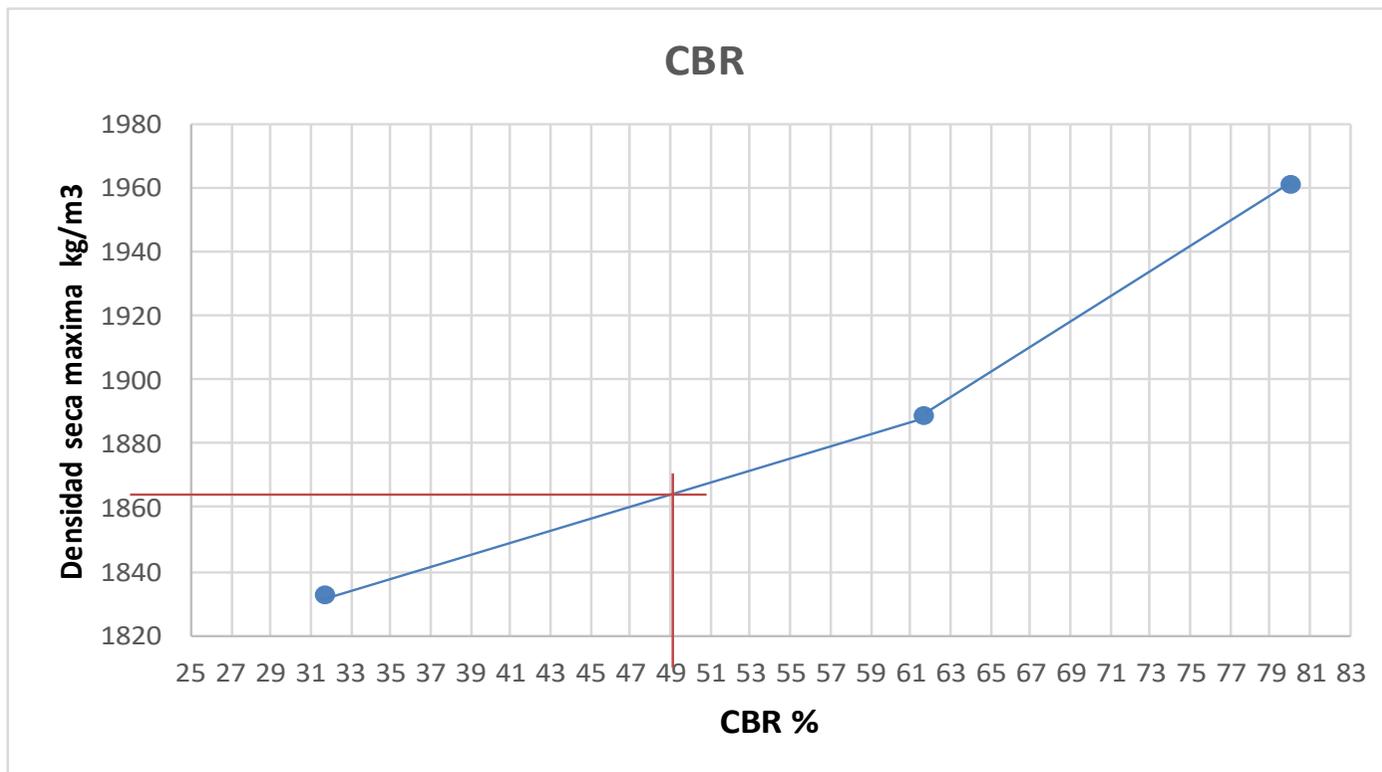


#GOLPES	CBR	DENSIDAD
56	80	2047
25	72.232828	1948
10	40.32328	1876

95%	1945
CBR	71%

Ilustración 25 Base Rockazul

Fuente: Autor

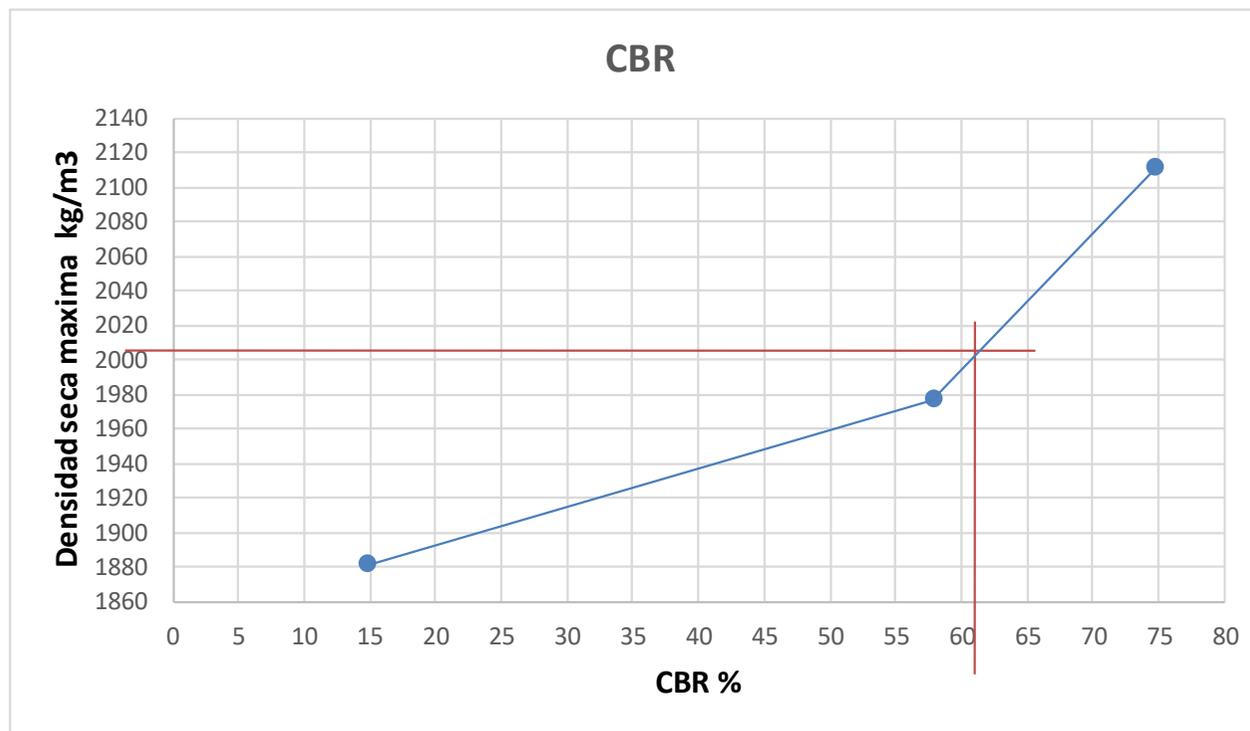


GOLPES	CBR	DENSIDAD
10	31.609518	1833
25	61.666667	1889
56	80	1961

95% 1863
CBR= 49%

Ilustración 26 Base Trelles

Fuente: Autor



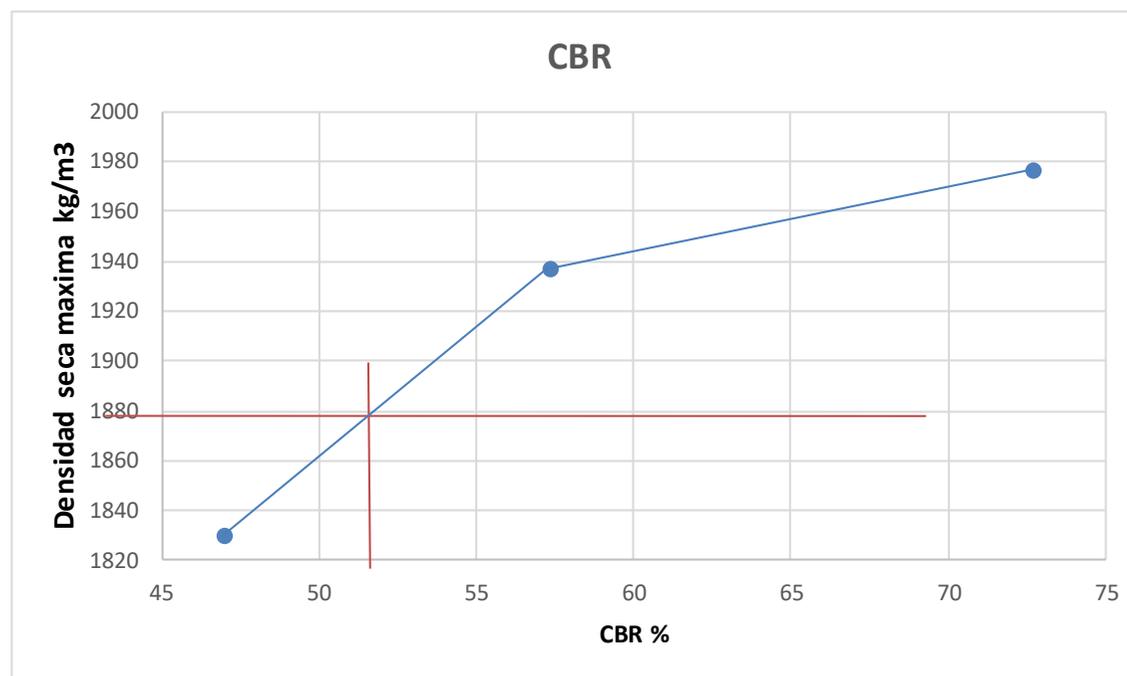
GOLPES	CBR	DENSIDAD
56	74.6667	2112
25	57.8735	1978
10	14.6667	1882

95%	2006.8
CBR=	61%

Ilustración 27 Base Vipesa

Fuente: Autor

2.7.3 Graficas de CBR material Sub-base.

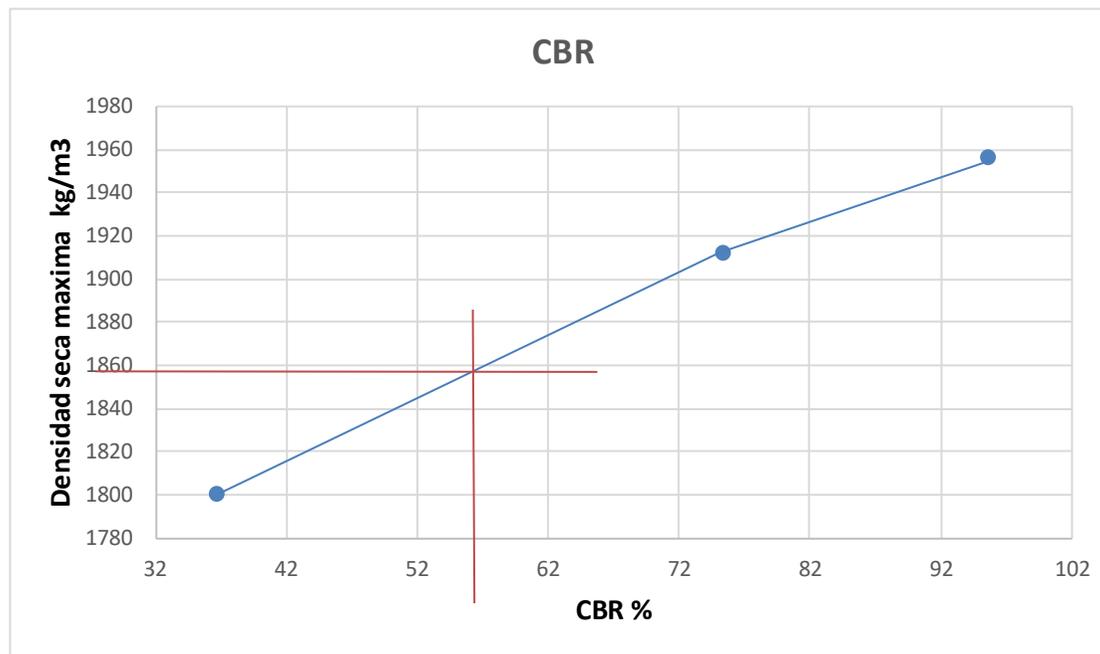


GOLPES	CBR	DENSIDAD
56	72.6667	1977
25	57.3333	1937
10	46.9506	1830

95% 1878
CBR= 52%

Ilustración 28 Subbase Hormicroto

Fuente: Autor

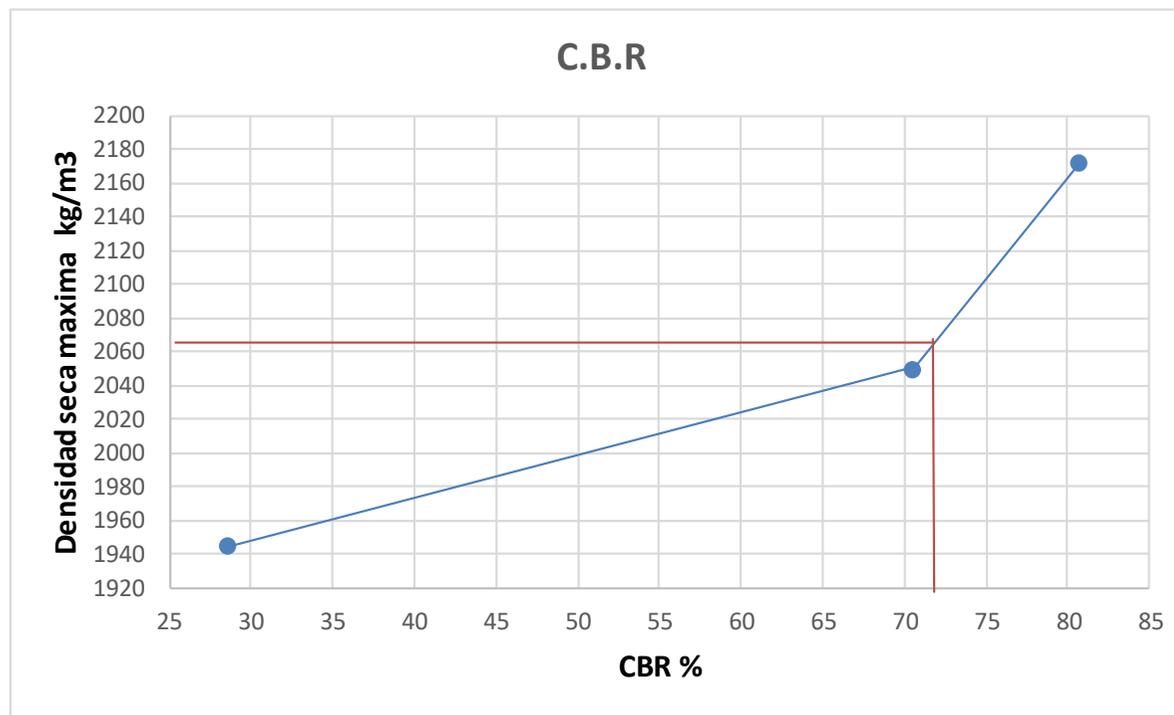


GOLPES	CBR	DENSIDAD
10	36.6667	1801
25	75.3011	1913
56	95.5513	1957

95%	1859.15
CBR=	55%

Ilustración 29 Subbase Rockazul

Fuente: Autor



GOLPES	CBR	DENSIDAD
10	80.666667	2173
25	70.391892	2050
56	28.541292	1945

95% 2064.35
CBR= 72%

Ilustración 30 Subbase Vipesa

Fuente: Autor



Es importante resaltar que para los valores de CBR encontrados en los materiales granulares de las plantas procesadoras estudiadas se ha tomado el 95% de su valor debido a que muchos autores mencionan la dificultad de llegar a la compactación óptima en el campo tal como se puede lograr en un laboratorio de suelos adecuadamente, además de ello se toma el valor del 95% de CBR por motivos conservadores, dando lugar a que durante la realización de los ensayos se hayan presentado errores.



3 CAPÍTULO TERCERO: Metodología de obtención de la magnitud de M.r.



3.1 Viabilidad de obtención de módulo resiliente mediante equipos triaxiales

La determinación del M.R. a través del uso de equipos triaxiales es la forma más común de obtención de ésta cantidad, existiendo metodologías desarrolladas para este único fin. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), (Rubio Moreno, 2005) y (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002).

No obstante, el contar con información relevante a estos protocolos o metodologías de análisis no son suficientes, requiriéndose de personal calificado y equipos triaxiales dinámicos; los cuales, cuando menos en lo que a América Latina se refiere, constituyen inversiones altas (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

Lo antedicho, adicionado a que existe muy poca información en cuanto a M.r. para cualquier tipo de suelo, torna en que la viabilidad de determinar los valores de M.r. mediante equipos triaxiales, sea más bien, difícil. (Ayala Velasco, 2013)

Muy a pesar de esto conocimientos e información acerca del equipo triaxial dinámico debe estar implementada en libros o textos referente a la mecánica de los materiales para pavimentos²⁹, ya que, en un futuro, gracias al avance tecnológico, lo más probable es que estos equipos ya estén al alcance de la mayoría de empresas públicas y privadas destinadas al estudio, diseño y construcción de pavimentos.

²⁹ Así como en los textos de diseños de pavimentos que utilicen la metodología AASHTO.

3.1.1 Descripción de equipo triaxial cíclico y su función.

3.1.1.1 Función del equipo triaxial

Como se sabe, existen estructuras diseñadas para soportar cargas estáticas y/o dinámicas; en función del tipo de uso que se ha de dar. El cuadro sinóptico presentado en la ilustración 31 explica los casos en que ha de considerarse cargas dinámicas y estáticas.



Ilustración 31
Esquema de naturaleza de cargas en las estructuras.

Fuente: Autor

Para cualquier tipo de pavimentos, resulta fácil ver que las solicitaciones serán de carácter dinámico, requiriéndose conocer el comportamiento de los elementos que componen las capas de pavimento bajo este régimen de cargas. Siendo esto, lo que se trata de reproducir con la ayuda de los equipos triaxiales cíclicos/dinámicos. Estos equipos ejercerán cargas y descargas temporales (ciclos) en la muestra o en tiempos determinados³⁰, en las que para cada instante de carga y descarga se deberá tomar las deformaciones del espécimen. Las ilustraciones 32 y 33 exponen un esquema de lo antedicho:

³⁰ Véase: tabla

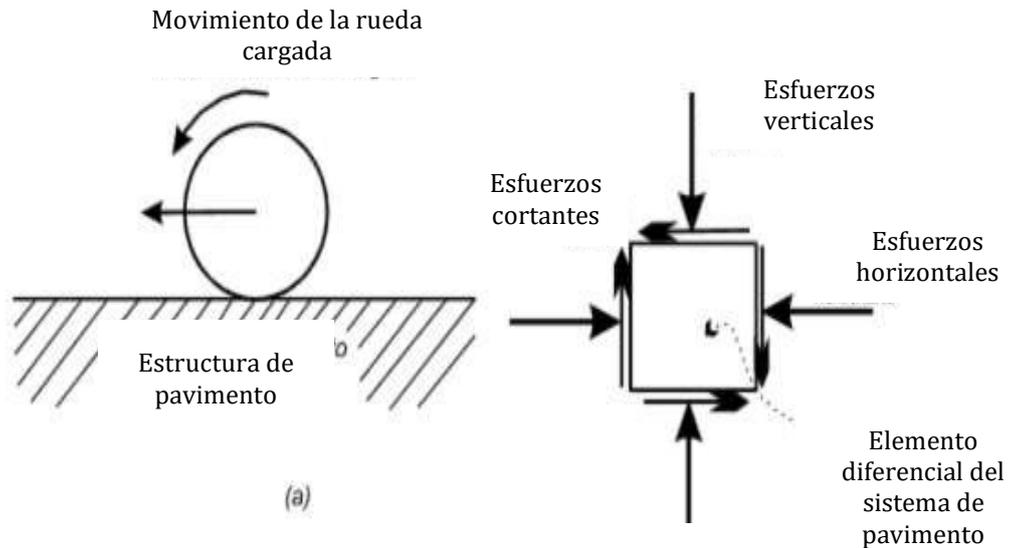


Ilustración 32

Esquema de estructura de pavimento sometida a ciclos de cargas. Parte I. Extraído de: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

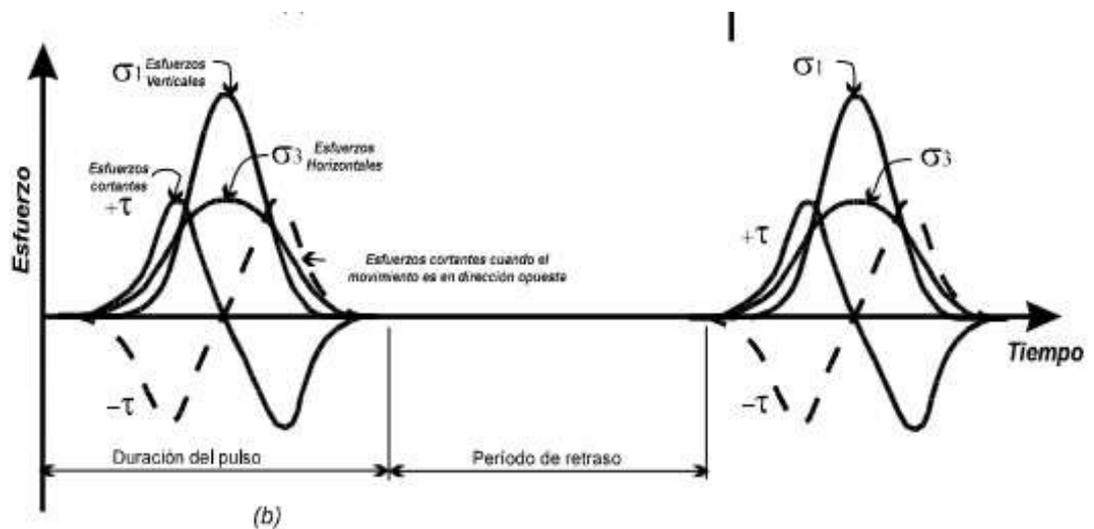


Figura 1-9 Pulsaciones de carga originadas por el movimiento del tránsito

Ilustración 33

Esquema de estructura de pavimento sometida a ciclos de cargas. Parte II. Extraído de: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Las pulsaciones de cargas y descargas simularán las condiciones de tránsito ejercidas en las diferentes capas que componen el sistema de pavimentos. La ilustración 34 presenta la aplicación de las cargas de eje de un vehículo a un elemento diferencia del pavimento. Nótese la similitud entre la ilustración 33 (Carga en laboratorio) con la ilustración 34 (Carga en condiciones reales)

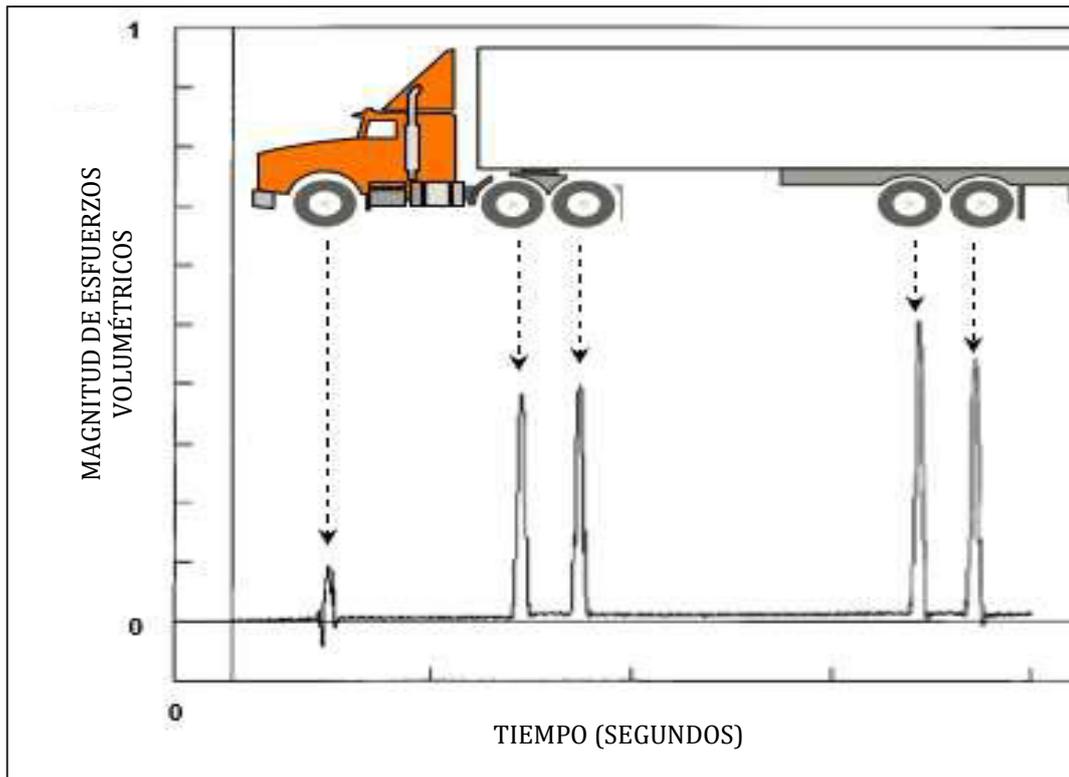


Ilustración 34

Esquema de estructura de pavimento sometida a ciclos de cargas. Parte III. Extraído de: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

De ahí, resulta fácil notar que el comportamiento de un material bajo una carga estática última en comparación con cargas dinámicas para el mismo material conduce a resultados diferentes. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002).

Finalmente, Missouri Highway & Transportation Department Division of Materials and Research, nos presenta el esquema de procesos que describe el funcionamiento del equipo triaxial. Consúltese Figura 1.

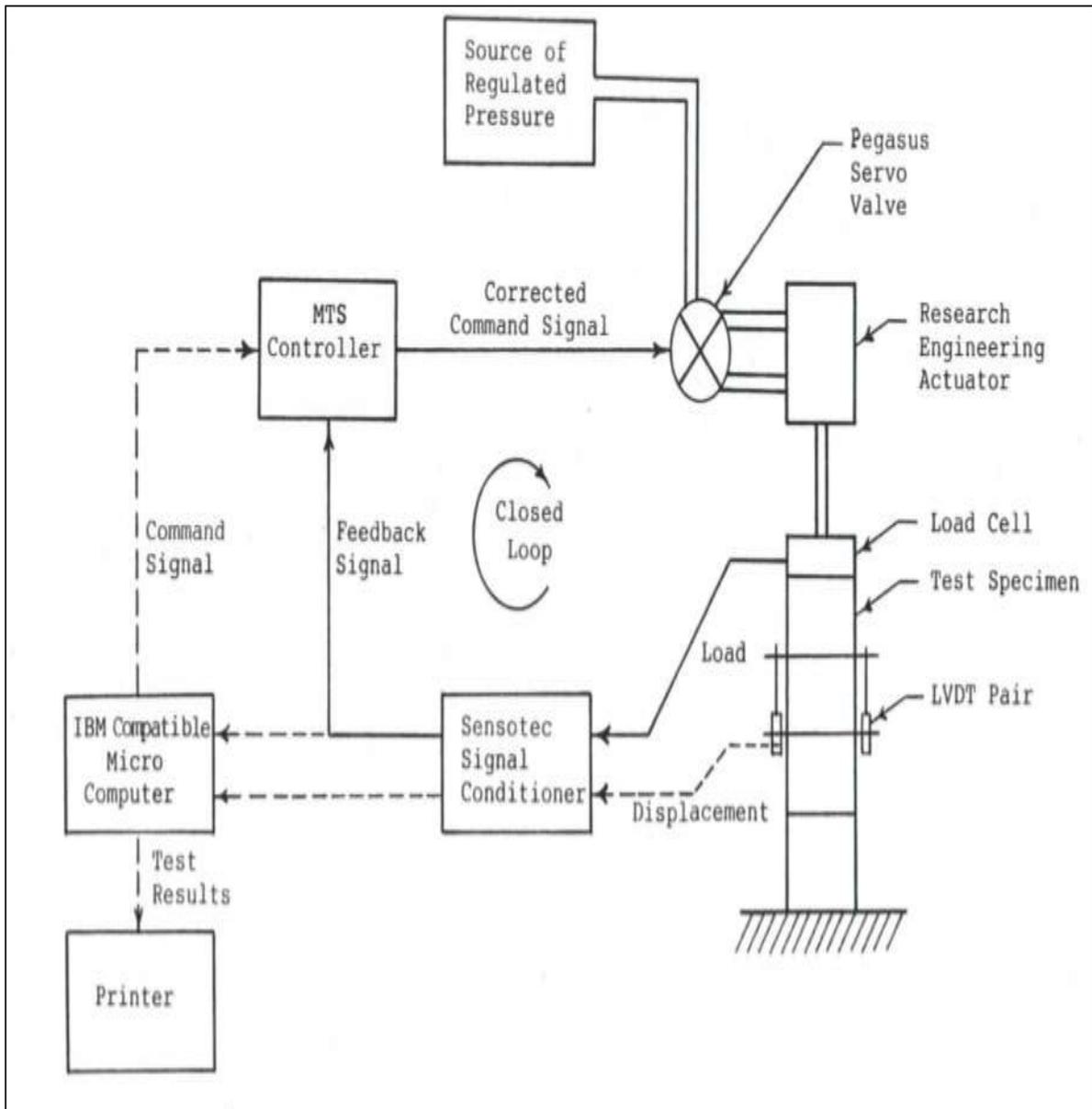


Figura 1
Esquema de procesos de un equipo triaxial

3.1.1.2 Equipo triaxial cíclico

Un equipo triaxial consta de los siguientes elementos:

- I. Bases de 100 mm de diámetro y altura de 215 mm, cuyo material es acero.
- II. Equipo de medición de respuesta
- III. Unidades de carga
- IV. Equipos de preparación de espécimen y probetas
- V. Cámaras de presión triaxial

La información anterior, conjuntamente con la ilustración 35, han sido directamente extraídos de: (Ayala Velasco, 2013)



Ilustración 35
Equipo triaxial dinámico moderno. Imagen extraída de: (Ayala Velasco, 2013)

Dependiendo del tipo de suelo a analizarse las probetas pueden ser de 7.1 o 15 centímetros de diámetro (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993). Esto dependerá de la categoría de suelo: I para suelos gruesos³¹ y II para suelos finos y (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)

Esto tipo de suelos: I: Gruesos y II: Finos puede relacionarse según la clasificación AASHTO de la siguiente manera:

Tabla 23
Información extraída de: (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)

SUELOS	TIPO	CLASIFICACIÓN AASHTO APLICABLE
	I	A-1, A-1-b, A2 o A3.
	II	A-4, A-5, A-6 y A-7

Un detalle de la cámara triaxial se presenta en la ilustración 36. Esta imagen ha sido extraída de (LanammeUCR, 2009)

³¹ Son los materiales que no estén ligados/cementados y que cuando menos el 70% del mismo debe pueda pasar el tamiz N°10 y como máximo el 20% puede pasar el tamiz N°200.

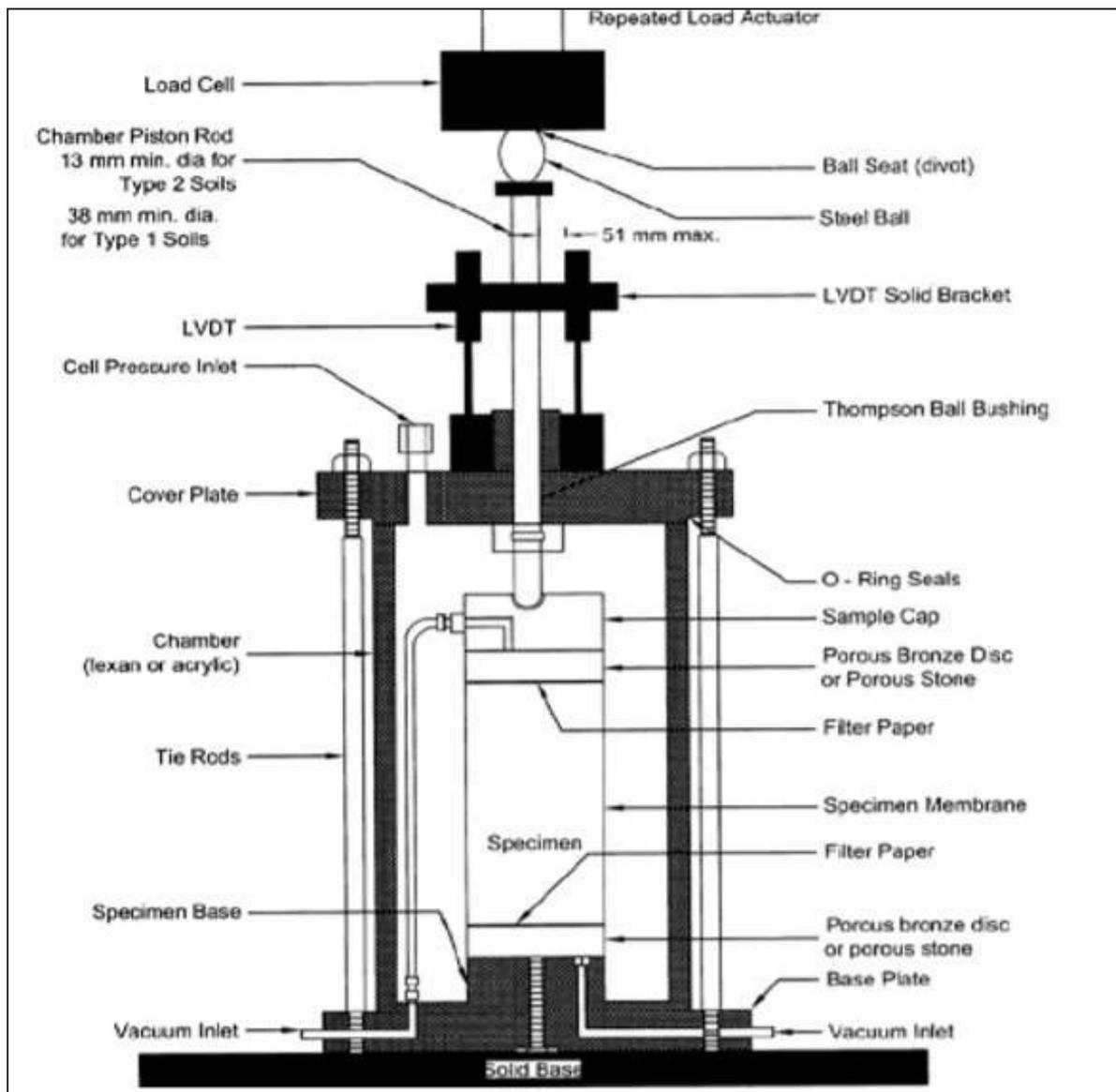


Ilustración 36
Detalla de cámara triaxial y complementos. Imagen extraída de: (LanammeUCR, 2009)

3.2 Protocolos a seguir y descripción de procedimientos.

3.2.1 Protocolos a seguir

En función de las partes de la cámara triaxial y complementos, ilustración 36, se puede verificar que la probeta consiste en un cilindro cerrado cuyo diámetro será función del tipo de suelo según el protocolo a seguir, siendo dos los más utilizados:

- I. Protocolo AASHTO: “Resilient Modulus of Uriband Granular Base/Sub base Materials and Subgrade Soils **T274-82**” (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)
- II. Protocolo SHRP P46

Las especificaciones del protocolo SHRP P46 se presentan en la tabla 24, la cual es una extracción directa de (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016):

Tabla 24
Protocolo SHRP P46. “Módulos resilientes para base y sub-base granular.” Extraído de (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)

Tipo de material	Características	Duración de aplicación de carga	Duración del ciclo	Localización de LVDTs	Espécimen	Método para reconstituir muestras	No de capas del espécimen
I	Menos del 70% pasa la malla 70. 20% máximo de material que pasa la malla 200	0.1 s	1 s	Fuera de la cámara triaxial	15 cm de diámetro	Vibratorio	5
II	Suelos con clasificación A-4, A-5, A-6, A-7, A-1-b, A-2 y A-3				7.1 cm de diámetro	Estático	

3.2.2 Descripción de procedimientos.

3.2.2.1 Proceso de probeta en equipo triaxial dinámico

Para ello se deberá tener en cuenta los siguientes aspectos:

- I. En la parte inferior, “Cabezal” se deberá adecuar un disco poroso, además de un papel filtro.
- II. Encima del disco de papel filtro deberá colocarse el espécimen y sobre éste, otro papel filtro y disco poroso.
- III. Encima del disco poroso que yace sobre la superficie del espécimen se tendrá que colocar el cabezal superior.
- IV. Se deberá atornillar el pistón de carga.
- V. Una membrana sellada a los cabezales de látex se tendrá que insertar con el objeto de evitar el secado de la muestra.



- VI. Ensamblar la celda y acoplamiento al sistema de carga.
- VII. En la parte exterior de la cámara/celda triaxial se deberán ubicar los sensores de medición de deformación también conocidos como “LVDTs” por sus siglas en inglés.

3.2.2.2 Durante la prueba: Desarrollo.

Con los pasos establecidos en el punto anterior, se procede a la realización del ensayo, el cual, como se mencionó consiste en la aplicación de cargas y descargas consecutivas al espécimen, para de esta manera *medir la resiliencia del material*. Se deberá seguir uno de los dos protocolos de pruebas mencionados³² anteriormente; sabiendo que, los objetivos que persiguen cada uno de los protocolos es en esencia el mismo: **medir la resiliencia del material**.

Por ello, se da una descripción a modo general de este proceso³³

- I. Se debe realizar una clasificación del material con la finalidad de determinar si el suelo estudiado es de carácter fino o por lo contrario es grueso, para esto, se requiere sencillamente realizar una clasificación de suelos por el método AASHTO y verificar en tablas si pertenecen al grupo I o II, que sería: Suelos finos o friccionantes (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)
- II. Se deberá realizar un pre acondicionamiento de la muestra, esto consiste en someter a 1000 ciclos de cargas y descargas al material con una presión o esfuerzo vertical y de confinamiento predeterminado. (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)

³² Protocolos T274-82 y SHRP P46

³³ Sujeto a cambios en función de la elección del protocolo de procedimiento.

III. Se deberá someter a 15 o más secuencias³⁴ al material, buscando un comportamiento resiliente como se expresa en la ilustración 37.

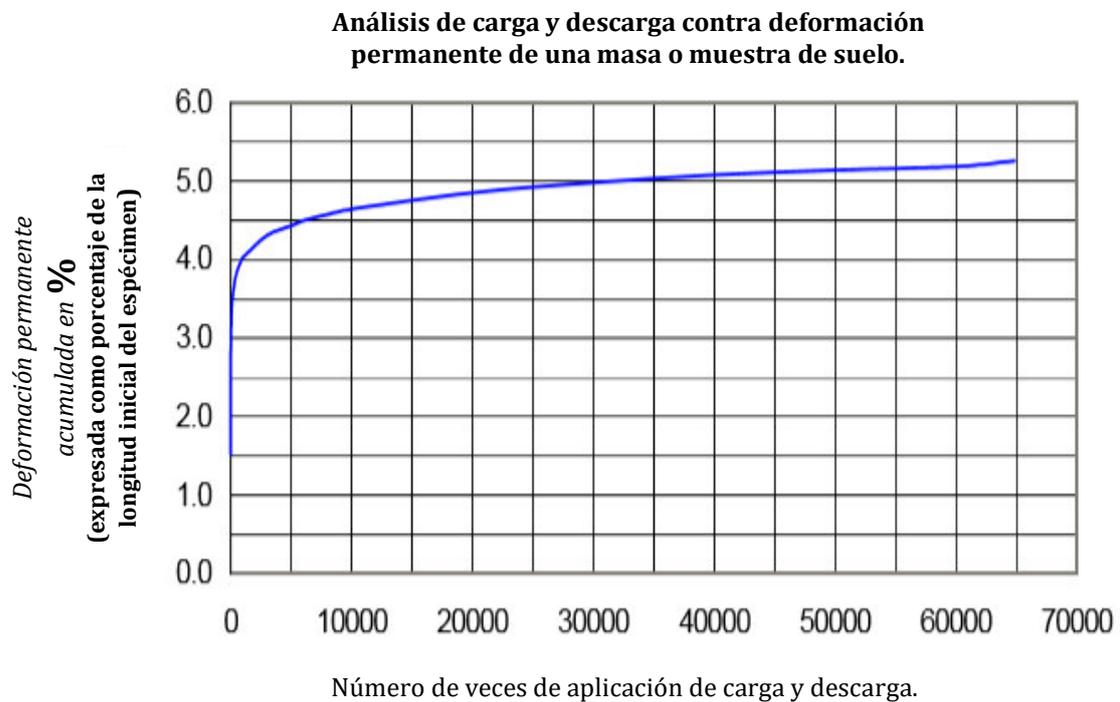


Ilustración 37
Gráfica de deformaciones vs aplicación de número de ciclos. Imagen extraída de: (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)

I. Una combinación de presiones desviadoras³⁵ y de confinamiento se deberá dar a la muestra. La tabla 25 presenta la secuencia de aplicación de esfuerzos desviadores y de confinamiento. El ciclo 0 corresponde al pre-acondicionamiento expuesto en literales anteriores (Apartado 3.2.2.2).

³⁴ Hasta que se vea que existe un comportamiento resiliente en el material, en la práctica esto significaría que no existan deformaciones permanentes. La imagen que se presenta en esta página ilustra lo dicho.

³⁵ La presión o esfuerzo desviador constituye la diferencia entre el esfuerzo vertical con el de confinamiento (esfuerzo lateral) aplicada a una muestra de suelo en un equipo triaxial dinámico.

Tabla 25

Secuencia de aplicación de esfuerzos desviadores y de confinamiento. El ciclo 0 corresponde al pre-acondicionamiento expuesto en literales anteriores. Información extraída de: (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)

Secuencia de aplicación	Esfuerzo de confinamiento en Kpa	Esfuerzo desviador en Kpa	Número de aplicaciones de cargas
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	69.0	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	69.0	100
11	0.0	13.8	100
12	0.0	27.6	100
13	0.0	41.4	100
14	0.0	55.6	100
15	0.0	69.0	100

Adicionalmente, se menciona que el intervalo de aplicación de la carga corresponde a 0.2 segundos y de descarga a no más de 10 segundos, denominándose **pulsaciones al intervalo de carga**. (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)

3.3 Viabilidad de pruebas de módulo resiliente en equipo triaxial.

Se ha mencionado algunas veces a lo largo de este trabajo investigativo el alto costo que demanda adquirir un equipo triaxial cíclico o cuando menos el alquiler de esta máquina, por ello la mayoría de las empresas de diseño y construcción de pavimentos optan por determinar



éste tras la utilización de ciertos modelos matemáticos que involucran variables fácilmente determinables en un laboratorio de suelos y a costo relativamente bajo.

3.4 Determinación de módulo resiliente a partir de otras propiedades de los suelos

En función de lo antedicho, con el fin de abaratar costos, diversos estudios que relacionan al M.r. con otras propiedades (por lo general fácilmente determinables en los suelos) se han realizado, entre otras, las más interesantes son aquellas que tienen que ver con:

- I. Resistencia al cortante de los suelos. (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009)
- II. Resistencia a la compresión axial o axil. Lee et al. (1997) (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)
- III. Resistencia a la compresión diametral (Rubio Moreno, 2005).
- IV. CBR (Valor de soporte california)
- V. Valor Relativo de Soporte Heukelom y Klomp (Rubio Moreno, 2005).

A continuación, se da una descripción detallada del proceso a seguir para determinar el M.r. y su aplicación a suelos granulares o finos.

3.4.1 M.r. a través del valor relativo de soporte y valor de resistencia R.

Heukelom y Klomp realizaron investigaciones que buscaban relacionar el M.r. de suelos finos con el valor relativo de soporte, encontrando que:

Ecuación 5. Ecuación de Heukelom y Klomp que determina el módulo resiliente a través del valor relativo de soporte.

$$M.r. (psi) = 1500 * CBR$$

Dónde,

CBR: Valor de soporte California



Para mayor información acerca del valor relativo de soporte consúltese (Rubio Moreno, 2005) y (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

Una correlación un tanto más aproximada y que incluye suelos granulares fue determinada por el Instituto del Asfalto (Rubio Moreno, 2005):

Ecuación 6. Desarrollada por el instituto del asfalto. (Rubio Moreno, 2005)

$$M. r. (psi) = A + B * (Valor de R)$$

Dónde,

A: Puede tomar valores entre 772 a 1155

B: Puede tomar valores entre 369 a 555.

Los valores de A y B han sido obtenidos en procedimientos de correlación estadística (Rubio Moreno, 2005). El valor de 772 para A y de 369 para B corresponde a los materiales granulares de calidad más baja analizados en la investigación, en tanto que los más altos (1115 para A y 555 para B) fueron obtenidos con los materiales granulares de la más alta calidad estudiados.

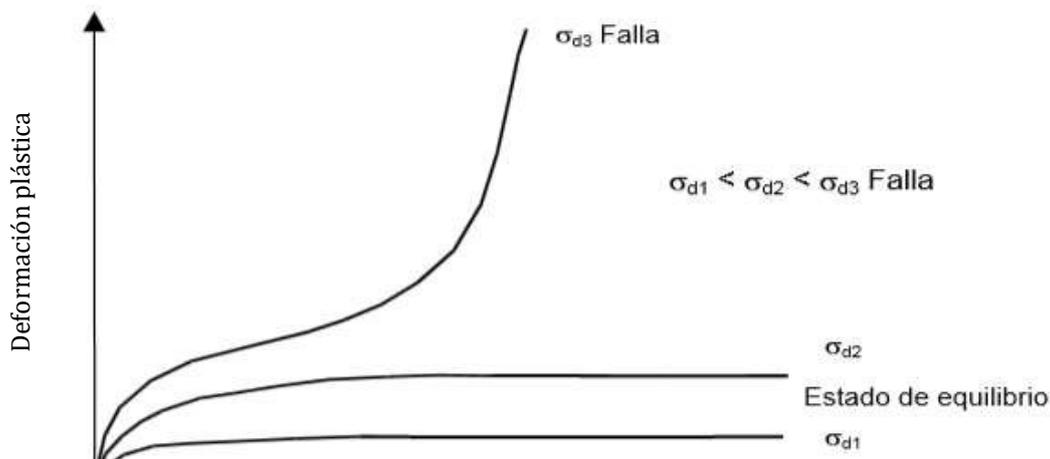
Específicamente, para materiales base y sub-base, es decir, para materiales que conforman las capas de la estructura de pavimento, existen co-relaciones que son función del nivel de esfuerzos inducidos en estas capas.

Aquí surge una gran pregunta, ¿Qué es exactamente el nivel de esfuerzos inducidos en las capas granulares?, con respecto a esto, la literatura es contradictoria o en su caso deficiente³⁶.

(AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), (Higuera Sandoval, 2011), (Instituto Mexicano del Transporte (SCT),

³⁶ Se recomienda realizar una investigación que a través de modelos derivados de la teoría de la elasticidad intenten explicar esta variación de esfuerzos y el porqué de su elección.

2016) (Limaymanta Mendoza & Guitérrez Lázares, 2009), (Martha Herrera-Montealegre, 2014), (Richardson, 1994). No obstante, se dice que este valor es tomado mediante ensayos experimentales y que guarda relación con la resistencia última del material sometido a esfuerzos volumétricos. La gráfica expuesta en la ilustración 38, expone el comportamiento de deformación plástica de una muestra de suelo contra la acumulación de deformaciones plásticas bajo cargas repetidas.



Acumulación de deformaciones plásticas bajo cargas repetidas.

Ilustración 38

Acumulación de deformación plástica bajo cargas repetidas. Brown, 1994 (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Como se puede observar en la ilustración 38, un elemento diferencial de la capa estructural de pavimento estará sometido a esfuerzos que definirán el comportamiento del material:

- I. Esfuerzo de falla abrupta σ_{d3}
- II. Esfuerzo de falla inminente σ_{d2}
- III. Esfuerzo mínimo σ_{d1} (Sin carga de vehículo, solo peso del material que yace inmediatamente superior al elemento diferencial analizado)

El esfuerzo de equilibrio, al cual se espera que trabaje un elemento diferencial de una capa granular se encontrará, entre σ_{d1} y σ_{d2}

La SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, (2000) menciona que “En México, las dependencias de construcción y diseño de pavimentos pueden recurrir actualmente al Instituto Mexicano del Transporte para realizar pruebas de módulo de resiliencia para la caracterización de los suelos regionales que son comúnmente utilizados en la construcción de carreteras y aeropistas.”

Sin lugar a dudas, la implementación de este sistema en nuestro País, podría dar un gran salto en el ámbito del diseño de pavimentos.

3.4.2 M.r. a través de propiedades físicas y constantes no lineales de los materiales.

3.4.2.1 Constantes no lineales y métodos de regresión

Durante las últimas décadas se han realizado intentos por determinar relaciones matemáticas que permitan dar con el M.r. a través de parámetros relacionados con los esfuerzos a los que estará sometida las capas granulares durante su funcionamiento como componente estructural del sistema de pavimentos flexible. Hoy en día, se sabe que la relación entre módulo resiliente y esfuerzo a la que está sometida la muestra de suelo sigue la relación descrita en la ecuación 7. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

Ecuación 7. Determinación de módulo resiliente a través de constantes no lineales de regresión. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002), (Higuera Sandoval, 2011)

$$M. r. = K1 * \emptyset^{k2}$$

Aquí, los valores de K1 y K2 son obtenidos a través de modelos de regresión, en tanto que \emptyset corresponde a la sumatoria de los esfuerzos en las tres direcciones (Eje X, Y y Z) a las que está sometida la masa de suelo, llamado: Esfuerzo volumétrico, ecuación 8.

Ecuación 8. Determinación de módulo resiliente a través de constantes no lineales de regresión. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002), (Higuera Sandoval, 2011)

$$\phi = \phi_x + \phi_y + \phi_z = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$$

El lector se preguntará el porqué de la no consideración de esfuerzos de corte en la ecuación 8, la respuesta consiste en que la situación más desfavorable se da cuando la carga vehicular está inmediatamente superior a la parte considerada. Se expone una explicación gráfica, la cual ha sido directamente extraída de (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002).

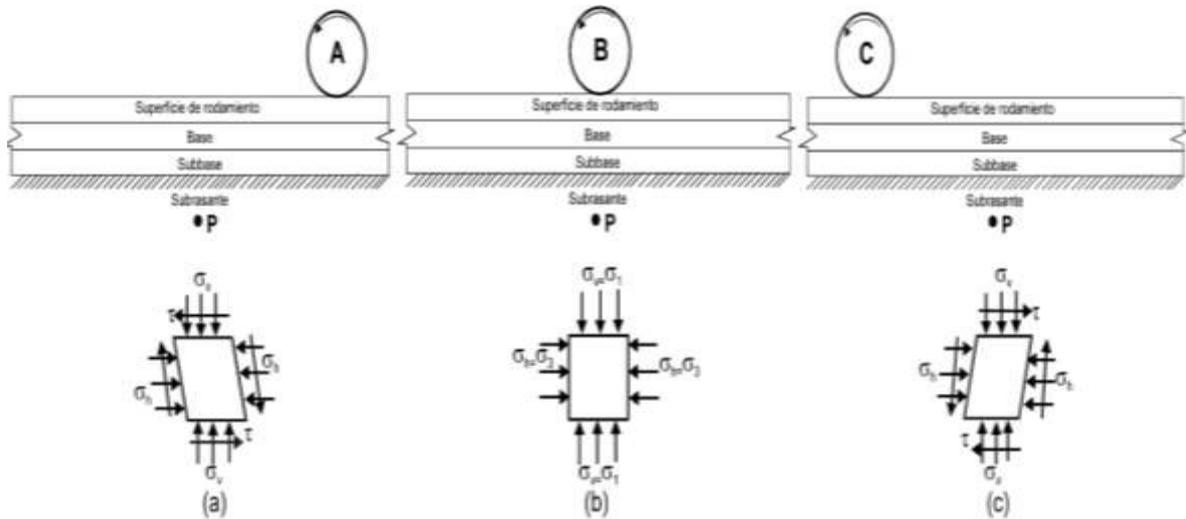


Ilustración 39

Esfuerzos en un elemento diferencial de la estructura de pavimento. Imagen extraída directamente de: (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

La ecuación 8 expresa que, durante la pulsación o carga vehicular existirán esfuerzos perpendiculares a las caras de un cubo diferencial de la estructura. Sin embargo, el punto considerado será la parte superficial o altura $z=0$, en función de esto, la ecuación 8 se modifica así:

Ecuación 9. Esfuerzo volumétrico. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

$$\phi = \phi_x + \phi_y + \phi_z + \gamma z(1 + 2K_0)$$

Donde,

γ : Constituye el peso específico promedio del material hasta el punto de referencia estudiado.

z : Es la profundidad del punto estudiado en unidades de longitud consistentes a las tomadas en los esfuerzos y peso específico.

K_0 : Es el “Coeficiente de presión de tierras en reposo”.

Un acercamiento a los valores de M.r. se obtiene gracias a los estudios estadísticos realizados por Rada y Witczak (1981), los cuales tras diversos ensayos realizados presentan la desviación estándar y valores medios de M.r. para un gran número de materiales de categoría granulares.

La tabla 26 presenta los resultados de dicha investigación. Los valores de K_1 y K_2 , son insumos que pueden utilizarse en la ecuación en la ecuación 7, se recomienda primeramente realizar la clasificar los suelos, determinando así el tipo de material y luego elegir los parámetros obtenidos en función de ello.

Tabla 26
Valores de K_1 y k_2 recopilados de las investigaciones realizadas por Rada y Witczak (1981) (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Tipo de material	No. de datos	K_1 (MPa)		K_2	
		media	desviación estándar	media	desviación estándar
Arena limosa	8	11.17	0.54	0.62	0.13
Grava arenosa	37	30.89	29.65	0.53	0.17
Arena-grava	78	30.00	18.13	0.59	0.13
Roca triturada	115	49.70	51.64	0.45	0.23

Siguiendo esto, (Shook et al, 1982) también generaría una recopilación varios estudios similares a los de Rada y Witczak.

Tabla 27
Valores de K_1 y k_2 recopilados de las información de (Shook et al, 1982) (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Referencias	Material	K_1 (MPa)	K_2
Hicks (1970)	Grava parcialmente triturada, roca triturada	11.03-34.48	0.57-0.73
Hicks y Finn (1973)	Base no tratada, tramo de prueba (San Diego)	14.48-37.23	0.61
Allen (1973)	Grava, roca triturada	12.41-55.16	0.32-0.70
Kalcheff y Hicks (1973)	Roca triturada	27.58-62.06	0.46-0.64
Boyce et al (1976)	Caliza triturada bien graduada	55.16	0.67
Monismith y Witczak (1980)	Materiales de base y subbase en servicio	20.00-53.44	0.46-0.65

Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, (2002), en sus investigaciones acerca del comportamiento de materiales constitutivos de pavimentos establecen que la ecuación del párrafo anterior podría otorgar resultados más aproximados si se considerasen constantes “Obtenidas por una prueba triaxial con carga repetida en materiales granulares.”

(Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002) presentan una relación matemática aproximada que considera los esfuerzos cortantes en los materiales granulares.

Esta ecuación se presenta ahora:

Ecuación 10 Relación para materiales granulares. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

$$M.r. = 2K_a * \left[\frac{\phi}{P_0} \right]^{k_b} * \left[\frac{\sigma_d}{P_0} \right]^{k_c}$$

Donde,

- I. K_a, K_b y K_c , son constantes de materiales las cuales deberán ser necesariamente obtenidas en ensayos triaxiales a cargas repetidas.
- II. σ_d corresponde al “esfuerzo desviador” el cual como se dijo, corresponderá al valor absoluto de la diferencia del esfuerzo vertical con el esfuerzo de confinamiento aplicado o, $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$
- III. P_0 es una unidad de presión de referencia. Para el sistema MKS este valor es igual a 1.

“Este modelo ha dado resultados razonablemente buenos y es recomendado para su uso en la práctica para caracterizar materiales de base y subbase.” (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

3.4.2.2 Correlaciones que involucran propiedades índices y físicas de materiales granulares con el M.r.

Debido a la naturaleza de los suelos granulares, la determinación de correlaciones entre ensayos triaxiales a compresión simple se torna inviable, al menos cuando ésta es no confinada.



Por ello y debido a la poca frecuencia con la que se encuentran estos suelos en la vida práctica las empresas de pavimentos han centrado sus esfuerzos en suelos no granulares o muy poco granulares. (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002), (Core, Ceylan, & Harrington, 2005), (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016).

Aun así, la información con la que se cuenta resulta ampliamente oportuna, especialmente en los países en vías al desarrollo

Para suelos granulares clasificados en la metodología AASHTO como A3, una correlación importante fue presentada en el 2007 por Ping y Ling, la cual viene expresada como:

Ecuación 11. Ping y Ling 2007, (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016)

$$\ln M.r. = 9.5 - 0.161 * C_c - 0.0123 * W + 71.4 K$$

Donde,

M.r.= Módulo de resiliencia con presión de confinamiento de 2 libras sobre pulgada cuadrada.

Cc= Coeficiente de curvatura³⁷.

W= Contenido de agua gravimétrico (0-100)

K= Valor obtenido tras la realización del ensayo de permeabilidad en un laboratorio de suelos y materiales.

³⁷ Coeficiente que permite establecer la gradación granulométrico de un material, también conocido como factor de forma. se obtiene mediante la relación entre el D30 con el producto del D10 y D60. Los parámetros D10, D30 Y D60 son determinados en función de la curva granulométrica de la muestra analizada y corresponde al porcentaje en peso del material. Por ejemplo, el D10 es la cantidad en peso del material por debajo del 10%. Lo mismo se aplica para D30 y D60.



**4 CAPÍTULO CUATRO: Metodología de
obtención de Correlación entre CBR y Mr:
Resultados y consideraciones finales.**

4.1 Algunas correlaciones entre valor de CBR y M. r.

A inicios de la década de los 90, finalmente el M. r. sería establecido en los protocolos AASHTO como un parámetro que reemplazaría al CBR, otorgando valores más exactos a los concebidos en la realidad debido a su carácter dinámico. (Instituto Mexicano del Transporte (SCT), 2016). Este cambio fue plasmado en la edición de 1993 del libro guía de diseño y construcción de pavimentos AASHTO en donde se puede encontrar correlaciones que involucran espesores de capas de pavimentos flexibles dependientes de su módulo resiliente. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993).

Muy a pesar del gran avance referente a tecnología del pavimento en los países en vías al desarrollo de América Latina, ha seguido haciéndose uso de CBR como relación directa entre el espesor de las capas del sistema estructural de pavimento flexible. Con esto, empresas dedicadas a la investigación, así como a la construcción y diseño de pavimentos, no tardaron en desarrollar colaboraciones empíricas que permitan relacionar los valores de CBR con Módulos resilientes.

Algunas de las fórmulas que establecen estas relaciones se presentan a continuación:

Ecuación 12.
(Montealegre Herrera, 2014). Correlación generada para suelos finos.

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

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

Ecuación 13.
Ecuación desarrollada por el instituto de Asfalto. Fórmula extraída de los estudios de (Montealegre Herrera, 2014)

$$M_r(\text{psi}) = A + B * \text{CBR}$$

A: Toma un valor de 772 a 1115



B: Toma un valor de 369 a 555³⁸

Acorde a lo mencionado los valores de A y B son resultados de correlaciones estadísticas (Rubio Moreno, 2005). El valor de 772 para A y de 369 para B corresponde a los materiales granulares de calidad más baja analizados, en tanto que los más altos (1115 para A y 555 para B) fueron obtenidos con los materiales granulares de alto comportamiento resiliente (calidad). Una expresión general desarrollada por AASHTO establece que la relación entre M. r. y CBR viene establecida por la siguiente relación:

*Ecuación 14.
Ecuación General AASHTO*

$$M_r(\text{psi}) = 2555 * CBR^{0.65}$$

Por otro lado, (Pacheco Rodríguez, 2018) realiza una recopilación de fórmulas que involucran CBR y M. r., entre las más importantes para este trabajo investigativo se encuentran las siguientes:

*Ecuación 15
Consejo de Investigaciones Científicas e Industriales de Suráfrica (Ayes,1997).*

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

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

*Ecuación 16
Laboratorio de Investigación en Transporte y Carreteras (Lister & Powell, 1987)*

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

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

*Ecuación 17
Departamento de Transporte del Estado de Georgia (EE.UU.)*

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

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

*Ecuación 18
Ohio EEUU (2008)*

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

³⁸ Los valores de A y B dependen de la resiliencia y calidad del material, tomar un valor medio resulta aceptable.

Ecuación 19

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

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

$$M_r(\text{psi}) = 860 + 307 * 4.5 \text{ CBR}$$

Ecuación 20

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

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

4.1.1 Gráfica de funciones [SI]

Una forma más clara de expresar el comportamiento entre módulos resilientes y valores de CBR es través de la gráfica de funciones. Para valores³⁹ de M. r. en Mega pascales contra valores de CBR %, puede consultarse la ilustración 40.

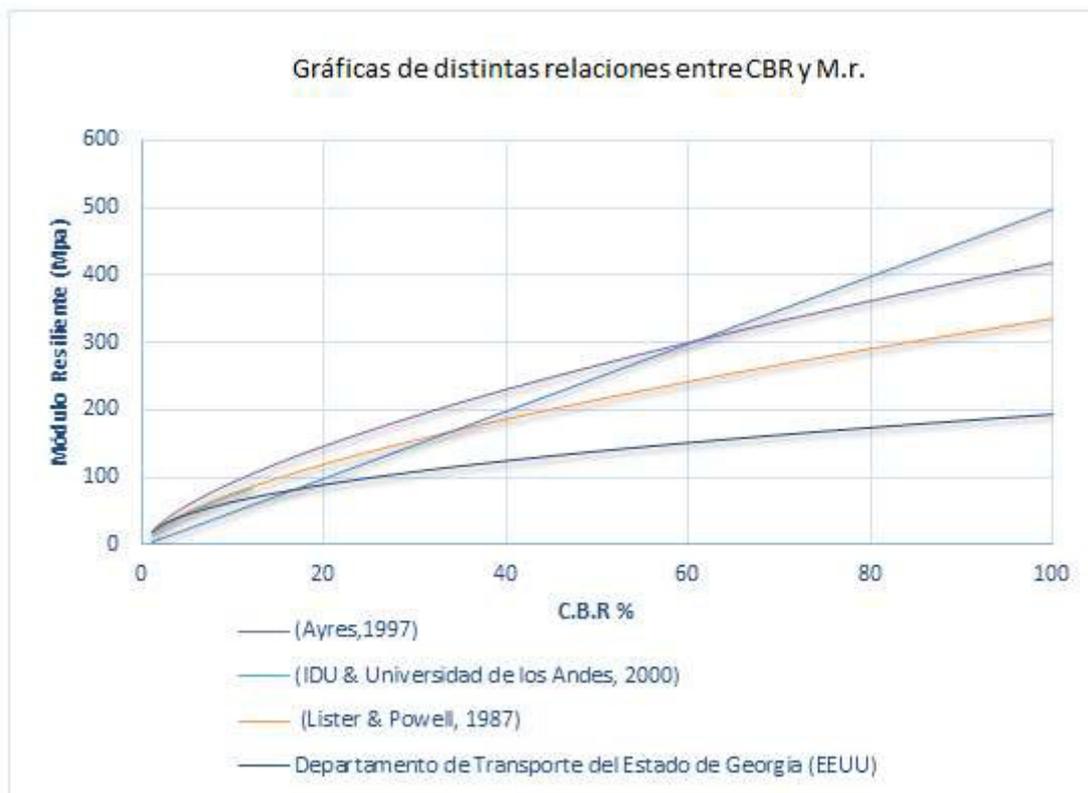


Ilustración 40

Gráfica de funciones: CBR contra valor de módulo resiliente en unidades del SI

Fuente: Autor

³⁹ Se recomienda realizar una investigación en laboratorio que valide la utilización de las fórmulas de M. r. contra CBR para suelos granulares y finos existentes en la literatura pertinente.



La ilustración anterior permite interpretar el *relativo desfase* que existen en diferentes suelos granulares muy a pesar de haber presentado un CBR similar. Esto otorga la idea de que factores como:

- I. Intemperismo
- II. Temperaturas extremas
- III. Errores durante realización de ensayos
- IV. Condiciones estáticas y dinámicas.

Han afectado los resultados, generando desviaciones considerables.

El primer y segundo punto guarda estrecha relación con lo establecido por AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993.

En el que se establece la variación del modulo resiliente a lo largo de los meses del año, que a su vez es función de los cambios de temperatura provocado por las estaciones del año, incluyendo ciclos de congelamiento y deshielo, lluvias excesivas, entre otros. No obstante AASHTO alude esto, para *suelos de sub-rasante*; dando prioridad a suelos finos, ahora podemos ver que esto también es aplicable para suelos friccionantes, salvo la condición de que la variación o dispersión de resultados no es tan alta. Por ello AASHTO propone una carta de medición de M. r. en diversas épocas del año. Ver ilustración 41.

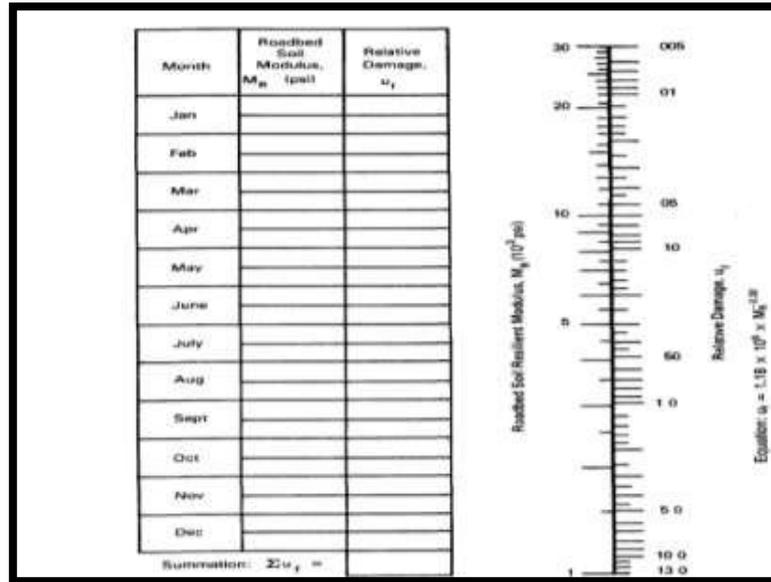


Ilustración 41

Fuente: (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993)

Esto no solo es aplicable para variaciones debidas a fenómenos de intemperismo sino que también puede extrapolarse al lugar de extracción del material granular. La ilustración 42 presenta la variación del módulo resiliente de muestras obtenidas en diferentes abscisas de una vía en construcción.

Variación del Módulo Resiliente Compuesto

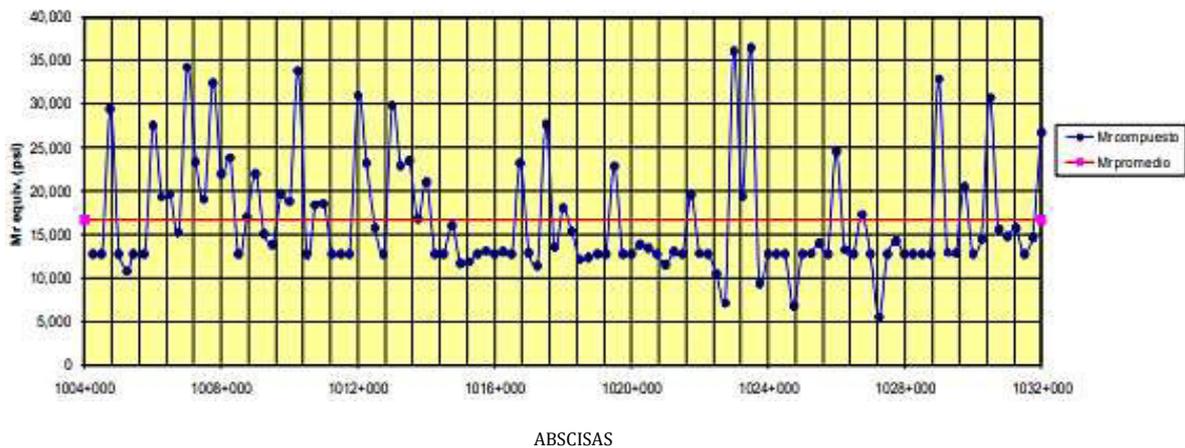


Ilustración 42

Variación del módulo resiliente a lo largo de las abscisas de construcción de una red vial.

Fuente: (Martha Herrera-Montealegre, 2014)

Demostrando la gran sensibilidad de esta variable. Para finalizar esta subsección, se presenta la gráfica de ciertas funciones que también relacionan CBR y M.r. pero esta vez, las unidades de análisis para M.r. se encuentran en el sistema inglés.

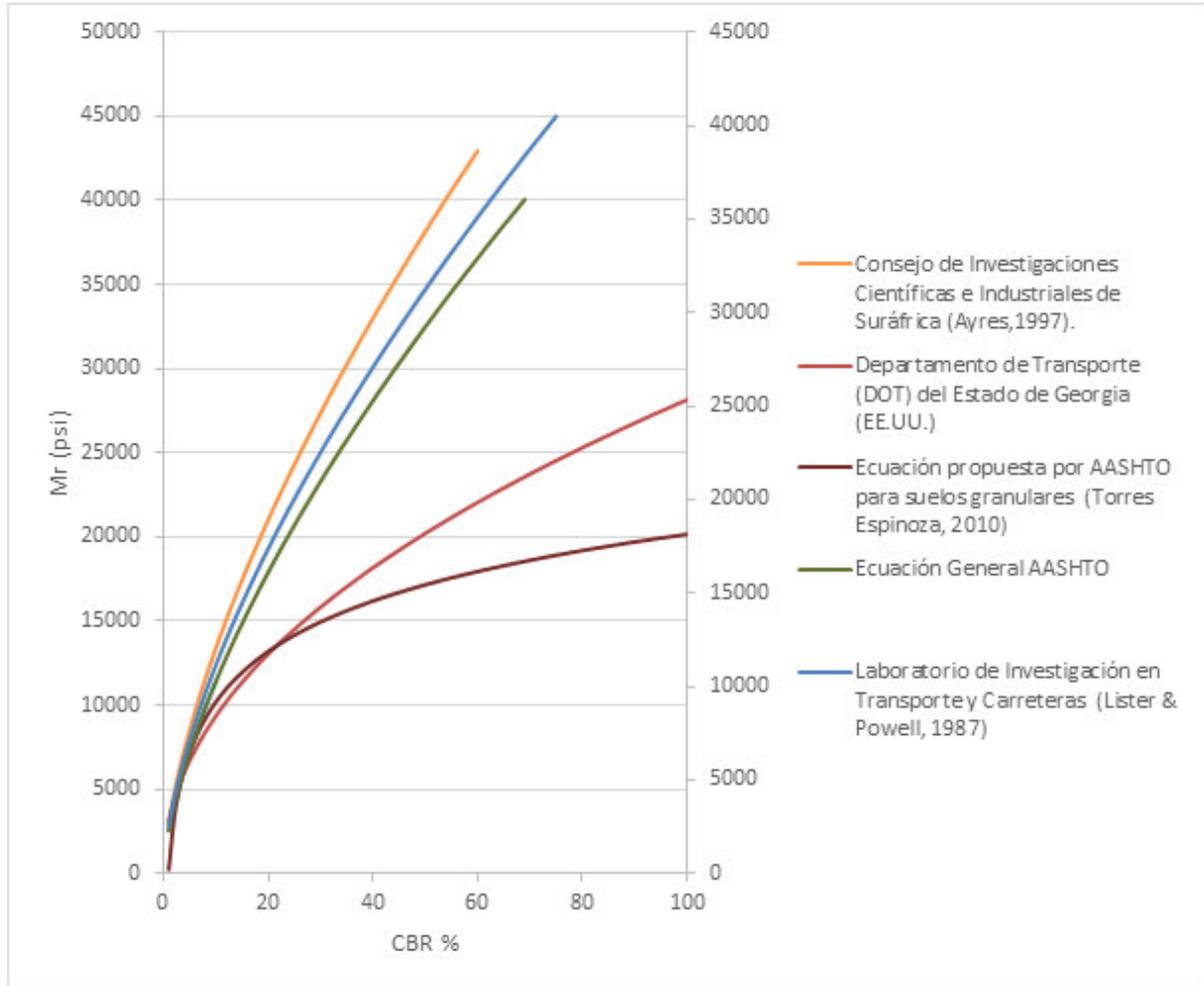


Ilustración 43
Gráfica de funciones: CBR contra valor de módulo resiliente en unidades inglesas.
Fuente: Autor

La ilustración 43 presenta una serie de correlaciones entre M.r. y CBR, muy a pesar de esto se pueden notar variaciones considerables entre una y otra ecuación, aquí, imperará variables tales como tipología de análisis para ensayos triaxiales, épocas del año, temperaturas máximas y mínimas, entre otras.

Como dato adicional, Se puede determinar mayor información al respecto en aquella literatura desarrollada en países del primer mundo y/o de alto avance en el área de diseño y construcción de pavimentos, los cuales en su gran mayoría son de habla inglesa.



4.2 Resultados de muestras analizadas en laboratorio y cálculo de valores de M. r.

4.2.1 Descripción y metodologías a aplicar

Sin duda, la manera más idónea para dar con los objetivos de este proyecto hubiera sido aquel escenario en el cual se cuente con un equipo triaxial dinámico, esto hubiera permitido obtener resultados más exactos e incisivos, aun así, ventajosamente la literatura permite obtener valores de M.r. en función de variables tales como pesos específicos (densidad seca máxima), humedad óptima, estados de consistencia y granulometrías, los cuales constituyen ensayos alcanzables para los estudiantes de pregrado y los cuales han sido ya analizados en laboratorio. Se pueden recurrir a dos fórmulas que han sido desarrolladas para facilitar este propósito, la primera ya ha sido analizada en este documento y es la que sigue la siguiente expresión:

$$\ln M. r. = 9.5 - 0.161 * C_c - 0.0123 * W + 71.4 k$$

Dónde,

M.r.= Módulo de resiliencia con presión de confinamiento de 2 libras sobre pulgada cuadrada.

Cc= Coeficiente de curvatura.

W= Contenido de agua gravimétrico (0-100)

k= Coeficiente de permeabilidad

Conocida como la ecuación de Ping y Ling, la cual en su mayoría depende fuertemente de sus características granulométricas (Coeficiente de curvatura), contenido de agua gravimétrico (W) y coeficiente de permeabilidad, es decir la cantidad de agua que escurre por una muestra de suelo por segundo.

Por otro lado, la segunda la encontramos en los estudios realizados por Rahim & George (2005) (Pacheco Rodríguez, 2018), esta ecuación relacionada variables tales como: densidad, grado de uniformidad, contenido de agua y finos para materiales granulares:

Ecuación 21

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

Dónde,

Ecuación 22

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

Ecuación 23

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

Dónde,

θ Sumatoria de esfuerzos principales

q Esfuerzo desviador

γ_d Densidad seca

w Contenido de agua en la muestra

ρ_a Presión atmosférica

#200 Porcentaje del material que pasa el tamiz No. 200

Cu Coeficiente de uniformidad.

Estas ecuaciones permitirán obtener valores bastantes realistas de M_r de los materiales analizados en laboratorio. Antes de proceder al cálculo de estos valores, se presentan los estudios realizados en laboratorio. Lo que resta de este capítulo estará estructurado de la siguiente manera:

I. Presentación de resultados de análisis realizados en laboratorio.



- II. Cálculo de módulo resiliente a través de estados de consistencia y clasificación de suelos.
- III. Cálculo de módulo resiliente a partir de correlaciones que incluyan variables tales como densidades máximas secas, humedades y granulometrías.
- IV. Tabulación de valores de CBR obtenido de las muestras objeto de estudio.
- V. Aplicación de método de correlación estadística basada en mínimos cuadrados.
- VI. Tabulación y gráfica de la función obtenida.

4.2.2 Resultados de ensayos obtenidos en laboratorio y estudios recopilados.

Se han recolectado siete muestras de materiales base y sub-base los cuales han sido analizados en detalle, pudiéndose determinar:

- I. Granulometrías (Gruesa y fina)
- II. Estados de consistencia: Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad.
- III. Humedad óptima y densidad seca máxima.
- IV. CBR

A más de ello, gracias a los análisis compartidos por empresas consultoras⁴⁰ de la ciudad se ha podido recopilar datos útiles adicionales. Esta información se considera necesaria y suficiente para la presentación de pares coordinados para la posterior regresión estadística a realizar.

⁴⁰ Se agradece los ensayos compartidos: Ing. Msc Luis Mario Almache, Ing. Msc César Humberto Maldonado, e Ing. Cristina Vintimilla.

4.2.2.1 Tablas granulométricas y gráficas:

Tabla 28
Análisis granulométrico 1.

tamiz #	Abertura mm	Porcentaje 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%
Nº4	4.76	47.1%
10	2	30.70%
40	0.42	14.25%
200	0.074	5.98%

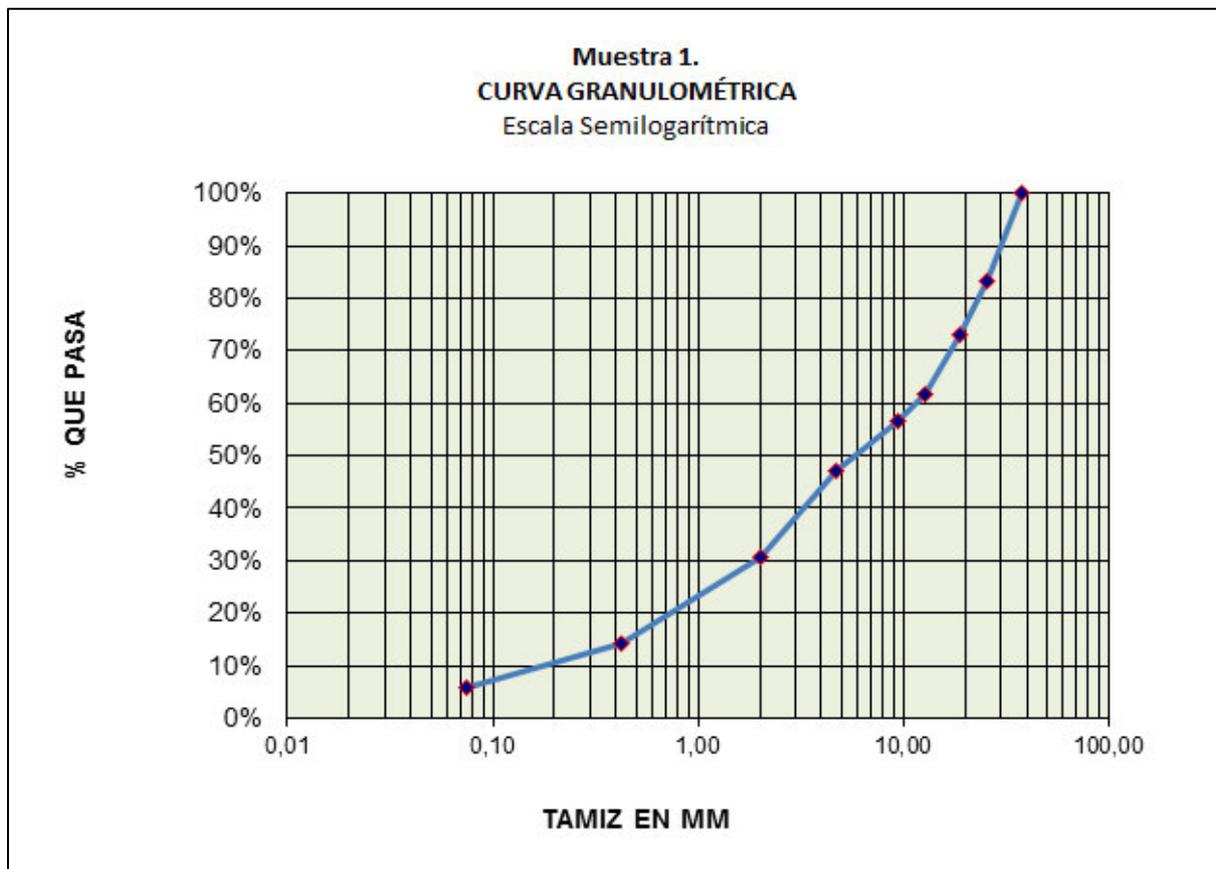


Ilustración 44
Gráfica de granulometría de muestra 1 en formato semilogarítmico.

Tabla 29
Análisis granulométrico 2.

tamiz #	abert. mm	Porcentaje 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%

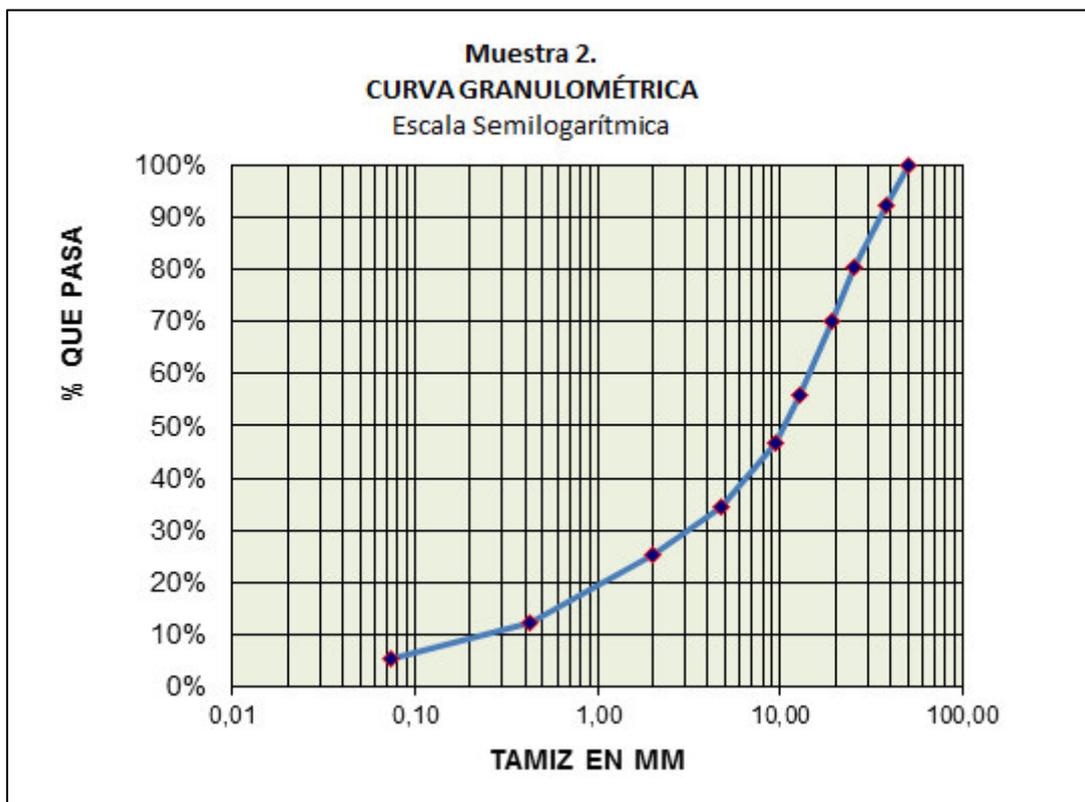


Ilustración 45
Gráfica de granulometría de muestra 2 en formato semilogarítmico.

Tabla 30
Análisis granulométrico 3.

tamiz #	Abertura. mm	Porcentaje que 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%

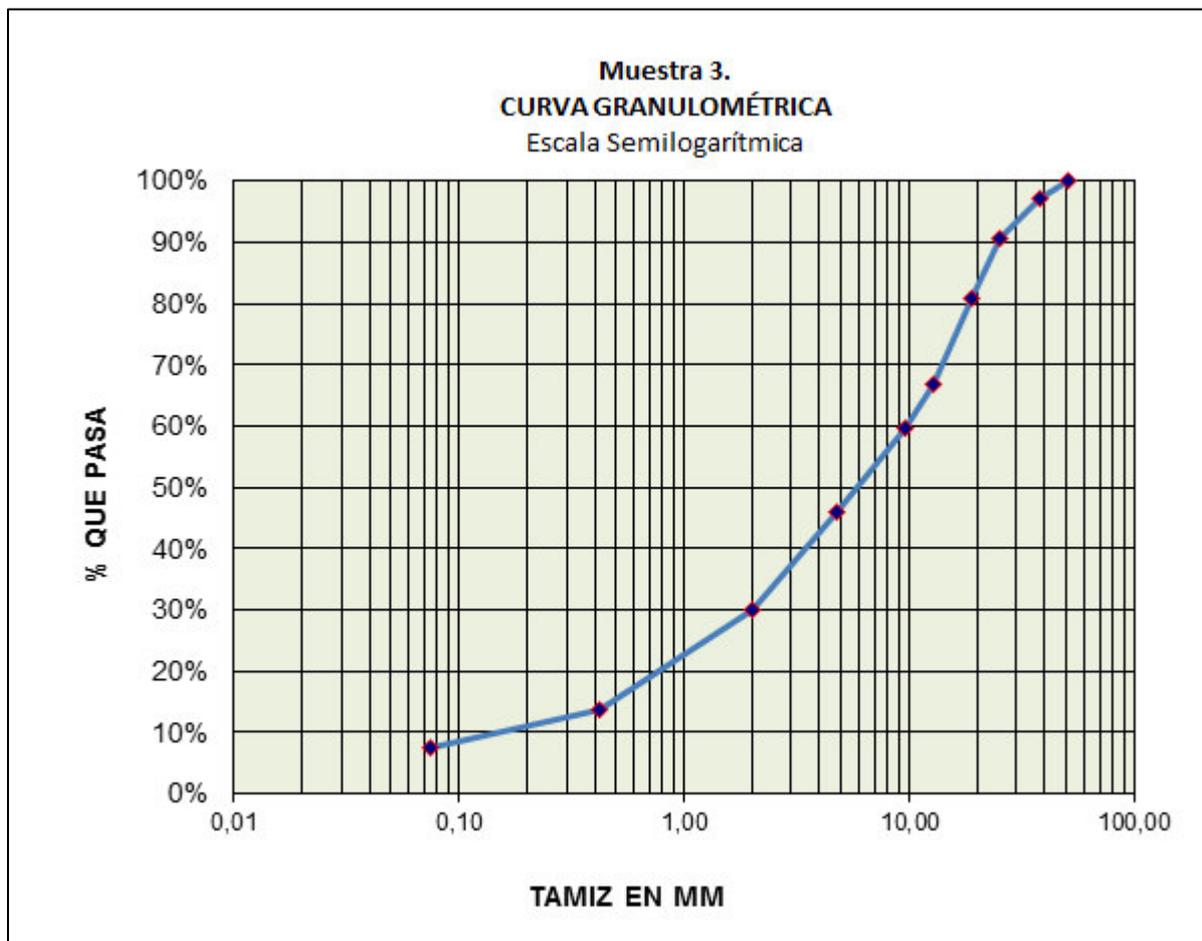


Ilustración 46
Gráfica de granulometría de muestra 3 en formato semilogarítmico.

Tabla 31
Análisis granulométrico 4.

tamiz #	Abert. mm	Porcentaje que 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%

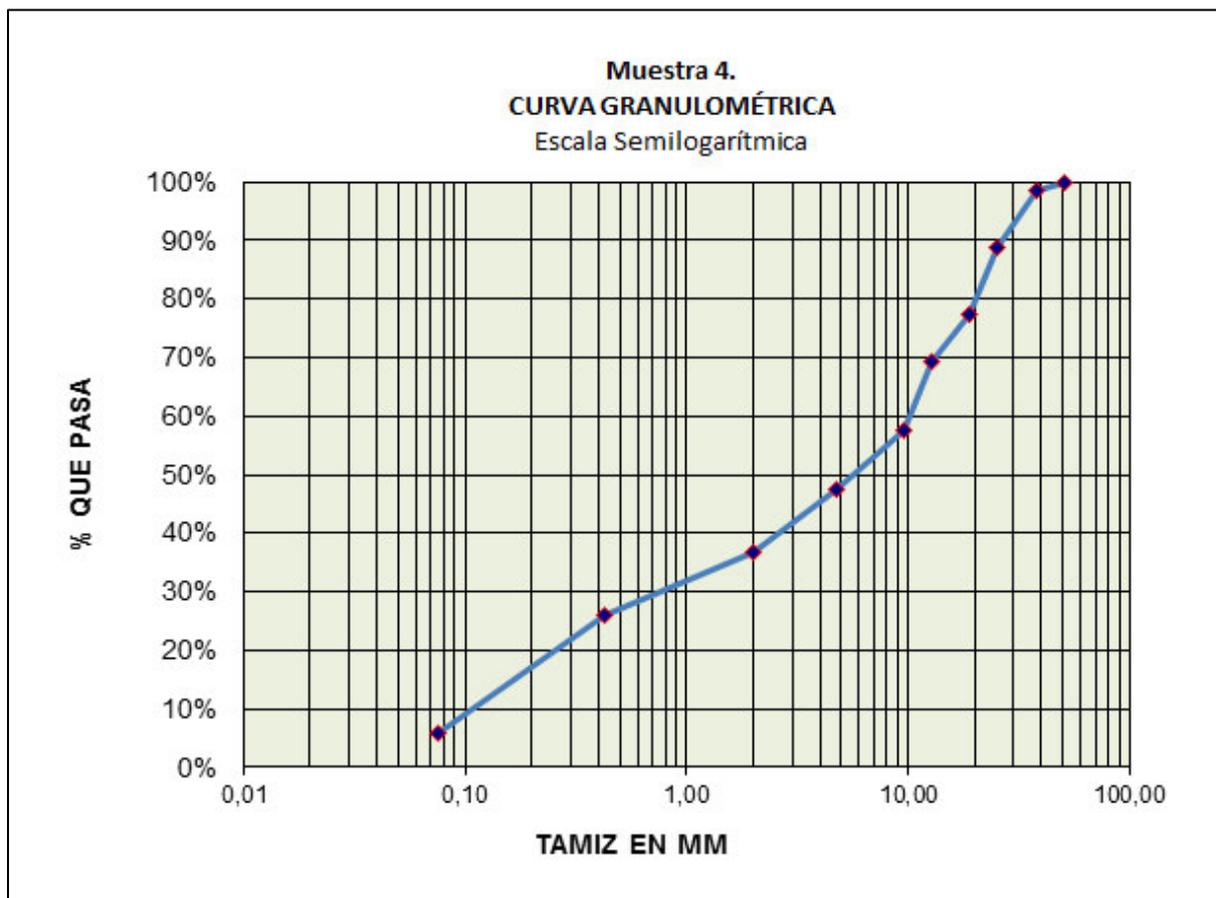


Ilustración 47
Gráfica de granulometría de muestra 4 en formato semilogarítmico.

Tabla 32
Granulometría 5.

tamiz #	Abert. mm	Porcentaje que 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%

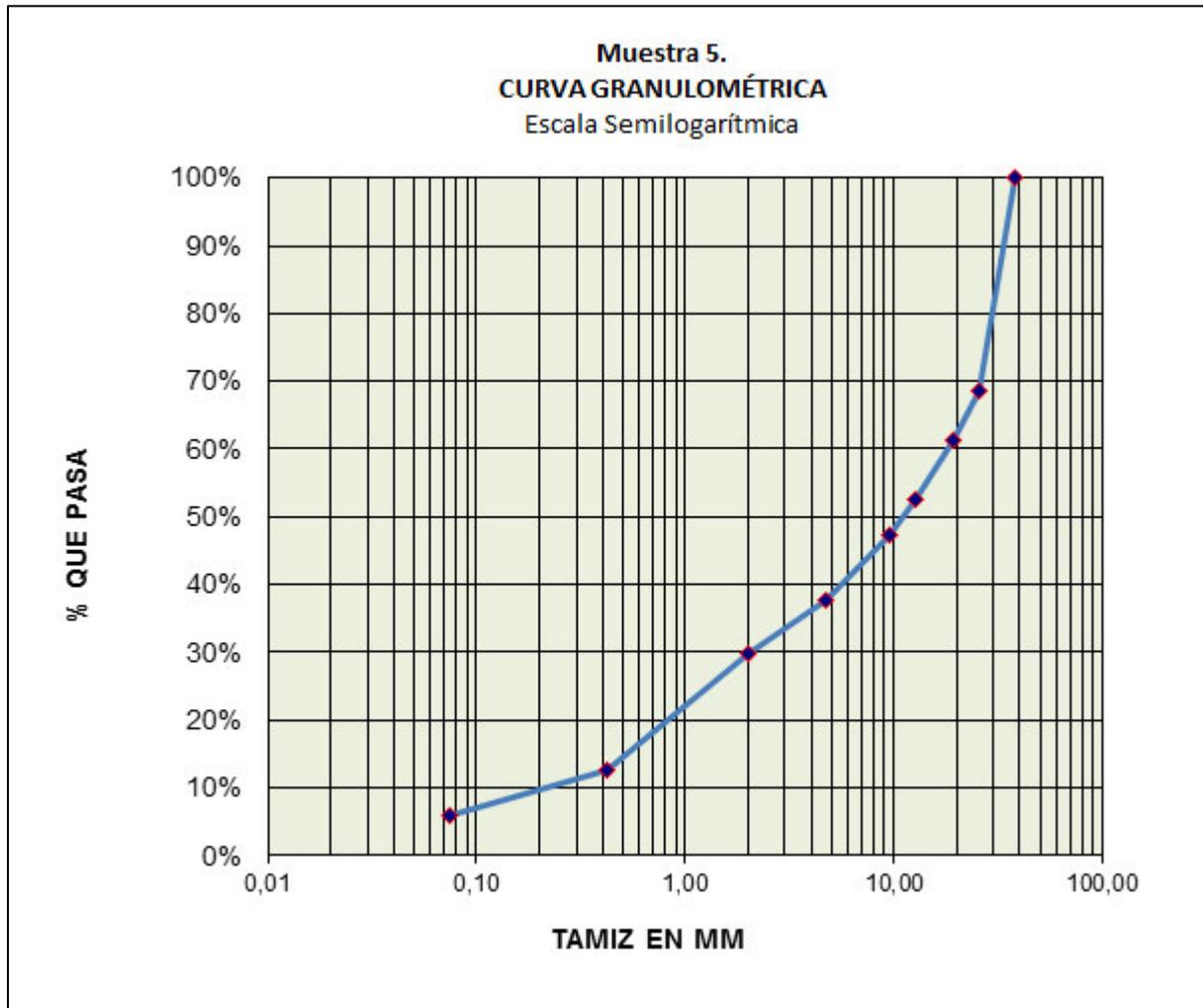


Ilustración 48
Gráfica de granulometría de muestra 5

Tabla 33
Granulometría 6.

tamiz #	Abertura mm	Porcentaje que 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%

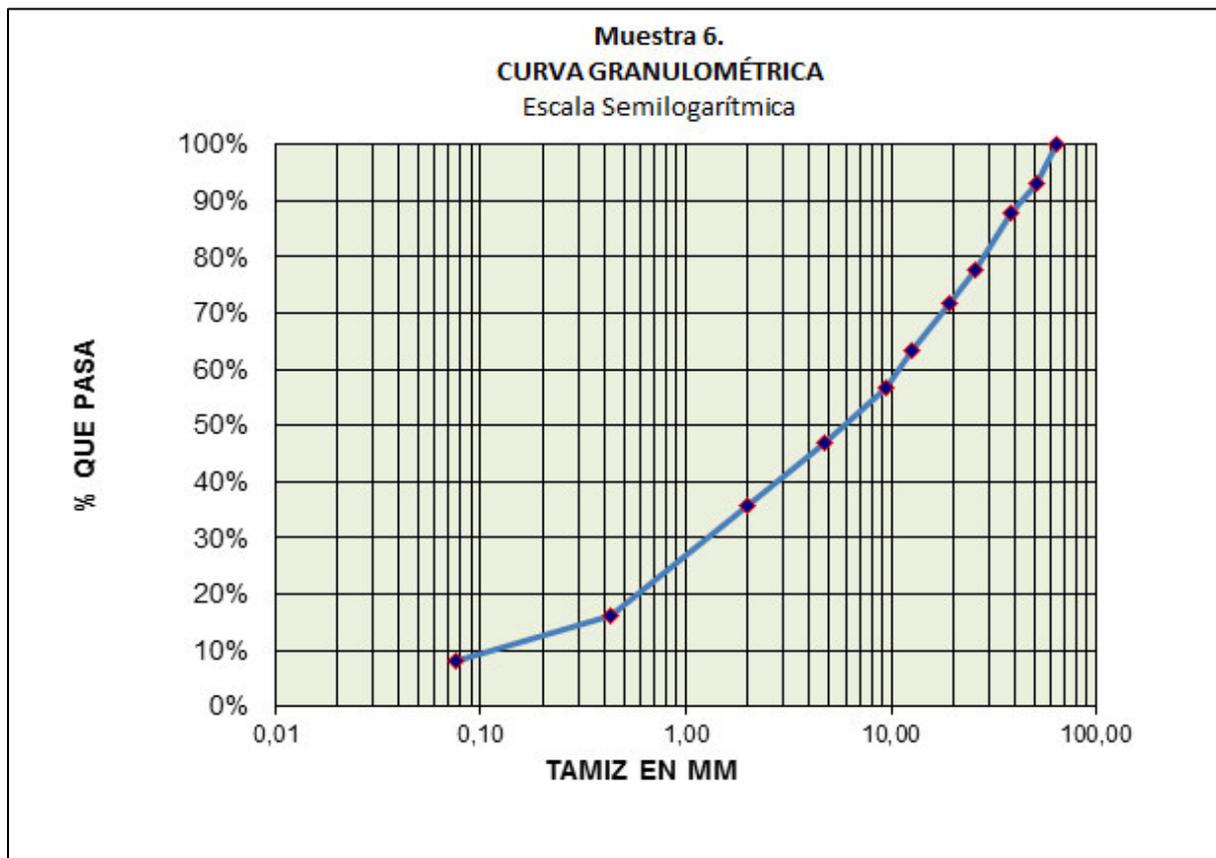


Ilustración 49
Gráfica de granulometría de muestra 6

Tabla 34
Granulometría 7.

tamiz #	Abertura. mm	Porcentaje 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%

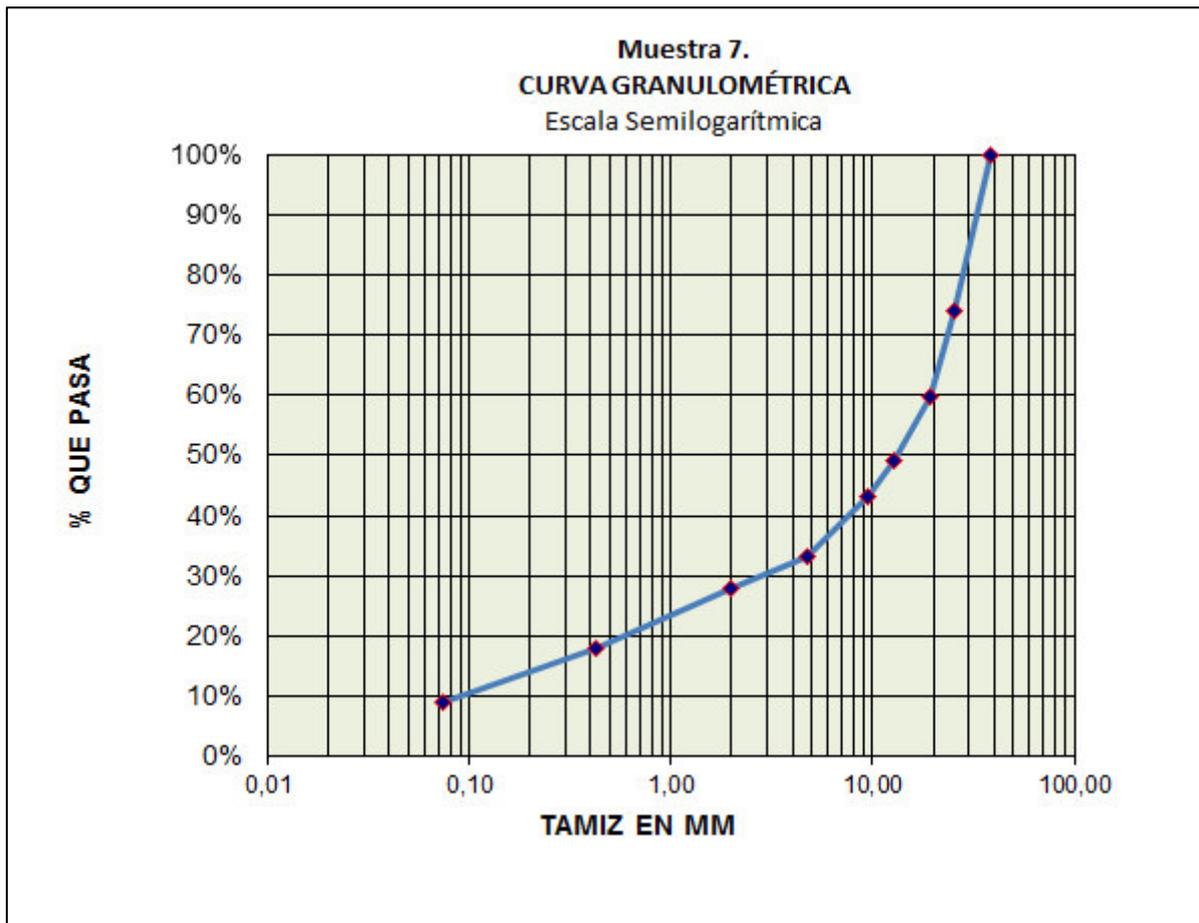


Ilustración 50
Gráfica de granulometría de muestra 7

Tabla 35
Granulometría 8.

tamiz #	abert. mm	Porcentaje 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%

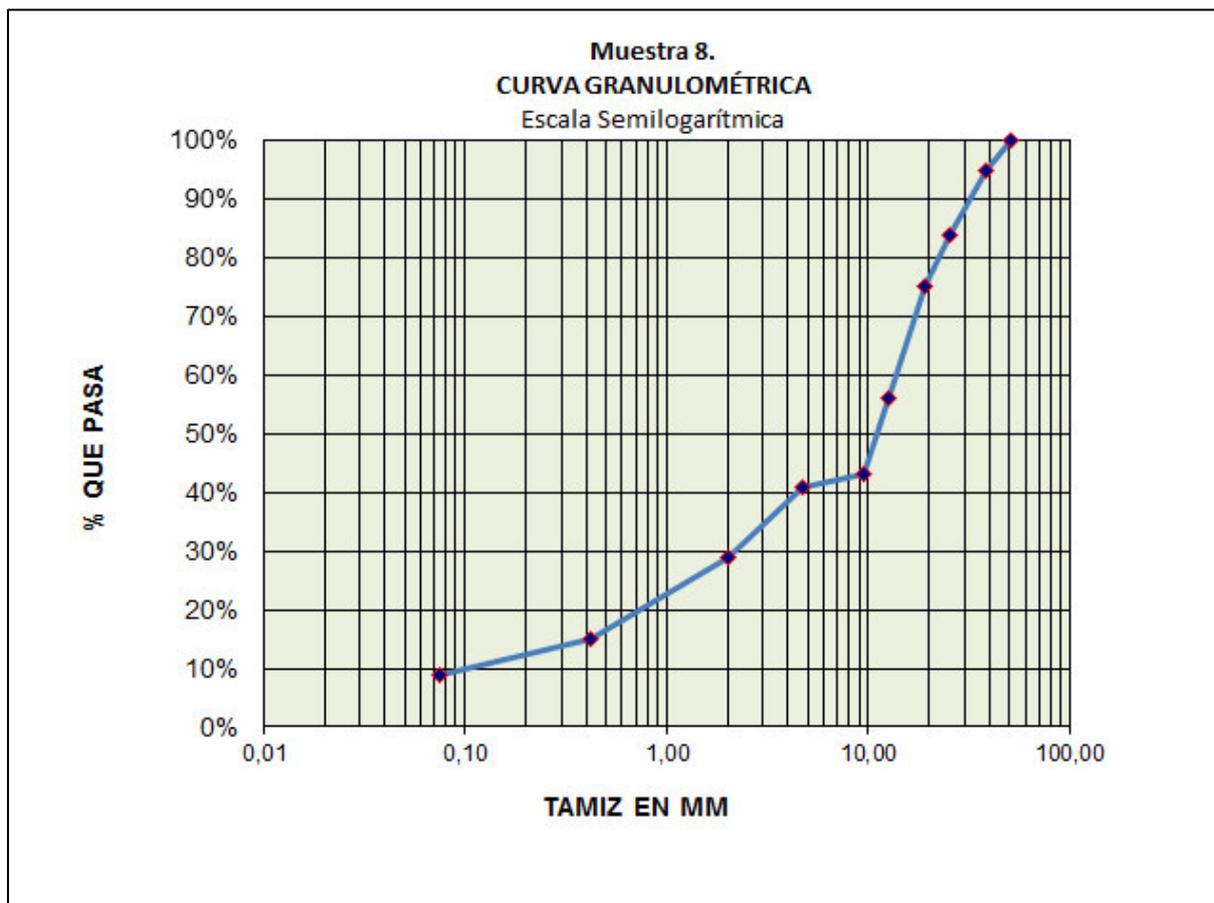


Ilustración 51
Gráfica de granulometría de muestra 8

Tabla 36
Granulometría 9.

tamiz #	Abert. mm	Porcentaje 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%
N°4	4.76	46.0%
10	2	36.00%
40	0.42	23.00%
200	0.074	10.00%

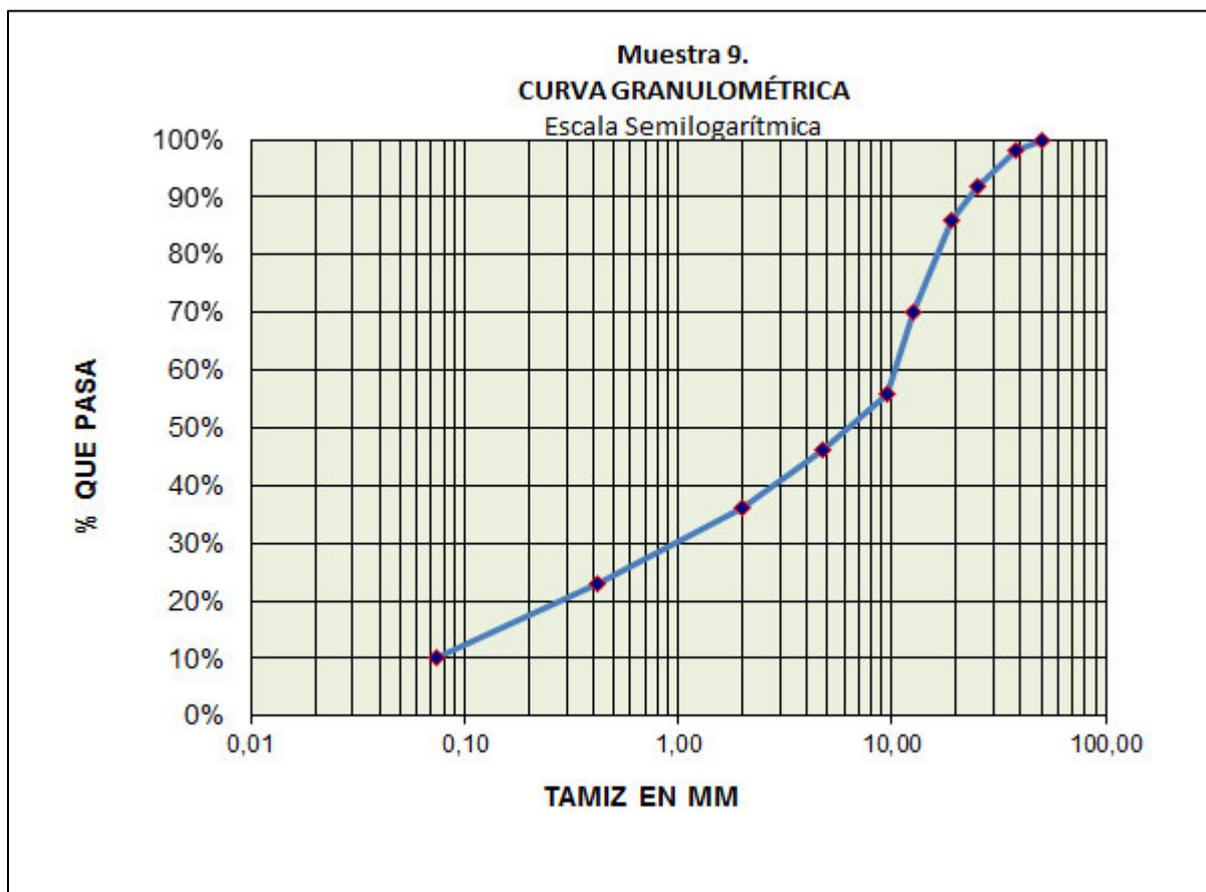


Ilustración 52
Gráfica de granulometría de muestra 9

Tabla 37
Granulometría de muestra 10.

tamiz #	abert. mm	Porcentaje 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%

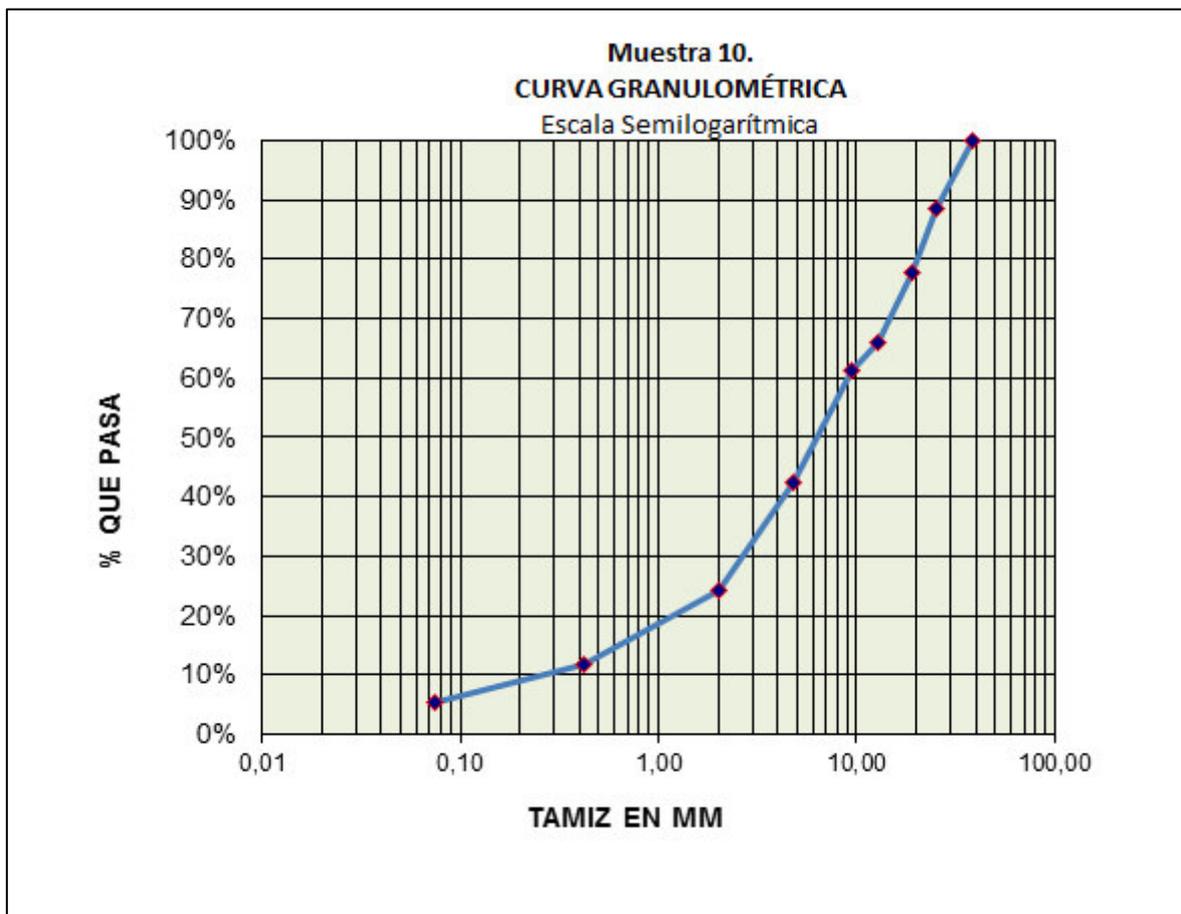


Ilustración 53
Grafica de muestra 10

Tabla 38
Granulometría de muestra 11

tamiz #	abert. mm	Porcentaje 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%

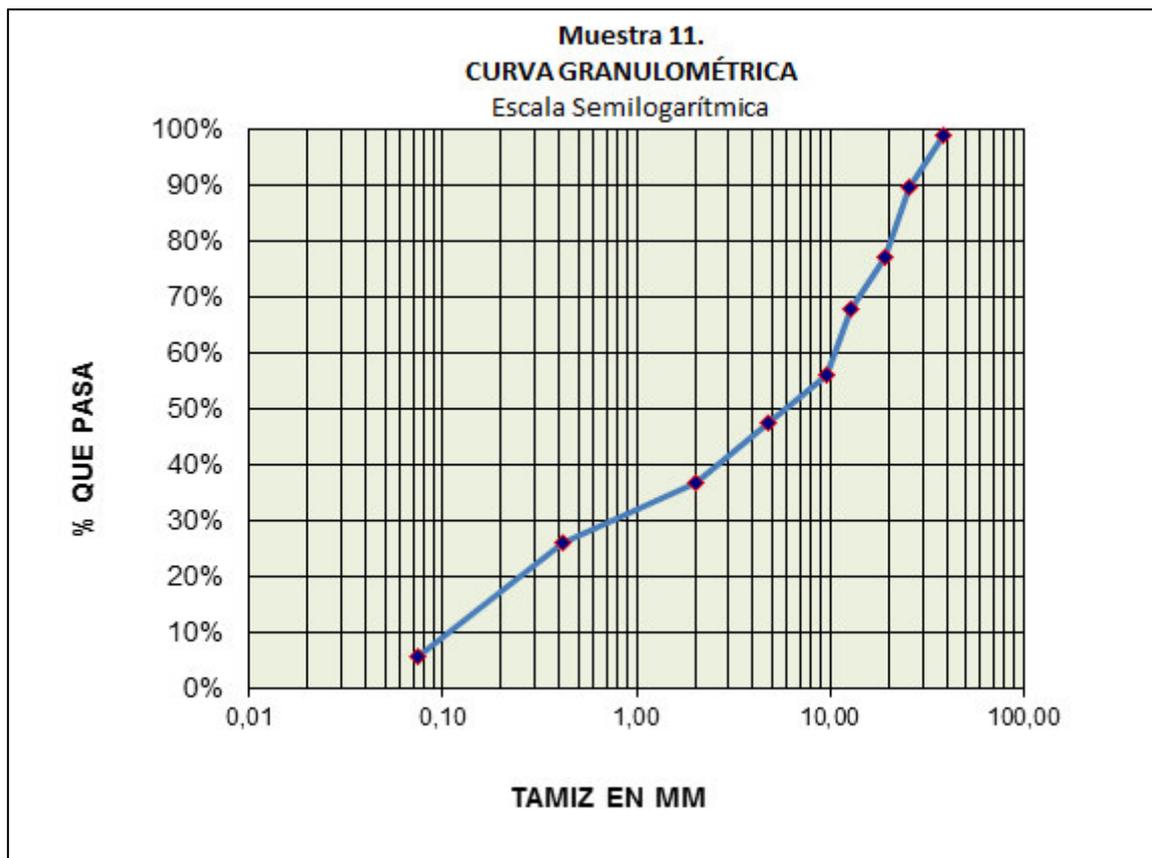


Ilustración 54
Gráfica de muestra 11

Tabla 39
Granulometría de muestra 12.

tamiz #	abert. Mm	Porcentaje 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%

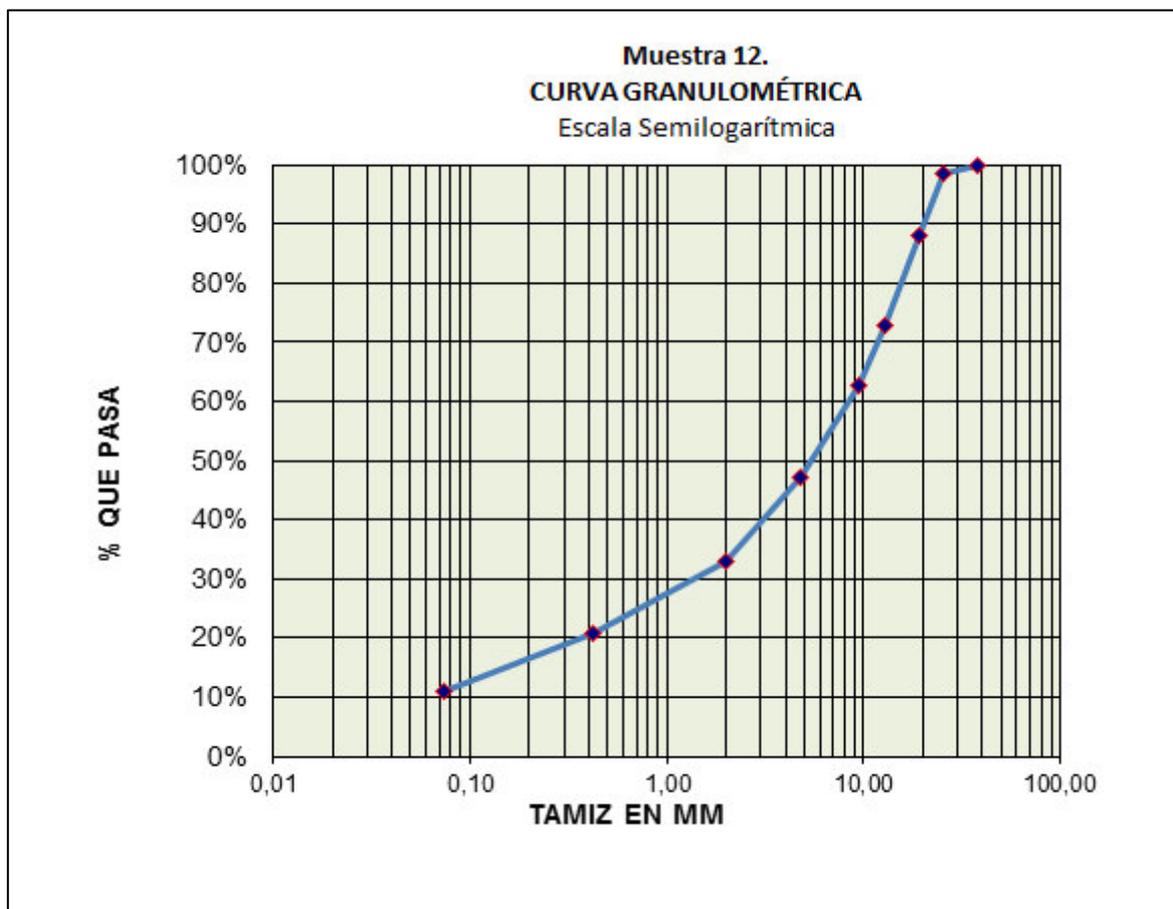


Ilustración 55
Gráfica de granulometría de muestra 12

Tabla 40
Granulometría de muestra 13

tamiz #	abert. mm	Porcentaje que 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%

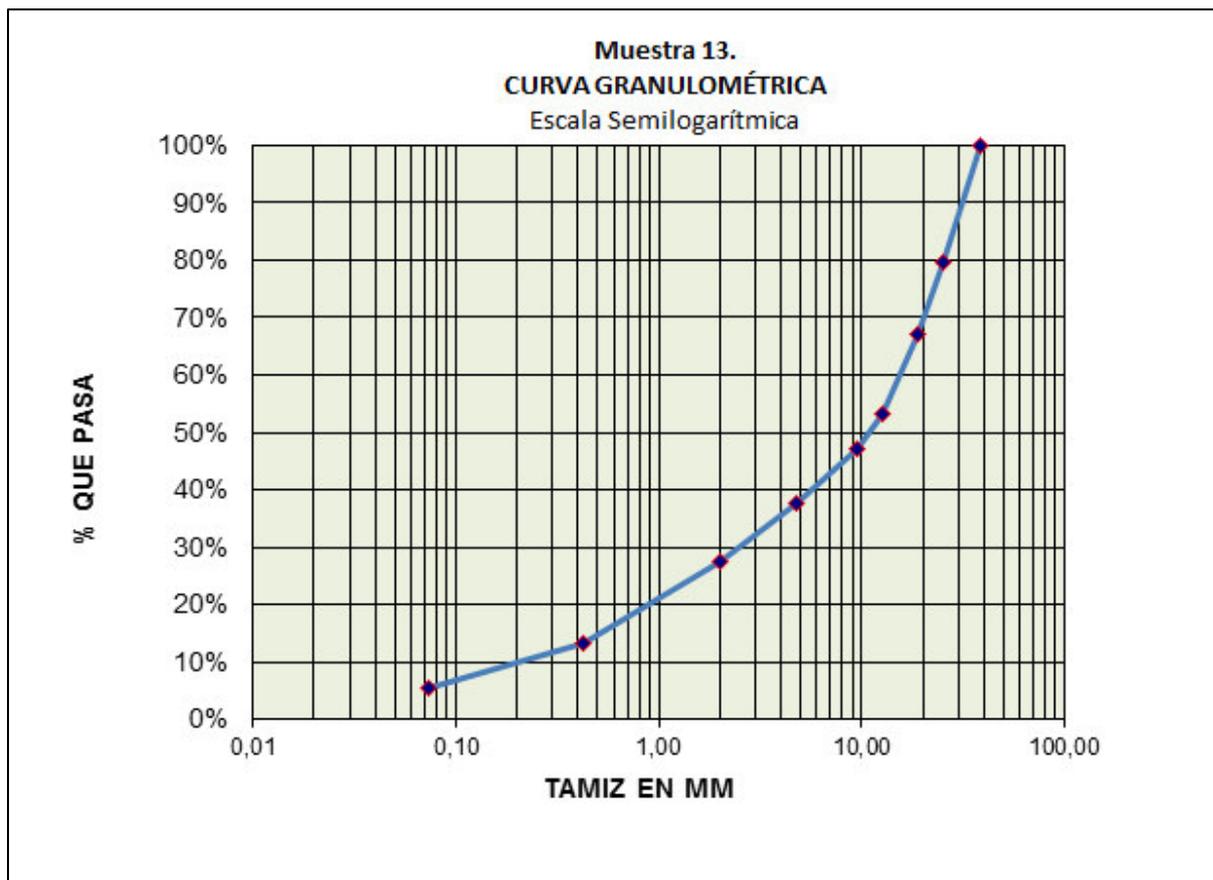


Ilustración 56
Gráfica de granulometría de muestra 13

4.2.2.2 Estados de consistencia

Análogo al párrafo anterior, se procede a presentar, ésta vez; los estados de consistencia de materiales granulares comercializados en la ciudad de Cuenca. Se hace hincapié en que estos resultados pueden no comprender los mismo que los analizados en las granulometrías, de igual manera, la esencia quedaría intacta ya que se hace alusión global a todos los materiales granulares comercializados.

Se ha podido recopilar y analizar la siguiente información:

Muestra 1:

Tabla 41. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	25
LP	22.72
IP	2.28

Tabla 42. Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.

Cu	55
Cc	1.82

Tabla 43. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

CLASIFICACIÓN	
SUCS	GW
AASHTO	A-1-a

Muestra 2:

Tabla 44. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	30.58
LP	23.17
IP	7.41

Tabla 45. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

SUCS	GW-GC
AASHTO	A-2-4(0)

Muestra 3:

Tabla 46. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	28.91
LP	21.85
IP	7.06

Tabla 47 Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

SUCS	GW-GM
AASHTO	A-2-4(0)

Muestra 4:

Tabla 48. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	27.830
LP	21.150
IP	6.680

Tabla 49. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

GW-GM
A-2-4(0)

Muestra 5:

Tabla 50. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	22.8
LP	17.04
IP	5.7600

Tabla 51 Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.

Cu	100
Cc	1

Tabla 52. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

SUCS	GW-GM
AASHTO	A-1-B (0)



Muestra 6:

Tabla 53. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	26.17
LP	20.63
IP	5.540

Tabla 54. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

SUCS	GW-GM
AASHTO	A-2-4 (0)

Muestra 7:

Tabla 55. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	25.1
LP	20.97
IP	4.13

Tabla 56 Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.

Cu	200
Cc	4.5

Tabla 57. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

CLASIFICACIÓN	
SUCS	GP-GM
AASHTO	A-1-B(0)

Muestra 8:

Tabla 58. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	NP
LP	NP
IP	NP

Tabla 59 Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.

Cu	144.33
Cc	2.95

Tabla 60. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

AASHTO	A-1-a
SUCS	GW

Muestra 9:

Tabla 61. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	26.15
LP	21.23
IP	4.92

Tabla 62 Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

SUCS	GC
AASHTO	A-1

Muestra 10:

Tabla 63. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	29.06
LP	18.03
IP	11.03

Tabla 64. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

SUCS	A-2-6(0)
AASHTO	GW-GC

Muestra 11:

Tabla 65. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	NP
LP	NP
IP	NP

Tabla 66 Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.

Cu	33.3
Cc	0.96



Tabla 67. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

SUCS	GW
AASHTO	A-1-a

Muestra 12:

Tabla 68 Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	NP
LP	NP
IP	NP

Tabla 69. Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.

Cu	110
Cc	0.44

Tabla 70. Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

CLASIFICACIÓN	
SUCS	SP
AASHTO	A3

Muestra 13:

Tabla 71. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	24.50
LP	20.16
IP	4.40

Tabla 72. Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.

Cu	120
Cc	2.13

Tabla 73 Clasificación de suelos según SUCS

CLASIFICACIÓN	
SUCS	GW



Muestra 14:

Tabla 74. Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de una muestra de suelo granular.

LL	27.5
LP	22.72
IP	4.78

Tabla 75. Coeficiente de Uniformidad y coeficiente de curvatura de una muestra de suelo granular.

Cu	212.5
Cc	4.59

Tabla 76 Clasificación de suelos según SUCS y AASHTO

CLASIFICACIÓN	
SUCS	GW-ML
AASHTO	A1

Se deduce también que:

Algunos materiales granulares no cumplen con lo establecido en las Norma Vial Ecuatoriana, la cual además de otros requerimientos establece un valor máximo del límite líquido de 25% así como un índice de plasticidad de 6%.

4.2.2.3 Humedades óptimas y densidades máximas

Siguiendo con lo establecido, en la tabla 77 se presenta un cuadro resumen de las densidades secas máximas obtenidas en ensayos de laboratorio y recopiladas, análogo a esto se presentará la humedad óptima que el material ha requerido para llegar a dicha densidad, así como el coeficiente de uniformidad obtenido tras la relación entre “d60⁴¹” y “d10”, y la cantidad de finos que contienen las muestras.

⁴¹ Estos valores describen la abertura del tamiz en un determinado porcentaje del material. Así, decimos que d60 significa la abertura del tamiz o diámetro del grano en el 60% del material que pasa por los tamices.

Tabla 77

Algunos parámetros físicos de materiales granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca obtenidos a través de ensayos en laboratorio y recopilaciones.

Fuente: Autor

PARÁMETROS FÍSICOS DE MATERIALES GRANULARES COMERCIALIZADOS EN LA CIUDAD DE CUENCA					
Tipo de material	Muestra	Densidad máxima alcanzada Kg/m ³	Humedad óptima %	Cu	Porcentaje pasa #200
Base	1	2050	9.6	50	7.1
Base	2	2055	10.6	75	6.3
Subbase	3	2040	13.48	100	7.42
Base	4	2168	10.78	120	8.15
Subbase	5	1995	11.5	55	5.98
Base	6	2150	9.4	100	5.9
Subbase	7	1970	14.5	200	9
Base	8	2045	13.8	33	5.55
Subbase	9	2161	10.09	110	5.7
Subbase	10	1992	13.7	120	11.1
Subbase	11	1965	13.8	212.5	5.56

4.2.3 Cálculo de módulo resiliente a través de estados de consistencia, clasificación de suelos y ecuaciones AASHTO

Gracias a investigaciones realizadas, resulta posible dar con el valor de M. r. relacionando la clasificación de suelos SUCS y AASHTO con el valor VRS (CBR) y posteriormente con el valor de M. r. o de manera más corta, directamente entre clasificación de suelos y M. r. para ello se hace uso de las tablas 78, 26 y 27. (La tabla 26 y 27 fue descrita en 3.4.1 y serán mostradas nuevamente a continuación).

Tabla 78 Valores de M.r. que dependen de ciertas características de los materiales.

Información extraída directamente de: (SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, 2000)

Tipo de suelo AASHTO	Descripción	SUCS	γ_d (kN/m ³)	VRS %	Módulo resiliente (MPa)
Suelos de grano grueso					
A-1-a , bien graduado	Grava	GW, GP	19.6-22	60 - 80	70.37-140.74
A-1-a , mal graduado			18.9-20.4	35 - 60	70.37-140.74
A-1-b	Arena gruesa	SW	17.3-20.4	20 - 40	42.23-105.55
A-3	Arena fina	SP	16.5-18.9	15 - 25	35.18-14.07
Suelos A-2 (materiales granulares con alto porcentaje)					
A-2-4 , gravosa	Grava limosa	GM	20.4-22.8	40 - 80	70.37-211.11
A-2-5 , gravosa					
A-2-4 , arenosa	Arena limosa	SM	18.9-21.2	20 - 40	70.37-140.74
A-2-5 , arenosa					
A-2-6 gravosa	Grava arcillosa	GC	18.9-22.0	20 - 40	56.29-140.74
A-2-7 gravosa	Grava arcillosa con arena	SC	16.5-20.4	10 - 20	35.18-105.55
A-2-6 arenosa	Arena arcillosa				
A-2-7 arenosa	Arena arcillosa con grava				
Suelos de grano fino *					
A-4	Limo	ML , OL	14.1-16.5	4 - 8	14.07-42.22
	Grava-arena-limo		15.7-19.6	5 - 15	28.14-56.29
A-5	Limo alta compresibilidad	MH	12.6-15.7	4-8	14.07-42.22
A-6	Arcilla plástica	CL	15.7-19.6	5-15	14.07-70.37
A-7-5	Arcilla baja compresibilidad	CL, OL	14.1-19.6	4-15	14.07-70.37
A-7-6	Arcilla alta compresibilidad	CH, OH	12.6-17.3	3-5	28.14-70.37

También:

Valores de K₁ y k₂ recopilados de las investigaciones realizadas por Rada y Witczak (1981) (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Tipo de material	No. de datos	K ₁ (MPa)		K ₂	
		media	desviación estándar	media	desviación estándar
Arena limosa	8	11.17	0.54	0.62	0.13
Grava arenosa	37	30.89	29.65	0.53	0.17
Arena-grava	78	30.00	18.13	0.59	0.13
Roca triturada	115	49.70	51.64	0.45	0.23

Y, finalmente:

Valores de K_1 y k_2 recopilados de las información de (Shook et al, 1982) (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

Referencias	Material	K_1 (MPa)	K_2
Hicks (1970)	Grava parcialmente triturada, roca triturada	11.03-34.48	0.57-0.73
Hicks y Finn (1973)	Base no tratada, tramo de prueba (San Diego)	14.48-37.23	0.61
Allen (1973)	Grava, roca triturada	12.41-55.16	0.32-0.70
Kalcheff y Hicks (1973)	Roca triturada	27.58-62.06	0.46-0.64
Boyce et al (1976)	Caliza triturada bien graduada	55.16	0.67
Monismith y Witczak (1980)	Materiales de base y subbase en servicio	20.00-53.44	0.46-0.65

El proceso estará estructurado de la siguiente manera:

- I. Con la ayuda del primer cuadro y mediante las clasificaciones de suelos recopiladas y analizadas propiamente por el autor, se obtendrán valores aproximados de módulos resilientes de materiales comercializados en la ciudad de Cuenca.
- II. Siguiendo la fórmula descrita en 3.4.1.1.: $M.r. = K_1 * \phi^{k_2}$ y con la ayuda de las **dos últimas tablas** presentadas se podrán obtener también valores de M. r.
- III. Luego, se compararán los obtenidos en I y II para finalmente obtener un rango de variación.

4.2.3.1 Parámetros recopilados

Recordemos que las muestras analizadas y recopiladas entran en los siguientes grupos:

Tabla 79
 Clasificación de suelos y número de muestras analizadas y recopiladas

Fuente: Autor

Muestra #	CLASIFICACIÓN DE SUELOS	
	SUCS	AASHTO
1	GW	A-1-a
2	GW-GC	A-2-4(0)
3	GW-GM	A-2-4(0)
4	GW-GM	A-2-4(0)
5	GW-GM	A-1-B(0)
6	GW-GM	A-2-4(0)
7	GP-GM	A-1-B(0)
8	GW	A-1-a
9	GC	A-1
10	GW-GC	A-2-6(0)
11	GW	A-1-a
12	GW	A-1-a
13	GW	
14	GW-ML	A1

Es decir:

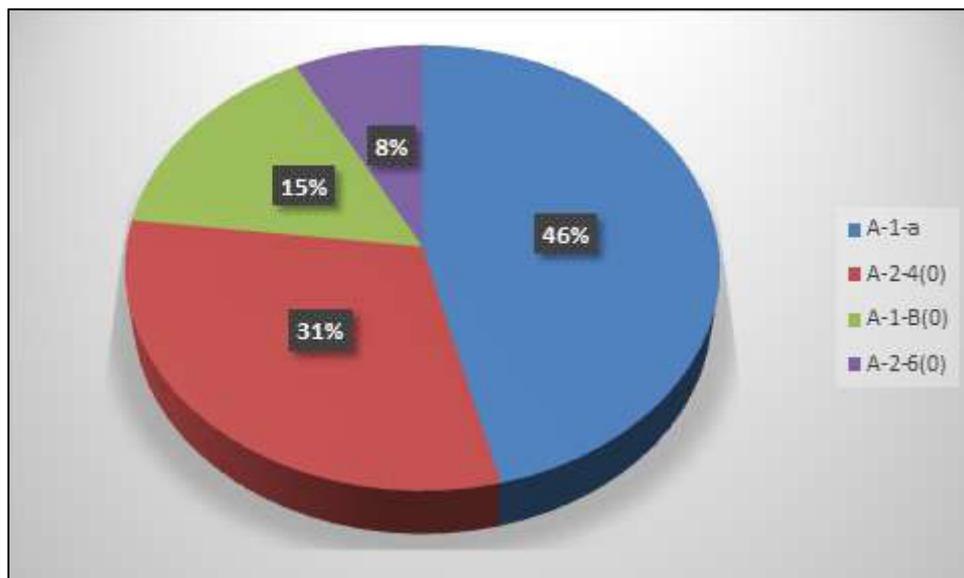


Ilustración 57
 Clasificación de suelos AASHTO y número de muestras de cada tipología
 Fuente: Autor

O también,

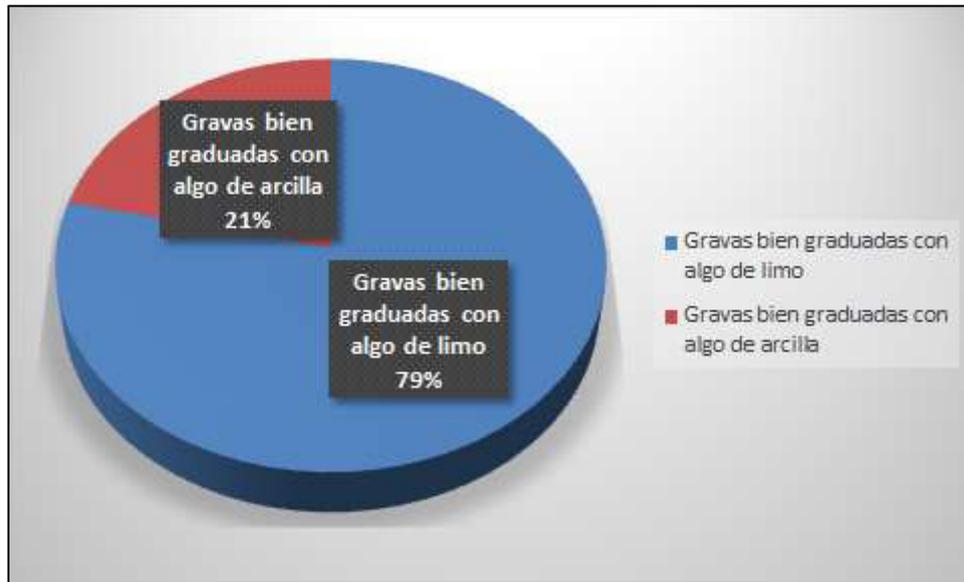


Ilustración 58
Clasificación de suelos SUCS y número de muestras de cada tipología
Fuente: Autor

Finalmente, con la clasificación de suelos de cada muestra descrito en la sección 4.2.2.2 y las tablas presentadas en este párrafo se acuerda que:

M. r. para los suelos granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca pertenece al dominio de los números reales comprendidos entre [35.18. 140.74]Mpa

4.2.3.2 Análisis de la ecuación AASHTO y segunda metodología de determinación de M.r.

Otro criterio a tener en cuenta, es tras la clasificación de suelos y número de muestras presentadas en las tablas anteriores, obtener valores de K1 y K2 para así aplicar la ecuación descrita al inicio de este párrafo.

La ecuación de la forma:

Determinación de módulo resiliente a través de constantes no lineales de regresión. (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 1993), (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002), (Higuera Sandoval, 2011)

$$M.r. = K1 * \sigma^{k2}$$

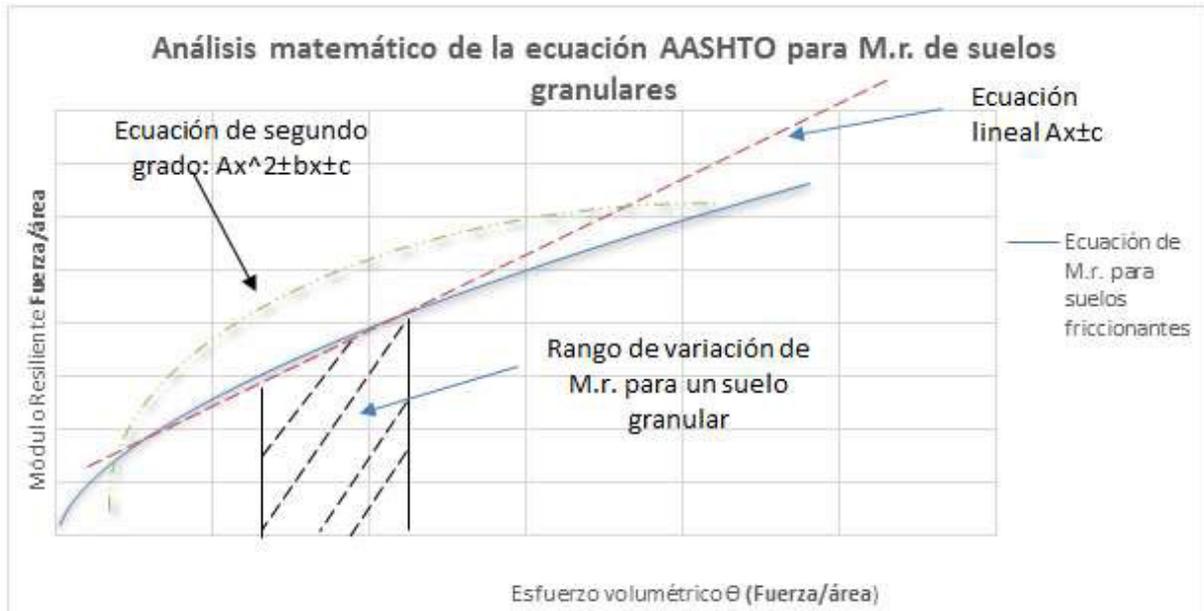


Ilustración 59

Comportamiento de la ecuación AASHTO que describe la relación entre módulo resiliente, esfuerzo volumétrico y parámetros K_1 y k_2 .

Fuente: Autor

La ilustración 59 presenta el comportamiento de la ecuación AASHTO para materiales granulares, así como dos ecuaciones de primer y segundo grado, lo que aquí se pretende es entender la naturaleza de la ecuación que mejor se adapte a las variables M.r. y CBR.

Resulta entonces, fácilmente deducible que la ecuación AASHTO para suelos granulares posee un comportamiento polinomial con exponente fraccionario, de la forma $Y = A * x^B$. Donde A y B son constantes. Si B fuera igual a 1 o cercana a 1 tanto por la izquierda como por la derecha cayera en la particularidad de que $Y = A * x$, regresando a la ilustración anterior se puede notar que existirá un dominio muy limitado en donde esto coincida, esto significaría un coeficiente de correlación difícilmente cercano a 1. La misma discusión se podría aplicar a una ecuación de segundo orden, generando desviaciones más importantes.

Luego:

La correlación que se buscará se obtendrá partiendo de la naturaleza de la ecuación AASHTO para suelos friccionantes y que incluye exponente fraccionario (función exponencial)



Con la utilización de la ecuación AASHTO, la clasificación de suelos para cada muestra y con los parámetros K1 y K2 obtenidos de la tabla 26y 27, presentadas en esta sección nuevamente; se procede entonces a obtener el valor de M.r. mediante la expresión anteriormente analizada. Primero, se tomará como dato principal que los suelos granulares predominantes son de carácter gravoso bien graduado y con algo de limo (SUCS) o de tipo A-1 (AASHTO). Con esto entramos en las tablas presentadas al inicio de este párrafo y obtenemos que:

Ecuación 24. Ecuación obtenida siguiendo los estándares AASHTO y las investigaciones de Rada y Witczak (1981) (Garnica Anguas, Gómez López, & Sesma Martínez, 2002)

$$M. r_1 = 30.89 * \emptyset^{0.53}$$

También,

Ecuación 25. Ecuación obtenida siguiendo los estándares AASHTO y las investigaciones de Hicks y Finn (1973)

$$M. r_2 = 25.86 * \emptyset^{0.61}$$

Y,

Ecuación 26. . Ecuación obtenida siguiendo los estándares AASHTO y las investigaciones de Monismith y Witczak (1980)

$$M. r_3 = 36.72 * \emptyset^{0.54}$$

Como se podrá notar, las constantes son muy parecidas, puesto que se trata de materiales granulares; sin embargo fueron determinadas en investigaciones diferentes. En la ilustración 60 graficando cada ecuación obtenemos la siguiente comparación:

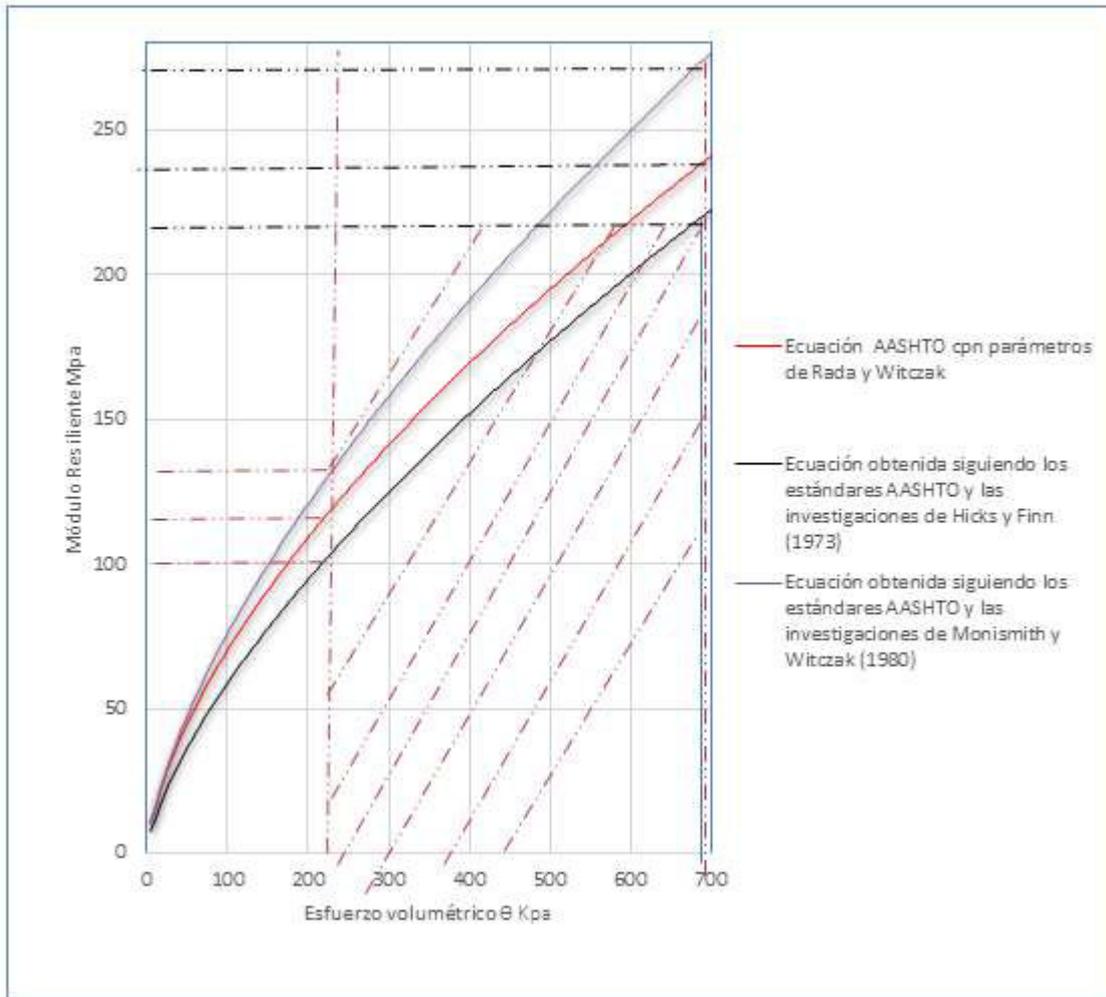


Ilustración 60

Gráficas de ecuaciones con constantes funciones de clasificaciones de suelos SUCS y AASHTO de las muestras analizadas y recopiladas.

Fuente: Autor

Donde sí se considera que el rango promedio de esfuerzos a los que estarán sometidos los materiales granulares oscilaría como mínimo entre 206 Kpa (30 lb/in²) y 690 Kpa (100 lb/in²), y con la ayuda de la gráfica anterior se establece que:

Acorde a los análisis realizados en laboratorio y esfuerzos volumétricos establecidos por diferentes investigadores, el rango de variación del módulo resiliente para materiales granulares oscila entre 100 y 260 Mpa.

4.2.4 Modulo resiliente para suelos tipo AASHTO A3 según la ecuación de Ping y Ling, 2007.

Esta ecuación fue descrita en el párrafo 3.4.1.2 y nuevamente citada a inicios de este capítulo. En efecto, como se mencionó esta ecuación es función del coeficiente K de permeabilidad, coeficiente de curvatura, así como humedad gravimétrica (En porcentaje de 0 a 100)

4.2.4.1 Coeficiente K de permeabilidad

Acorde a lo visto en las asignaturas de geotecnia y mecánica de suelos, una muestra de suelo está conformada por tres elementos: Masa de material (suelo), agua y aire. Lógicamente, cuando la muestra se encuentra sumergida en agua, ésta pasa a ocupar la totalidad de los espacios vacíos. A la propiedad que tienen los diferentes tipos de suelos de dejar pasar o escurrir agua a través de él se le conoce como *coeficiente de permeabilidad* y se mide en unidades de longitud sobre tiempo. Se deriva de la ley de Darcy (1856)

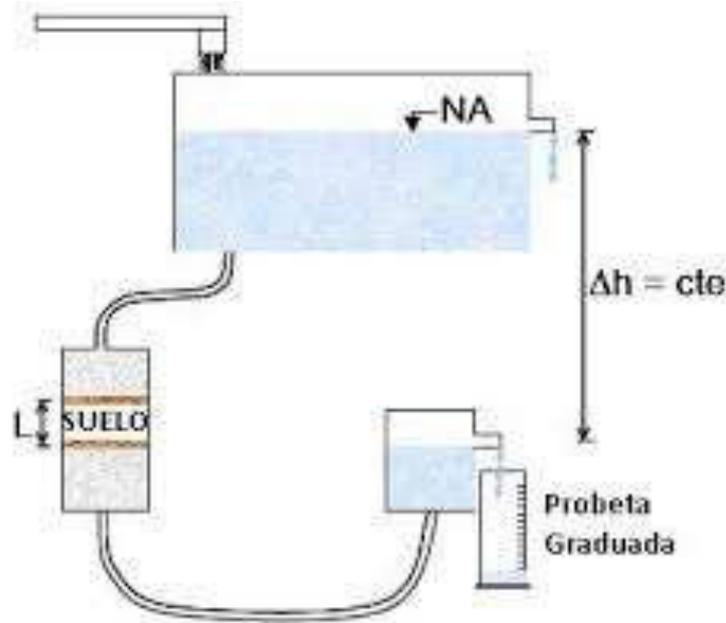


Ilustración 61

Imagen extraída de: <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/fuerzas/mecanica-de-suelos-permeabilidad>

Una vez más, nos basamos en nuestra clasificación de suelos para obtener este importante parámetro. Véase la siguiente ilustración:

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje	Bueno				Pobre				Prácticamente impermeable			
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada				Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			
					Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. ^d							

Ilustración 62

Fuente: (Angelone, Garibay, & Casaux, Septiembre, 2006). Las unidades corresponden a cm/s

Para nuestro caso en concreto, tomando un valor medio entre 10^{-1} y 10^{-2} , es decir: 0.055 cm/segundo y convirtiendo a pulgadas/segundo, tenemos que $k=0.02$.

4.2.4.2 Análisis de la ecuación

Con el objeto de comprender el comportamiento de la ecuación de una manera más detallada e inferir cómo los parámetros afectan el valor del M. r., se presentan gráficos que relacione el módulo resiliente con variables específicas. Véase las siguientes gráficas:

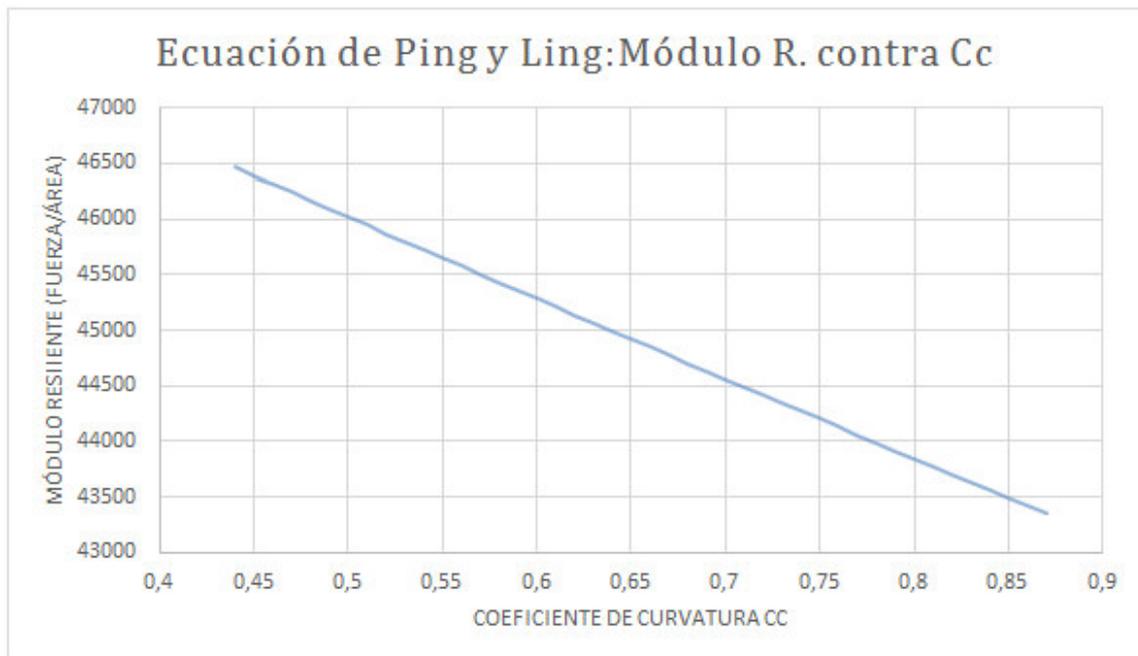


Ilustración 63

Gráfica módulo resiliente contra Cc de materiales granulares. Ecuación de Ping y Ling 2006.

Fuente: Autor

La ilustración 63 presenta una recta con pendiente negativa, la cual indica que a medida que el coeficiente de curvatura aumenta, el valor del módulo resiliente decrece. *En otras palabras; a medida que el d_{30} se acerca al d_{10} y d_{60} existirá un decrecimiento del módulo resiliente en suelos tipo A3 AASHTO.* Esta es una conclusión importante que permitirá al ingeniero vial/geotécnico entender la calidad del material en función de la variabilidad granulométrica de una muestra.

Ahora bien, revisemos la variación de M.r. contra el contenido de humedad de una muestra analizada. La ilustración 64 describe esto:

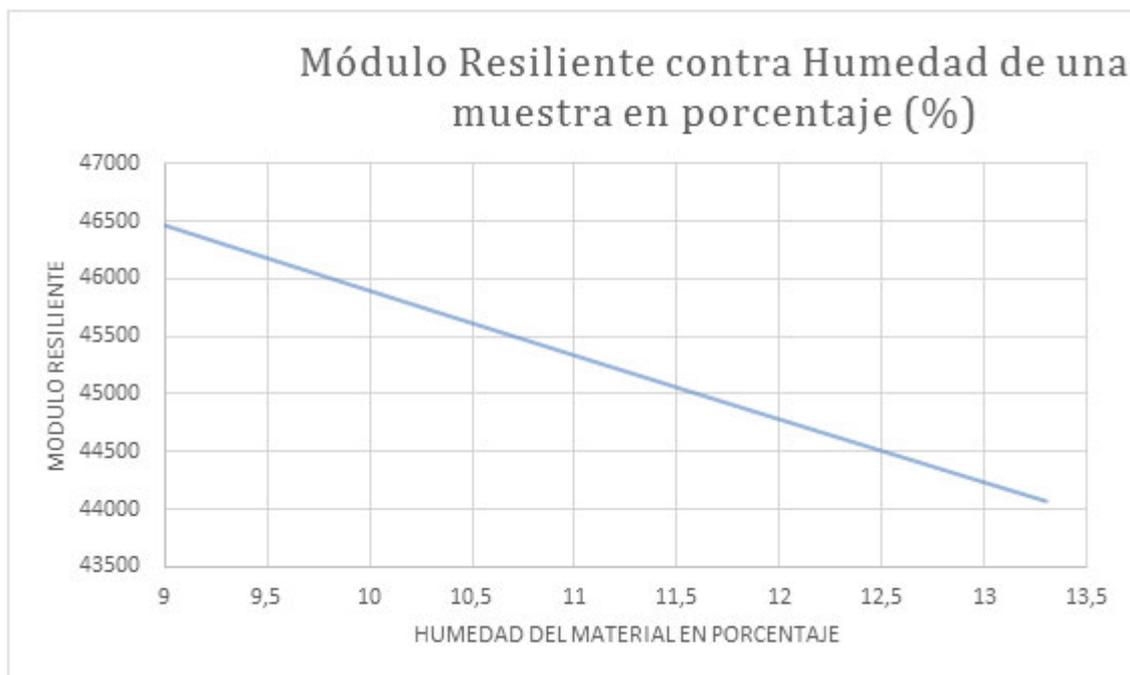


Ilustración 64

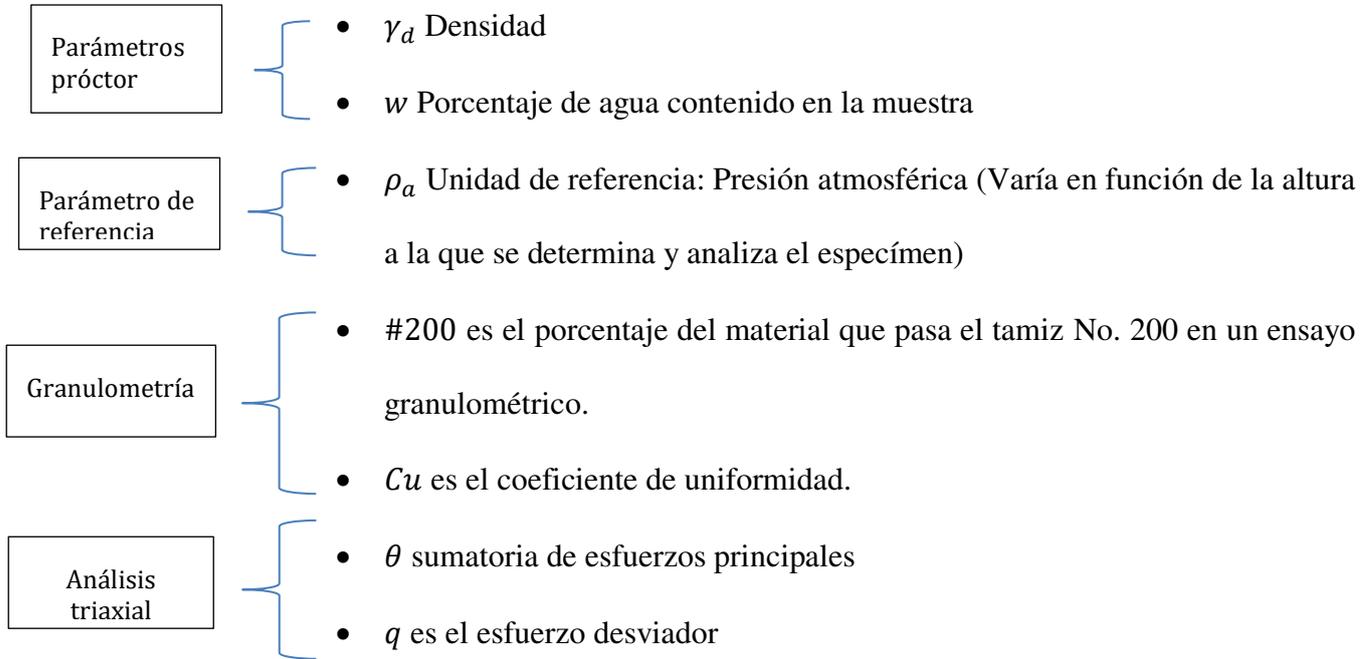
Gráfica módulo resiliente contra w de materiales granulares. Ecuación de Ping y Ling 2006.

Fuente: Autor

A medida que aumenta la cantidad de agua en una muestra de material, su módulo resiliente decrece, esto último resulta bastante razonable de secundar. Nuevamente, lo ideal será mantener al material granular en condiciones de densidad máxima seca.

4.2.5 Aplicación de ecuación de Rahim & George (2005)

La ecuación de Rahim y George, fue descrita en la sección 4.2.1. Fue obtenida tras correlacionar ensayos triaxiales con parámetros intrínsecos del material tales como:



Ahora bien, se analizará el comportamiento de esta expresión matemática:

Primero, se cita lo expresado en 4.2.1:

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

Analizando esta ecuación. Los parámetros K_1 y K_2 se discutirán a través de la fórmula anterior. Entonces veremos que:

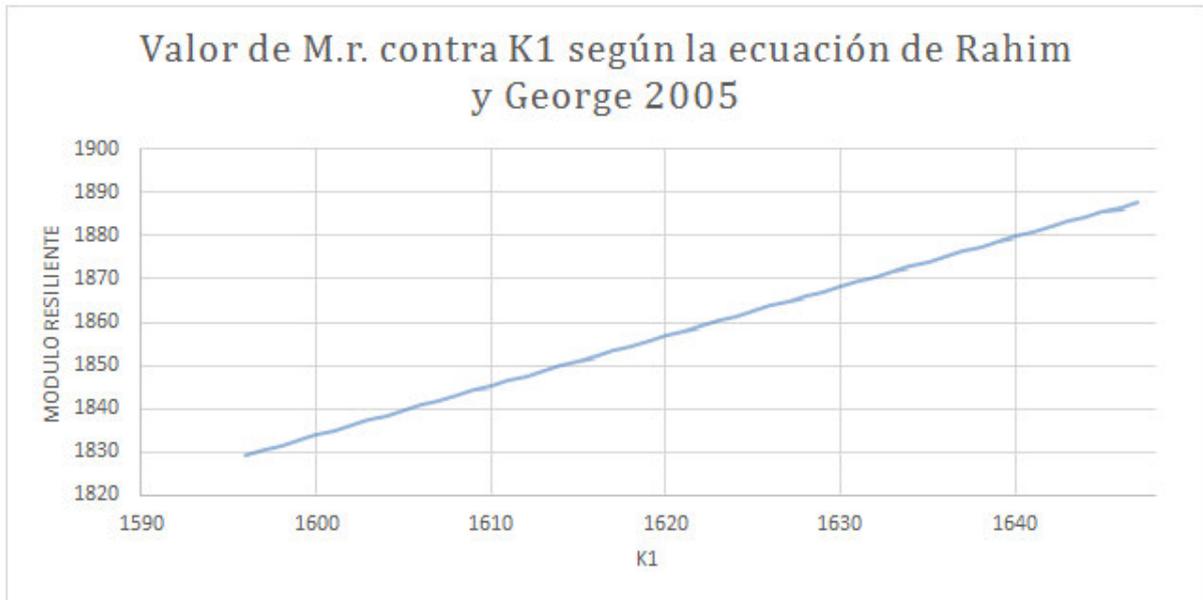


Ilustración 65
Gráfica módulo resiliente contra parámetro k1 de la ecuación de Rahim y George 2005
Fuente: Autor

Y también que:

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

La gráfica de la ilustración 65 establece que a medida que el porcentaje de material que pasa el tamiz número 200 tienda a un valor muy pequeño, dejará de generar influencia en el valor de K1, esto también es aplicable para la cantidad de agua.

Luego:

Un material granular tendrá un módulo resiliente mayor, y por ende mayor capacidad estructural si su densidad es máxima, albergue poco contenido de agua, exista una cantidad de finos mínima y el valor de d60 sea bastante superior al valor de d10.

Esto también es aplicable para el parámetro k2, el cual se presenta a continuación:

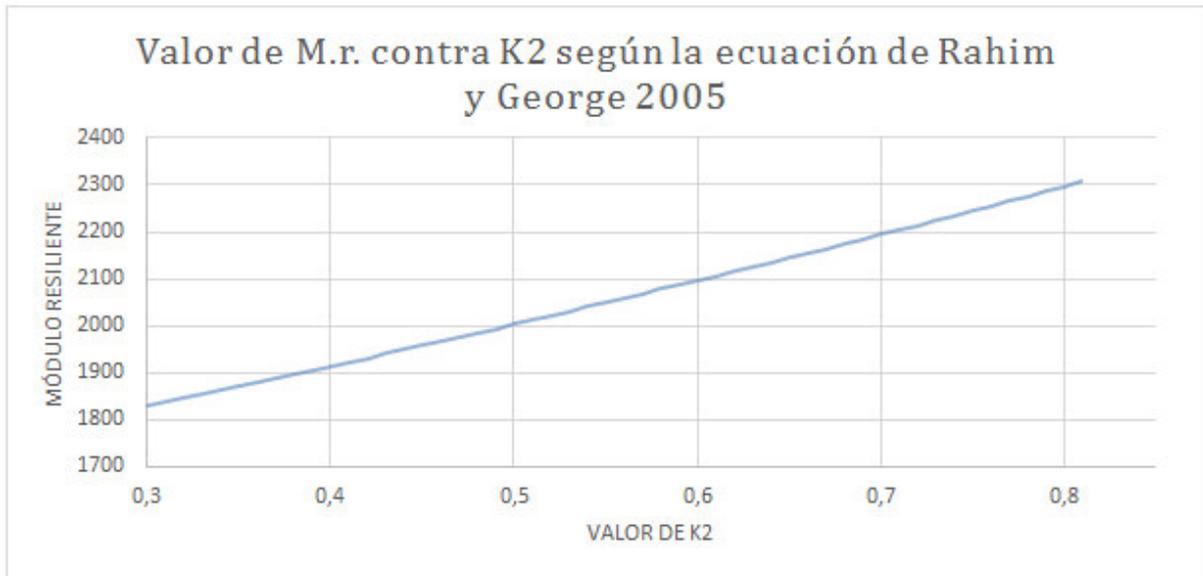


Ilustración 66

Valor de M.r. contra valor de k2. Ecuación de Rahim y George 2005

Fuente: Autor

Y también que,

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

Dejando de lado el producto del contenido de agua con la densidad del material, se puede inferir que a medida que el coeficiente de uniformidad sea menor y el porcentaje de material que pasa el tamiz número 200 mayor, existirá un aumento súbito del término entre paréntesis, incrementando el valor de k2 y consecuentemente el valor de M.r. Una vez mencionado esto, se procede a presentar el cálculo de valores de M.r. obtenido mediante esta fórmula:

Tabla 80
Cálculo de módulo resiliente a través de la Ecuación de Rahim y George 2005

MUESTRAS	γ_d kg/m ³	Humedad material: w	Coef. Unif. Cu	pasa tamiz #200	K1	K2	Esfuerzo volumétrico θ Kg/cm ²	Esfuerzo desviador: q Kg/cm ²	Módulo resiliente: Mr Kg/cm ²	Módulo resiliente: Mr Mpa
1	2050	0.096	50	0.071	1640.60	0.35	1	0.75	2343.732	234.37
2	2055	0.106	75	0.063	1644.65	0.39	1	0.75	2438.07	243.81
3	2040	0.1348	100	0.0742	1632.68	0.53	1	0.75	2779.041	277.90
4	2168	0.1078	120	0.0815	1735.12	0.43	1	0.75	2688.246	268.82
5	1995	0.115	55	0.0598	1596.61	0.42	1	0.75	2432.311	243.23
6	2150	0.094	100	0.059	1720.70	0.35	1	0.75	2449.212	244.92
7	1970	0.145	200	0.09	1576.77	0.55	1	0.75	2763.709	276.37
8	2045	0.138	33	0.0555	1636.52	0.54	1	0.75	2831.44	283.14
9	2161	0.1009	110	0.057	1729.51	0.38	1	0.75	2542.258	254.23
10	1992	0.137	120	0.111	1594.30	0.54	1	0.75	2766.672	276.67
11	1965	0.138	212.5	0.0556	1572.78	0.49	1	0.75	2580.081	258.01

El valor mínimo redondeado corresponde a 234 Mpa en cuanto que el máximo a 278 Mpa.

Así,

El dominio de valores de M.r. determinado mediante la ecuación de Rahim y George, 2005 está comprendido en los intervalos de [234 a 278] Mpa

4.2.6 Dominios M.r.

Utilizando las correlaciones descritas en los capítulos anteriores en el cual el parámetro principal fue la clasificación de suelos y algunos parámetros físicos de cada muestra, se pudo obtener el dominio de valores de M.r. presentados en la tabla 81 para materiales granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca.

Tabla 81
Dominios de módulos resilientes de materiales granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca

Fuente: Autor

Dominio modulo resiliente		
MÉTODO	Valor mínimo	Valor máximo
RELACIÓN CON CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS Y AASHTO	35 Mpa	140 Mpa
RELACIÓN CON ECUACIONES AASHTO	100 Mpa	260 Mpa

Por otro lado, los valores determinados de M.r. en la tabla 82, específicamente para las muestras analizadas y obtenidas indican lo siguiente:

Tabla 82
Rangos de valores de módulos resilientes determinados.
Fuente: Autor

Ecuación	Valor	Dentro dominio
Ping y Ling	268	Excede
	282	Excede
Rahim y George	234.4	Dentro de dominio
	243.8	Dentro de dominio
	277.9	Excede
	268.8	Excede
	243.2	Dentro de dominio
	244.9	Dentro de dominio
	276.4	Excede
	283.1	Excede
	254.2	Dentro de dominio
	276.7	Excede
	258.0	Dentro de dominio

Sumando los dominios excedentes y despreciando aquellos que han resultado más bien de valores bajos tenemos de la tabla 82 que:

Un dominio razonable para módulos resilientes comprende el rango de 140 Mpa a 278 Mpa.

4.2.7 Dominios CBR

También, se han llevado a cabo la determinación de CBR de las muestras discutidas a lo largo de este trabajo de investigación. La tabla 83 presenta un resumen de los valores obtenidos:

Tabla 83
Valores de CBR obtenidos en ensayos de laboratorio y recopilados.

Fuente: El Autor.

CBR 95 %
37
49
55
60.7
62
67.8
72
80
80



Estos valores constituyen los representativos de las muestras analizadas. Aquí el lector posiblemente se pregunte la utilidad de obtener valores al 95% de su densidad seca máxima, la respuesta esto no es otra que aquella que tiene que ver con seguridad. Un valor conservador podría tomarse en porcentaje (95%). Es bien sabido que, en la construcción, inclusive en la realización de ensayos de laboratorio existen demasiados parámetros que controlar, los cuales pueden desfasarse y con ello producir alguna variabilidad.

Se observa aquí que el valor más bajo es de 37% y el más alto constituye el 80%, obteniéndose en los análisis dos resultados de este valor, por ello la repetición en las dos últimas filas de la tabla anterior, con esto ya podemos decir que:

De los análisis realizados y recopilados en el laboratorio de la Universidad Católica de Cuenca, el rango de variación de valores de CBR de materiales granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca tomados al 95% de su capacidad (por razones conservadoras) tiene el rango de [37%-80%].

Debido a la amplia variabilidad de resultados que se pueden obtener tras la obtención de una muestra de material granular se cree que difícilmente se puedan encontrar valores tan bajos como 37%, esto correspondería a un material de mejoramiento, el cual ya no se le podría considerar granular sino un intermedio, debido a su baja calidad.

Ahora con estos valores lo que se quiere es crear una expresión matemática que permita generar una relación directa entre módulos resilientes y valores de CBR, para los materiales específicos de la zona de estudio. Se cree necesario y suficiente los rangos de variación anteriormente presentados. Esta investigación hubiera podido ser más exacta de haberse contado con equipos triaxiales dinámicos. Aun así, la expresión a concebirse se torna bastante realista y es posible aplicarse a casos de la vida real. Cabe recalcar que ésta será aplicable solo en aquellos casos que se trate con materiales granulares con poca plasticidad. Para



determinar la mencionada expresión se recurrirá a procesos de regresión. En efecto, recurriremos a la estadística.

4.3 Aplicación de procesos estadísticos y correlación entre M. r. y CBR

Los métodos de regresión y ajuste de curvas, son esenciales en las teorías de ciencias y pruebas experimentales ya que se sabe que dos pares de puntos siguen una tendencia, ya sea ascendente o descendente.

4.3.1 Discusión

En la mayoría de casos, como, por ejemplo, los analizados en las ramas de las matemáticas se cuentan con funciones determinadas como sigue:

$$Y = F(x)$$

Sin embargo, en los experimentos no se cuentan con una función, sino con un cuadro de datos. La estructura más sencilla es aquella que relaciona dos variables directas, sin embargo, existen correlaciones entre múltiples variables. De cualquier forma, la idea alude a que estos cuadros de valores son insumos para desarrollar una ecuación polinómica que permita relacionar las dos variables. Los puntos de los cuadros de valores desarrollados en los experimentos oscilarán cerca de la función obtenida y a medida que éstos se superpongan en la expresión desarrollada se dirá *que poseen* un coeficiente de correlación mayor y por ende la ecuación/función será mucho más exacta. Este coeficiente de correlación tiene un valor mínimo de -1 (Datos al revés), 0 (Datos no cercanos) y un valor máximo de 1 (Datos sobrepuestos). La ilustración 67 presenta ajustes polinómicos a diferentes puntos experimentales, la diferencia radica en el coeficiente de correlación r .

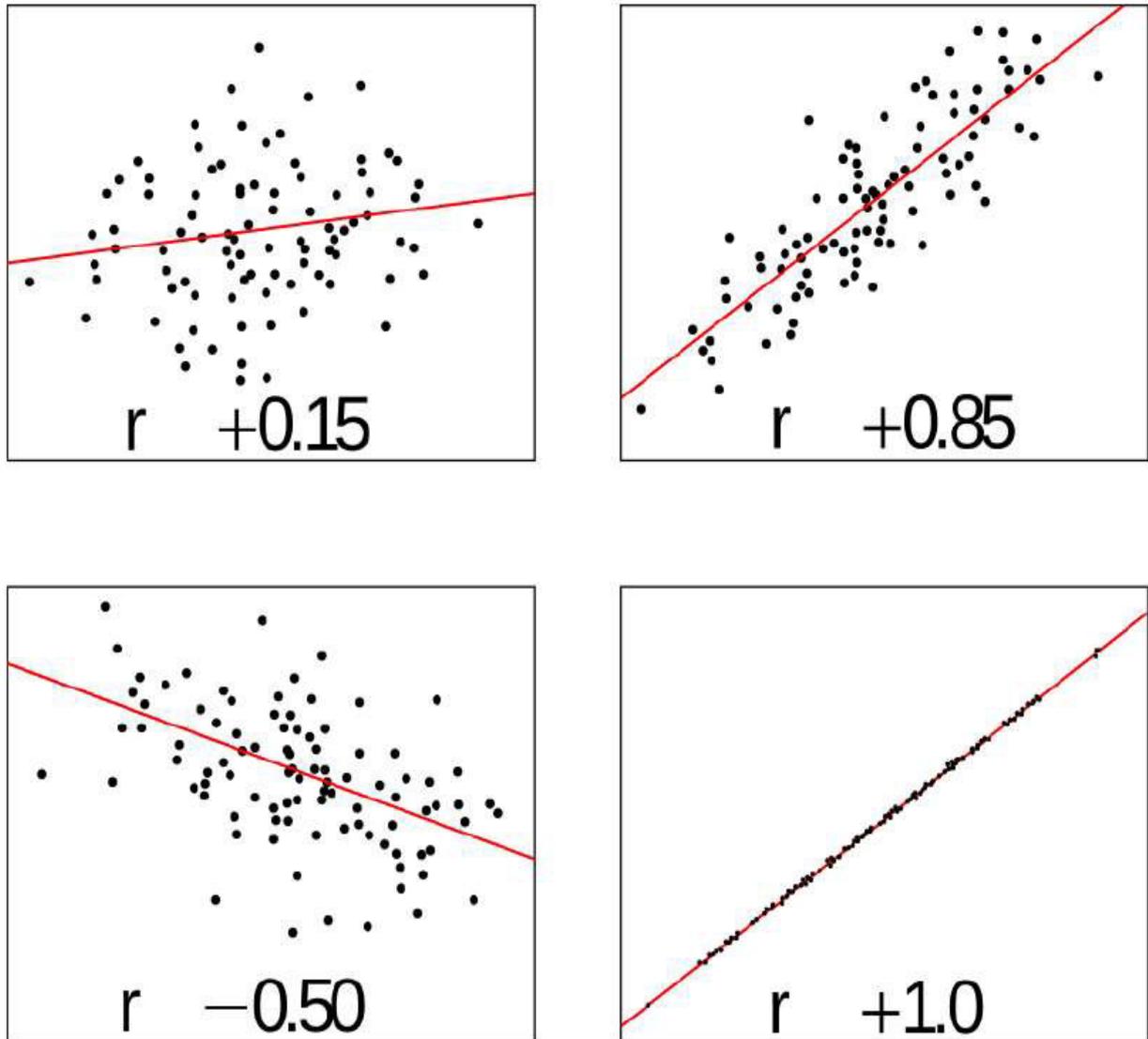


Ilustración 67

Diferentes coeficientes de correlación. Imagen extraída de: <http://vivaelssoftwarelibre.com/coeficiente-de-correlacion-en-r/>

Diferentes curvas se pueden ajustar a los datos obtenidos, por ejemplo, para desarrollar una función del crecimiento de la población, un coeficiente de correlación que más se acerca a 1 es aquel dado por una función exponencial. La relación entre el peso del cerebro humano y el cuerpo siguen una función lineal o recta.

Así lo que se quiere es encontrar una función polinómica cualquiera, que mejor se aproxime a los datos.

4.3.2 Cuadro de valores y obtención de fórmula

Ahora bien, se procede a presentar los cuadros de valores obtenidos en función de los rangos:



Tabla 84. Valores de Mr vs CBR
Fuente: Autor

CBR	MODULO RESILIENTE
37	140
38	143.2
39	146.4
40	149.6
41	152.8
42	156
43	159.2
44	162.4
45	165.6
46	168.8
47	172
48	175.2
49	178.4
50	181.6
51	184.8
52	188
53	191.2
54	194.4
55	197.6
56	200.8
57	204
58	207.2
59	210.4
60	213.6
61	216.8
62	220
63	223.2
64	226.4
65	229.6
66	232.8
67	236
68	239.2
69	242.4
70	245.6
71	248.8
72	252
73	255.2
74	258.4
75	261.6
76	264.8
77	268
78	271.2
79	274.4
80	278



4.3.3 Ajuste de curva: Procedimiento estadístico

Con los pares de puntos establecidos en la tabla anterior lo que se quiere es obtener una expresión matemática de la forma:

$$Y = ax^n$$

Introduciendo logaritmos de cualquier base, por facilidad de base diez en ambos lados de la expresión de tal manera que no se altere tendremos que:

$$\text{Log } Y = \text{Log } (ax^n)$$

Utilizando la propiedad del producto de dos logaritmos, y sabiendo que toda cantidad puede cambiarse por su igual, en la parte derecha tendremos que:

$$\text{Log } Y = \text{Log } (a) + \text{Log } (x^n)$$

Ahora, un logaritmo elevado a una potencia es igual a:

$$\text{Log } Y = \text{Log } (a) + n * \text{Log } (x)$$

Ahora por facilidad proponemos realizar un cambio de variable de la siguiente manera:

$$\text{Log } Y = n * \text{Log } (x) + \text{Log } (a)$$

Llegando a una expresión lineal de la forma:

$$v = n * u + l$$

Tenemos entonces una recta con pendiente “n” y ordenada en el origen “l”.

Entonces, haciendo uso de la tabla anterior presentada y aplicando los principios aquí establecidos se obtiene la tabla 85 con los siguientes valores:



Tabla 85. Cambio de variable aplicado a función exponencial. Se ha utilizado logaritmos base 10.

x	Y	u = log x	v = log y
37	140	1.57	2.15
38	143.2	1.58	2.16
39	146.4	1.59	2.17
40	149.6	1.60	2.17
41	152.8	1.61	2.18
42	156	1.62	2.19
43	159.2	1.63	2.20
44	162.4	1.64	2.21
45	165.6	1.65	2.22
46	168.8	1.66	2.23
47	172	1.67	2.24
48	175.2	1.68	2.24
49	178.4	1.69	2.25
50	181.6	1.70	2.26
51	184.8	1.71	2.27
52	188	1.72	2.27
53	191.2	1.72	2.28
54	194.4	1.73	2.29
55	197.6	1.74	2.30
56	200.8	1.75	2.30
57	204	1.76	2.31
58	207.2	1.76	2.32
59	210.4	1.77	2.32
60	213.6	1.78	2.33
61	216.8	1.79	2.34
62	220	1.79	2.34
63	223.2	1.80	2.35
64	226.4	1.81	2.35
65	229.6	1.81	2.36
66	232.8	1.82	2.37
67	236	1.83	2.37
68	239.2	1.83	2.38
69	242.4	1.84	2.38
70	245.6	1.85	2.39
71	248.8	1.85	2.40
72	252	1.86	2.40
73	255.2	1.86	2.41
74	258.4	1.87	2.41
75	261.6	1.88	2.42
76	264.8	1.88	2.42
77	268	1.89	2.43
78	271.2	1.89	2.43
79	274.4	1.90	2.44
80	278	1.90	2.44

Partiendo de la teoría de ajuste por mínimos cuadrados, y recordando que nuestra variable independiente es “v” y la dependiente es “u”, obtendremos dos importantes expresiones:

$$\Sigma v = n\Sigma u + Nl$$

Y,

$$\Sigma vu = n\Sigma u^2 + l\Sigma u$$

De aquí, se establece que:

v: Corresponde a la variable dependiente convertida o realizada el cambio de variable.

u: Variable independiente.

N: Número de datos con los que se cuenta para el análisis de regresión.

L: Coeficiente obtenido tras la realización del cambio de variable.

Primeramente, se procederá a la aplicación de la primera ecuación presentada, la cual arroja los siguientes datos:

Tabla 86.
Sumatoria de datos obtenidos.

ΣV (Sumatoria de valores V)	$n \Sigma u$ (producto de n por sumatoria de valores u)	N (Número de datos existentes, equivale a 1 por fila)
2.15	1.57	1.00
2.16	1.58	1.00
2.17	1.59	1.00
2.17	1.60	1.00
2.18	1.61	1.00
2.19	1.62	1.00
2.20	1.63	1.00
2.21	1.64	1.00
2.22	1.65	1.00
2.23	1.66	1.00
2.24	1.67	1.00
2.24	1.68	1.00
2.25	1.69	1.00
2.26	1.70	1.00
2.27	1.71	1.00
2.27	1.72	1.00
2.28	1.72	1.00
2.29	1.73	1.00
2.30	1.74	1.00
2.30	1.75	1.00



2.31	1.76	1.00
2.32	1.76	1.00
2.32	1.77	1.00
2.33	1.78	1.00
2.34	1.79	1.00
2.34	1.79	1.00
2.35	1.80	1.00
2.35	1.81	1.00
2.36	1.81	1.00
2.37	1.82	1.00
2.37	1.83	1.00
2.38	1.83	1.00
2.38	1.84	1.00
2.39	1.85	1.00
2.40	1.85	1.00
2.40	1.86	1.00
2.41	1.86	1.00
2.41	1.87	1.00
2.42	1.88	1.00
2.42	1.88	1.00
2.43	1.89	1.00
2.43	1.89	1.00
2.44	1.90	1.00
2.44	1.90	1.00
101.69	77.28	44

Σ

Así, diremos entonces que la primera ecuación que nos ayudará a determinar la buscada función corresponde a:

$$101.69 = 77.28n + 44$$

Lo mismo se aplica para la ecuación segunda:

Σ Vu	n Σ u ²	l Σ u
3.37	2.46	1.57
3.41	2.50	1.58
3.45	2.53	1.59
3.48	2.57	1.60
3.52	2.60	1.61
3.56	2.63	1.62
3.60	2.67	1.63
3.63	2.70	1.64
3.67	2.73	1.65
3.70	2.76	1.66
3.74	2.80	1.67
3.77	2.83	1.68



3.81	2.86	1.69
3.84	2.89	1.70
3.87	2.92	1.71
3.90	2.94	1.72
3.93	2.97	1.72
3.96	3.00	1.73
4.00	3.03	1.74
4.03	3.06	1.75
4.06	3.08	1.76
4.08	3.11	1.76
4.11	3.14	1.77
4.14	3.16	1.78
4.17	3.19	1.79
4.20	3.21	1.79
4.23	3.24	1.80
4.25	3.26	1.81
4.28	3.29	1.81
4.31	3.31	1.82
4.33	3.33	1.83
4.36	3.36	1.83
4.38	3.38	1.84
4.41	3.40	1.85
4.44	3.43	1.85
4.46	3.45	1.86
4.48	3.47	1.86
4.51	3.49	1.87
4.53	3.52	1.88
4.56	3.54	1.88
4.58	3.56	1.89
4.60	3.58	1.89
4.63	3.60	1.90
4.65	3.62	1.90
178.99	136.17	77.28

Sumatoria



Σ

Obteniendo como resultado que:

$$178.99 = 136.17n + 77.28$$

Se cuenta con el siguiente sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$\begin{aligned} 77.28 \quad 44 &= 101.69 \\ 136.17 \quad 77.28 &= 178.99 \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema, obtenemos:

$$n = 0.8794$$

$$l = 0.7665$$

Entonces,

$$v = 0.8794 * u + 0.7665$$

Pero dar con la ecuación de ajuste, debemos revertir el cambio de variable realizado:

$$l = \text{Log} (a) = 0.7665$$

Así:

$$a = 10^{0.7665} = 5.8411$$

Finalmente, el modelo calculado será y su grafica será representada en la ilustración 68:

$$Mr (Mpa) = 5.841 CBR^{0.8794}$$

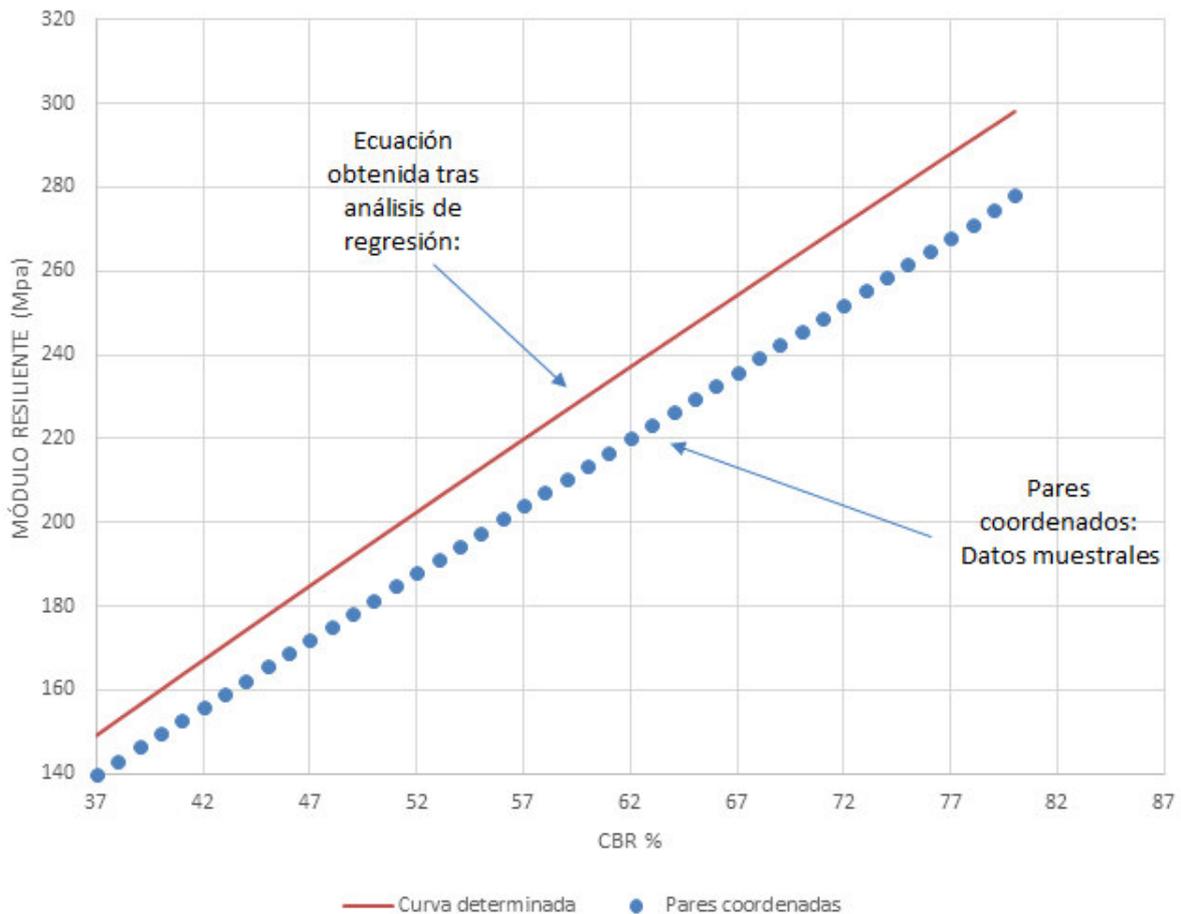


Ilustración 68

Comparación entre pares coordinados con ecuación determinada mediante regresión cuadrática.

Fuente: Autor

En la ilustración 68 puede verse que existe una pequeña variación entre los pares coordenados y la ecuación determinada. Esta variación queda corregida con el valor excedente que se dio al determinar valores de CBR al 95%. No obstante recordar que como mucho el límite de uso para la ecuación determinada corresponde a suelos granulares con CBR mayor o igual a 37% y menor a 80%.

Finalmente, en la ilustración 69 se establece una comparación de las diferentes correlaciones realizadas por otros autores:

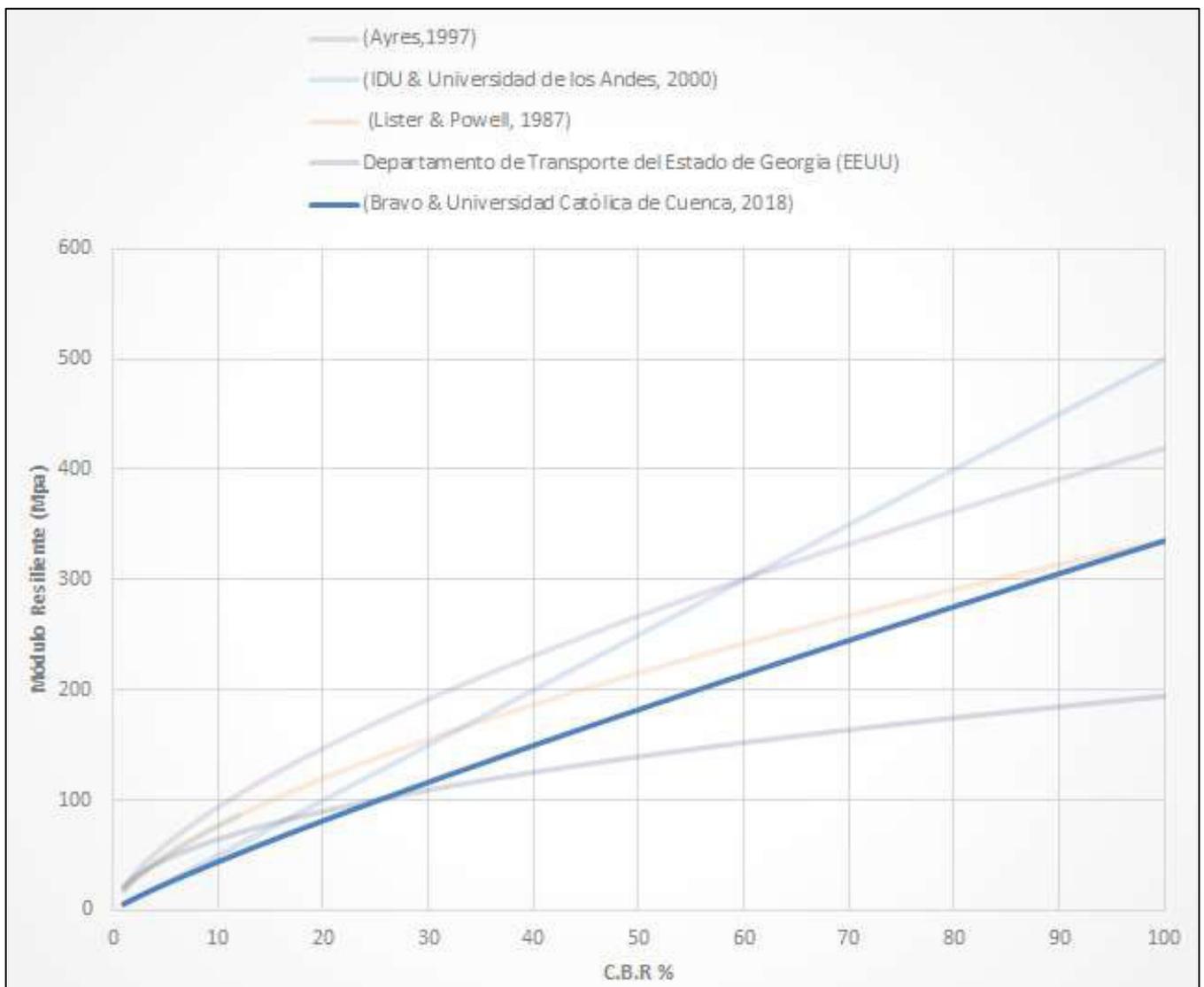


Ilustración 69
Comparación de estudios similares con los realizados en esta investigación.
Fuente: Autor



La ilustración 69 presenta una importante comparación entre las ecuaciones desarrolladas por varios autores, encontradas en la literatura contra la curva determinada en este trabajo de investigación. Como se puede observar, la curva se encuentra más bien en un rango medio en comparación con las otras ecuaciones, de aquí podemos deducir que:

Los suelos granulares (base y sub-base) comercializados en la Ciudad de Cuenca, presentan una calidad media en términos de CBR y módulo resiliente en comparación con las determinadas por ciertos autores.

4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

4.4.1 CONCLUSIONES:

- I. La ecuación encontrada que describe la relación entre el módulo resiliente y el CBR para los suelos granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca, es de la forma: $Mr (Mpa) = 5.841CBR^{0.8794}$, situándose en un rango moderado en comparación con ecuaciones desarrolladas por otros autores, estableciéndose que los materiales granulares utilizados en la Ciudad de Cuenca para la construcción de pavimentos presentan una calidad superior en términos de resiliencia.⁴²
- II. El rango de variación entre módulos resilientes en Mpa para suelos granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca corresponde a [140, 278], superior a valores encontrados en la Guía AASHTO
- III. El rango de variación entre valores de CBR para suelos granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca corresponde a [37, 80], constituyendo materiales de calidad media-alta.
- IV. Los suelos granulares (base y sub-base) comercializados en la Ciudad de Cuenca, presentan una calidad media en términos de CBR y módulo resiliente en comparación con las determinadas por autores citados en este estudio.
- V. El rango de variación de densidades máximas secas de las muestras analizadas y recopiladas de materiales granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca corresponde a [1965, 2168] Kgf/m³
- VI. El rango de variación de humedades óptimas de los materiales analizados en laboratorio y recopilados de investigaciones similares comprende aproximadamente entre el 9% y 14%.

⁴² Remítase a la ilustración 69 donde se establece una comparación entre éstos.

- VII. El rango de variación de porcentaje de materiales finos que pasan el tamiz número 200 de las muestras analizadas corresponde aproximadamente a [5.56, 11.1] %
- VIII. A medida que aumenta la cantidad de agua en una muestra de material, su módulo resiliente decrece
- IX. Un material granular tendrá un módulo resiliente mayor, y por ende mayor capacidad estructural si su densidad es máxima, albergue poco contenido de agua, exista una cantidad de finos mínima.

4.4.3 RECOMENDACIONES

- I. Se recomienda realizar una investigación en laboratorio que valide la utilización de las fórmulas de M. r. contra CBR para suelos finos existentes en la literatura pertinente, con ello se conseguirán valores de Mr más realistas que pueden utilizarse en la ecuación general AASHTO⁴³ para el diseño de pavimentos flexibles, obteniendo espesores más realistas.
- II. Se recomienda determinar el valor de M.r. para suelos granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca, mediante ensayos triaxiales cíclicos dinámicos, con la finalidad de establecer una comparación con la ecuación determinada en este estudio y generar un criterio acerca de la utilización de modelos teóricas (Lo aplicados en este estudio) y prácticos (que involucran ensayos triaxiales dinámicos/cíclicos).
- III. Se recomienda determinar el rango de variación entre módulos de elasticidad de materiales granulares comercializados en la Ciudad de Cuenca, y con esto establecer un criterio acerca de elasticidad Vs Resiliencia de materiales granulares.

⁴³ La ecuación general AASHTO permite obtener el Número Estructural de Tránsito.



BIBLIOGRAFÍA

Acuña, I. M. (Julio 2009). Implementación del ensayo de modulo resiliente en bases granulares para pavimentos . San José, Costa Rica .

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (1993). AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES.

Angelone, S., Garibay, M. T., & Casaux, M. (Septiembre, 2006). Geología y Geotécnica: Permeabilidad de Suelos. Rosario-Argentina.

Anguas, P., Pérez, N., & Gómez, J. A. (2001). Modulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. Sanfandila: Secretaria de comunicación y transportes. Instituto Mexicano de Transporte.

Ayala Velasco, L. E. (2013). Acondicionamiento de un Equipo Triaxial Cíclico. Quito.

Caterpillar, R. (s.f.). LA IMPORTANCIA DE CONTENIDO DE AGUA. 1 - 5.

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.

Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. E. (200). Mecanica de Suelos. Manizales .

Elliott, R., & Sam, T. (s.f.). Resilient modulus and AASHTO pavement desing . Transportation research record 1192, 116 - 124.

Garcia, N., Anguas, P., Rufino, J. L., Iniguez, N., & Sanguinez, M. J. (2016). Modelo para estimar el modulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación . Sanfandila : Secretaria de comunicación y transportes. Instituto Mexicano del Transporte.

Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martínez, J. A. (2002). Mecánica de Materiales Para Pavimentos. Queretaro.

(s.f.). Guia de Laboratorio: Compactación y CBR .



Guitierrez, W., & Marlene, L. (IQuitos 2003). Ensayo de Modulo resiliente . XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil , 1 - 11.

Higuera Sandoval, C. H. (2011). Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica publicaciones.

Instituto Mexicano del Transporte (SCT). (2016). Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación. Queretaro.

Juarez, B., & Rico, R. (2005). Mecánica de suelos Tomo 1: Fundamentos de la mecánica de suelos . México : LIMUSA, NORIEGA EDITORES.

LanammeUCR. (2009). IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN BASES GRANULARES PARA PAVIMENTOS. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Ciudad universitaria Rodrigo Facio, 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.

Martha Herrera-Montealegre. (2014). DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE DISEÑO DE PAVIMENTOS MEDIANTE CRITERIOS ASSHTO 1993 Y 2002. Lima.

Ministerio de transporte y obras públicas. (2013). NEVI-12-MTOP: Volumen II Manual de control de calidad en la construcción de las obras de infraestructura del transporte. Quito.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas Del Ecuador. (2013). Norma Ecuatoriana Vial-Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (Vol. 3). Quito.



Modificado, E. d. (s.f.).

Montealegre Herrera, M. (2014). DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE DISEÑO DE PAVIMENTOS MEDIANTE CRITERIOS ASSHTO 1993 Y 2002. Lima: Pirhua.

Pacheco Rodríguez, C. M. (2018). Coeficientes Estructurales de Materiales Granulares Utilizados en la Ciudad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.

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.

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.

Rojas Quintero, L. M. (2014). Evaluación del Modulo resiliente y deformacion permanente en material arcilloso con presencia de material friccionante. Bogota.

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.

Rondón, H., & Reyes, F. (2007). Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado de conocimientos. Revista Ingenierías Universidad de Medellin , 66 - 90.

Rubio Moreno, J. (2005). El módulo Resiliente. En J. Rubio Moreno, El módulo Resiliente (págs. 28-38). Cataluña, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

Salas, I. O. (2011). ENSAYOS TRIAXIALES PARA SUELOS. LenammeUCR, 14 - 24.



SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. (2000). Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulare. Queretaro, México.

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

U. S. Departament of transportation federal highway administration . (March 1990).

Laboratory Determinination of resilient modulus of missouri subgrade soils; phase I; equipment, personnel, and testing requeriments.



ANEXOS



**PERMISO DEL AUTOR DE TESIS PARA SUBIR AL REPOSITORIO
INSTITUCIONAL**

Yo, **Michael Alonso Bravo Cabrera** portador de la cédula de ciudadanía N° 1750539437. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Investigación bibliográfica de método para encontrar correlación entre módulo resiliente de materiales granulares comercializados en el Cantón Cuenca”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Marzo del 2019

F: Michael Bravo
Michael Alonso Bravo Cabrera
C.I. 1750539437