PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

¨COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO DE MÓDULO DE YOUNG Y C.B.R PARA BASES Y SUBBASES, CASO DE ESTUDIO: CANTERA SAN JOAQUÍN (PROVINCIA DE COTOPAXI, SECTOR SANTA RITA).

AUTOR: PEDRO GUILLERMO URQUIZO LÓPEZ

DIRECTOR: ING. WILSON CANDO

QUITO, 2019

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme sonreír ante todos mis logros que son resultado de su ayuda. Gracias porque he podido tener y disfrutar de mi familia.

A mis padres, por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por confiar y creer en mí. Gracias, por cada consejo y por cada una de sus palabras, que me guiaron durante mi vida. Espero y ruego a Dios que les dé salud y vida para poder devolverles algo de todo el esfuerzo que hicieron por mí.

A mi hermana "Germán", por su apoyo moral y sus palabras alentadoras en mi vida. El tiempo sigue pasando, y ahí estas, cerca de mi ofreciendo lo mejor que tienes. Gracias por tu apoyo y por tus esfuerzos de mantener siempre viva nuestra hermandad.
A mi familia, por sus palabras de aliento, por su apoyo incondicional, por creer en mí aún cuando ni yo mismo lo hacía.

Gracias a mi novia, Nicole, por creer en mi capacidad. Tu cariño, tu amor, tu apoyo y tus grandes manifestaciones de afecto son una gran muestra de la persona que eres.

A mi Director de Tesis, Ing. Wilson Cando, por ser aparte de un mentor, un amigo. Gracias por su amistad, sus consejos y su orientación a lo largo de la carrera.

A mis correctores, Ing. Jorge Bucheli e Ing. Mauricio Cely, por su amistad, su tiempo y su ayuda en este trabajo.

A mí, por ser chévere y porque logré acabar este trabajo que me costó tanto como me encantó hacerlo. ¡Gracias, crack!

Pedro Guillermo Urquizo López

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años; gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Con su paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mi familia, por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como humana. Especialmente, dedico este trabajo a mis tíos, Gustavo y Sofía, porque pese a las circunstancias, siguen apoyándome. Definitivamente, son las mejores personas que conozco.

A mis compañeros de estudio, a mis maestros y amigos, quienes sin su ayuda nunca hubiera podido realizar este trabajo.

Pedro Guillermo Urquizo López

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN **14**

ABSTRACT **14**

1. GENERALIDADES **15**

1.1. INTRODUCCIÓN 15

1.2. OBJETIVOS 16

1.2.1. Objetivo General 16

1.2.2. Objetivos Específicos 16

1.3. DESCRIPCIÓN DE LA CANTERA 16

2. ENSAYOS EN LABORATORIO **18**

2.1. MUESTREO DE LOS AGREGADOS (ASTM D75) 18

2.2. CUARTEO DE LOS AGREGADOS (ASTM C702) 19

2.3. GRANULOMETRÍA (ASTM C136) 21

2.3.1. Clasificación de suelo según SUCS y AASHTO 22

2.3.2. Resultados 24

2.4. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO 38

2.4.2. Gravedad Específica y absorción del agregado fino (ASTM C-128) 38

2.4.2.1. Resultados 40

2.4.3. Gravedad Específica y absorción del agregado grueso (ASTM C-127) 40

2.4.3.1. Resultados 42

2.5. CONTENIDO ORGÁNICO (ASTM C40) 42

2.5.1. Resultados 43

2.6. DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA EN LOS AGREGADOS NATURALES (ASTM C 142) 44

2.6.1. Resultados 45

2.7. DETERMINACIÓN DEL EQUIVALENTE DE ARENA (ASTM D 2419) 46

2.7.1. Resultados 47

2.8. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DEL AGREGADO POR ABRASIÓN E IMPACTO EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES. (ASTM C131) 47

2.8.1. Resultados 49

2.9. DESGASTE DE LOS AGREGADOS ANTE LA ACCIÓN DE SULFATO DE SODIO O SULFATO DE MAGNESIO (ASTM C88) 49
2.9.1. Resultados 52
3. CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) 54
3.1. DEFINICIÓN 54
3.2. PROCTOR MODIFICADO (ASTM D1557) 56
3.2.1. Resultados 56
3.3. ENSAYO C.B.R. DE LABORATORIO (ASTM D1883) 64
3.3.1. Resultados 65
4. MÓDULO DE YOUNG (GEOGAUGE) 94
4.1. DEFINICIÓN 94
4.2. RESULTADOS GEOGAUGE 97
5. CORRELACIÓN C.B.R. VS MÓDULO RESILIENTE 99
5.1. CORRELACIÓN ENTRE C.B.R. Y MÓDULO RESILIENTE PARA BASES 99
5.2. CORRELACIÓN ENTRE C.B.R. Y MÓDULO RESILIENTE PARA SUBBASES 101
6. EJERCICIO DE APLICACIÓN: DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE 102
6.1. DISEÑO BASADO EN EL MÉTODO TRADICIONAL AASHTO-1993 102
6.2. DISEÑO BASADO EN LA CORRELACIÓN ENCONTRADA PARA LA CANTERA DE ESTUDIO 115
6.3. RESUMEN DE LOS DISEÑOS FINALES DE LOS DOS MÉTODOS UTILIZADOS 122
6.4. CÁLCULO DE COEFICIENTES ESTRUCTURALES PARA LAS BASES Y SUBBASES DE LA CANTERA SAN JOAQUÍN UBICADA EN LA PROVINCIA DE COTOPAXI. 122
6.5. COMPARACIÓN DE LOS COEFICIENTES ESTRUCTURALES CON LA TABLA DE REFERENCIAS AASHTO -93 130
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 132
7.1. CONCLUSIONES 132
7.2. RECOMENDACIONES 134
8. BIBLIOGRAFÍA 135

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.1: Cantidad de las muestras según su tamaño 19
Tabla 2.3.1: Tamices para el ensayo de granulometría de agregados. 21
Tabla 2.3.2: Masa mínima para granulometría agregado fino y grueso 21
Tabla 2.3.3: Clasificación de Suelos según SUCS 23
Tabla 2.3.4: Clasificación de Suelos según AASHTO 24
Tabla 2.3.5: Granulometría Material Venido Como Base proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 25
Tabla 2.3.6: Clasificación SUCS y AASHTO del Material Venido Como Base proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 26
Tabla 2.3.7: Granulometría Material Venido Como Subbase proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 26
Tabla 2.3.8: Clasificación SUCS y AASHTO del Material Venido Como Subbase proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 27
Tabla 2.3.9: Granulometría Base Clase 1-B proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 28
Tabla 2.3.10: Clasificación SUCS y AASHTO de Base Clase 1-B proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 29
Tabla 2.3.11: Granulometría Base Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 29
Tabla 2.3.12: Clasificación SUCS y AASHTO de Base Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 30
Tabla 2.3.13: Granulometría Base Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 31
Tabla 2.3.14: Clasificación SUCS y AASHTO de Base Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 32
Tabla 2.3.15: Granulometría Base Clase 4 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 32
Tabla 2.3.16: Clasificación SUCS y AASHTO de Base Clase 4 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 33
Tabla 2.3.17: Granulometría Subbase Clase 1 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 34
Tabla 2.3.18: Clasificación SUCS y AASHTO de Subbase Clase 1 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 35

Tabla 2.3.19: Granulometría Subbase Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 35
Tabla 2.3.20: Clasificación SUCS y AASHTO de Subbase Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 36
Tabla 2.3.21: Granulometría Subbase Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 37
Tabla 2.3.22: Clasificación SUCS y AASHTO de Subbase Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 38
Tabla 2.4.1: Gravedad específica y absorción del agregado fino de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 40
Tabla 2.4.2: Gravedad específica y absorción del agregado grueso de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 42
Tabla 2.5.1: Contenido Orgánico del material proveniente de la cantera San Joaquín (Cotopaxi) 43
Tabla 2.6.1 Masa mínima de agregado fino y grueso para la determinación de terrones de arcilla y partículas desmenuzables 44
Tabla 2.6.2: Tamaño del tamiz para remover los residuos de terrones de arcilla y partículas desmenuzables 45
Tabla 2.6.3: Terrones de arcilla en el agregado fino 45
Tabla 2.6.4: Terrones de arcilla en el agregado grueso 46
Tabla 2.7.1: Equivalente de Arena del agregado proveniente de la cantera San Joaquín (Cotopaxi) 47
Tabla 2.8.1: Gradaciones para muestras de ensayo 48
Tabla 2.8.2: Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de los Ángeles 49
Tabla 2.9.1: Fraccionado del agregado fino para ensayo de desgaste ante sulfatos 50
Tabla 2.9.2: Fraccionado del agregado grueso para ensayo de desgaste ante sulfatos 51
Tabla 2.9.3: Fraccionado del agregado grueso para ensayo de desgaste ante sulfatos 52
Tabla 2.9.4: Cálculo del porcentaje de desgaste ante sulfatos en el agregado grueso 53
Tabla 2.9.5: Fraccionado del agregado fino para ensayo de desgaste ante sulfatos 53
Tabla 2.9.6: Cálculo del porcentaje de desgaste ante sulfatos en el agregado fino 54
Tabla 3.2.1: Proctor Modificado BASE CLASE 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 57
Tabla 3.2.2: Proctor Modificado BASE CLASE 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 58
Tabla 3.2.3: Proctor Modificado BASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 59
Tabla 3.2.4: Proctor Modificado BASE CLASE 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 60
Tabla 3.2.5: Proctor Modificado SUBBASE CLASE 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 61

Tabla 3.2.6: Proctor Modificado SUBBASE CLASE 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 62
Tabla 3.2.7: Proctor Modificado SUBBASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 63
Tabla 3.3.1: Datos C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 66
Tabla 3.3.2: Datos penetración C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 67
Tabla 3.3.3: Datos de presión C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 67
Tabla 3.3.4: C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 69
Tabla 3.3.5: Datos C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 70
Tabla 3.3.6: Datos penetración C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 71
Tabla 3.3.7: Datos de presión C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 71
Tabla 3.3.8: C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 73
Tabla 3.3.9: Datos C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 74
Tabla 3.3.10: Datos penetración C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 75
Tabla 3.3.11: Datos de presión C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 75
Tabla 3.3.12: C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 77
Tabla 3.3.13: Datos C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 78
Tabla 3.3.14: Datos penetración C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 79
Tabla 3.3.15: Datos de presión C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 79
Tabla 3.3.16: C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 81
Tabla 3.3.17: Datos C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 82
Tabla 3.3.18: Datos penetración C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 83
Tabla 3.3.19: Datos de presión C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 83
Tabla 3.3.20: C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 85
Tabla 3.3.21: Datos C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 86
Tabla 3.3.22: Datos penetración C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 87
Tabla 3.3.23: Datos de presión C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 87
Tabla 3.3.24: C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 89
Tabla 3.3.25: Datos C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 90
Tabla 3.3.26: Datos penetración C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 91
Tabla 3.3.27: Datos de presión C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 91
Tabla 3.3.28: C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 93

Tabla 3.3.29: Resumen ensayo C.B.R. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 94
Tabla 4.2.1: Resultados de GeoGauge para bases y Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi) 98
Tabla 4.2.2: Resultados de Módulo Resiliente para bases y Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi) 98
Tabla 5.1.1: Datos para correlación de las Bases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 99
Tabla 5.1.2: Resultados C.B.R. y Módulo Resiliente de Bases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi).. 100
Tabla 5.2.1: Datos para correlación de las Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi) 101
Tabla 5.2.2: Resultados C.B.R. y Módulo Resiliente de Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi) 102
Tabla 6.1.1: TPDA para ejercicio de aplicación 103
Tabla 6.1.2: Niveles recomendados de confiabilidad R según AASHTO-93..... 103
Tabla 6.1.3: Valores típicos de desviación estándar 104
Tabla 6.1.4: Proyección TPDA 106
Tabla 6.1.5: Cálculo de factor de carga equivalente 106
Tabla 6.1.6: Pérdida por serviciabilidad según AASHTO-93 107
Tabla 6.1.7: Valores recomendados para coeficiente de drenaje según método AASHTO-93..... 114
Tabla 6.4.1: Coeficientes estructurales de Bases y Subbases de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi). ... 130
Tabla 6.5.1: Coeficientes estructurales típicos según AASHTO-93..... 131

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.3.1: Ubicación Google Maps Cantera San Joaquín, provincia de Cotopaxi. 17
Ilustración 1.3.2: Ubicación cantera San Joaquín en el mapa de la Agencia de Regulación y Control Minero. 17
Ilustración 2.2.1: Descripción gráfica del Método del Cuarteo 20
Ilustración 2.3.1: Curva Granulométrica Material Venido Como Base proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 25
Ilustración 2.3.2: Curva Granulométrica Material Venido Como Subbase proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 27
Ilustración 2.3.3: Curva Granulométrica Base Clase 1-B proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 28
Ilustración 2.3.4: Curva Granulométrica Base Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 30
Ilustración 2.3.5: Curva Granulométrica Base Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 31
Ilustración 2.3.6: Curva Granulométrica Base Clase 4 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 33
Ilustración 2.3.7: Curva Granulométrica Subbase Clase 1 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 34
Ilustración 2.3.8: Curva Granulométrica Subbase Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 36
Ilustración 2.3.9: Curva Granulométrica Subbase Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 37
Ilustración 3.2.1: Curva de Compactación BASE CLASE 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 57
Ilustración 3.2.2: Curva de Compactación BASE CLASE 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 58
Ilustración 3.2.3: Curva de Compactación BASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 59
Ilustración 3.2.4: Curva de Compactación BASE CLASE 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 60
Ilustración 3.2.5: Curva de Compactación SUBBASE CLASE 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 61
Ilustración 3.2.6: Curva de Compactación SUBBASE CLASE 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 62

Ilustración 3.2.7: Curva de Compactación SUBBASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 63
Ilustración 3.3.1: Curva de Compactación SUBBASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 65
Ilustración 3.3.2: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 68
Ilustración 3.3.3: C.B.R. vs Densidad seca. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 69
Ilustración 3.3.4: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 72
Ilustración 3.3.5: C.B.R. vs Densidad seca. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 73
Ilustración 3.3.6: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 76
Ilustración 3.3.7: C.B.R. vs Densidad seca. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 77
Ilustración 3.3.8: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 80
Ilustración 3.3.9: C.B.R. vs Densidad seca. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 81
Ilustración 3.3.10: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 84
Ilustración 3.3.11: C.B.R. vs Densidad seca. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 85
Ilustración 3.3.12: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 88
Ilustración 3.3.13: C.B.R. vs Densidad seca. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 89
Ilustración 3.3.14: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 92
Ilustración 3.3.15: C.B.R. vs Densidad seca. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi) 93
Ilustración 5.1.1: Resultados correlación C.B.R. vs Módulo Resiliente para bases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi) 100
Ilustración 5.2.1: Resultados correlación C.B.R. vs Módulo Resiliente para Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)..... 101
Ilustración 6.1.1: Tipos de vehículos para diseño de pavimentos según MTOP 105
Ilustración 6.1.2: Cálculo de Número Estructural para subrasante según el nomograma AASHTO-93 109

Ilustración 6.1.3: Cálculo de coeficiente estructural y Módulo Resiliente de la Base clase 4 según método AASHTO-93 110
Ilustración 6.1.4: Cálculo de coeficiente estructural y Módulo Resiliente de la Subbase clase 2 según método AASHTO-93 112
Ilustración 6.1.5: Cálculo de coeficiente estructural de la Carpeta Asfáltica según método AASHTO-93 114
Ilustración 6.1.6: Espesores finales de la estructura del pavimento según método tradicional AASHTO-93 115
Ilustración 6.2.1: Cálculo de coeficiente estructural y Módulo Resiliente de la Base clase 4 según Módulo Resiliente in situ 117
Ilustración 6.2.2: Cálculo de coeficiente estructural y Módulo Resiliente de la Subbase clase 2 según Módulo Resiliente in Situ 119
Ilustración 6.2.3: Cálculo de coeficiente estructural de la Carpeta Asfáltica según método AASHTO-93 121
Ilustración 6.2.4: Espesores finales de la estructura del pavimento según el verdadero valor de Módulo Resiliente 122
Ilustración 6.3.1: Espesores finales de la estructura del pavimento en ambos métodos 122
Ilustración 6.4.1: Cálculo de coeficiente estructural a2 para Base Clase 1 B de la Cantera San Joaquín. 123
Ilustración 6.4.2: Cálculo de coeficiente estructural a2 para Base Clase 2 de la Cantera San Joaquín.. 124
Ilustración 6.4.3: Cálculo de coeficiente estructural a2 para Base Clase 3 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi). 125
Ilustración 6.4.4: Cálculo de coeficiente estructural a2 para Base Clase 4 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi). 126
Ilustración 6.4.5: Cálculo de coeficiente estructural a3 para Subbase Clase 1 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi). 127
Ilustración 6.4.6: Cálculo de coeficiente estructural a3 para Subbase Clase 2 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi). 128
Ilustración 6.4.7: Cálculo de coeficiente estructural a3 para Subbase Clase 3 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi). 129

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 2.5.1: Contenido Orgánico del material proveniente de la cantera San Joaquín (Cotopaxi) .. 43
Fotografía 4.1.1: Metodología para ensayo con GeoGauge 95
Fotografía 4.1.2: Metodología para ensayo con GeoGauge 96
Fotografía 4.1.3: Metodología para ensayo con GeoGauge 97
Fotografía 6.1.1: Cálculo de Número Estructural para subrasante en el programa Ecuación AASHTO-93 108
Fotografía 6.1.2: Cálculo de Número Estructural para base clase 1 B en el programa Ecuación AASHTO-93 111
Fotografía 6.1.3: Cálculo de Número Estructural para Subbase clase 1 en el programa Ecuación AASHTO-93 113
Fotografía 6.2.1: Cálculo de Número Estructural para subrasante en el programa Ecuación AASHTO-93 116
Fotografía 6.2.2: Cálculo de Número Estructural para base clase 1 B en el programa Ecuación AASHTO-93 según Módulo Resiliente in situ 118
Fotografía 6.2.3: Cálculo de Número Estructural para Subbase clase 1 en el programa Ecuación AASHTO-93 según Módulo resiliente in situ (GeoGauge)..... 120

RESUMEN

Se realizó una investigación cuyo propósito fue encontrar una correlación entre el ensayo de C.B.R. y el Módulo Resiliente para las Bases y Subbases conformadas con material de la Cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi, Ecuador. Para lograr este objetivo, primero se caracterizó el material de la cantera estudiada a partir de ensayos de laboratorio, para luego determinar el Módulo Resiliente mediante GeoGauge y determinar el porcentaje de C.B.R. para cada una de las Bases y de las Subbases. Todos los resultados de los ensayos fueron comparados con las especificaciones mínimas que solicita la norma MOP-001-F 2002. Una vez realizados estos ensayos, se encontró una correlación entre el C.B.R. y el Módulo Resiliente para encontrar una fórmula con la que se pueda encontrar el Módulo Resiliente del material en base al porcentaje de C.B.R. y poder realizar un diseño de un pavimento flexible que tendrá un comportamiento favorable. Para finalizar, se comparó un diseño mediante la correlación tradicional de la AASHTO-93, con un diseño realizado con la correlación encontrada, dando como resultado un diseño subdimensionado por parte de la correlación tradicional de la AASHTO-93.

ABSTRACT

The purpose of this investigation was to find a correlation between the C.B.R. test and the Resilient Module for Bases and Subbases conformed with material from the San Joaquin Quarry located in the province of Cotopaxi, Ecuador. To achieve this objective, we first characterized the material of the quarry studied from laboratory tests, to then determine the Resilient Module using GeoGauge and determine the percentage of C.B.R. for each Bases and Subbases. All the results from the tests were compared with the minimum specifications required by the standard MOP-001-F 2002. Once these tests were carried out, a correlation was found between the C.B.R. and the Resilient Module in order to find a formula with which the Resilient Module of the material can be found based on the percentage of C.B.R. and to be able to design a flexible pavement that will have a favorable behavior. Finally, a design using the traditional correlation of the AASHTO-93 was compared with a design made using the correlation found, resulting in a design under-dimensioned by the traditional correlation of the AASHTO-93.

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

En cualquier construcción de obra civil, siempre se busca optimizar los materiales sin dejar de lado la seguridad y el correcto funcionamiento de la obra. Esto puede contribuir al ahorro de dinero y al beneficio del medio ambiente, y la construcción de pavimentos no se queda atrás en la búsqueda de este objetivo.

Al momento de realizar el diseño de la estructura del pavimento, debemos tomar en cuenta varios factores. El Módulo Resiliente de tanto la base como de la subbase es uno de los factores más importantes a determinar. Según la metodología AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), actualmente utilizada en el Ecuador, se pueden utilizar correlaciones entre el ensayo de C.B.R. (California Bearing Ratio) y el Módulo Resiliente.

Se han publicado varios trabajos para encontrar la correlación perfecta entre estos dos factores, pero las correlaciones encontradas, son enfocadas para otros tipos de suelo ubicados en otras zonas, y, por consiguiente, no revelarían un valor verdadero del comportamiento del suelo.

Al utilizar correlaciones entre C.B.R. y Modulo Resiliente preexistentes, existe el riesgo de subdimensionar o sobredimensionar la estructura del pavimento, exponiéndose a problemas serios tanto económicos como de desempeño del pavimento.

El presente trabajo se centrará en la caracterización del material de la cantera estudiada, y en la obtención de una correlación real entre el ensayo de C.B.R. (California Bearing Ratio) y el ensayo de Módulo Resiliente para los agregados provenientes de la cantera San Joaquín ubicada en el sector de Santa Rita en la provincia de Cotopaxi, Ecuador. El valor de Módulo Resiliente verdadero será encontrado mediante el dispositivo GeoGauge, con ensayos in situ. Una vez encontrada la correlación real, se realizará un ejercicio para encontrar el tamaño de la estructura del pavimento con el valor que se obtiene de C.B.R (correlaciones existentes según AASHTO-93) y con la correlación nueva encontrada, para analizar si el diseño con el método tradicional es correcto o no para este tipo de material.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Obtener el módulo resiliente mediante el uso del GeoGauge, y correlacionarlo con el índice de california (C.B.R) mediante los ensayos de laboratorio correspondientes a los materiales de base y subbases de la Cantera San Joaquín de la provincia de Cotopaxi, sector Santa Rita.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el material de la cantera San Joaquín, comparándolo con las especificaciones del Ministerio de Obras Públicas.
- Determinar el porcentaje de C.B.R de bases y subbases en laboratorio, según la normativa vigente del Ministerio de Transportes y Obras Públicas.
- Encontrar los valores verdaderos de Módulo Resiliente para las bases y subbases de la cantera San Joaquín, mediante el uso del GeoGauge.
- Encontrar una correlación entre el porcentaje de C.B.R. y el módulo resiliente obtenido del GeoGauge para las bases y subbases de la cantera San Joaquín
- Definir los espesores de las diferentes capas de la estructura del pavimento que se obtienen con el método tradicional de la AASHTO-93 y con la correlación obtenida en el punto anterior.
- Comparar ambas estructuras del pavimento e indicar si el diseño tradicional estaba subdimensionado o sobredimensionado.

1.3. Descripción de la cantera

La procedencia del material con los que se van a realizar los ensayos proviene de la cantera San Joaquín, ubicada en la provincia de Cotopaxi, Panamericana Sur Km 44, junto al ingreso al Parque Nacional Cotopaxi, Sector Santa Rita. En la Ilustración 1.3.1 se puede observar la ubicación de la cantera según Google Maps.



Ilustración 1.3.1: Ubicación Google Maps Cantera San Joaquín, provincia de Cotopaxi.

La cantera cuenta con los permisos respectivos otorgados en la concesión 5972, con licencia ambiental 261 en los cuales se les aprobó los permisos de funcionamiento y planes de manejo ambiental. A continuación, se muestra una imagen extraída de la página de la Agencia de Regulación y Control Minero.

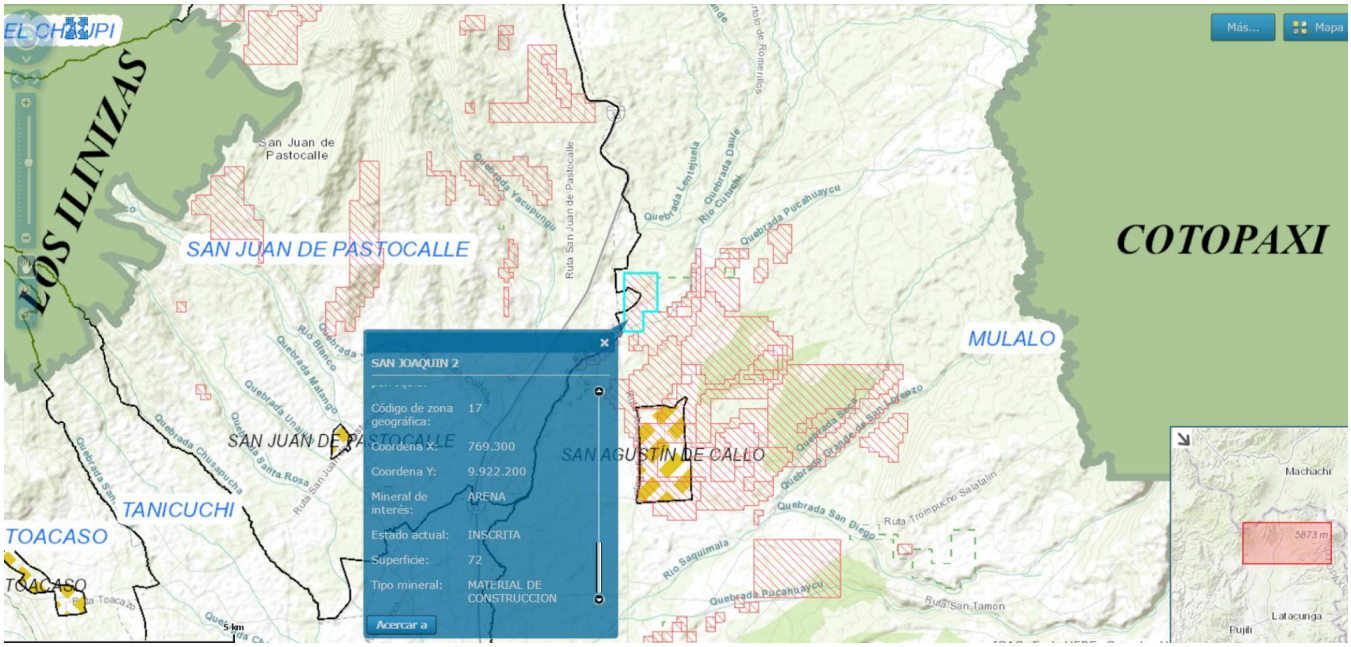


Ilustración 1.3.2: Ubicación cantera San Joaquín en el mapa de la Agencia de Regulación y Control Minero.

El clima del sector de la cantera es templado y frío, con una temperatura media anual de 13 grados Centígrados.

La cantera San Joaquín ofrece varios productos como subbase clase 2,3 y 4, arena fina, arena, piedra bola, piedra coco, piedra gruesa, piedra sobredimensión, piedra partida/basílica, piedra molón 2 caras, chispa clasificada, ripio clasificado, polvo de piedra, triturado de ½´´ a ¾´´y triturado de ¾´´ a 1´´.

2. ENSAYOS EN LABORATORIO

Los ensayos en laboratorio se realizaron bajo supervisión de laboratoristas profesionales, siguiendo los procesos que se muestran en la normativa ASTM, INEN, y MOP.

2.1. Muestreo de los agregados (ASTM D75)

El muestreo es tan importante como el ensayo y el muestreador debe usar toda precaución para obtener muestras que exhiban la naturaleza y condición de los materiales que representan. (ASTM INTERNATIONAL, 2003)

El proceso para la obtención del material que se va a utilizar en los diferentes ensayos en laboratorio y en los ensayos en campo, va de acuerdo con los pasos que se muestran en la normativa ASTM D75, que habla sobre el correcto muestreo de los agregados, para tener una muestra representativa para la obtención de resultados confiables.

Se les solicito a los trabajadores y al director de la cantera, que me provean de material que comúnmente venden como Base y Subbase. Los trabajadores me llevaron al sitio donde estaba la pila de material y se procedió con el muestreo.

En el caso de la cantera San Joaquín, se realizaron los procesos que muestra la norma para el muestreo desde una pila de almacenaje. Se procedió a realizar un plan de muestreo para evitar que la segregación no represente una desviación en los resultados, pese a que es muy difícil asegurar muestras inalteradas. Se procedió a tomar tres porciones del tercio superior de la pila, de la zona media y del tercio inferior del volumen de la pila según como indica la norma. Una tabla colocada verticalmente sobre la pila, justamente por encima del punto de muestreo ayudó a prevenir la segregación. También se tuvo en cuenta la tabla que se muestra a continuación obtenida de la norma, para saber qué cantidad es suficiente para las granulometrías rutinarias y el análisis de calidad de la muestra.

Tabla 2.1.1: Cantidad de las muestras según su tamaño

CANTIDAD DE LAS MUESTRAS	
Tamaño del agregado	**Masa mínima de Muestra de Campo**
Agregado fino	
No. 8 (2.36mm)	10 Kg
No. 4 (4.75mm)	10 Kg
Agregado Grueso	
3/8¨ (9.5mm)	10 Kg
1/2¨ (12.5mm)	15 Kg
3/4¨ (19.0mm)	25 Kg
1¨ (25.0mm)	50 Kg
1 1/2¨ (37.5 mm)	75 Kg
2¨ (50mm)	100 Kg
2 1/2¨ (63mm)	125 Kg
3¨ (75 mm)	150 Kg
3 1/2¨ (90mm)	175 Kg
Para combinaciones de agregado fino y grueso (agregado para base y sub-base), el peso mínimo debe ser el mínimo para el agregado grueso mas 10 Kg	

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (2003). Práctica Normativa para el Muestreo de Agregados D75. West Conshohocken, Estados Unidos.

El transporte de la muestra se lo realizó en sacos, construidos para evitar posibles pérdidas de material, o una posible contaminación por parte de agentes externos. Los sacos fueron identificados individualmente, para no confundir los diferentes materiales solicitados.

2.2. Cuarteo de los Agregados (ASTM C702)

Para la obtención de las cantidades precisas para las muestras destinadas para los diferentes ensayos en laboratorio, se siguieron los procesos que sugiere la norma ASTM C702 que habla sobre la práctica estándar para la reducción de muestras de agregado a prueba de tamaño.

En esta práctica se indican procedimientos para reducir la gran muestra obtenida en el campo a un tamaño conveniente para llevar a cabo una serie de pruebas para describir el material y medir su calidad, de tal manera que la proporción de muestra de ensayo más pequeño sea una representación de la muestra más grande, y por lo tanto del suministro total. (ASTM INTERNATIONAL, 1998)

Debido a que el material de la cantera San Joaquín era un material con agregado tanto grueso como fino, se optó por el método B descrito en la norma (Cuarteo). Se colocó la muestra original de los sacos en una superficie limpia y se lo homogenizó girando la muestra más de tres veces con la pala. Una vez que la muestra esta homogenizada y en forma cónica, aplanamos la pila a un espesor uniforme. Se dividió la masa aplanada en cuatro cuartos iguales y se extrajeron los cuartos opuestos como se muestra en la imagen a continuación. Se repitió este ensayo hasta llegar a la muestra que se deseaba.

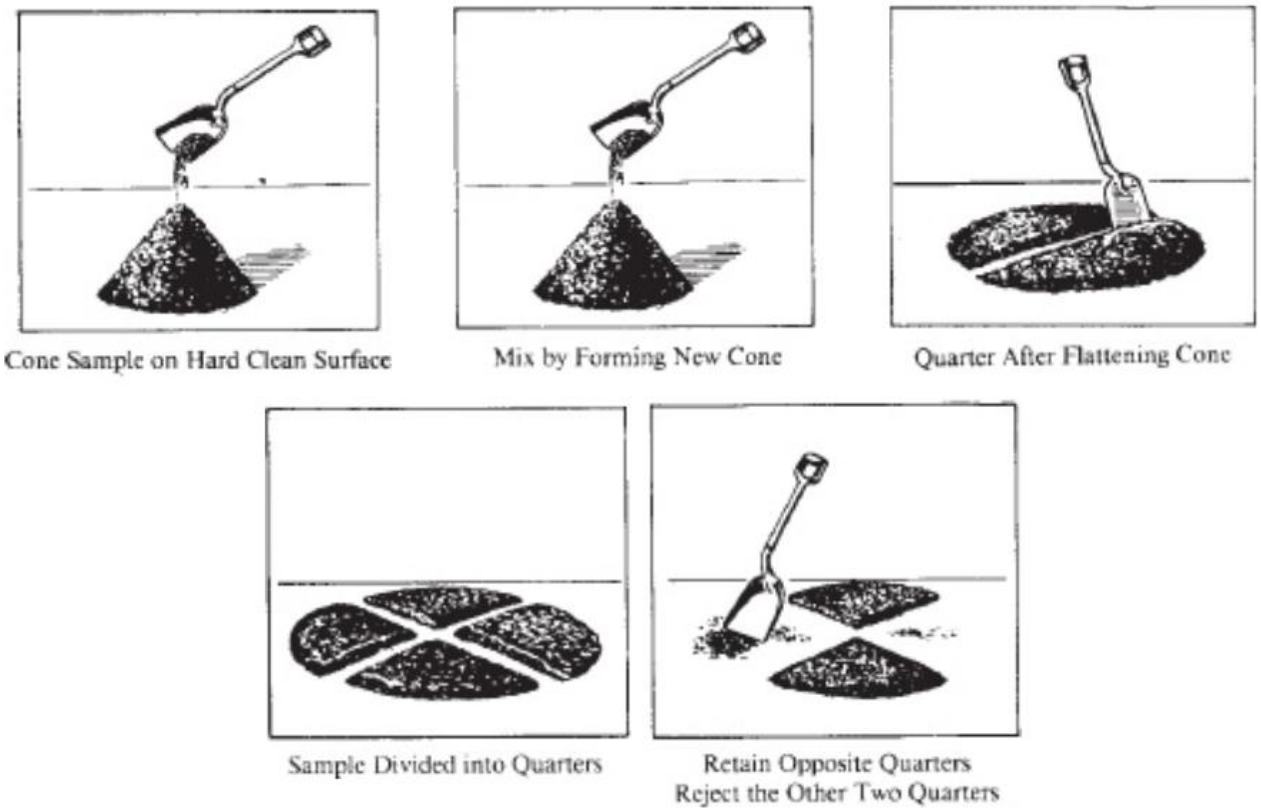


Ilustración 2.2.1: Descripción gráfica del Método del Cuarteo

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (1998). Práctica estándar para la Reducción de muestras de agregado a Prueba de Tamaño C702. West Conshohocken, Estados Unidos.

2.3. Granulometría (ASTM C136)

El ensayo de granulometría de los agregados (finos y gruesos), tiene por finalidad conocer los diferentes tamaños del agregado que van a conformar nuestras bases y subbases. Para lograr este objetivo, se utilizan tamices (mallas de diferentes aberturas).

Los tamices utilizados en el ensayo de granulometría se muestran a continuación.

Tabla 2.3.1: Tamices para el ensayo de granulometría de agregados.

TAMICES AGREGADO GRUESO	Malla No.	3¨	2 1/2´´	2´´	1 1/2´´	1´´	3/4´´	1/2´´	3/8´´	No. 4
	Abertura (mm)	76.2	64	50.4	38.1	25.4	19	12.7	9.51	4.76
TAMICES AGREGADO FINO	Malla No.	No. 10	No. 40	No. 200						
	Abertura (mm)	2	0.42	0.074						

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (2014). ASTM C136- Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, Estados Unidos.

Según la norma ASTM C136, las masas mínimas (material seco) para realizar el ensayo tanto para agregado fino y agregado grueso son las siguientes:

Tabla 2.3.2: Masa mínima para granulometría agregado fino y grueso

Abertura tamiz		Masa mínima	Descripción
mm	in	kg	
Pasa No. 4		0.3	Agregado fino
9.5	3/8´´	1	Agregado grueso
12.5	1/2´´	2	
19	3/4´´	5	
25	1´´	10	
37.5	1 1/2´´	15	
50	2´´	20	
63	2 1/2´´	35	
75	3´´	60	
90	3 1/2´´	100	
100	4´´	150	
125	5´´	300	

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (2014). ASTM C136- Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, Estados Unidos.

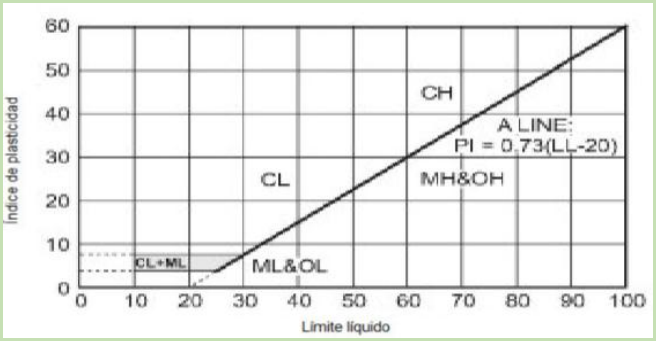
Una vez definida la masa inicial del ensayo (de material seco), se coloca la masa a través de los tamices indicados en la Tabla 1, se pesa la masa retenida en cada tamiz y se calcula el porcentaje de masa retenida y el porcentaje de masa que pasa por el tamiz.

2.3.1. Clasificación de suelo según SUCS y AASHTO

Para la clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y la clasificación de suelos según la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), se siguieron los procedimientos encontrados en las normas ASTM D2487-17 y AASHTO M145 respectivamente.

Con la granulometría obtenida de cada material, se clasifica como se indica en las siguientes tablas.

Tabla 2.3.3: Clasificación de Suelos según SUCS

<table>
<tr><th colspan="3">GRUPOS PRINCIPALES</th><th>Símbolos del grupo</th><th>NOMBRES TÍPICOS</th><th colspan="3">IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO</th></tr>
<tr><td rowspan="8">SUELOS DE GRANO GRUESO
Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200</td><td rowspan="4">GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)</td><td rowspan="2">Gravas límpias (sin o con pocos finos)</td><td>GW</td><td>Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.</td><td rowspan="8">Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5%->GW,GP,SW,SP. >12%->GM,GC,SM,SC. 5 al 12%->casos límite que requieren usar doble símbolo.</td><td colspan="2">$Cu=D_{60}/D_{10}>4$ $Cc=(D30)^2/D_{10}xD_{60}$ entre 1 y 3</td></tr>
<tr><td>GP</td><td>Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.</td><td colspan="2">No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)</td><td>GM</td><td>Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.</td><td>Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP<4.</td><td rowspan="2">Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.</td></tr>
<tr><td>GC</td><td>Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.</td><td>Límites de Atterberg sobre la línea A con IP>7.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)</td><td rowspan="2">Arenas límpias (pocos o sin finos)</td><td>SW</td><td>Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.</td><td colspan="2">$Cu=D_{60}/D_{10}>6$ $Cc=(D30)^2/D_{10}xD_{60}$ entre 1 y 3</td></tr>
<tr><td>SP</td><td>Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.</td><td colspan="2">Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)</td><td>SM</td><td>Arenas limosas, mezclas de arena y limo.</td><td>Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP<4.</td><td rowspan="2">Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.</td></tr>
<tr><td>SC</td><td>Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.</td><td>Límites de Atterberg sobre la línea A con IP>7.</td></tr>
<tr><td rowspan="6">SUELOS DE GRANO FINO
Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200</td><td colspan="2" rowspan="3">Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50</td><td>ML</td><td>Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos límpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plásticidad.</td><td rowspan="6" colspan="3">
</td></tr>
<tr><td>CL</td><td>Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.</td></tr>
<tr><td>OL</td><td>Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50</td><td>MH</td><td>Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.</td></tr>
<tr><td>CH</td><td>Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.</td></tr>
<tr><td>OH</td><td>Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Suelos muy orgánicos</td><td>PT</td><td>Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.</td></tr>
</table>

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) ASTM D2487. *West Conshohocken, Estados Unidos.*

Tabla 2.3.4: Clasificación de Suelos según AASHTO

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz Nº 200)							Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz Nº 200)			
Grupo:	A-1		A-3	A-2-4				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa:											
Nº 10 (2mm)	50 máx	-	-	-				-			
Nº 40 (0,425mm)	30 máx	50 máx	51 mín	-				-			
Nº 200 (0,075mm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx				36 min			
Características de la fracción que pasa por el tamiz Nº 40											
Límite líquido	-		-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín (2)
Indice de plasticidad	6 máx		NP (1)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Constituyentes principales	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado	Excelente a bueno							Pobre a malo			

(1): No plástico

(2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

Fuente: AASHTO. (2004). Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes M145-91 (2004). Washington, D.C., Estados Unidos.

2.3.2. Resultados

Se realizó el ensayo de granulometría, la clasificación según SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) y la clasificación de suelos según AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) del material proveniente de la cantera, dando como resultado los siguiente.

- **Material vendido como Base**

El material proveniente de la cantera, vendido como base, tuvo la siguiente granulometría correspondiente a una Base clase 2.

Tabla 2.3.5: Granulometría Material Venido Como Base proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

TAMIZ	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICACIÓN Tabla 404-1.2 Clase 2
3"	75.0	0	0	0.0	100.0	---
2 ½"	63.0	0	0	0.0	100.0	---
2"	50.0	0	0	0.0	100.0	---
1 ½"	37.5	0	0	0.0	100.0	---
1"	25.0	80	80	0.4	99.6	**100**
3/4"	19.0	685	765	3.8	96.2	**70 - 100**
1/2"	12.5	1525	2290	11.5	88.6	---
3/8"	9.50	2180	4470	22.4	77.7	**50 - 80**
No.4	4.75	5050	9520	47.6	52.4	**35 - 65**
No.10	2.00	2176	11696	58.5	41.5	**25 - 50**
No.40	0.425	3213	14909	74.5	25.5	**15 - 30**
No.200	0.075	3106	18015	90.1	9.9	**3 - 15**
P A S A No 200		1985	1985			
SUMA:		20000	20000			

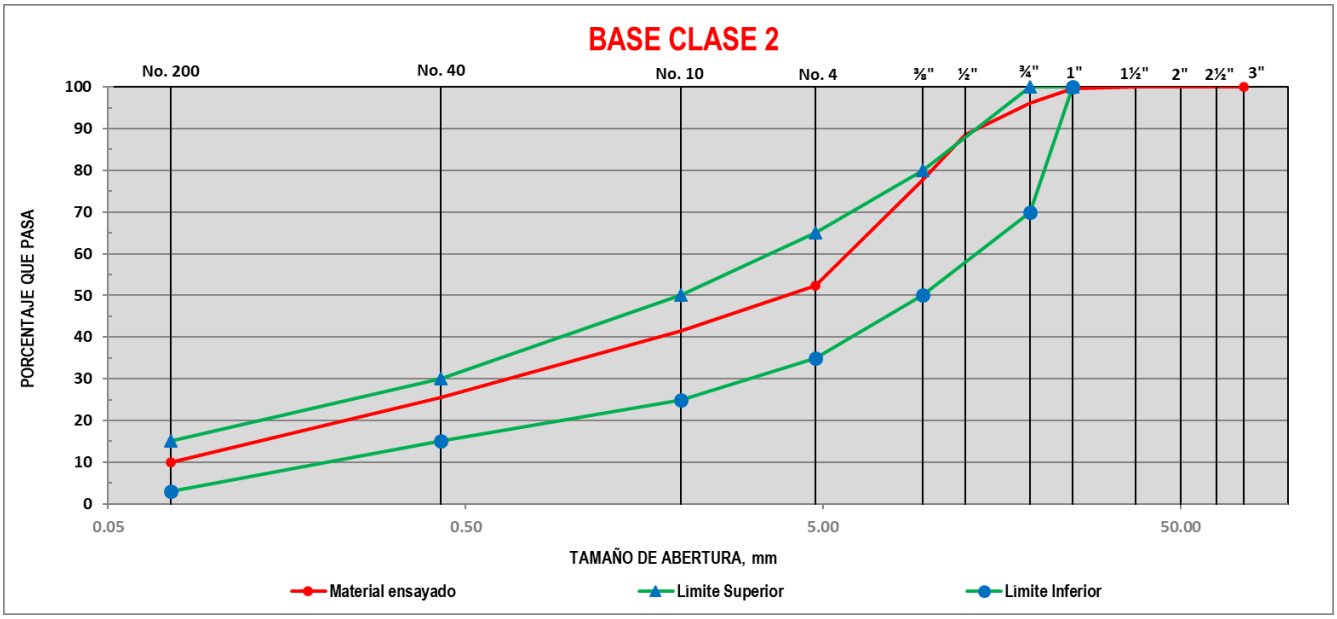


Ilustración 2.3.1: Curva Granulométrica Material Venido Como Base proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.3.6: Clasificación SUCS y AASHTO del Material Venido Como Base proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CLASIFICACIÓN	
MATERIAL VENDIDO COMO BASE	
SUCS	SW-SM
AASHTO	A-1-a
Descripción	Caso límite (doble símbolo), Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos. Arenas limosas, mezclas de arena y limo. Incluye materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

- **Material vendido como Subbase**

El material proveniente de la cantera, vendido como subbase, tuvo la siguiente granulometría, correspondiente a una subbase clase 2.

Tabla 2.3.7: Granulometría Material Venido Como Subbase proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

TAMIZ	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICACIÓN Tabla 403-1.1 Clase 2
3"	75.0	0	0	0.0	100.0	---
2 ½"	63.0	0	0	0.0	100.0	---
2"	50.0	0	0	0.0	100.0	**100**
1 ½"	37.5	1830	1830	9.2	90.9	**70 - 100**
1"	25.0	2400	4230	21.2	78.9	---
3/4"	19.0	1430	5660	28.3	71.7	---
1/2"	12.5	2315	7975	39.9	60.1	---
3/8"	9.50	1650	9625	48.1	51.9	---
No.4	4.75	3235	12860	64.3	35.7	**30 - 70**
No.10	2.00	1612	14472	72.4	27.6	**---**
No.40	0.425	2032	16504	82.5	17.5	**15 - 40**
No.200	0.075	2144	18648	93.2	6.8	**0 - 20**
P A S A No 200		1352	1352			
SUMA:		20000	20000			

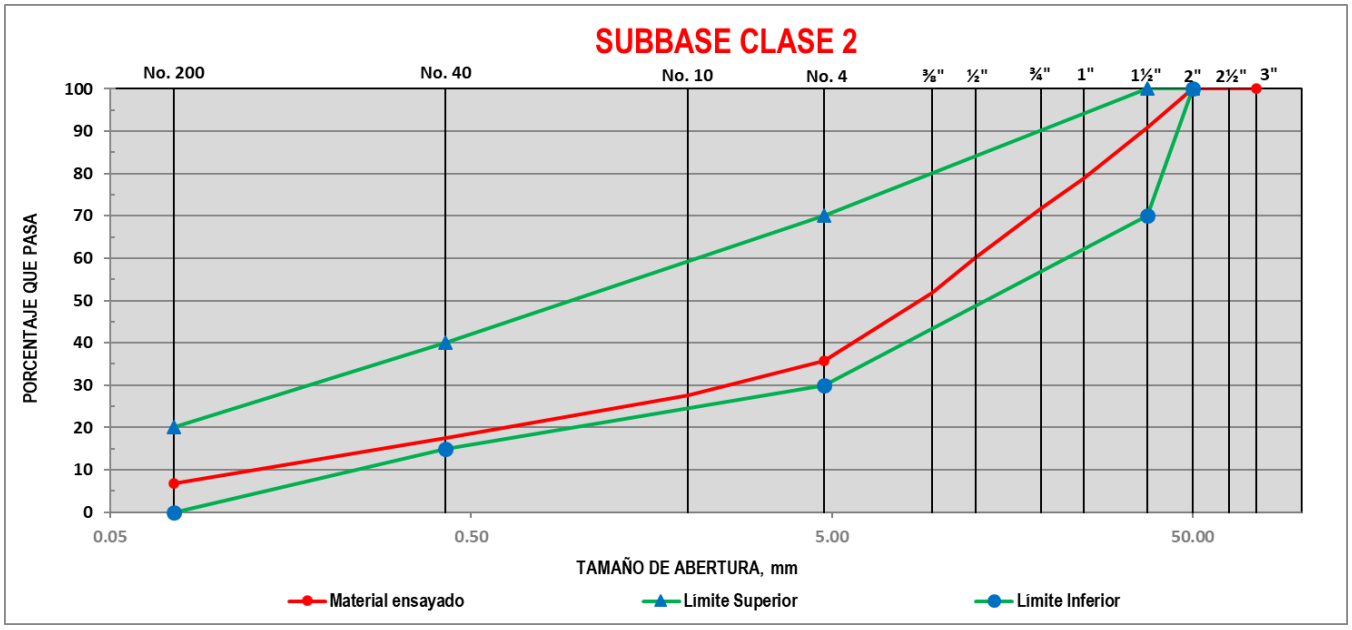


Ilustración 2.3.2: Curva Granulométrica Material Venido Como Subbase proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.3.8: Clasificación SUCS y AASHTO del Material Venido Como Subbase proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CLASIFICACION	
MATERIAL VENDIDO COMO SUBBASE	
SUCS	GM-GP
AASHTO	A-1-a
Descripción	Caso límite (doble símbolo), Gravas limosas, mezclas grava y arena, Gravas mal graduadas, pocos finos o sin finos. Incluye materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

Conformación de Bases y Subbases con el material de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi).

A continuación, se presentarán las granulometrías de las diferentes bases y subbases conformadas por el material de la cantera San Joaquín.

- **Base Clase 1-B Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 2.3.9: Granulometría Base Clase 1-B proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

TAMIZ	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICACIÓN Tabla 404-1.1 Clase 1 - Tipo B
3"	75.0	0	0	0.0	100.0	---
2 ½"	63.0	0	0	0.0	100.0	---
2"	50.0	0	0	0.0	100.0	---
1 ½"	37.5	0	0	0.0	100.0	**100**
1"	25.0	686	686	3.4	96.6	**70 - 100**
3/4"	19.0	1715	2401	12.0	88.0	**60 - 90**
1/2"	12.5	1714	4115	20.6	79.4	---
3/8"	9.50	2572	6687	33.4	66.6	**45 - 75**
No.4	4.75	4329	11016	55.1	44.9	**30 - 60**
No.10	2.00	1865	12881	64.4	35.6	**20 - 50**
No.40	0.425	2755	15636	78.2	21.8	**10 - 25**
No.200	0.075	2663	18299	91.5	8.5	**2 - 12**
P A S A No 200		1702	1702			
SUMA:		20000	20000			

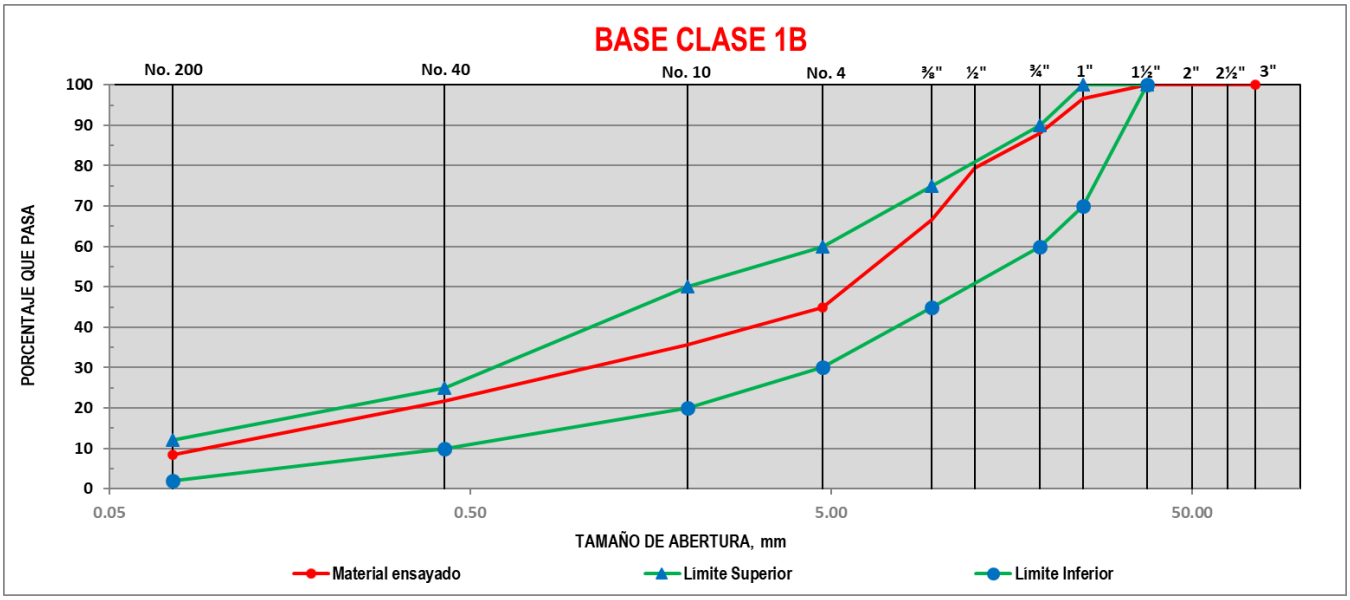


Ilustración 2.3.3: Curva Granulométrica Base Clase 1-B proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.3.10: Clasificación SUCS y AASHTO de Base Clase 1-B proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CLASIFICACION	
BASE CLASE 1-B	
SUCS	GW-GM
AASHTO	A-1-a
Descripción	Caso límite (doble símbolo), Gravas bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos. Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo. Incluye materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

- **Base Clase 2 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 2.3.11: Granulometría Base Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

TAMIZ	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICACIÓN Tabla 404-1.2 Clase 2
3"	75.0	0	0	0.0	100.0	---
2 ½"	63.0	0	0	0.0	100.0	---
2"	50.0	0	0	0.0	100.0	---
1 ½"	37.5	0	0	0.0	100.0	---
1"	25.0	0	0	0.0	100.0	**100**
3/4"	19.0	1776	1776	8.9	91.1	**70 - 100**
1/2"	12.5	1775	3551	17.8	82.2	---
3/8"	9.50	2663	6214	31.1	68.9	**50 - 80**
No.4	4.75	4483	10697	53.5	46.5	**35 - 65**
No.10	2.00	1931	12628	63.1	36.9	**25 - 50**
No.40	0.425	2852	15481	77.4	22.6	**15 - 30**
No.200	0.075	2757	18238	91.2	8.8	**3 - 15**
P A S A No 200		1762	1762			
SUMA:		20000	20000			

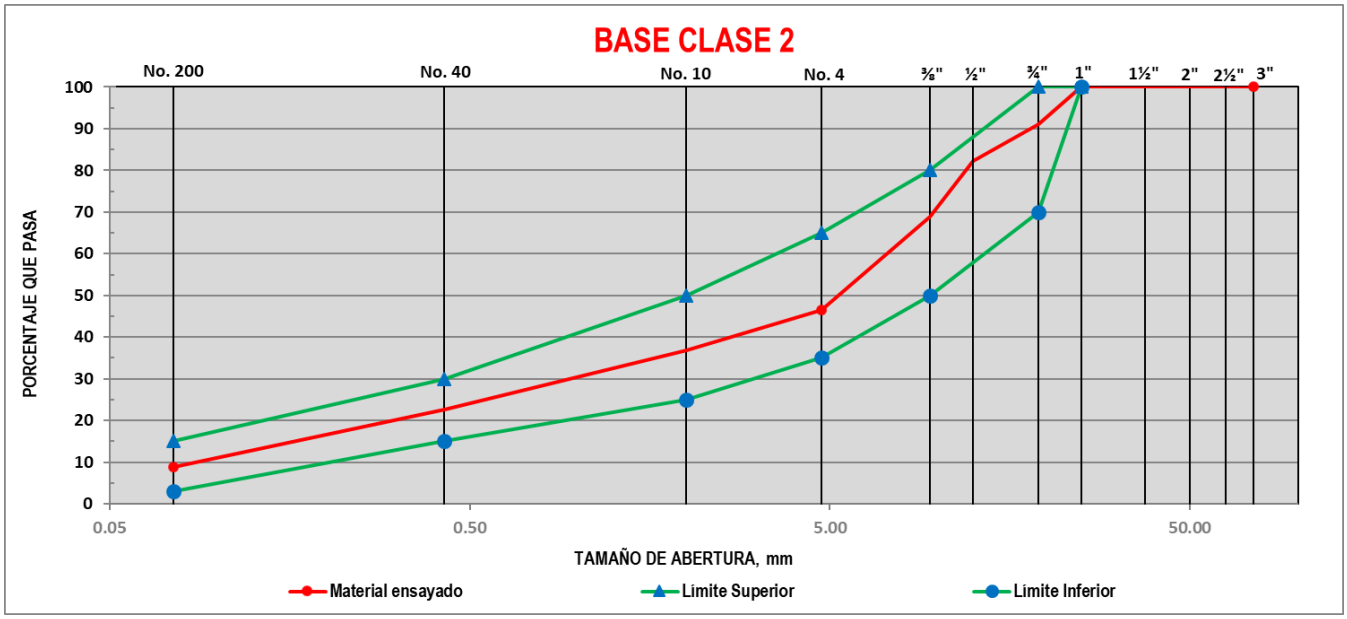


Ilustración 2.3.4: Curva Granulométrica Base Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.3.12: Clasificación SUCS y AASHTO de Base Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CLASIFICACION	
BASE CLASE 2	
SUCS	GW-GM
AASHTO	A-1-a
Descripción	Caso límite (doble símbolo), Gravas bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos. Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo. Incluye materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

- **Base Clase 3 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 2.3.13: Granulometría Base Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

TAMIZ	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICACIÓN Tabla 404-1.3 Clase 3
3"	75.0	0	0	0.0	100.0	---
2 ½"	63.0	0	0	0.0	100.0	---
2"	50.0	0	0	0.0	100.0	---
1 ½"	37.5	0	0	0.0	100.0	---
1"	25.0	0	0	0.0	100.0	---
3/4"	19.0	0	0	0.0	100.0	**100**
1/2"	12.5	1430	1430	7.2	92.9	---
3/8"	9.50	2144	3574	17.9	82.1	---
No.4	4.75	5341	8915	44.6	55.4	**45 - 80**
No.10	2.00	2301	11216	56.1	43.9	**30 - 60**
No.40	0.425	3399	14615	73.1	26.9	**20 - 35**
No.200	0.075	3286	17901	89.5	10.5	**3 - 15**
P A S A No 200		2099	2099			
SUMA:		20000	20000			

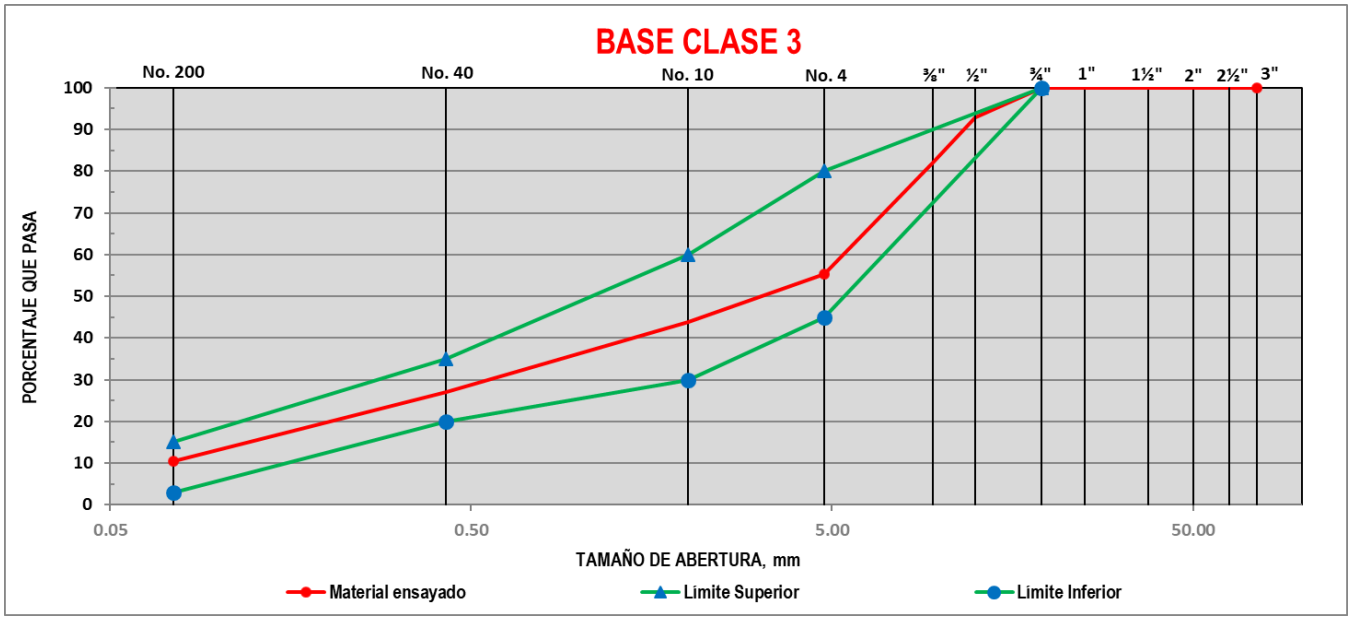


Ilustración 2.3.5: Curva Granulométrica Base Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.3.14: Clasificación SUCS y AASHTO de Base Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CLASIFICACIÓN	
BASE CLASE 3	
SUCS	SW-SM
AASHTO	A-1-a
Descripción	Caso límite (doble símbolo), Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos. Arenas limosas, mezclas de arena y limo. Incluye materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

- **Base Clase 4 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 2.3.15: Granulometría Base Clase 4 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

TAMIZ	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICACIÓN Tabla 404-1.4 Clase 4
3"	75.0	0	0	0.0	100.0	---
2 ½"	63.0	0	0	0.0	100.0	---
2"	50.0	0	0	0.0	100.0	**100**
1 ½"	37.5	1482	1482	7.4	92.6	---
1"	25.0	3702	5184	25.9	74.1	**60 - 90**
3/4"	19.0	1852	7036	35.2	64.8	---
1/2"	12.5	1186	8222	41.1	58.9	---
3/8"	9.50	1778	10000	50.0	50.0	---
No.4	4.75	2593	12593	63.0	37.0	**20 - 50**
No.10	2.00	1538	14131	70.7	29.3	---
No.40	0.425	2271	16402	82.0	18.0	---
No.200	0.075	2195	18597	93.0	7.0	**0 - 15**
P A S A No 200		1403	1403			
SUMA:		20000	20000			

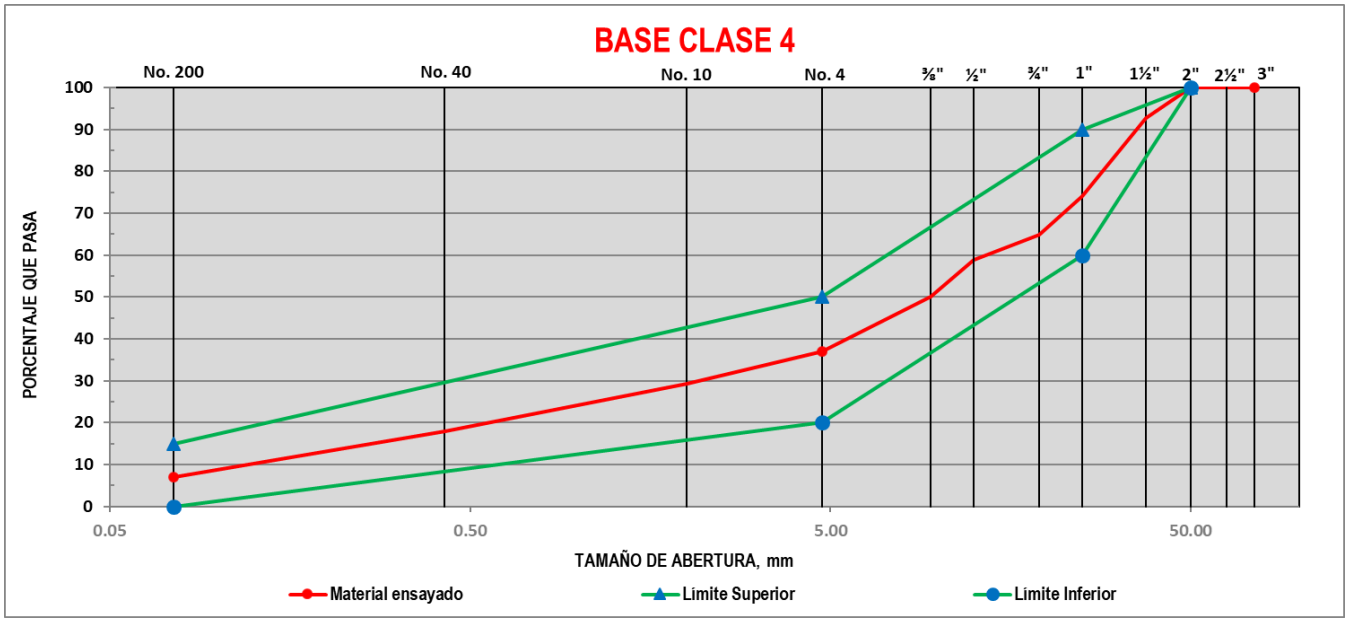


Ilustración 2.3.6: Curva Granulométrica Base Clase 4 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.3.16: Clasificación SUCS y AASHTO de Base Clase 4 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CLASIFICACION	
BASE CLASE 4	
SUCS	GW-GM
AASHTO	A-1-a
Descripción	Caso límite (doble símbolo), Gravas bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos. Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo. Incluye materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

- **Subbase Clase 1 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 2.3.17: Granulometría Subbase Clase 1 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

TAMIZ	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICACIÓN Tabla 403-1.1 Clase 1
3"	75.0	0	0	0.0	100.0	---
2 ½"	63.0	0	0	0.0	100.0	---
2"	50.0	0	0	0.0	100.0	---
1 ½"	37.5	0	0	0.0	100.0	**100**
1"	25.0	2067	2067	10.3	89.7	---
3/4"	19.0	1064	3131	15.7	84.3	---
1/2"	12.5	1434	4565	22.8	77.2	---
3/8"	9.50	2150	6715	33.6	66.4	---
No.4	4.75	3445	10160	50.8	49.2	**30 - 70**
No.10	2.00	2222	12382	61.9	38.1	---
No.40	0.425	2800	15182	75.9	24.1	**10 - 35**
No.200	0.075	2955	18137	90.7	9.3	**0 - 15**
P A S A No 200		1863	1863			
SUMA:		20000	20000			

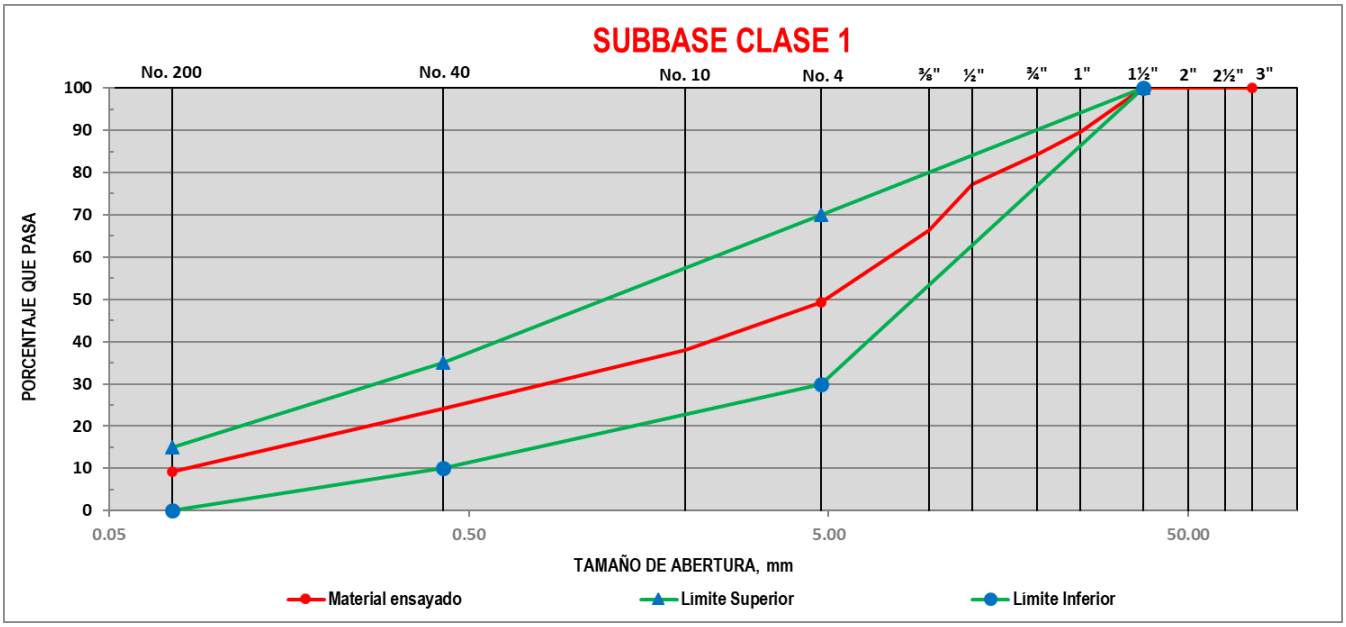


Ilustración 2.3.7: Curva Granulométrica Subbase Clase 1 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.3.18: Clasificación SUCS y AASHTO de Subbase Clase 1 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CLASIFICACION	
SUBBASE CLASE 1	
SUCS	GW-GM
AASHTO	A-1-a
Descripción	Caso límite (doble símbolo), Gravas bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos. Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo. Incluye materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

- **Subbase Clase 2 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 2.3.19: Granulometría Subbase Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

TAMIZ	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICACIÓN Tabla 403-1.1 Clase 2
3"	75.0	0	0	0.0	100.0	---
2 ½"	63.0	0	0	0.0	100.0	---
2"	50.0	0	0	0.0	100.0	**100**
1 ½"	37.5	2263	2263	11.3	88.7	**70 - 100**
1"	25.0	2474	4737	23.7	76.3	---
3/4"	19.0	1484	6221	31.1	68.9	---
1/2"	12.5	1237	7458	37.3	62.7	---
3/8"	9.50	1855	9313	46.6	53.4	---
No.4	4.75	1856	11169	55.8	44.2	**30 - 70**
No.10	2.00	1994	13163	65.8	34.2	---
No.40	0.425	2513	15676	78.4	21.6	**15 - 40**
No.200	0.075	2652	18328	91.6	8.4	**0 - 20**
P A S A No 200		1672	1672			
SUMA:		20000	20000			

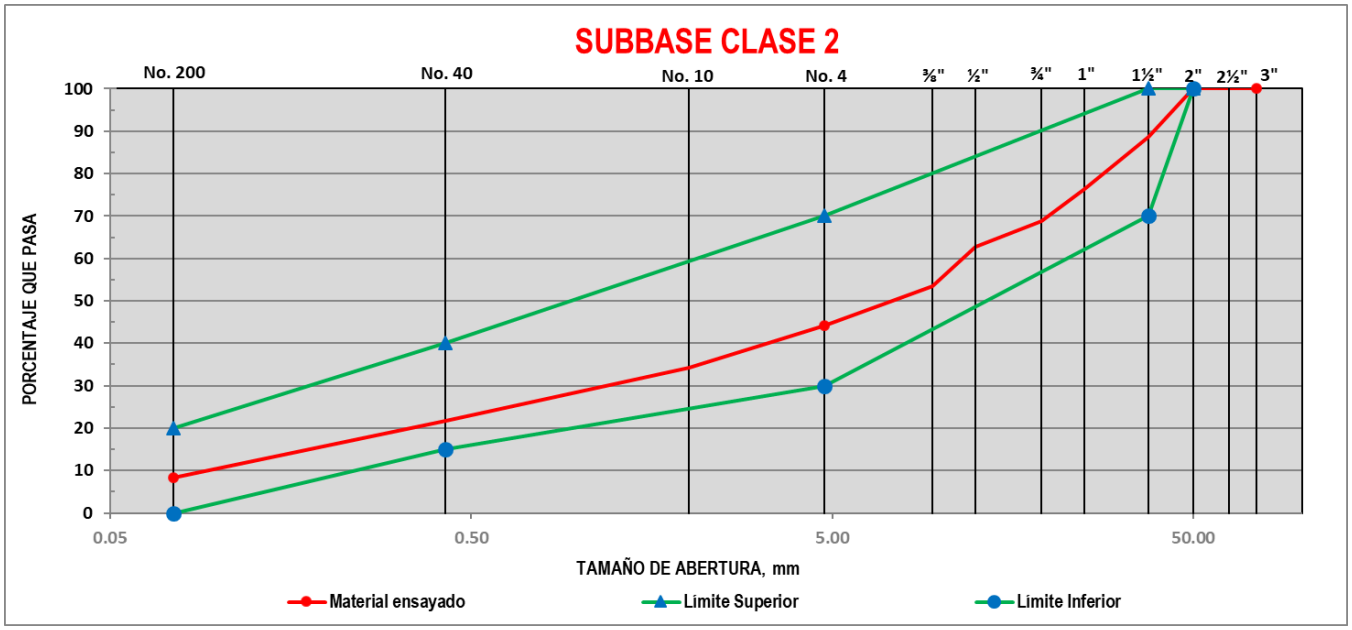


Ilustración 2.3.8: Curva Granulométrica Subbase Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.3.20: Clasificación SUCS y AASHTO de Subbase Clase 2 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CLASIFICACION	
SUBBASE CLASE 2	
SUCS	GW-GM
AASHTO	A-1-a
Descripción	Caso límite (doble símbolo), Gravas bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos. Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo. Incluye materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

- **Subbase Clase 3 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 2.3.21: Granulometría Subbase Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

TAMIZ	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICACIÓN Tabla 403-1.1 Clase 3
3"	75.0	0	0	0.0	100.0	**100**
2 ½"	63.0	689	689	3.4	96.6	---
2"	50.0	689	1378	6.9	93.1	---
1 ½"	37.5	1511	2889	14.4	85.6	---
1"	25.0	1259	4148	20.7	79.3	---
3/4"	19.0	755	4903	24.5	75.5	---
1/2"	12.5	1100	6003	30.0	70.0	---
3/8"	9.50	1650	7653	38.3	61.7	---
No.4	4.75	2518	10171	50.9	49.1	**30 - 70**
No.10	2.00	2219	12390	62.0	38.0	---
No.40	0.425	2797	15188	75.9	24.1	---
No.200	0.075	2952	18139	90.7	9.3	**0 - 20**
P A S A No 200		1861	1861			
SUMA:		20000	20000			

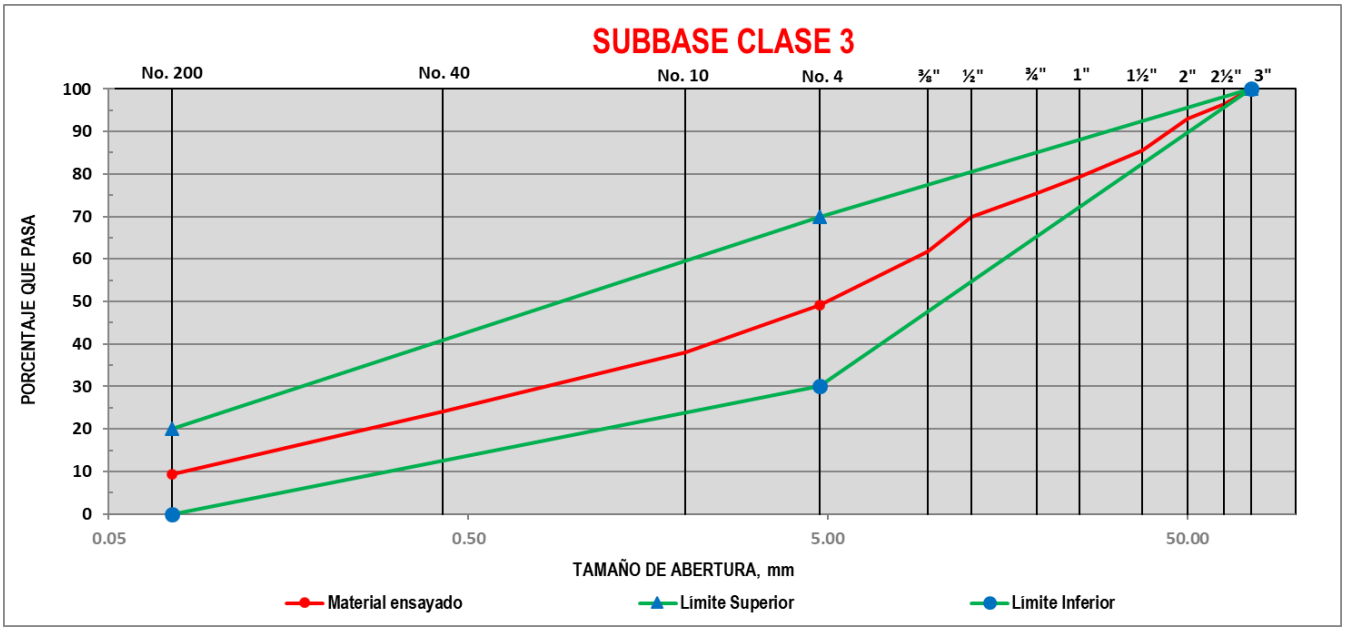


Ilustración 2.3.9: Curva Granulométrica Subbase Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.3.22: Clasificación SUCS y AASHTO de Subbase Clase 3 proveniente de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CLASIFICACION	
SUBBASE CLASE 3	
SUCS	GW-GM
AASHTO	A-1-a
Descripción	Caso límite (doble símbolo), Gravas bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos. Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo. Incluye materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

2.4. Gravedad Específica y Absorción del Agregado

Este ensayo es utilizado para encontrar la gravedad específica Bulk, gravedad específica saturada con superficie seca, la gravedad específica aparente y la absorción del agregado.

Normalmente, este ensayo es utilizado para conocer la densidad del agregado, lo cual nos sirve para dosificaciones del hormigón, o como auxiliar para otros ensayos, como por ejemplo el ensayo de Proctor estándar o Proctor modificado. En cuanto a la absorción, es importante conocer la cantidad de agua que absorbe el agregado cuando está en contacto con el agua.

Se deben realizar los ensayos de agregado fino y de agregado grueso por separado, ya que tienen comportamiento diferente. A continuación, se presenta el procedimiento de los ensayos y los resultados de agregado fino y agregado grueso.

2.4.2. Gravedad Específica y absorción del agregado fino (ASTM C-128)

Como la norma dicta dos procedimientos, se optó por el procedimiento gravimétrico (picnómetro/matraz). El material será obtenido por cuarteo.

Para la preparación de la muestra de material fino (pasante tamiz #4), se satura la muestra y se seca su superficie (Saturado con superficie seca SSS), para posteriormente colocar 500 gr de material SSS dentro del matraz de ensayo.

Se procede a llenar el matraz con agua hasta casi alcanzar la marca de 500 cm3. Se debe verificar que la temperatura del agua oscile entre los 20º C.

Se eliminan las burbujas de aire dentro de la muestra rodando el matraz sobre la palma de la mano o sobre una superficie plana, o también se puede utilizar una bomba de succión para la extracción de burbujas de aire.

Una vez que se observa que no existen burbujas de aire, se llena hasta la marca de 500 cm3, lavando el suelo sobrante de la boquilla con cuidado para no introducir nuevas burbujas de aire.

Se determina la masa del conjunto (matraz, agua, suelo), y se extrae la muestra del picnómetro (sin botar nada de la muestra), para luego secar la muestra en el horno y determinar la masa de la muestra seca.

Cálculos:

- Masa de agua añadida al matraz:

$$Ma = Mmw - (Mm + B)$$

(Ecuación 2.4.1)

- Gravedad específica Bulk

$$Ge = \frac{A}{500 - Ma}$$

(Ecuación 2.4.2)

- Gravedad Específica Saturada con superficie Seca:

$$Ges = \frac{B}{500 - Ma}$$

(Ecuación 2.4.3)

- Gravedad Específica Aparente

$$Gea = \frac{A}{500 + A + Mm - Mmw}$$

(Ecuación 2.4.4)

- Absorción del agregado

$$Ab\ \% = \frac{B - A}{A} * 100$$

(Ecuación 2.4.5)

Donde:

Ge: Gravedad específica Bulk

Ges: Gravedad Específica Saturada con Superficie Seca.

Gea: Gravedad Específica Aparente.

Ab %: Porcentaje de Absorción del agregado.

A: Masa de la muestra seca.

Ma: Masa de agua añadida al matraz/picnómetro.

Mm: Masa del matraz.

Mmw: Masa del conjunto agua + matraz + suelo SSS.

B: Masa de la muestra SSS.

2.4.2.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino.

Tabla 2.4.1: Gravedad específica y absorción del agregado fino de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

	GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO	
	IDENTIFICACION	**CANTIDAD**
Mm	Masa Matraz (gr)	154.30
Mmwm	Matraz + Agua + Muestra (gr)	947.60
A	Masa Muestra Seca (gr)	489.10
B	Masa Saturada con superf. Seca (gr)	500.00
Ma	Masa de agua añadida al matraz (gr)	293.30
Ge	Gravedad específica BULK	2.37
Ges	Gravedad específica saturada con superf. Seca	2.42
Gea	Gravedad específica aparente	2.50
Ab	Porcentaje de absorcion (%)	2.23

2.4.3. Gravedad Específica y absorción del agregado grueso (ASTM C-127)

La toma de muestras del árido se obtendrá con cuarteo. Se debe tomar aproximadamente 5000 gr del material retenido en el tamiz #4 mediante tamizado en seco. Se lava el material para limpiarlo de cualquier partícula de polvo en su superficie.

Se seca la muestra en el horno por un periodo de aproximadamente 24 horas. Se saca la muestra del horno, se coloca dentro de un recipiente lleno de agua y se la deja reposar por otras 24 horas.

Se saca la muestra del agua y se seca su superficie con un paño grande o toalla, hasta que no exista película de agua sobre la superficie de las partículas. Debe evitarse la evaporación de agua.

Se determina la masa de la muestra sin película de agua (saturada con superficie seca SSS), para posteriormente sumergirla dentro del agua en la cesta de alambre para pesar la muestra sumergida.

Se saca la muestra sumergida y se seca en el horno hasta que no existan variaciones de masa para así encontrar la masa de la muestra seca.

Cálculos:

- Gravedad específica Bulk

$$Ge = \frac{A}{B - C}$$

(Ecuación 2.4.6)

- Gravedad Específica Saturada con superficie Seca:

$$Ges = \frac{B}{B - C}$$

(Ecuación 2.4.7)

- Gravedad Específica Aparente

$$Gea = \frac{A}{A - C}$$

(Ecuación 2.4.8)

- Absorción del agregado

$$Ab\ \% = \frac{B - A}{A} * 100$$

(Ecuación 2.4.9)

Donde:

Ge: Gravedad específica Bulk

Ges: Gravedad Específica Saturada con Superficie Seca.

Gea: Gravedad Específica Aparente.

Ab %: Porcentaje de Absorción del agregado.

A: Masa de la muestra seca.

C: Masa de la muestra sumergida en el agua.

B: Masa de la muestra SSS.

2.4.3.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso.

Tabla 2.4.2: Gravedad específica y absorción del agregado grueso de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

	GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO	
	IDENTIFICACIÓN	**CANTIDAD**
B	Masa de la muestra saturada con superficie seca (gr)	5168
A	Masa de la muestra seca (gr)	4965
C	Masa de la muestra sumergida en agua (gr)	2987
Ge	Gravedad específica BULK	2.28
Ges	Gravedad específica saturada con superficie seca	2.37
Gea	Gravedad específica aparente	2.51
Ab	Porcentaje de absorción	4.09

2.5. Contenido Orgánico (ASTM C40)

El objetivo del ensayo del contenido orgánico es para determinar la aceptabilidad del agregado fino que puede ser perjudicial en la construcción de morteros y hormigones.

Los agregados finos deberán estar libres de cantidades nocivas de impurezas orgánicas. Los agregados sujetos a la prueba de impurezas orgánicas que produzcan un color más oscuro que el color estándar deberán ser rechazados. (ASTM INTERNATIONAL, 2018)

Para realizar el ensayo de contenido orgánico, se toma una muestra de 500 gr aproximadamente de material que pasa el tamiz #4 (árido fino). Esta muestra debe obtenerse por cuarteo.

Se llena la probeta graduada con el material hasta la marca de 130 cm3, para posteriormente añadir una solución de hidróxido de sodio al 3%, hasta la marca de 200 cm3. Se cubre la probeta y se agita fuertemente. Se deja reposar la muestra por 24 horas.

Se compara el color del líquido por encima de la arena obtenido a las 24 horas con la escala de colores estándar y se anotan los resultados.

2.5.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de contenido orgánico en los agregados.



Fotografía 2.5.1: Contenido Orgánico del material proveniente de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 2.5.1: Contenido Orgánico del material proveniente de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

CONTENIDO ORGÁNICO	
Rango	Menor que 1
Observación	La arena se considera adecuada para el uso en la fabricación del Hormigón, desde el punto de vista orgánico.

2.6. Determinación de terrones de arcilla en los agregados naturales (ASTM C 142)

El objetivo del ensayo es determinar la cantidad de terrones de arcilla y partículas desmenuzables en los agregados de forma aproximada. Se debe realizar el ensayo de agregados finos y gruesos por separado. La muestra que se ensayará debe estar compuesta por partículas que pasan el tamiz #4 y se retienen en el tamiz #16. Para la muestra de agregado grueso, se debe tomar en cuenta la siguiente tabla donde se muestran los tamaños de las partículas y las masas mínimas.

Tabla 2.6.1 Masa mínima de agregado fino y grueso para la determinación de terrones de arcilla y partículas desmenuzables

Tamaño de las partículas que forman la muestra de ensayo	Masa de la muestra de ensayo, mínimo (g)	Agregado
No. 16 a 4.75 mm (No. 4)	25	**Fino**
4.75 mm a 9.5 mm (No. 4 a 3/8´´)	1000	**Grueso**
9.5 mm a 19.0 mm (3/8´´ a 3/4´´)	2000	
19.0 mm a 37.5 mm (3/4´´ a 1 1/2´´)	3000	
Sobre 37.5 mm (1 1/2´´)	5000	

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (2017). Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates C142. *West Conshohocken, Estados Unidos.*

Se obtiene la masa inicial de las muestras de ensayo, y se las sumerge en agua durante un periodo de 24 horas, luego se ruedan y se aprietan las partículas entre el pulgar y el dedo índice sin usar las uñas. Después de que se hayan destruido las partículas desmenuzables, se debe separar las partículas desprendidas por tamizado húmedo como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.6.2: Tamaño del tamiz para remover los residuos de terrones de arcilla y partículas desmenuzables

Tamaño de las partículas que forman la muestra de ensayo	Tamaño del tamiz para remover los residuos de terrones de arcilla y partículas desmenuzables	Agregado
No. 16 a 4.75 mm (No. 4)	850 µm (No. 20)	**Fino**
4.75 mm a 9.5 mm (No. 4 a 3/8´´)	2.36 mm (No. 8)	**Grueso**
9.5 mm a 19.0 mm (3/8´´ a 3/4´´)	4.75 mm (No. 4)	
19.0 mm a 37.5 mm (3/4´´ a 1 1/2´´)	4.75 mm (No. 4)	
Sobre 37.5 mm (1 1/2´´)	4.75 mm (No. 4)	

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (2017). Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates C142. *West Conshohocken, Estados Unidos.*

Se realiza el tamizado húmedo hasta que todo el material de tamaño más pequeño (pasante del tamiz) haya sido eliminado. Se extrae cuidadosamente la masa retenida en cada tamiz y se mete en el horno hasta que la masa húmeda esté seca. Se pesa la masa seca y se anotan los resultados.

Cálculos:

- Porcentaje de terrones de arcilla

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

(Ecuación 2.6.1)

Donde:

P: Porcentaje de terrones de arcilla y partículas desmenuzables.

M: Masa de la muestra de ensayo.

R: Masa de las partículas retenidas en el tamiz.

2.6.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de terrones de arcilla en el agregado fino y grueso.

Tabla 2.6.3: Terrones de arcilla en el agregado fino

TERRONES DE ARCILLA AGREGADO FINO	
Masa Inicial Pasante #4 Retenido #16 (gr)	200
Masa retenida tamiz #20 (gr)	196.4
Porcentaje de arcilla en terrones (%)	1.8

Según la norma MOP – 001-F 2002 acerca de las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, el porcentaje máximo de terrones de arcilla y partículas desmenuzables en el árido fino para el hormigón de cemento portland es del 3%. Por lo tanto, cumple con las especificaciones.

Tabla 2.6.4: Terrones de arcilla en el agregado grueso

TERRONES DE ARCILLA AGREGADO GRUESO						
PASA	**RETIENE**	**MASA ANTES DEL ENSAYO (gr)**	**MASA DESPUES DEL ENSAYO (gr)**	**% Retenido Parcial Agregado**	**% Que pasa el tamiz mas fino despues del ensayo**	**% Parcial de arcilla**
3/8	4	1000	999.6	99.96	0.04	0.04
3/4	3/8	2020	2014.5	99.73	0.27	0.27
1 1/2	3/4	5005	4972	99.34	0.66	0.65
				PORCENTAJE DE ARCILLA EN TERRONES (%)		**0.48**

Según la norma MOP – 001-F 2002 acerca de las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, el porcentaje máximo de terrones de arcilla y partículas desmenuzables en el árido grueso para el hormigón de cemento portland es del 5%. Por lo tanto, cumple con las especificaciones.

2.7. Determinación del Equivalente de Arena (ASTM D 2419)

El objetivo principal de este ensayo es determinar la proporción de arena en el agregado que pasa el tamiz No. 4. Cuanto mayor es el equivalente de arena del agregado, la calidad del agregado es mejor.

El valor de equivalente de arena es importante ya que este factor puede afectar al hormigón, por lo que es necesario calcularlo. Nos da una idea principal de cómo está compuesto el agregado fino (arcillas, arena, etc.).

Para comenzar el ensayo, se pesan dos muestras de material fino (pasante tamiz No. 4) de 120 gr cada una. Se llenan 2 probetas graduadas hasta 10 cm con solución tipo (Cloruro cálcico, glicerina y agua destilada). Vertemos las muestras de material fino en cada probeta y dejamos reposar 10 minutos.

Agitar la probeta desplazándola horizontalmente 90 ciclos durante 30 segundos. Se lava la probeta con solución tipo eliminando material de las paredes interiores de la probeta. Se introduce el tubo irrigador hasta el fondo de la probeta y ascendemos mientras se suelta más solución tipo con el objetivo de que el

material fino atrapado pueda subir. Se deja reposar durante 20 minutos y se miden las lecturas h1 y h2 de las dos muestras con la barra colocada.

Cálculos:

- Equivalente de arena

$$Equivalente\ Arena = \frac{Sedimento\ Nivel\ de\ Arena: Lectura\ B}{Suspensión\ Nivel\ de\ Arcilla: Lectura\ A} * 100$$

(Ecuación 2.7.1)

2.7.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de equivalente de arena.

Tabla 2.7.1: Equivalente de Arena del agregado proveniente de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

EQUIVALENTE DE ARENA		
PROBETA	1	2
NIVEL DE ARCILLA (cm)	4.5	4.6
NIVEL DE ARENA (cm)	3.6	3.7
% EQUIVALENTE DE ARENA	80.0	80.4
PROMEDIO PORCENTAJE EQUIVALENTE DE ARENA	**80.2**	

Según la norma MOP – 001-F 2002 acerca de las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, el porcentaje mínimo de equivalente de arena es del 50%. Por lo tanto, cumple con las especificaciones.

2.8. Determinación de la resistencia al desgaste del agregado por abrasión e impacto en la máquina de los Ángeles. (ASTM C131)

La resistencia a la abrasión se determina por el ensayo de ´´Los Ángeles´´. Esta característica cuyo estudio comenzó para conocer el comportamiento de los áridos granulares en las capas de firmes de carreteras, sometiendo aquellos a un proceso similar al que tienen en la unidad de obra al que van destinados, se ha

generalizado y se utiliza para determinar la calidad de un árido cualquiera que vaya a ser su utilización. (Martín, 1996).

Determinar la resistencia al desgaste es importante, ya que nos muestra un indicador de la calidad del agregado frente al desgaste de la abrasión (desgaste por fricción e impacto). Es un factor influyente en las propiedades físicas del hormigón.

La muestra que se usará para el ensayo debe obtenerse de acuerdo con una de las graduaciones que se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 2.8.1: Gradaciones para muestras de ensayo

Tamaño de las aberturas del tamiz (mm)		Masa por tamaños indicada (g)			
		Gradación			
Pasante	Retenido	A	B	C	D
37.5 mm (1 1/2 in.)	25.0 mm (1 in.)	1250 ± 25	-	-	-
25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (3/4 in.)	1250 ± 25	-	-	-
19.0 mm (3/4 in.)	12.5 mm (1/2 in.)	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
12.5 mm (1/2 in.)	9.5 mm (3/8 in.)	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
9.5 mm (3/8 in.)	6.3 mm (1/4 in.)		-	2500 ± 10	-
6.3 mm (1/4 in.)	4.75 mm (No. 4)		-	2500 ± 10	-
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)		-	-	5000 ± 10
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
Número de esferas		12	11	8	6
Número de revoluciones		500	500	500	500

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (2014). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. West Conshohocken, Estados Unidos.

Una vez obtenida la masa de cada fracción, se debe unir todas las fracciones y se deben colocar dentro de la máquina de los Ángeles junto con el número de esferas. Se enciende la máquina, y luego de 500 revoluciones, se extrae el material junto con las esferas. Se separan las esferas del material y se tamiza el material por el tamiz de 1.70 mm (No. 12), anotando los resultados obtenidos de masa retenida.

Cálculos

- Desgaste del agregado

$$\%\, Desgaste = \frac{B - C}{B} * 100$$

(Ecuación 2.8.1)

Donde:

B: Masa inicial de la muestra de ensayo.

C: Masa de la muestra retenida en el tamiz de 1.70 mm (No. 12), después del ensayo.

2.8.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de desgaste de los agregados en la máquina de los ángeles.

Tabla 2.8.2: Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de los Ángeles

DESGASTE DE LOS AGREGADOS GRUESOS EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES	
GRADACIÓN TIPO A NÚMERO DE ESFERAS 12	
TAMIZ QUE RETIENE	**MASA (gr)**
1´´	1246.00
3/4´´	1255.50
1/2´´	1253.90
3/8´´	1247.40
TOTAL MASA ANTES DEL ENSAYO (gr)	**5002.80**
TOTAL MASA RETENIDA EN TAMIZ 12 DESPUES DEL ENSAYO (gr)	**3295.00**
MASA QUE PASA EL TAMIZ 12 DESPUES DEL ENSAYO (gr)	**1707.80**
% DE DESGASTE DEL AGREGADO	**34.14**

Según la norma MOP – 001-F 2002 sobre las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, el porcentaje máximo de desgaste de los agregados en la máquina de los Ángeles para bases es del 40% y para subbases es del 50%. Por lo tanto, cumple con las especificaciones.

2.9. Desgaste de los agregados ante la acción de sulfato de sodio o sulfato de magnesio (ASTM C88)

El objetivo de este ensayo es estimar la estabilidad a la disgregación del material cuando están sometidos a condiciones extremas en la intemperie. Para lograr esto, se somete a una muestra a varios ciclos de inmersión en sulfato de sodio o sulfato de magnesio, seguidos de varios secados completos en horno, esto

con la finalidad de simular la expansión y contracción que se produce cuando el agua se congela dentro de las partículas del material.

Para la preparación de la muestra, se tiene que identificar tanto el material fino como el grueso. El agregado fino es todo el material que pasa el tamiz 3/8¨ (9.51mm). El material debe estar sin humedad (secado en horno), y este debe ser fraccionado según su tamaño en masas de 100 gr aproximadamente.

Tabla 2.9.1: Fraccionado del agregado fino para ensayo de desgaste ante sulfatos

AGREGADO FINO				
FRACCION	NUMERO DEL TAMIZ			
	PASA		RETIENE	
	Pulg.	mm.	Pulg.	mm.
1	3/8	9.51	No. 4	4.76
2	No. 4	4.76	No. 8	2.38
3	No. 8	2.38	No. 16	1.19
4	No. 16	1.19	No. 30	0.595
5	No. 30	0.595	No. 50	0.297

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (2018). Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate C88. *West Conshohocken, Estados Unidos.*

Para el agregado grueso, debemos tomar en consideración todo el material que retenga el tamiz No. 4 (4.75mm). El procedimiento es el mismo que el material fino, pero con masas diferentes como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 2.9.2: Fraccionado del agregado grueso para ensayo de desgaste ante sulfatos

AGREGADO GRUESO					
FRACCION	NUMERO DEL TAMIZ				MASA MINIMA DE LA MUESTRA g.
	PASA		RETIENE		
	Pulg.	mm.	Pulg.	mm.	
1	3/8	9.51	No. 4	4.76	300 ± 5
	3/4	19	3/8	9.5	1.000 ±10
2	1 ½	38.1	3/4	19	1.500 ±50
	¾	19	½	12.7	670 ±10
	½	12.7	3/8	9.51	330 ± 5
3	2 ½	64	1 ½	38.1	5.000 ±300
	1 ½	38.1	1	25.4	1000 ±50
	1	25.4	3/4	19	500 ±30
4	3	75	2 ½	64	7 000 ± 1 000
	2 ½	64	2	50.8	3 000 ±300
	2	50.8	1 1/2	38.1	2 000 ±200

Fuente: ASTM INTERNATIONAL. (2018). Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate C88. *West Conshohocken, Estados Unidos.*

Se sumergen las muestras del agregado en la solución de sulfato de sodio o de magnesio por un periodo entre 16 y 18 horas, se sacan las muestras de la solución y se seca al horno. Hay que tener cuidado que la muestra no permanezca mucho tiempo en el horno, porque pueden producirse esfuerzos excesivos. Deben realizarse 5 ciclos de inmersión y secado, para después lavar las muestras, secar y tamizar para obtener las masas retenidas y el porcentaje de afectación del sulfato.

Hay que recordar que cada fracción de material (1 o más tamaños de materiales), después de los cinco ciclos de inmersión y secado, se los debe pasar por diferentes tamices, dependiendo del tipo de fracción. Se tamizan las fracciones independientemente, por el tamiz más fino de las mismas; en el caso del agregado fino. Para el grueso, la fracción 1 por el tamiz # 5, la 2 por el tamiz 5/16´´, la 3 por el tamiz 5/8´´, y la 4 por el tamiz de 1 ¼´´.

Cálculos:

- Porcentaje retenido parcial

$$\%\ Retenido\ parcial = \frac{Masa\ retenida\ parcial}{Masa\ total\ de\ la\ muestra} * 100$$

(Ecuación 2.9.1)

- Porcentaje que pasa el tamiz (calculado para cada fracción)

$$\%\ Que\ Pasa = \frac{Masa\ inicial - Masa\ retenida\ después\ del\ ensayo}{Masa\ Inicial} * 100$$

(Ecuación 2.9.2)

- Porcentaje de desgaste parcial del agregado

$$\%\ Desgaste\ Parcial = \frac{\%\ Retenido\ Parcial * \%\ Que\ Pasa}{100}$$

(Ecuación 2.9.3)

El porcentaje de desgaste total del agregado será la suma de los porcentajes de desgaste parciales.

2.9.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de desgaste ante los sulfatos del agregado grueso y fino.

- Agregado grueso

Tabla 2.9.3: Fraccionado del agregado grueso para ensayo de desgaste ante sulfatos

DESGASTE A LOS SULFATOS AGREGADO GRUESO				
FRACCION	TAMIZ QUE PASA	TAMIZ QUE RETIENE	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	MASA DE LAS FRACCIONES DESPUÉS DEL ENSAYO
4	2	1 1/2	2035	2033.6
3	1 1/2	1	986.9	977.7
3	1	3/4	493	476.6
2	3/4	1/2	657	626.1
2	1/2	3/8	320.1	272.3
1	3/8	4	296.2	272.2

Tabla 2.9.4: Cálculo del porcentaje de desgaste ante sulfatos en el agregado grueso

FRACCION	MASA TOTAL DE LA MUESTRA	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA INICIAL	MASA RETENIDA DESPUES DEL ENSAYO	% QUE PASA	% RETENIDO PARCIAL	% DESGASTE PARCIAL
4	2035.00	2033.60	2035.00	2033.60	0.07	99.93	0.07
3	1479.90	1454.30	1479.90	1454.30	1.73	98.27	1.70
2	977.10	898.40	977.10	898.40	8.05	91.95	7.41
1	296.20	272.20	296.20	272.20	8.10	91.90	7.45
						% DESGASTE	16.62

Según las especificaciones del ministerio de obras públicas en la norma MOP-001-F2002, en la sección 814-2.02, el porcentaje máximo de resistencia a la disgregación (pérdida de masa después de 5 ciclos de inmersión y secado) para el agregado grueso es del 12%, por lo que no cumpliría con los requerimientos mínimos.

- Agregado Fino

Tabla 2.9.5: Fraccionado del agregado fino para ensayo de desgaste ante sulfatos

DESGASTE A LOS SULFATOS AGREGADO FINO				
FRACCION	TAMIZ QUE PASA	TAMIZ QUE RETIENE	MASA DE LAS FRACCIONES ANTES DEL ENSAYO	MASA DE LAS FRACCIONES DESPUÉS DEL ENSAYO
2	4	8	94	91.3
3	8	16	92.5	82.4
4	16	30	94.6	89.9
5	30	50	92.1	88

Tabla 2.9.6: Cálculo del porcentaje de desgaste ante sulfatos en el agregado fino

FRACCION	MASA TOTAL DE LA MUESTRA	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA INICIAL	MASA RETENIDA DESPUES DEL ENSAYO	% QUE PASA	% RETENIDO PARCIAL	% DESGASTE PARCIAL
2	94.00	91.30	94.00	91.30	2.87	97.13	2.79
3	92.50	82.40	92.50	82.40	10.92	89.08	9.73
4	94.60	89.90	94.60	89.90	4.97	95.03	4.72
5	92.10	88.00	92.10	88.00	4.45	95.55	4.25
						% DESGASTE	21.49

Según las especificaciones del ministerio de obras públicas en la norma MOP-001-F2002, en la sección 814-2.02, el porcentaje máximo de resistencia a la disgregación (pérdida de masa después de 5 ciclos de inmersión y secado) para el agregado fino es del 12%, por lo que tampoco cumpliría con los requerimientos mínimos.

3. CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.)

3.1. Definición

El ensayo más representativo para comprobar las características mecánicas de un suelo es el ensayo C.B.R. Fue creado y desarrollado antes de la segunda guerra mundial por el Departamento de transportes de California con el propósito de determinar un índice de resistencia de los suelos, denominado el valor de relación de soporte.

Este ensayo mide la resistencia al corte del suelo, bajo condiciones tanto de humedad y de densidad controladas. Este índice se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante y de las capas de base, subbase y de afirmado. (ASTM INTERNATIONAL, 2016).

El procedimiento del ensayo consta de 6 fases presentadas a continuación:

- Determinación de humedad óptima y densidad máxima de las muestras (Ensayo Proctor Modificado).
- Preparación de la muestra a ensayar

- Elaboración de especímenes
- Inmersión de los especímenes en agua
- Penetración del pistón.
- Cálculos y presentación de resultados.

El ensayo consiste en someter a una muestra representativa de la explanada, compactada y saturada de agua, a un ensayo de penetración o punzonamiento con un pistón cilíndrico, en el que se determina el índice C.B.R. A mayor índice C.B.R, mayor es la capacidad de soporte de la explanada. (Reed Business Information, 2006)

El C.B.R, se obtiene de la relación de la carga unitaria (lbs/pulg2.) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (19.4 cm2) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (lbs/pulg2.) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. (Chang, 2010)

La importancia de la utilización del índice C.B.R, es debido a que es la base en el diseño de pavimentos. Con este índice, podríamos determinar las dimensiones de las diferentes capas que va a tener la estructura del pavimento para que nos resista las diferentes cargas dinámicas a las que este va a estar sometido.

La expresión con la que se obtiene el índice de C.B.R. es la siguiente:

$$CBR = \frac{Carga\ Unitaria\ del\ ensayo}{Carga\ Unitaria\ patrón} * 100$$

(Ecuación 3.1.1)

Como se explicó anteriormente, el ensayo de C.B.R. se debe realizar conociendo la densidad máxima y la humedad óptima del material. Para encontrar estos dos factores fundamentales en la construcción de caminos, es obligatorio realizar el ensayo de Proctor Modificado, propuesto por la norma ASTM D1557.

3.2. Proctor Modificado (ASTM D1557)

El suelo colocado como relleno ingenieril (terraplenes, plataformas para cimentaciones, bases de caminos) se compactan a un estado denso para obtener propiedades ingenieriles satisfactorias como resistencia al corte, compresibilidad, o permeabilidad. Además, los suelos de cimentación frecuentemente se compactan para mejorar sus propiedades ingenieriles. (ASTM INTERNATIONAL, 2012).

Un material, que este bajo condiciones de humedad óptimas, tiene una mejor compactación, es decir, un mejor acomodo de sus partículas.

Para la preparación de la muestra, se debe realizar la técnica de reemplazo, en él se sustituye el material retenido en la malla de ¾ de pulgada, por material más fino, para poder realizar un correcto compactado con las herramientas disponibles en el laboratorio, ya que muy pocos laboratorios cuentan con instalaciones y equipos para realizar con todos los tamaños de agregado.

Se crearon 4 fundas de 5.5 Kg cada una por cada tipo de base y de subbase, para ensayarlas con diferente humedad (4%, 6%, 8% y 10%). Y se midió su correspondiente densidad, conociendo el volumen del cilindro de ensayo.

3.2.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de Proctor Modificado para las diferentes Bases y Subbases conformadas con los agregados de la Cantera San Joaquín.

- **BASE CLASE 1B Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 3.2.1: Proctor Modificado BASE CLASE 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

NÚMERO DE MOLDE	1		2		3		4	
Vol. molde, cm³	2,112		2,112		2,112		2,112	
Peso molde + suelo húmedo, g	10,433		10,599		10,702		10,705	
Peso molde, g	6,402		6,402		6,402		6,402	
Peso suelo húmedo, g	4,031		4,197		4,300		4,303	
DENSIDAD HUMEDA, g/cm³	1.909		1.987		2.036		2.038	
Peso cápsula, g	33.73	23.09	49.25	22.58	31.46	30.78	33.53	33.16
Peso cap. + suelo húmedo, g	147.79	152.39	175.89	158.73	215.57	207.99	161.95	181.21
Peso cap. + suelo seco, g	143.09	147.50	168.45	151.33	201.87	194.51	150.49	167.98
Contenido de Humedad, %	4.30	3.93	6.24	5.75	8.04	8.23	9.80	9.81
HUMEDAD PROMEDIO, %	4.11		5.99		8.14		9.81	
DENSIDAD SECA, g/cm³	1.833		1.875		1.883		1.856	
Densidad seca máxima = 1.885 g/cm³					% Humedad Óptima = 7.37			

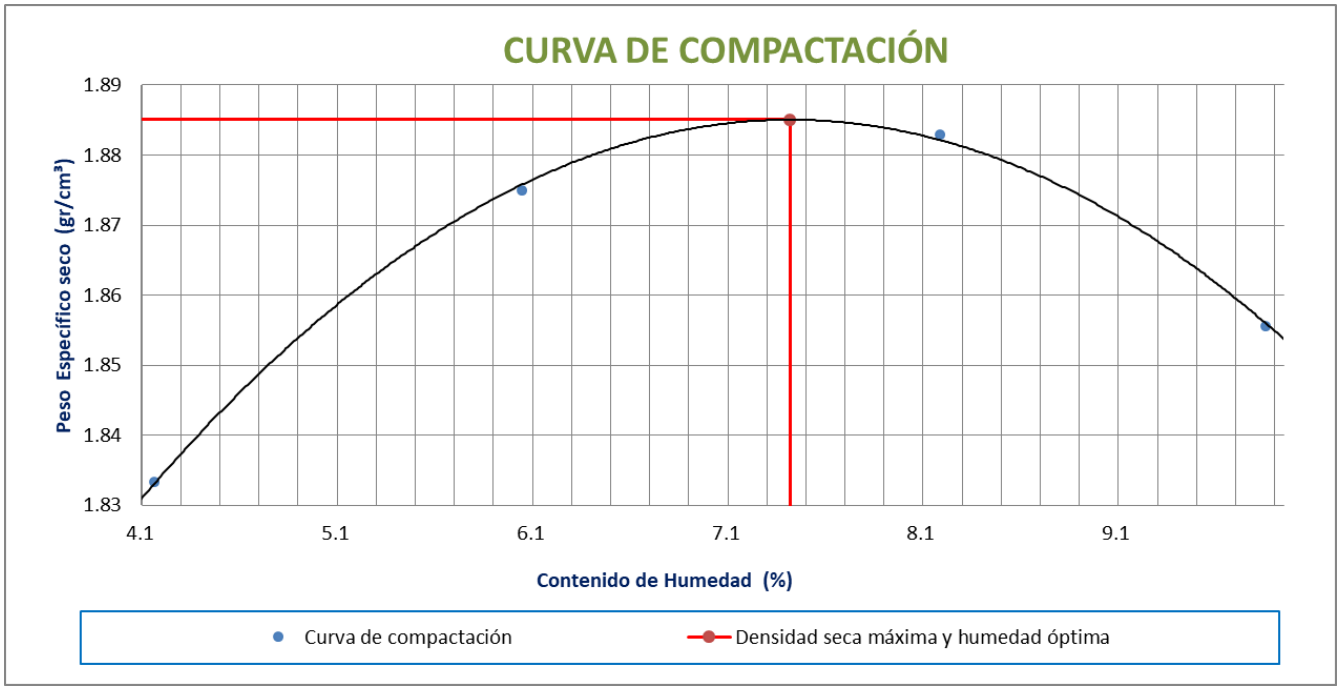


Ilustración 3.2.1: Curva de Compactación BASE CLASE 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

- **BASE CLASE 2 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 3.2.2: Proctor Modificado BASE CLASE 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

NÚMERO DE MOLDE	1		2		3		4	
Vol. molde, cm³	2,112		2,112		2,112		2,112	
Peso molde + suelo húmedo, g	10,446		10,580		10,640		10,658	
Peso molde, g	6,402		6,402		6,402		6,402	
Peso suelo húmedo, g	4,044		4,178		4,238		4,256	
DENSIDAD HUMEDA, g/cm³	1.915		1.978		2.007		2.015	
Peso cápsula, g	29.67	31.67	49.33	28.93	32.95	22.89	32.92	30.97
Peso cap. + suelo húmedo, g	213.46	239.29	128.00	207.96	157.21	145.50	256.24	239.14
Peso cap. + suelo seco, g	205.25	231.08	123.36	197.17	148.21	136.48	238.60	220.29
Contenido de Humedad, %	4.68	4.12	6.27	6.41	7.81	7.94	8.58	9.96
HUMEDAD PROMEDIO, %	4.40		6.34		7.87		9.27	
DENSIDAD SECA, g/cm³	1.834		1.860		1.860		1.844	
Densidad seca máxima = 1.863 g/cm³					% Humedad Óptima = 7.10			

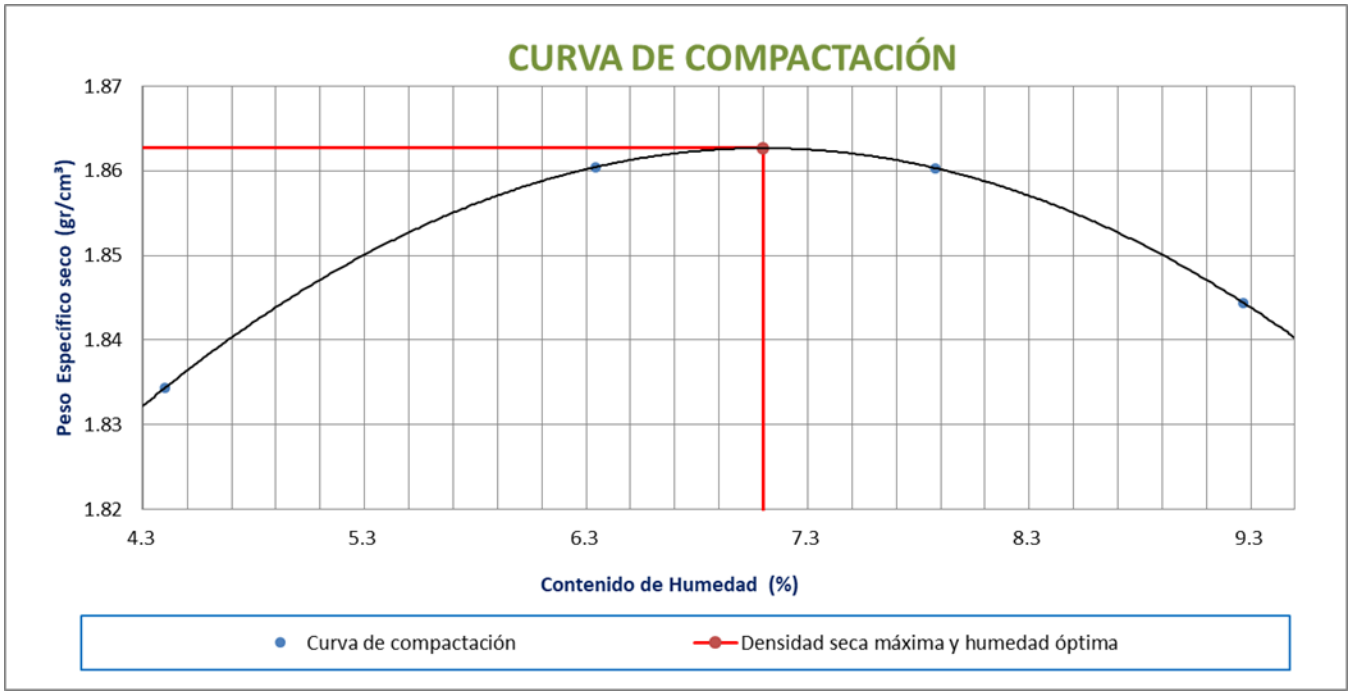


Ilustración 3.2.2: Curva de Compactación BASE CLASE 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

- **BASE CLASE 3 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 3.2.3: Proctor Modificado BASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

NÚMERO DE MOLDE	1		2		3		4	
Vol. molde, cm³	2,112		2,112		2,112		2,112	
Peso molde + suelo húmedo, g	10,395		10,512		10,686		10,750	
Peso molde, g	6,402		6,402		6,402		6,402	
Peso suelo húmedo, g	3,993		4,110		4,284		4,348	
DENSIDAD HUMEDA, g/cm³	1.891		1.946		2.029		2.059	
Peso cápsula, g	23.12	33.53	22.90	22.61	32.97	33.74	29.89	28.97
Peso cap. + suelo húmedo, g	128.89	130.07	117.58	135.01	136.93	121.14	211.22	214.35
Peso cap. + suelo seco, g	126.70	128.11	113.98	130.55	129.21	114.68	194.60	197.42
Contenido de Humedad, %	2.11	2.07	3.95	4.13	8.02	7.98	10.09	10.05
HUMEDAD PROMEDIO, %	2.09		4.04		8.00		10.07	
DENSIDAD SECA, g/cm³	1.852		1.871		1.878		1.871	
Densidad seca máxima = 1.880 g/cm³					% Humedad Óptima = 7.08			

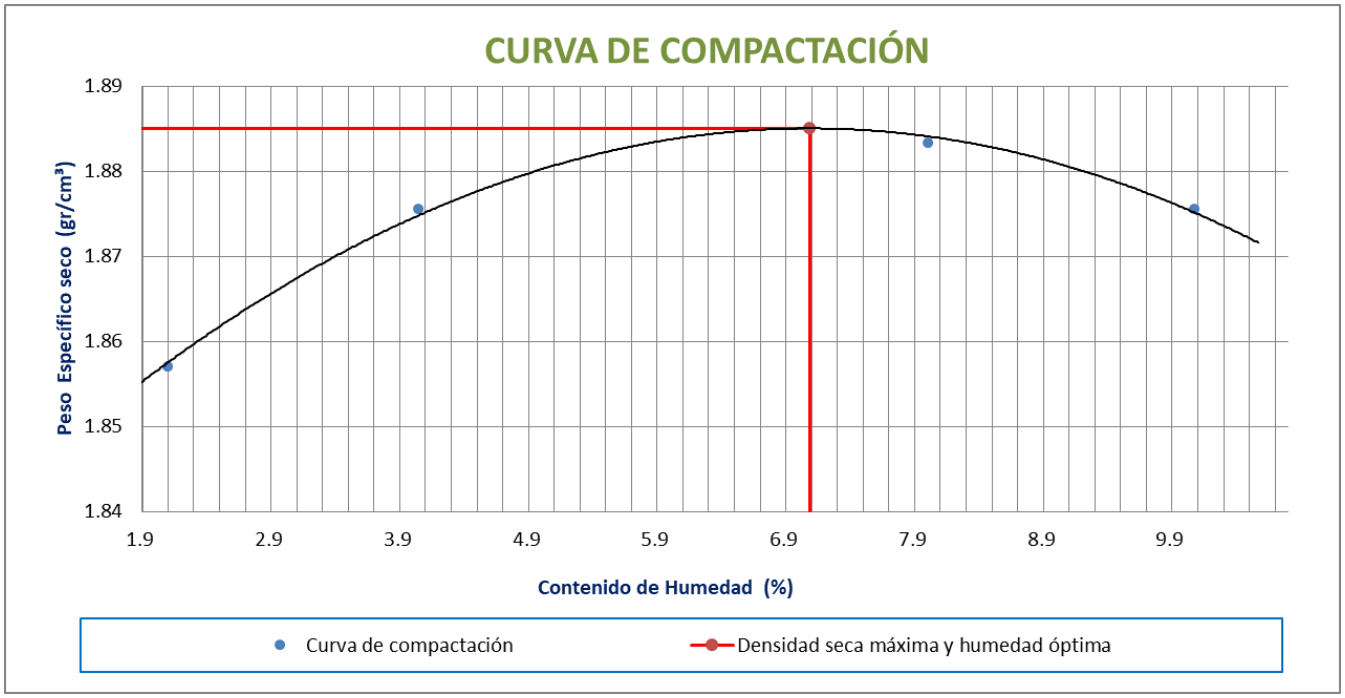


Ilustración 3.2.3: Curva de Compactación BASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

- **BASE CLASE 4 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 3.2.4: Proctor Modificado BASE CLASE 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

NÚMERO DE MOLDE	1		2		3		4	
Vol. molde, cm³	2,112		2,112		2,112		2,112	
Peso molde + suelo húmedo, g	10,500		10,602		10,660		10,680	
Peso molde, g	6,402		6,402		6,402		6,402	
Peso suelo húmedo, g	4,098		4,200		4,258		4,278	
DENSIDAD HUMEDA, g/cm³	1.941		1.989		2.016		2.026	
Peso cápsula, g	33.05	29.87	69.97	22.64	32.15	48.28	28.89	39.51
Peso cap. + suelo húmedo, g	234.79	225.95	249.94	124.49	218.41	169.78	194.52	148.15
Peso cap. + suelo seco, g	226.18	218.01	238.75	118.56	204.05	161.02	179.89	138.89
Contenido de Humedad, %	4.46	4.22	6.63	6.18	8.35	7.77	9.69	9.32
HUMEDAD PROMEDIO, %	4.34		6.41		8.06		9.50	
DENSIDAD SECA, g/cm³	1.860		1.869		1.866		1.850	
Densidad seca máxima = 1.870 g/cm³					% Humedad Óptima = 6.52			

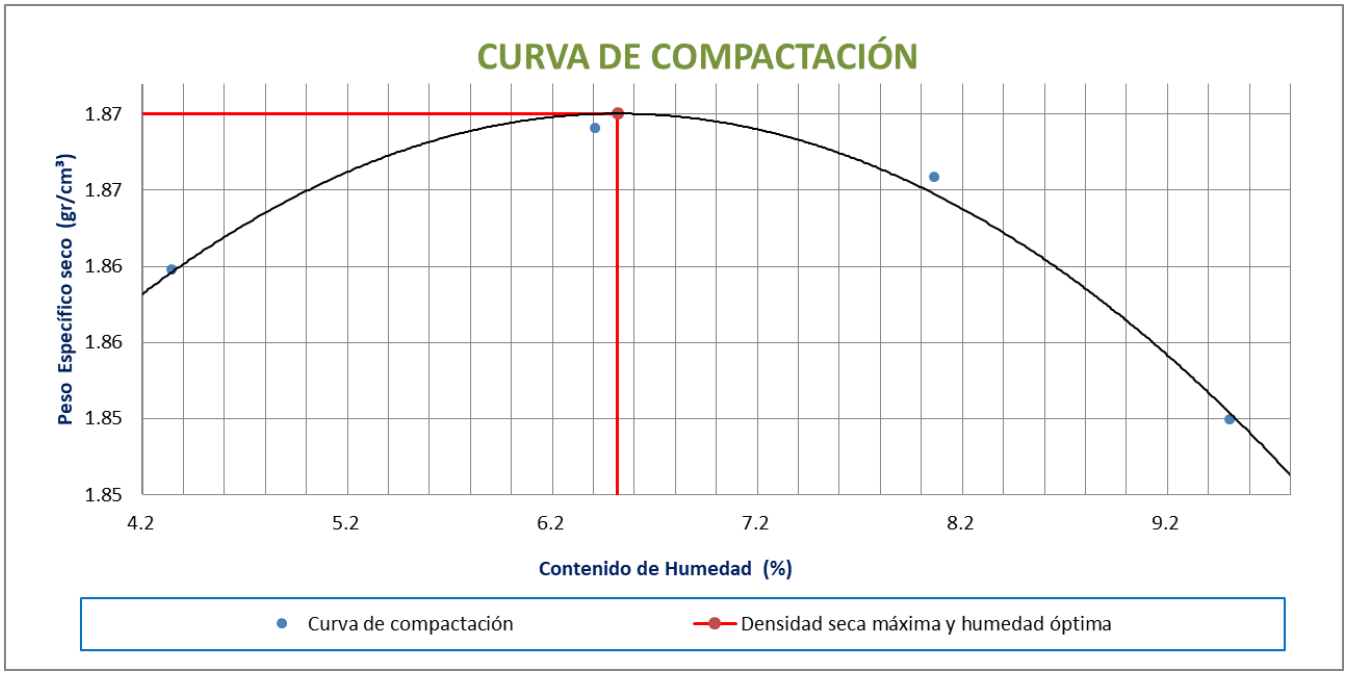


Ilustración 3.2.4: Curva de Compactación BASE CLASE 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

- **SUBBASE CLASE 1 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 3.2.5: Proctor Modificado SUBBASE CLASE 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

NÚMERO DE MOLDE	1		2		3		4	
Vol. molde, cm³	2,112		2,112		2,112		2,112	
Peso molde + suelo húmedo, g	10,527		10,635		10,706		10,761	
Peso molde, g	6,402		6,402		6,402		6,402	
Peso suelo húmedo, g	4,125		4,233		4,304		4,359	
DENSIDAD HUMEDA, g/cm³	1.953		2.004		2.038		2.064	
Peso cápsula, g	23.12	50.67	33.53	32.66	65.79	49.26	29.68	31.69
Peso cap. + suelo húmedo, g	163.38	157.94	120.08	132.79	209.53	147.71	170.15	141.57
Peso cap. + suelo seco, g	156.00	154.87	115.20	126.57	198.28	140.87	153.30	133.43
Contenido de Humedad, %	5.55	2.95	5.98	6.62	8.49	7.47	13.63	8.00
HUMEDAD PROMEDIO, %	4.25		6.30		7.98		10.82	
DENSIDAD SECA, g/cm³	1.874		1.886		1.887		1.863	
Densidad seca máxima = 1.888 g/cm³					% Humedad Óptima = 7.09			

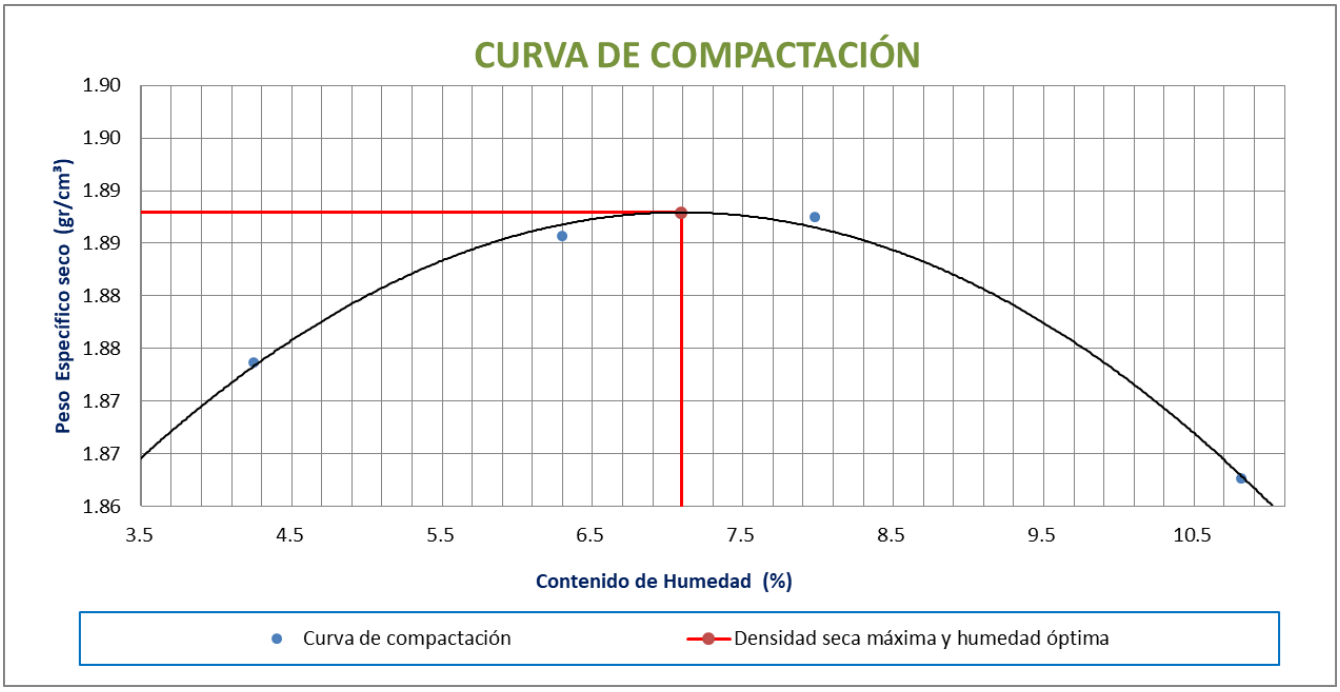


Ilustración 3.2.5: Curva de Compactación SUBBASE CLASE 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

- **SUBBASE CLASE 2 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 3.2.6: Proctor Modificado SUBBASE CLASE 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

NÚMERO DE MOLDE	1		2		3		4	
Vol. molde, cm³	2,114		2,114		2,114		2,114	
Peso molde + suelo húmedo, g	10,512		10,660		10,692		10,730	
Peso molde, g	6,402		6,402		6,402		6,402	
Peso suelo húmedo, g	4,110		4,258		4,290		4,328	
DENSIDAD HUMEDA, g/cm³	1.944		2.014		2.029		2.047	
Peso cápsula, g	32.92	30.97	30.78	33.05	31.45	69.98	50.64	65.78
Peso cap. + suelo húmedo, g	160.95	122.77	191.39	166.70	200.09	195.76	146.11	182.16
Peso cap. + suelo seco, g	156.03	119.25	180.76	158.52	187.94	186.49	137.51	171.52
Contenido de Humedad, %	4.00	3.99	7.09	6.52	7.76	7.96	9.90	10.06
HUMEDAD PROMEDIO, %	3.99		6.80		7.86		9.98	
DENSIDAD SECA, g/cm³	1.870		1.886		1.881		1.862	
Densidad seca máxima = 1.885 g/cm³					% Humedad Óptima = 6.67			

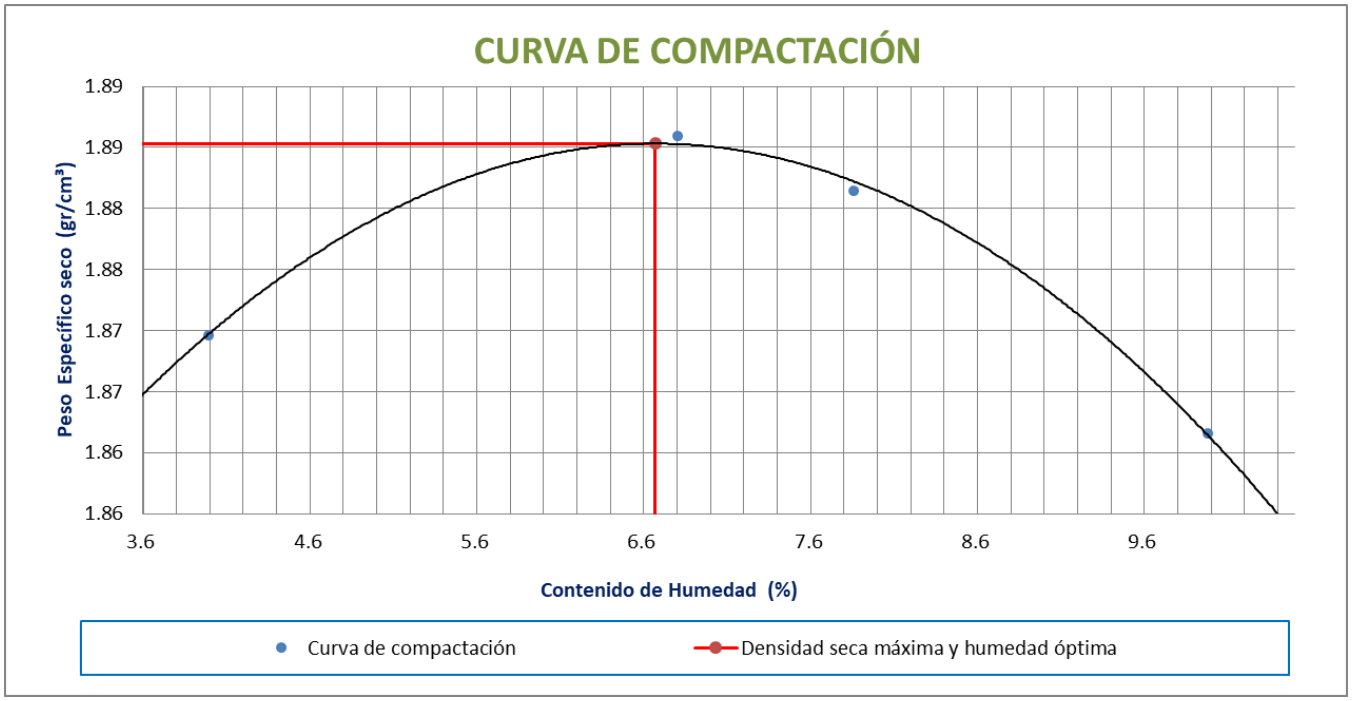


Ilustración 3.2.6: Curva de Compactación SUBBASE CLASE 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

- **SUBBASE CLASE 3 Cantera San Joaquín (Cotopaxi)**

Tabla 3.2.7: Proctor Modificado SUBBASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

NÚMERO DE MOLDE	1		2		3		4	
Vol. molde, cm³	2,112		2,112		2,112		2,112	
Peso molde + suelo húmedo, g	10,228		10,401		10,464		10,352	
Peso molde, g	6,187		6,187		6,187		6,187	
Peso suelo húmedo, g	4,041		4,214		4,277		4,165	
DENSIDAD HUMEDA, g/cm³	1.913		1.995		2.025		1.972	
Peso cápsula, g	49.84	22.53	22.60	33.74	22.68	22.89	72.74	76.76
Peso cap. + suelo húmedo, g	153.42	127.50	91.49	155.72	106.14	111.54	264.76	270.31
Peso cap. + suelo seco, g	149.14	123.29	87.58	148.72	100.52	105.24	247.00	252.60
Contenido de Humedad, %	4.31	4.18	6.02	6.09	7.22	7.65	10.19	10.07
HUMEDAD PROMEDIO, %	4.24		6.05		7.44		10.13	
DENSIDAD SECA, g/cm³	1.835		1.881		1.885		1.791	
Densidad seca máxima = 1.887 g/cm³					% Humedad Óptima = 6.74			

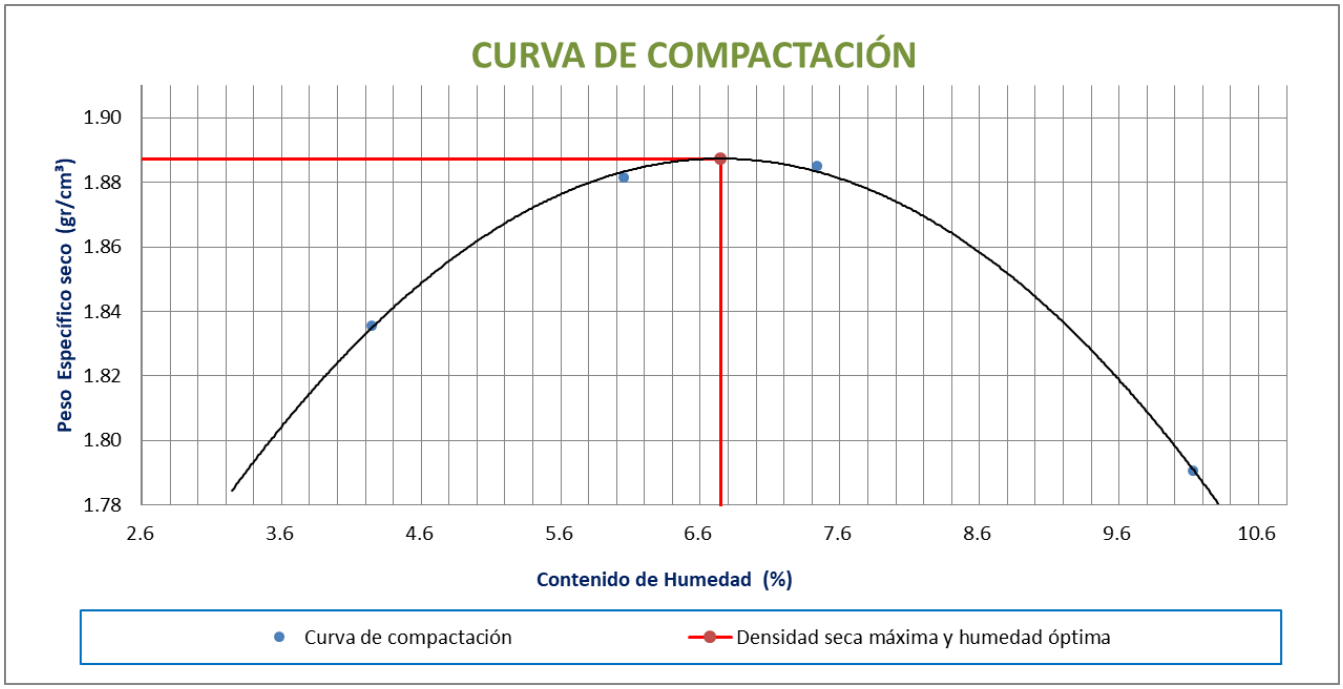


Ilustración 3.2.7: Curva de Compactación SUBBASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

3.3. Ensayo C.B.R. de laboratorio (ASTM D1883)

Para calcular el índice C.B.R. se procede como se indica a continuación:

Se dibuja una curva que relacione las presiones (ordenadas) y las penetraciones (abscisas), y se observa si esta curva presenta un punto de inflexión. Si no presenta punto de inflexión se toman los valores correspondientes a 2,54 y 5,08 mm (0,1" y 0,2") de penetración. Si la curva presenta un punto de inflexión, la tangente en ese punto cortará el eje de abscisas en otro punto (o corregido), que se toma como nuevo origen para la determinación de las presiones correspondientes a 2,54 y 5,08 mm. De la curva corregida tómense los valores de esfuerzo penetración para los valores de 2,54 mm y 5,08 mm y calcúlense los valores de relación de soporte correspondientes, dividiendo los esfuerzos corregidos por los esfuerzos de referencia 6,9 MPa (10001b/plg2) y 10,3 MPa (1500 lb/plg2) respectivamente, y multiplíquese por 100. La relación de soporte reportada para el suelo es normalmente la de 2,54 mm (0,1") de penetración. Cuando la relación a 5,08 mm (0,2") de penetración resulta ser mucho más mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado muy cercano, úsese la relación de soporte para 5,08 mm (0,2") de penetración. (Laboratorio de Mecánica de Suelos Universidad Nacional de Ingeniería, 2006).

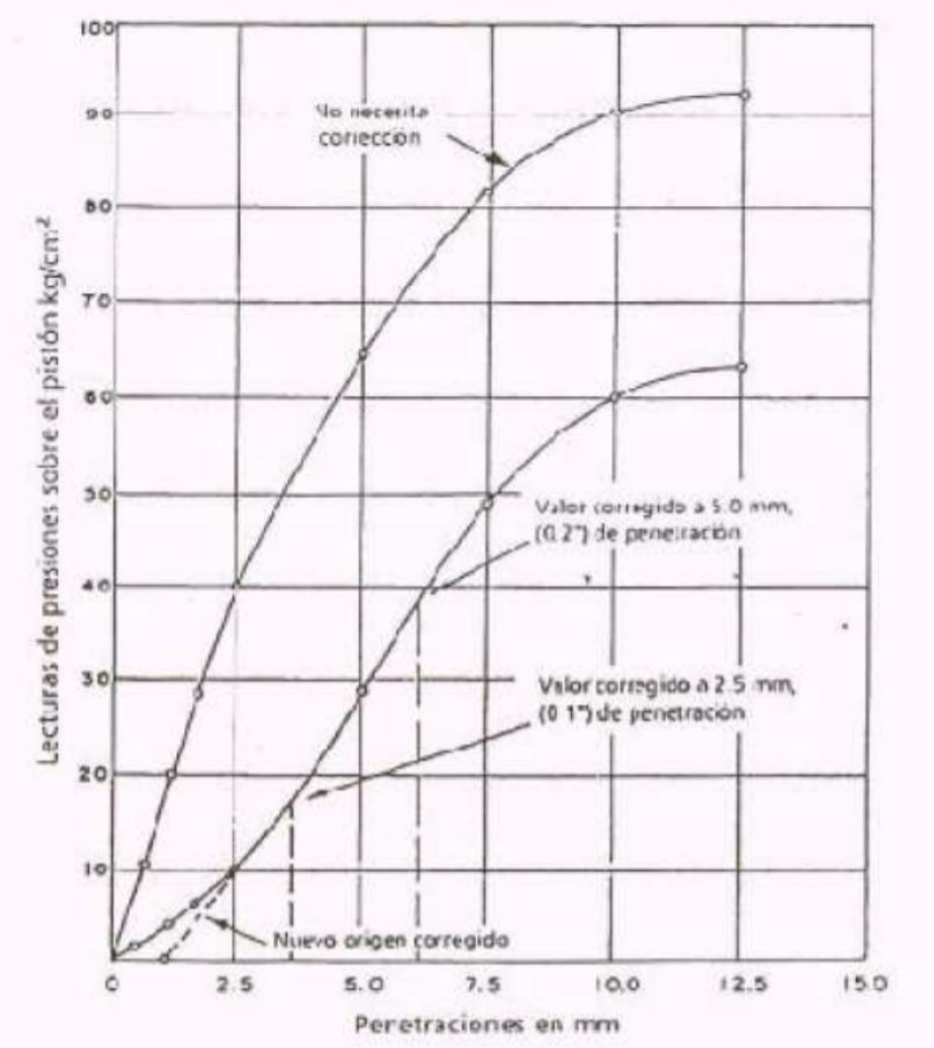


Ilustración 3.3.1: Curva de Compactación SUBBASE CLASE 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos Universidad Nacional de Ingeniería. (2006). CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) (Vol. 1). (U. N. Ingeniería, Ed.) Lima, Perú.

3.3.1. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de C.B.R. para todas las bases y subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi).

- **BASE CLASE 1B**

Tabla 3.3.1: Datos C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. BASE CLASE 1 B						
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	**7,37**		**VOL. MOLDE (CM3)**		**2124**	
DATOS DE MOLDEO						
	56 GOLPES		**25 GOLPES**		**12 GOLPES**	
Identificación molde	M7		Z7		001	
Peso molde (g)	8066		6701		7007	
Peso molde + suelo húmedo (g)	12360		10823		11018	
Identificación cápsula	H6	H28	H21	H29	H7	H22
Peso cápsula (g)	29,67	31,45	33,03	32,13	28,95	30,96
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	221,46	252,74	237,12	246,62	228,12	246,67
Peso cápsula + suelo seco (g)	208,49	237,78	223,21	231,08	213,70	231,85
Densidad seca (gr/cm3)	1,885		1,804		1,755	
Porcentaje de Humedad (%)	7,25	7,25	7,31	7,81	7,81	7,38
Porcentaje de humedad promedio (%)	7,25		7,56		7,59	
Diferencia con humedad óptima	0,12		0,19		0,22	
Densidad seca máxima (gr/cm3)	**1,885**					
DATOS DE EXPANSIÓN						
FECHA	**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**	
19-mar	210		210		210	
19-mar	207		208		209	
21-mar	205		205		206	
22-mar	204		204		206	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Peso molde + suelo húmedo (g)	12500		10993		11249	
Identificación cápsula	C614	C65	MS2	MS06	M531	13
Peso cápsula (g)	50,41	49,63	65,79	33,17	67,3	23,09
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	178,28	189,46	282,83	189,29	304,24	181,48
Peso cápsula + suelo seco (g)	167,41	177,59	262,47	175,01	278,33	163,41
Porcentaje de Humedad (%)	9,29	9,28	10,35	10,07	12,28	12,88
Porcentaje de humedad promedio (%)	9,28		10,21		12,58	

Tabla 3.3.2: Datos penetración C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE LA PENETRACIÓN					
Tiempo	Penetración		Lectura Anillo (56 golpes)	Lectura Anillo (25 golpes)	Lectura Anillo (12 golpes)
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	130	98	65
1	1,27	0,050	290	210	154
1,5	1,9	0,075	496	437	320
2	2,54	0,100	740	650	570
2,5	3,18	0,125	995	-	-
3	3,81	0,150	1260	-	-
3,5	4,45	0,175	1503	-	-
4	5,08	0,200	1698	1460	1245
4,5	5,71	0,225	1842	-	-
5	6,35	0,250	2078	1836	1610
5,5	6,98	0,275	2236	2008	-
6	7,62	0,300	2435	2211	1880
6,5	8,25	0,325	-	2291	2000
7	8,88	0,350	-	-	2111
7,5	9,52	0,375	-	-	2238
8	10,16	0,400	-	-	2306

Tabla 3.3.3: Datos de presión C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE PRESIÓN Y PENETRACIÓN					
Diámetro Pistón (plg)		1,964			
Área Pistón (plg2)		3,029			
56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES	
Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)
0	0	0	0	0	0,000
39,10301666	0,025	29,47765871	0,025	19,55150833	0,025
87,2298064	0,050	63,16641153	0,050	46,32203512	0,050
149,1930482	0,075	131,4462945	0,075	96,25357947	0,075
222,5864025	0,100	195,5150833	0,100	171,4516884	0,100
299,2884737	0,125	439,1569563	0,200	374,4865826	0,200
378,9984692	0,150	552,2549122	0,250	484,2758217	0,250
452,0910311	0,175	603,9912112	0,275	565,4897794	0,300
510,7455561	0,200	665,0520757	0,300	601,5848717	0,325
554,0596668	0,225	689,1154705	0,325	634,9728321	0,350
625,0466817	0,250	-	-	673,1734714	0,375
672,5718866	0,275	-	-	693,6273571	0,400
732,4295813	0,300	-	-	-	-

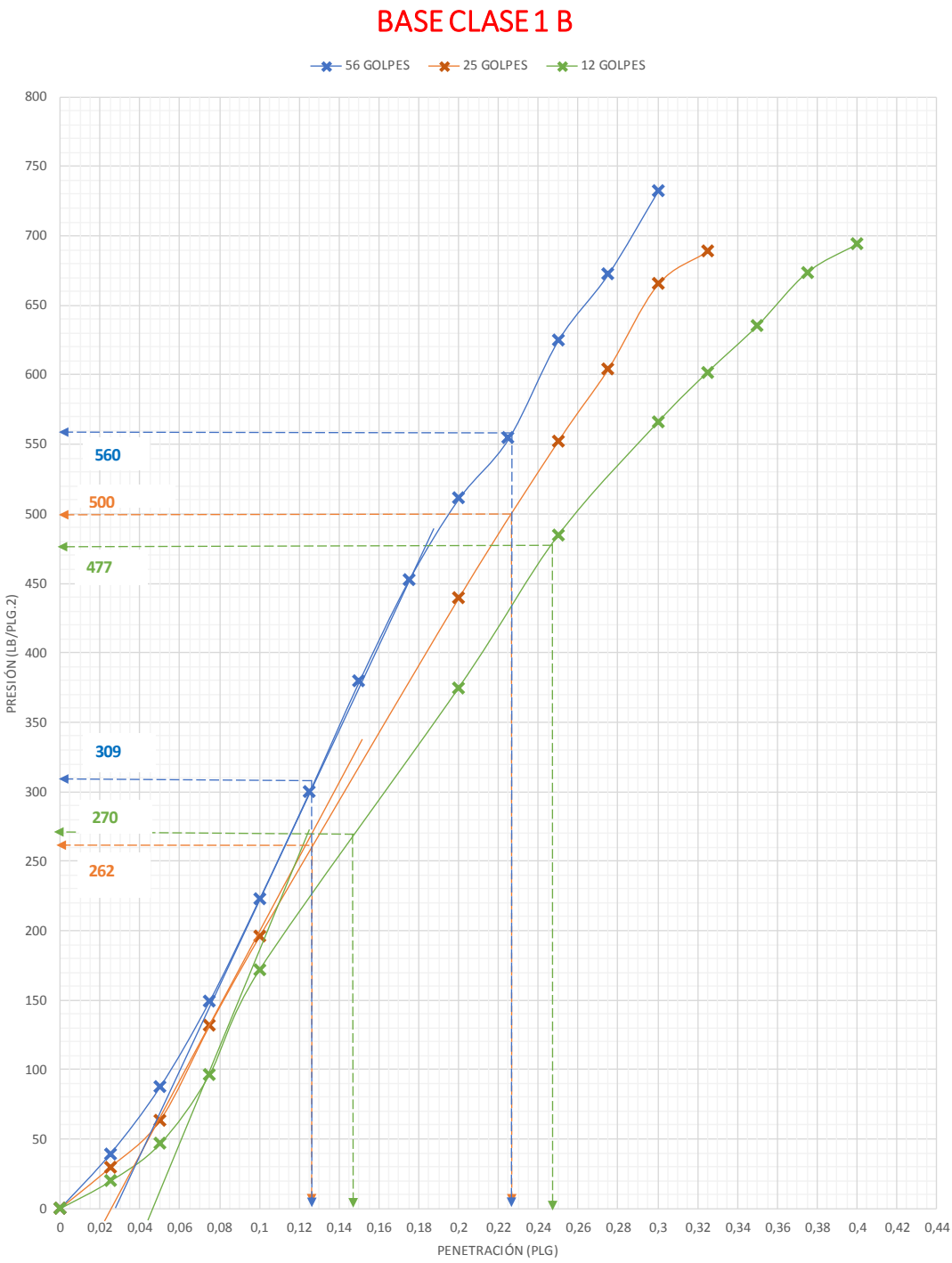


Ilustración 3.3.2: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

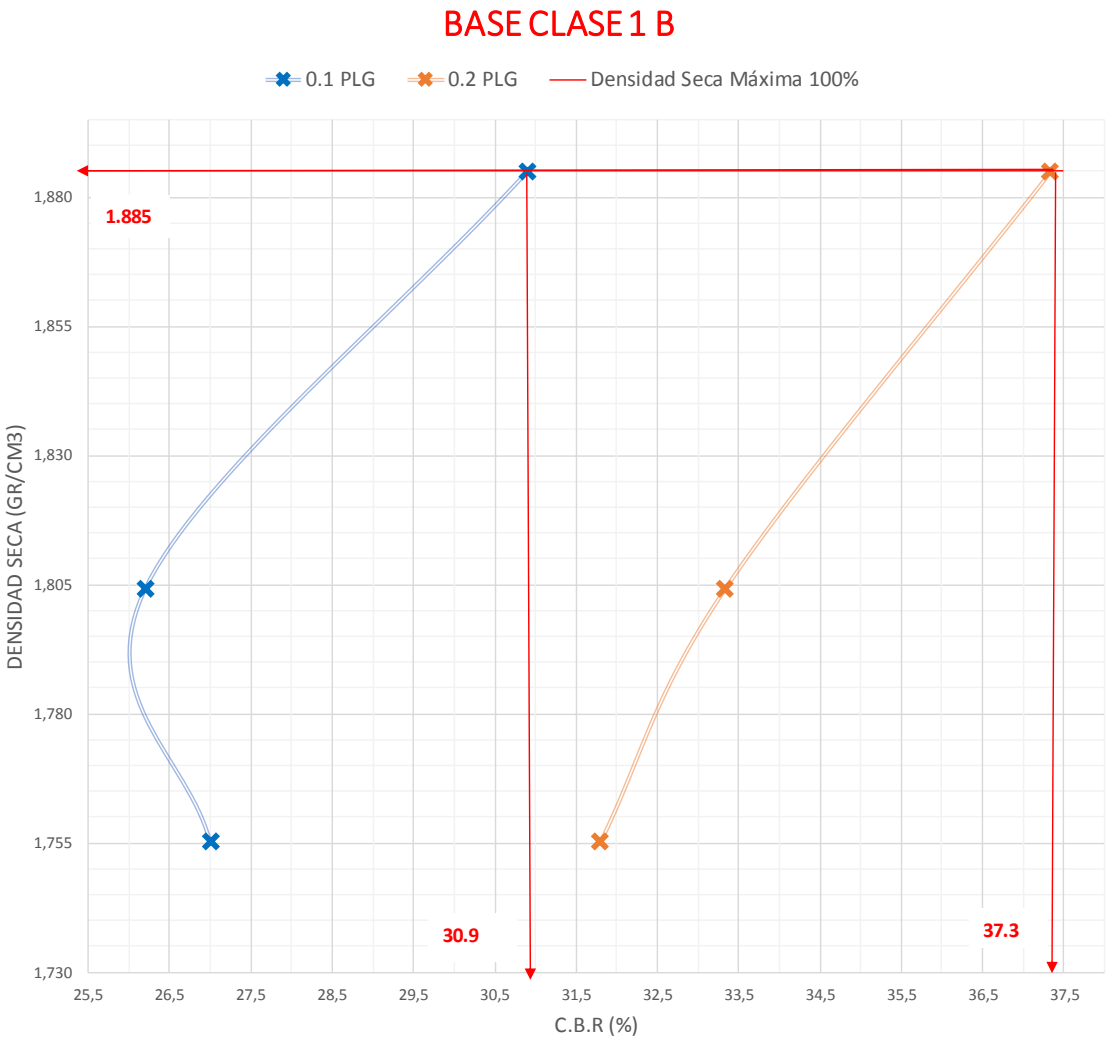


Ilustración 3.3.3: C.B.R. vs Densidad seca. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 3.3.4: C.B.R. Base Clase 1-B. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. (100%)			
GOLPES	**0.1 PLG**	**0.2 PLG**	**Densidad seca (gr/cm3)**
56	30,9	37,3	1,885
25	26,2	33,3	1,804
12	27,0	31,8	1,755
C.B.R. (100%)	**30,90**	**37,30**	

- **BASE CLASE 2**

Tabla 3.3.5: Datos C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. BASE CLASE 2						
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	**7.1**		**VOL. MOLDE (CM3)**		**2124**	
DATOS DE MOLDEO						
	56 GOLPES		**25 GOLPES**		**12 GOLPES**	
Identificación molde	29		4		18	
Peso molde (g)	6217		6149		7165	
Peso molde + suelo húmedo (g)	10459		10211		11105	
Identificación cápsula	MS15	M531	MS18	MS12	MS1	MS13X
Peso cápsula (g)	66.37	67.30	65.81	69.96	65.30	66.42
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	262.92	240.19	260.51	276.55	260.11	269.01
Peso cápsula + suelo seco (g)	249.94	228.26	247.53	263.41	247.05	255.01
Densidad seca (gr/cm3)	1.862		1.788		1.729	
Porcentaje de Humedad (%)	7.07	7.41	7.14	6.79	7.19	7.42
Porcentaje de humedad promedio (%)	7.24		6.97		7.30	
Diferencia con humedad óptima	0.14		0.13		0.20	
Densidad seca máxima (gr/cm3)	**1.863**					
DATOS DE EXPANSIÓN						
FECHA	**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**	
12-mar	200		200		200	
12-mar	186		179		180	
13-mar	185		178		180	
14-mar	185		177		179	
18-mar	179		170		174	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Peso molde + suelo húmedo (g)	10637		10446		11376	
Identificación cápsula	H27	H9	H3	H12	H19	H13
Peso cápsula (g)	32.04	29.94	29.86	31.26	30.79	32.91
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	238.57	245.89	271.11	278.81	283.43	240.29
Peso cápsula + suelo seco (g)	217.62	224.12	245	251.26	253.85	215.04
Porcentaje de Humedad (%)	11.29	11.21	12.14	12.52	13.26	13.86
Porcentaje de humedad promedio (%)	11.25		12.33		13.56	

Tabla 3.3.6: Datos penetración C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE LA PENETRACIÓN					
Tiempo	Penetración		Lectura Anillo (56 golpes)	Lectura Anillo (25 golpes)	Lectura Anillo (12 golpes)
minutos	mm	plg			
0.5	0.63	0.025	190	100	61
1	1.27	0.050	265	192	105
1.5	1.9	0.075	415	265	180
2	2.54	0.100	626	405	280
3	3.81	0.150	1125	802	605
4	5.08	0.200	1547	1186	1000
4.5	5.71	0.225	1762	-	-
5	6.35	0.250	1955	1500	1320
5.5	6.98	0.275	2175	-	-
6	7.62	0.300	2380	1830	1630
6.5	8.25	0.325	2453	1980	-
7	8.88	0.350	-	2140	1958
7.5	9.52	0.375	-	2245	-
8	10.16	0.400	-	-	2152
9	11.42	0.450	-	-	2225

Tabla 3.3.7: Datos de presión C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE PRESIÓN Y PENETRACIÓN					
Diámetro Pistón (plg)		1.964			
Área Pistón (plg2)		3.029			
56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES	
Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)
0	0	0	0.000	0	0.000
57.15056281	0.025	30.07924358	0.025	18.34833859	0.025
79.7099955	0.050	57.75214768	0.050	31.58320576	0.050
124.8288609	0.075	79.7099955	0.075	54.14263845	0.075
188.2960648	0.100	121.8209365	0.100	84.22188204	0.100
338.3914903	0.150	241.2355336	0.150	181.9794237	0.150
465.3258983	0.200	356.7398289	0.200	300.7924358	0.200
529.996272	0.225	451.1886538	0.250	397.0460153	0.250
588.0492121	0.250	550.4501576	0.300	490.2916704	0.300
654.223548	0.275	595.569023	0.325	588.9515894	0.350
715.8859973	0.300	643.6958127	0.350	647.3053219	0.400
737.8438451	0.325	675.2790185	0.375	669.2631698	0.450

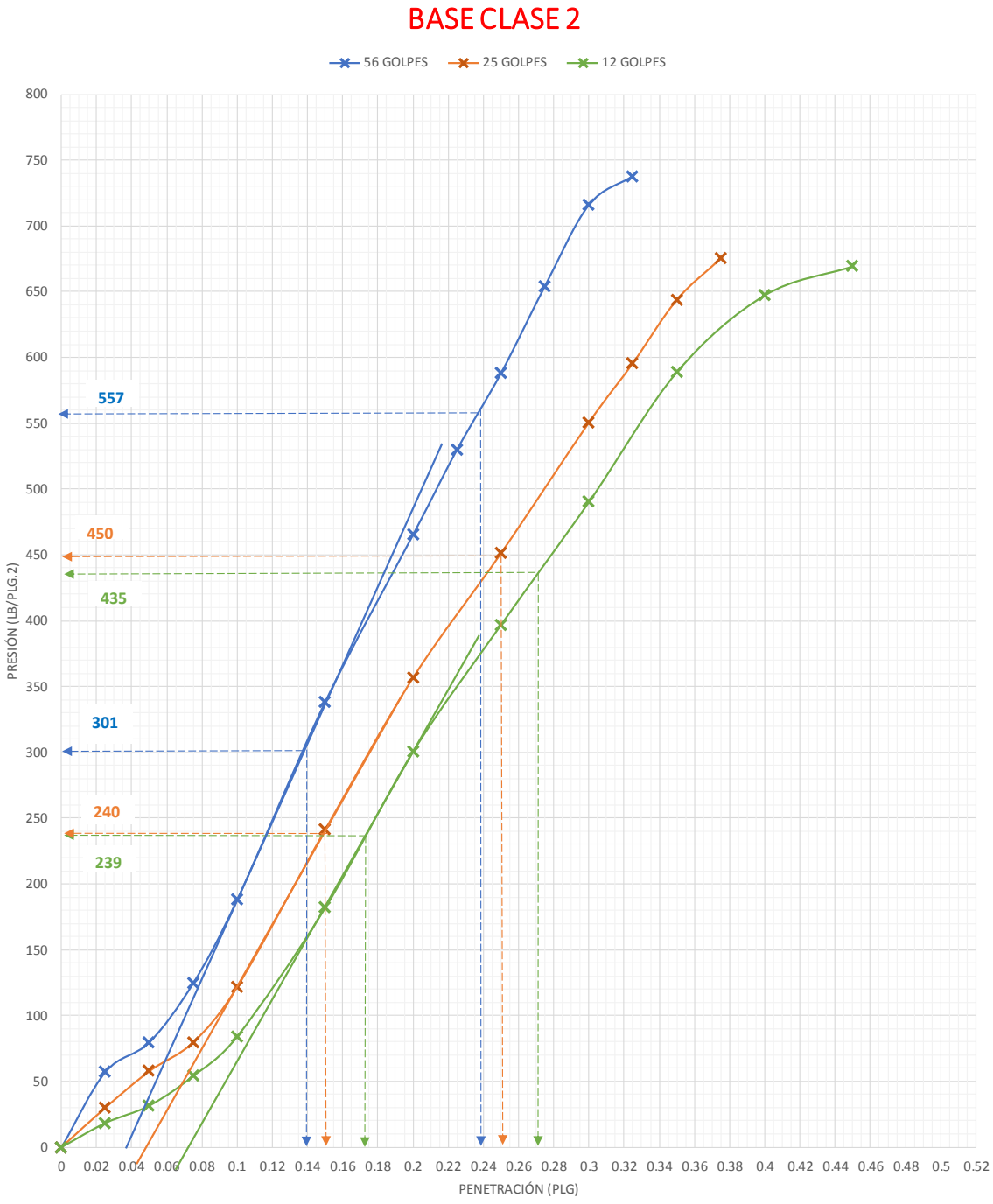


Ilustración 3.3.4: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

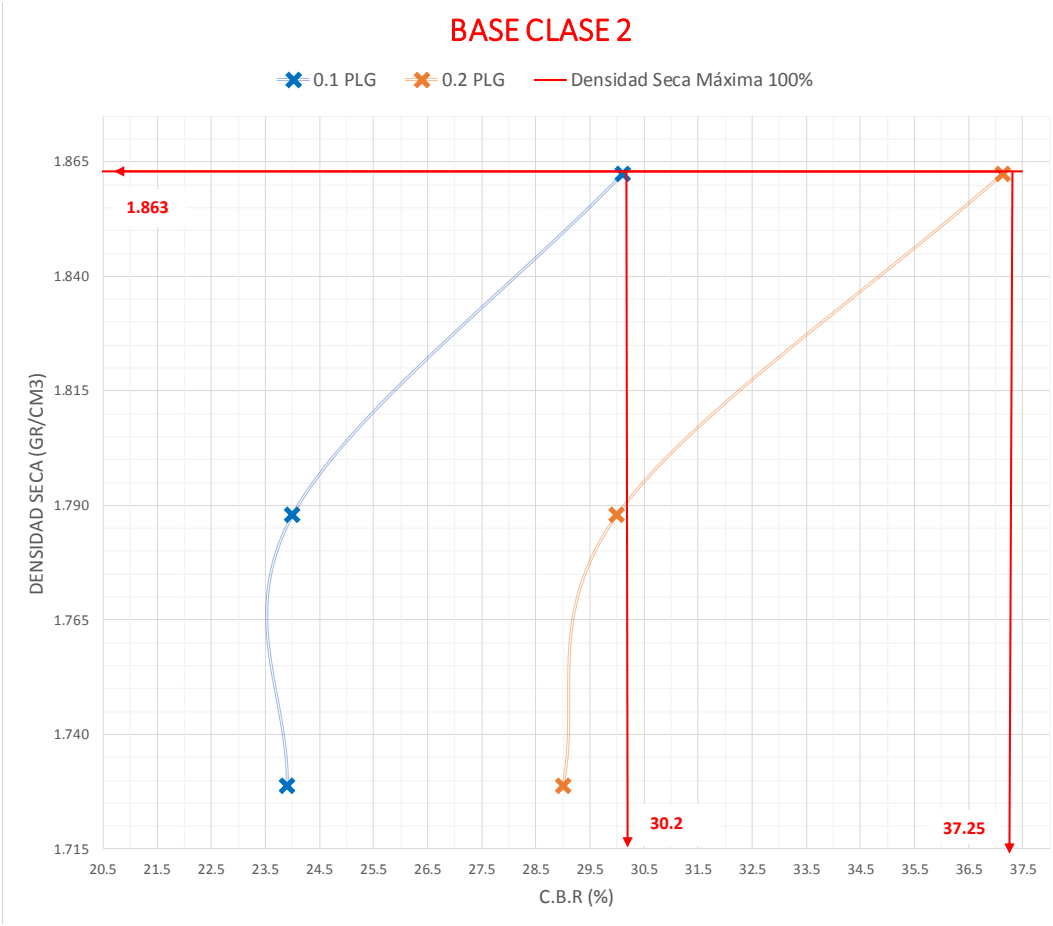


Ilustración 3.3.5: C.B.R. vs Densidad seca. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 3.3.8: C.B.R. Base Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. (100%)			
GOLPES	**0.1 PLG**	**0.2 PLG**	**Densidad seca (gr/cm3)**
56	30.1	37.1	1.862
25	24.0	30.0	1.788
12	23.9	29.0	1.729
C.B.R. (100%)	**30.20**	**37.25**	

- **BASE CLASE 3**

Tabla 3.3.9: Datos C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. BASE CLASE 3						
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	**7,08**		**VOL. MOLDE (CM3)**		**2124**	
DATOS DE MOLDEO						
	56 GOLPES		**25 GOLPES**		**12 GOLPES**	
Identificación molde	Z9		23		M6	
Peso molde (g)	6469		6049		7933	
Peso molde + suelo húmedo (g)	10752		10146		11886	
Identificación cápsula	MS14	MS16	C6237	MS23	MS09	PU2
Peso cápsula (g)	33,24	34,33	31,78	34,07	33,73	22,64
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	188,81	183,81	206,24	194,79	201,38	187,14
Peso cápsula + suelo seco (g)	178,01	173,78	194,44	183,50	189,81	175,80
Densidad seca (gr/cm3)	1,879		1,796		1,733	
Porcentaje de Humedad (%)	7,46	7,19	7,25	7,56	7,41	7,40
Porcentaje de humedad promedio (%)	7,33		7,40		7,41	
Diferencia con humedad óptima	0,25		0,32		0,33	
Densidad seca máxima (gr/cm3)	**1,880**					
DATOS DE EXPANSIÓN						
FECHA	**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**	
11-mar	200		200		200	
11-mar	180		196		181	
12-mar	176		188		178	
12-mar	176		188		178	
13-mar	176		188		178	
14-mar	176		188		178	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Peso molde + suelo húmedo (g)	10922		10350		12119	
Identificación cápsula	MS18	MS13X	MS15	MS1	M531	MS12
Peso cápsula (g)	65,85	66,45	66,39	65,31	67,31	69,97
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	272,91	277,71	298,02	287,07	282,35	317,11
Peso cápsula + suelo seco (g)	253,11	257,65	273,37	263,3	257,51	288,9
Porcentaje de Humedad (%)	10,57	10,49	11,91	12,01	13,06	12,89
Porcentaje de humedad promedio (%)	10,53		11,96		12,97	

Tabla 3.3.10: Datos penetración C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE LA PENETRACIÓN					
Tiempo	Penetración		Lectura Anillo (56 golpes)	Lectura Anillo (25 golpes)	Lectura Anillo (12 golpes)
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	190	128	71
1	1,27	0,050	354	274	171
1,5	1,9	0,075	680	449	325
2	2,54	0,100	870	650	496
4	5,08	0,200	1610	1440	1212
4,5	5,71	0,225	1832	-	-
5	6,35	0,250	2098	1811	1548
5,5	6,98	0,275	2350	2012	-
6	7,62	0,300	2583	2196	1852
6,5	8,25	0,325	2720	2283	-
7	8,88	0,350	-	-	2184
7,5	9,52	0,375	-	-	2250
8	10,16	0,400	-	-	-
9	11,42	0,450	-	-	-

Tabla 3.3.11: Datos de presión C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE PRESIÓN Y PENETRACIÓN					
Diámetro Pistón (plg)		1,964			
Área Pistón (plg2)		3,029			
56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES	
Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)
0	0	0	0,000	0	0,000
57,15056281	0,025	38,50143179	0,025	21,35626295	0,025
106,4805223	0,050	82,41712742	0,050	51,43550653	0,050
204,5388564	0,075	135,0558037	0,075	97,75754165	0,075
261,6894192	0,100	195,5150833	0,100	149,1930482	0,100
484,2758217	0,200	433,1411076	0,200	364,5604323	0,200
551,0517425	0,225	544,7351013	0,250	465,6266907	0,250
631,0625304	0,250	605,1943809	0,275	557,0675912	0,300
706,8622242	0,275	660,5401891	0,300	656,9306799	0,350
776,9468618	0,300	686,709131	0,325	676,7829807	0,375
818,1554255	0,325	-	-	-	-

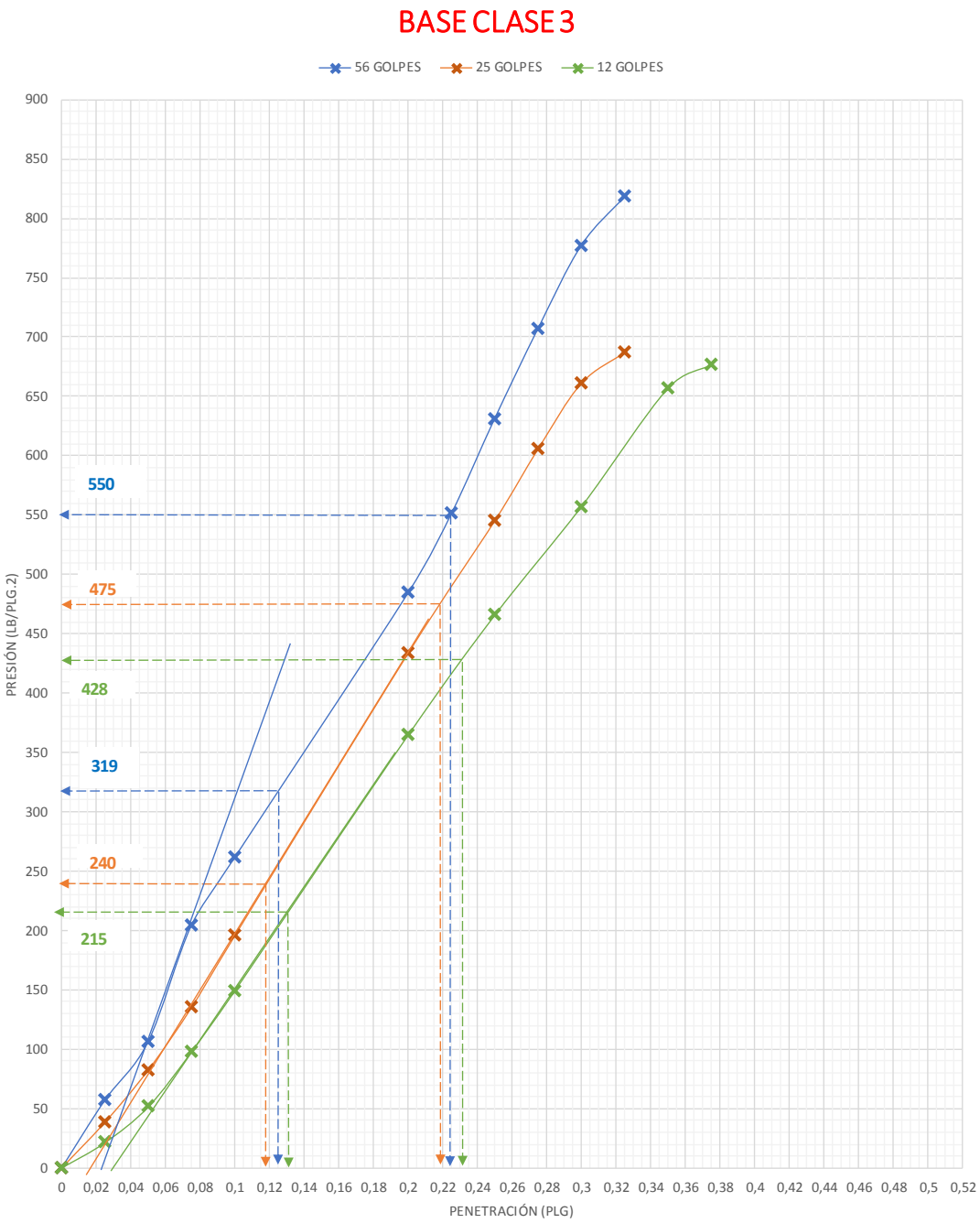


Ilustración 3.3.6: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

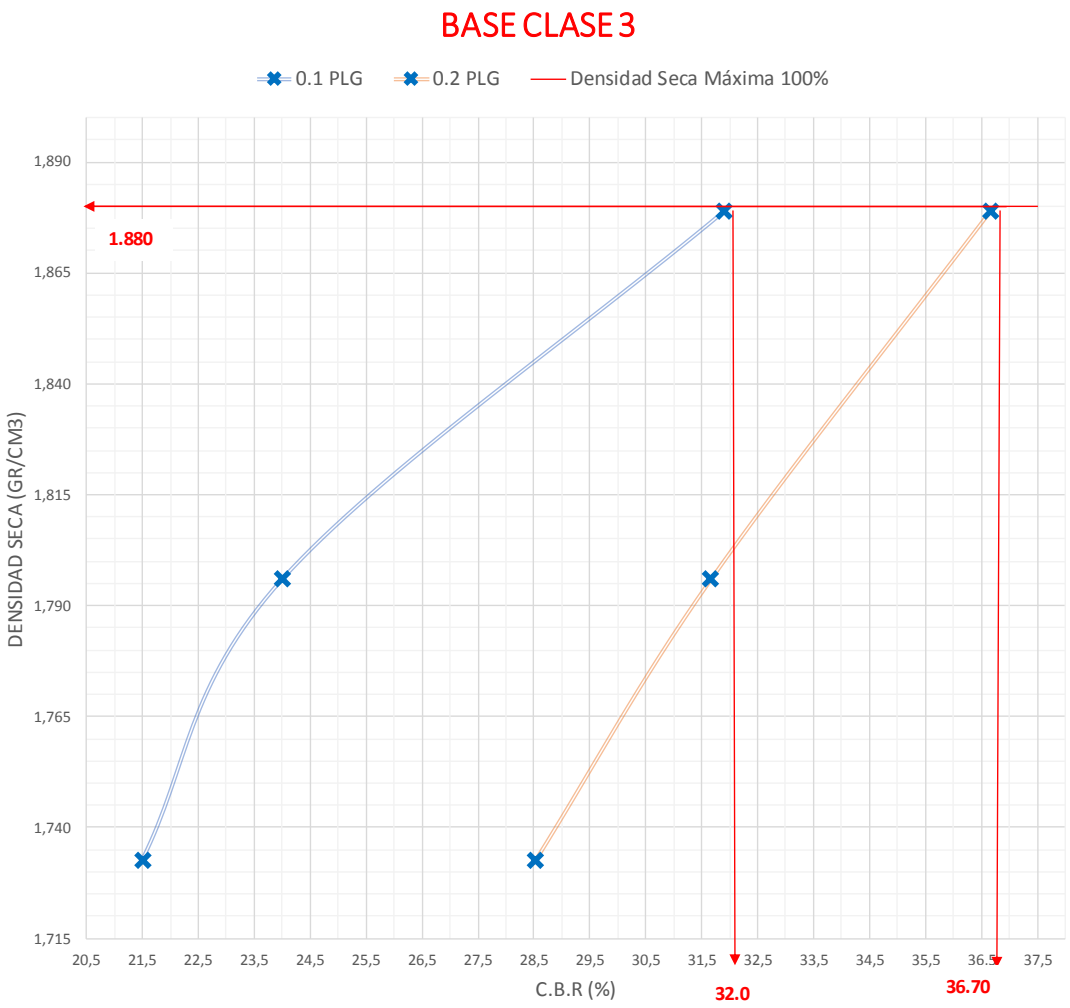


Ilustración 3.3.7: C.B.R. vs Densidad seca. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 3.3.12: C.B.R. Base Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. (100%)			
GOLPES	**0.1 PLG**	**0.2 PLG**	**Densidad seca (gr/cm3)**
56	31,9	36,7	1,879
25	24,0	31,7	1,796
12	21,5	28,5	1,733
C.B.R. (100%)	**32,00**	**36,70**	

- **BASE CLASE 4**

Tabla 3.3.13: Datos C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. BASE CLASE 4						
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	**6.52**		**VOL. MOLDE (CM3)**		**2124**	
DATOS DE MOLDEO						
	56 GOLPES		**25 GOLPES**		**12 GOLPES**	
Identificación molde	7		007		23	
Peso molde (g)	6141		5511		6148	
Peso molde + suelo húmedo (g)	10370		9629		10117	
Identificación cápsula	MS12	MS1	MS15	MS18	H8	MS13X
Peso cápsula (g)	69.99	65.32	66.40	65.84	31.66	66.43
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	244.14	238.32	221.35	220.14	192.16	222.93
Peso cápsula + suelo seco (g)	232.77	227.17	211.65	210.27	182.00	212.72
Densidad seca (gr/cm3)	1.862		1.816		1.749	
Porcentaje de Humedad (%)	6.98	6.89	6.68	6.83	6.76	6.98
Porcentaje de humedad promedio (%)	6.94		6.76		6.87	
Diferencia con humedad óptima	0.42		0.24		0.35	
Densidad seca máxima (gr/cm3)	**1.870**					
DATOS DE EXPANSIÓN						
FECHA	**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**	
19-mar	200		200		200	
19-mar	197		198		195	
21-mar	196		198		194	
22-mar	196		198		194	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Peso molde + suelo húmedo (g)	10574		9862		10395	
Identificación cápsula	H9	MS12	MS1	MS18	MS13X	H8
Peso cápsula (g)	29.92	69.98	65.32	65.84	66.44	31.67
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	259.09	285.99	270.59	255.42	285.1	257.52
Peso cápsula + suelo seco (g)	237.42	265.5	248.81	234.9	259.69	231.02
Porcentaje de Humedad (%)	10.44	10.48	11.87	12.14	13.15	13.29
Porcentaje de humedad promedio (%)	10.46		12.00		13.22	

Tabla 3.3.14: Datos penetración C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE LA PENETRACIÓN					
Tiempo	Penetración		Lectura Anillo (56 golpes)	Lectura Anillo (25 golpes)	Lectura Anillo (12 golpes)
minutos	mm	plg			
0.5	0.63	0.025	105	85	63
1	1.27	0.050	343	207	154
1.5	1.9	0.075	586	387	241
2	2.54	0.100	783	573	471
3	3.81	0.150	1154	970	812
3.5	4.45	0.175	1367	1180	-
4	5.08	0.200	1598	1406	1152
4.5	5.71	0.225	1788	1605	-
5	6.35	0.250	2035	1850	1518
5.5	6.98	0.275	2280	2048	-
6	7.62	0.300	2523	2235	1888
6.5	8.25	0.325	2670	2342	-
7	8.88	0.350	-	-	2208
7.5	9.52	0.375	-	-	2372
8	10.16	0.400	-	-	2434

Tabla 3.3.15: Datos de presión C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE PRESIÓN Y PENETRACIÓN					
Diámetro Pistón (plg)		1.964			
Área Pistón (plg2)		3.029			
56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES	
Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)
0	0	0	0	0	0
31.58320576	0.025	25.56735705	0.025	18.94992346	0.025
103.1718055	0.050	62.26403422	0.050	46.32203512	0.050
176.2643674	0.075	116.4066727	0.075	72.49097704	0.075
235.5204773	0.100	172.3540657	0.100	141.6732373	0.100
347.114471	0.150	291.7686628	0.150	244.2434579	0.150
411.1832598	0.175	354.9350743	0.175	346.5128861	0.200
480.6663125	0.200	422.9141648	0.200	456.6029176	0.250
537.8168753	0.225	482.7718595	0.225	567.8961189	0.300
612.112607	0.250	556.4660063	0.250	664.1496984	0.350
685.8067537	0.275	616.0229086	0.275	713.4796578	0.375
758.8993156	0.300	672.2710941	0.300	732.1287889	0.400
803.1158037	0.325	704.4558848	0.325	-	-

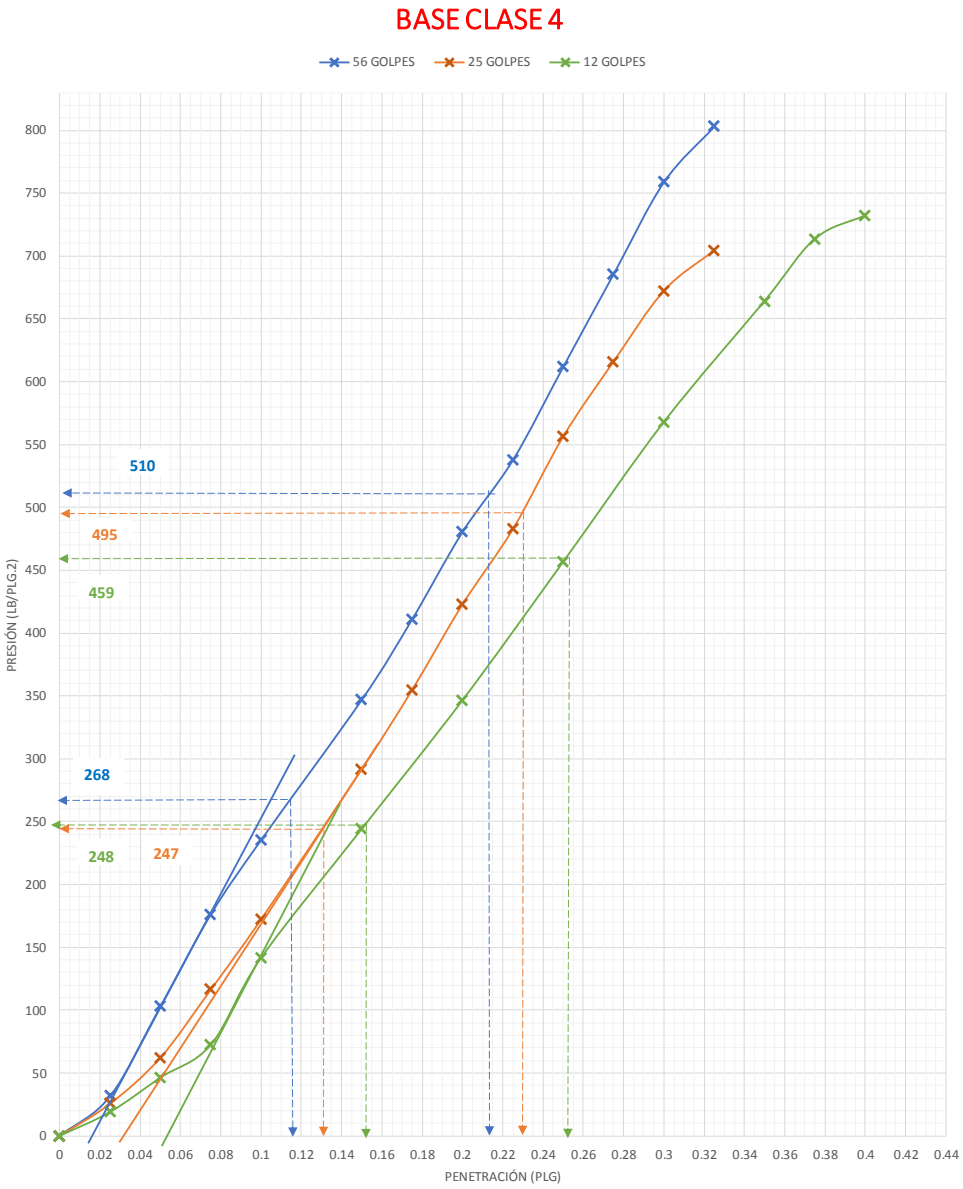


Ilustración 3.3.8: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

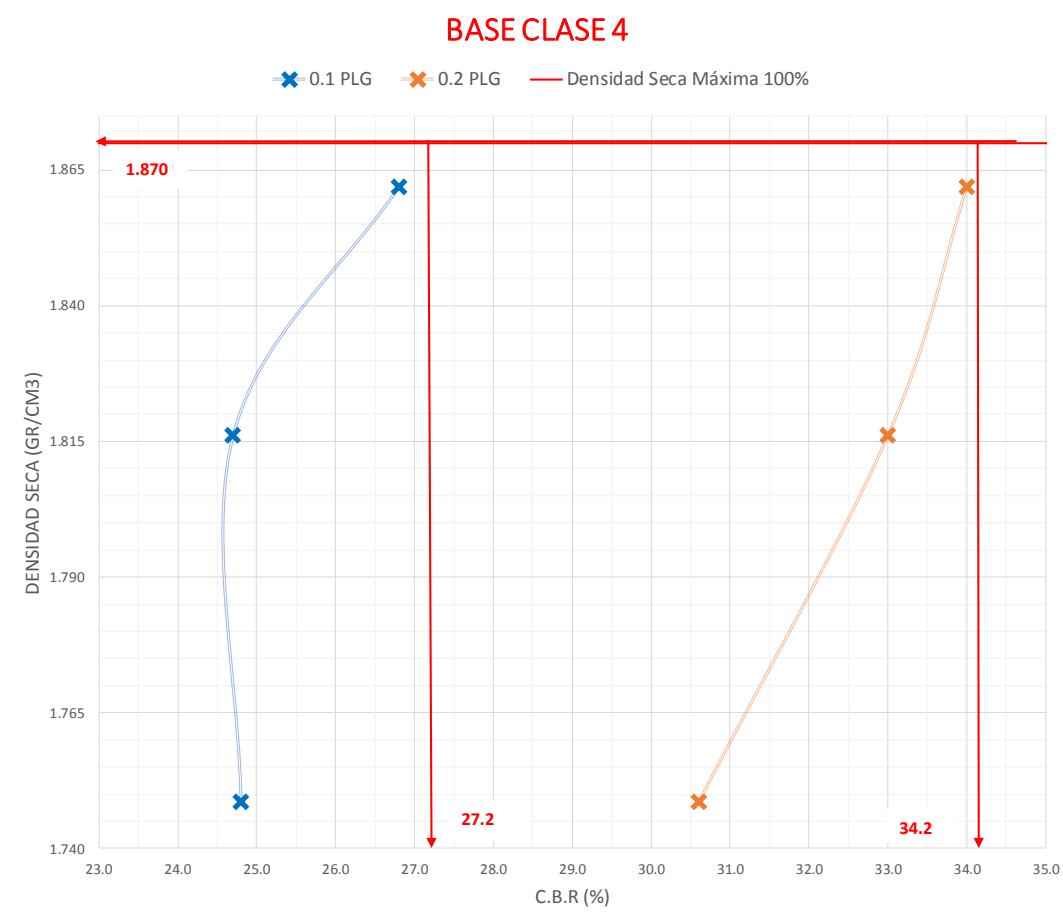


Ilustración 3.3.9: C.B.R. vs Densidad seca. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 3.3.16: C.B.R. Base Clase 4. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. (100%)			
GOLPES	**0.1 PLG**	**0.2 PLG**	**Densidad seca (gr/cm3)**
56	26.8	34.0	1.862
25	24.7	33.0	1.816
12	24.8	30.6	1.749
C.B.R. (100%)	**27.20**	**34.20**	

- **SUBBASE CLASE 1**

Tabla 3.3.17: Datos C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. SUBBASE CLASE 1						
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	**7,09**		**VOL. MOLDE (CM3)**		**2124**	
DATOS DE MOLDEO						
	56 GOLPES		**25 GOLPES**		**12 GOLPES**	
Identificación molde	23		Z9		M7	
Peso molde (g)	6086		6581		8068	
Peso molde + suelo húmedo (g)	10365		10706		11974	
Identificación cápsula	MS25	13	H6	H3	H19	H8
Peso cápsula (g)	33,53	23,09	29,69	29,87	30,79	31,68
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	145,82	129,34	196,47	196,27	180,75	189,46
Peso cápsula + suelo seco (g)	139,04	122,49	185,92	185,72	171,21	179,69
Densidad seca (gr/cm3)	1,889		1,819		1,724	
Porcentaje de Humedad (%)	6,43	6,89	6,75	6,77	6,79	6,60
Porcentaje de humedad promedio (%)	6,66		6,76		6,70	
Diferencia con humedad óptima	0,43		0,33		0,39	
Densidad seca máxima (gr/cm3)	**1,888**					
DATOS DE EXPANSIÓN						
FECHA	**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**	
26-feb	100		100		100	
28-feb	90		82		79	
28-feb	87		79		77	
1-mar	87		79		77	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Peso molde + suelo húmedo (g)	10585		10936		12227	
Identificación cápsula	H29	MS09	H9	H13	H7	12XX
Peso cápsula (g)	32,13	33,72	29,93	32,91	28,95	49,39
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	287,29	189,6	270,08	295,28	271,81	220,36
Peso cápsula + suelo seco (g)	262,35	174,66	245,8	268,91	245,01	201,72
Porcentaje de Humedad (%)	10,83	10,60	11,25	11,17	12,40	12,24
Porcentaje de humedad promedio (%)	10,72		11,21		12,32	

Tabla 3.3.18: Datos penetración C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE LA PENETRACIÓN					
Tiempo	Penetración		Lectura Anillo (56 golpes)	Lectura Anillo (25 golpes)	Lectura Anillo (12 golpes)
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	202	94	58
1	1,27	0,050	551	171	135
1,5	1,9	0,075	654	343	291
2	2,54	0,100	870	548	400
4	5,08	0,200	1609	1357	924
5	6,35	0,250	2120	-	-
5,5	6,98	0,275	2290	-	-
6	7,62	0,300	2651	1990	1640
6,5	8,25	0,325	-	2132	-
8	10,16	0,400	-	-	2052
8,5	10,79	0,425	-	-	2110
10	12,7	0,500	-	-	-

Tabla 3.3.19: Datos de presión C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE PRESIÓN Y PENETRACIÓN					
Diámetro Pistón (plg)		1,964			
Área Pistón (plg2)		3,029			
56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES	
Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)
0	0	0	0,000	0	0,000
60,76007204	0,025	28,27448897	0,025	17,44596128	0,025
165,7366322	0,050	51,43550653	0,050	40,60697884	0,050
196,718253	0,075	103,1718055	0,075	87,53059883	0,075
261,6894192	0,100	164,8342548	0,100	120,3169743	0,100
483,9750293	0,200	408,1753354	0,200	277,9322107	0,200
637,679964	0,250	598,5769473	0,300	493,2995948	0,300
688,8146781	0,275	641,2894732	0,400	617,2260784	0,400
797,4007474	0,400	-	-	634,6720396	0,425

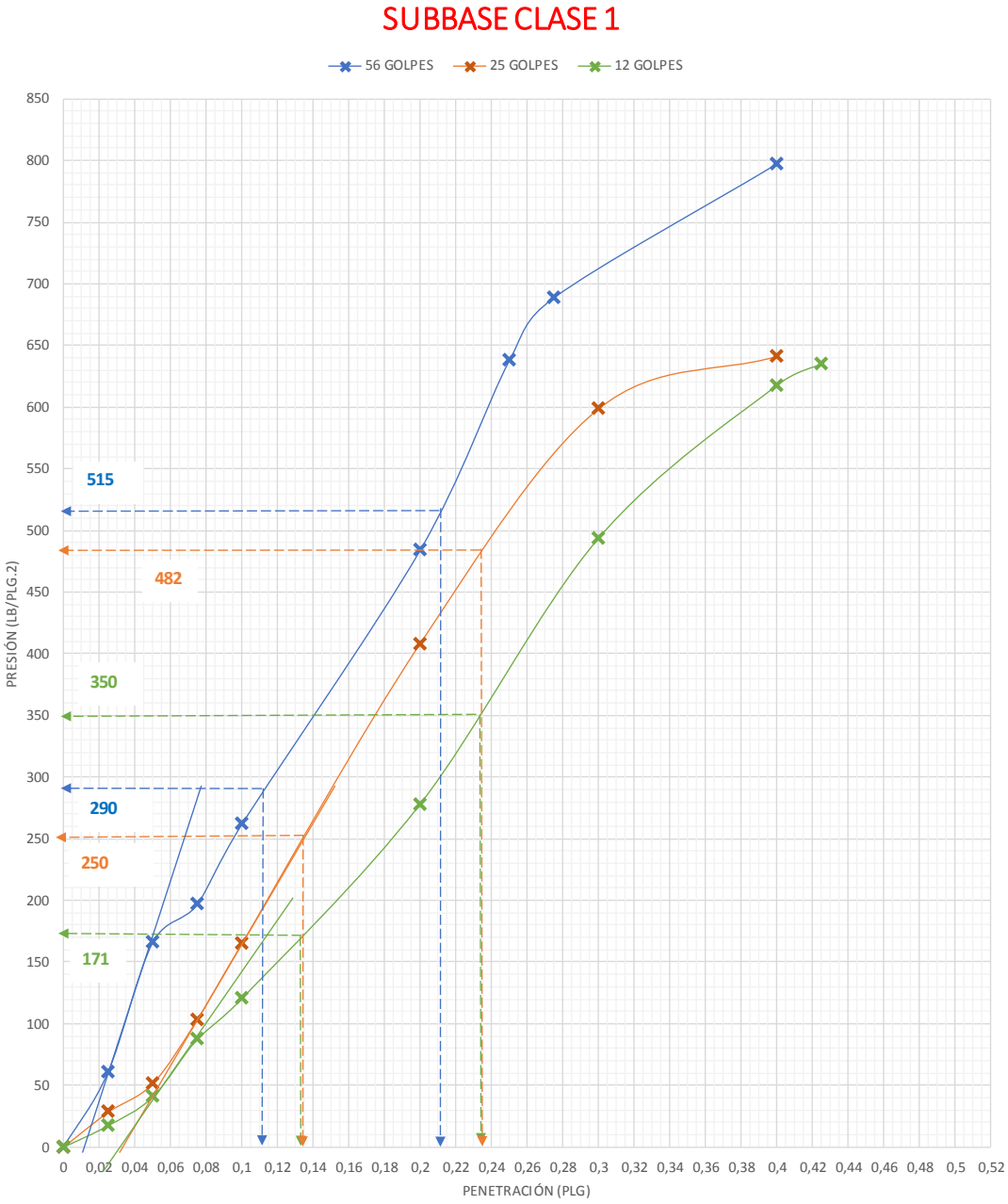


Ilustración 3.3.10: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

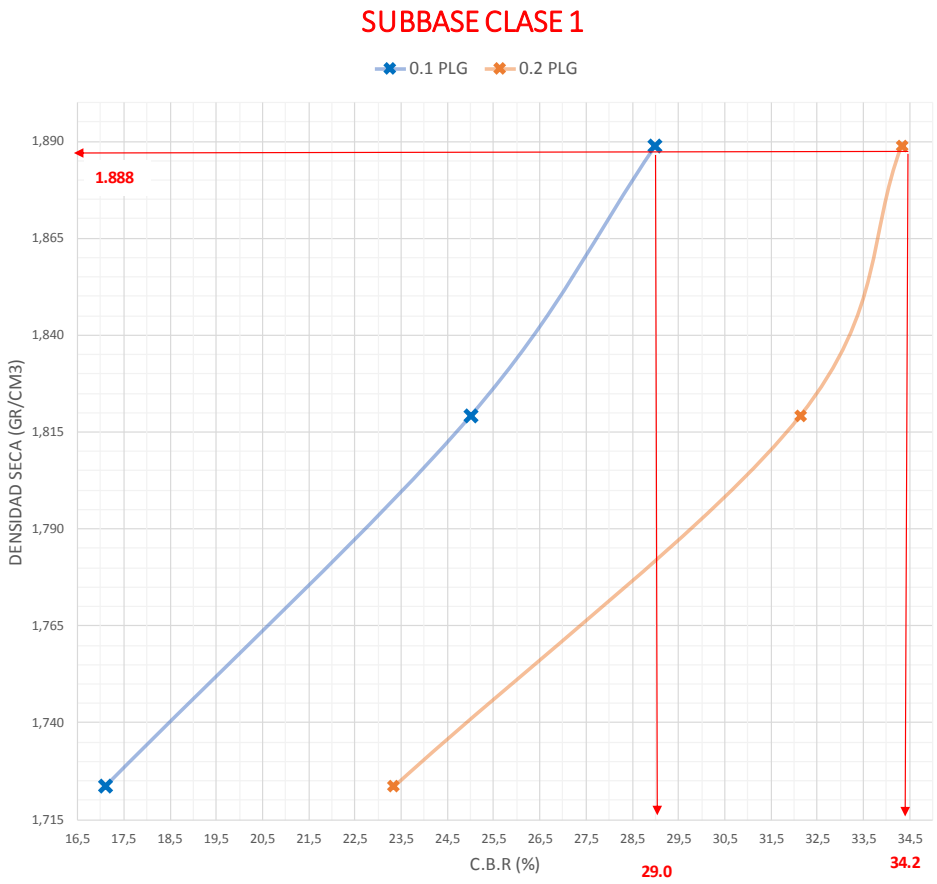


Ilustración 3.3.11: C.B.R. vs Densidad seca. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 3.3.20: C.B.R. Subbase Clase 1. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. (100%)			
GOLPES	**0.1 PLG**	**0.2 PLG**	**Densidad seca (gr/cm3)**
56	29,0	34,3	1,889
25	25,0	32,1	1,819
12	17,1	23,3	1,724
C.B.R. (100%)	**29,0**	**34,2**	

- **SUBBASE CLASE 2**

Tabla 3.3.21: Datos C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. SUBBASE CLASE 2						
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	**6,67**		**VOL. MOLDE (CM3)**		**2124**	
DATOS DE MOLDEO						
	56 GOLPES		**25 GOLPES**		**12 GOLPES**	
Identificación molde	Z8		Z7		001	
Peso molde (g)	6942		6601		6981	
Peso molde + suelo húmedo (g)	11205		10699		10966	
Identificación cápsula	MS2	MS12	H12	MS126	H27	H28
Peso cápsula (g)	65,78	69,97	31,27	80,63	32,05	31,46
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	239,40	190,77	197,12	236,16	205,35	185,70
Peso cápsula + suelo seco (g)	228,94	183,46	186,86	226,36	193,89	175,80
Densidad seca (gr/cm3)	1,886		1,809		1,754	
Porcentaje de Humedad (%)	6,41	6,44	6,59	6,72	7,08	6,86
Porcentaje de humedad promedio (%)	6,43		6,66		6,97	
Diferencia con humedad óptima	0,24		0,01		0,30	
Densidad seca máxima (gr/cm3)	**1,885**					
DATOS DE EXPANSIÓN						
FECHA	**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**	
26-feb	100		100		300	
28-feb	98		100		282	
28-feb	98		100		282	
1-mar	97		97		279	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Peso molde + suelo húmedo (g)	11426		10956		11254	
Identificación cápsula	H21	H12	H22	MS23	H8	H3
Peso cápsula (g)	33,04	31,25	30,96	34,07	31,67	29,85
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	243,14	250,16	293,45	185,87	286,02	267,83
Peso cápsula + suelo seco (g)	222,44	227,93	265,71	170,01	256,56	239,94
Porcentaje de Humedad (%)	10,93	11,30	11,82	11,67	13,10	13,28
Porcentaje de humedad promedio (%)	11,12		11,74		13,19	

Tabla 3.3.22: Datos penetración C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE LA PENETRACIÓN					
Tiempo	Penetración		Lectura Anillo (56 golpes)	Lectura Anillo (25 golpes)	Lectura Anillo (12 golpes)
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	170	101	67
1	1,27	0,050	330	231	148
1,5	1,9	0,075	600	369	238
2	2,54	0,100	772	540	367
4	5,08	0,200	1465	1290	900
5	6,35	0,250	1940	-	-
5,5	6,98	0,275	2057	-	-
6	7,62	0,300	2452	1905	1449
6,5	8,25	0,325	-	2050	-
7	8,88	0,350	-	2208	-
8	10,16	0,400	-	-	2060
9	11,42	0,450	-	2350	2205

Tabla 3.3.23: Datos de presión C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE PRESIÓN Y PENETRACIÓN					
Diámetro Pistón (plg)		1,964			
Área Pistón (plg2)		3,029			
56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES	
Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)
0	0	0	0,000	0	0,000
51,13471409	0,025	30,38003602	0,025	20,1530932	0,025
99,26150383	0,050	69,48305268	0,050	44,51728051	0,050
180,4754615	0,075	110,9924088	0,075	71,58859973	0,075
232,2117605	0,100	162,4279154	0,100	110,390824	0,100
440,6609185	0,200	388,0222422	0,200	270,7131923	0,200
583,5373255	0,250	573,0095903	0,300	435,8482395	0,300
618,7300405	0,275	616,6244935	0,325	619,6324179	0,400
737,5430527	0,400	664,1496984	0,400	663,247321	0,450
-	-	706,8622242	0,450	-	-

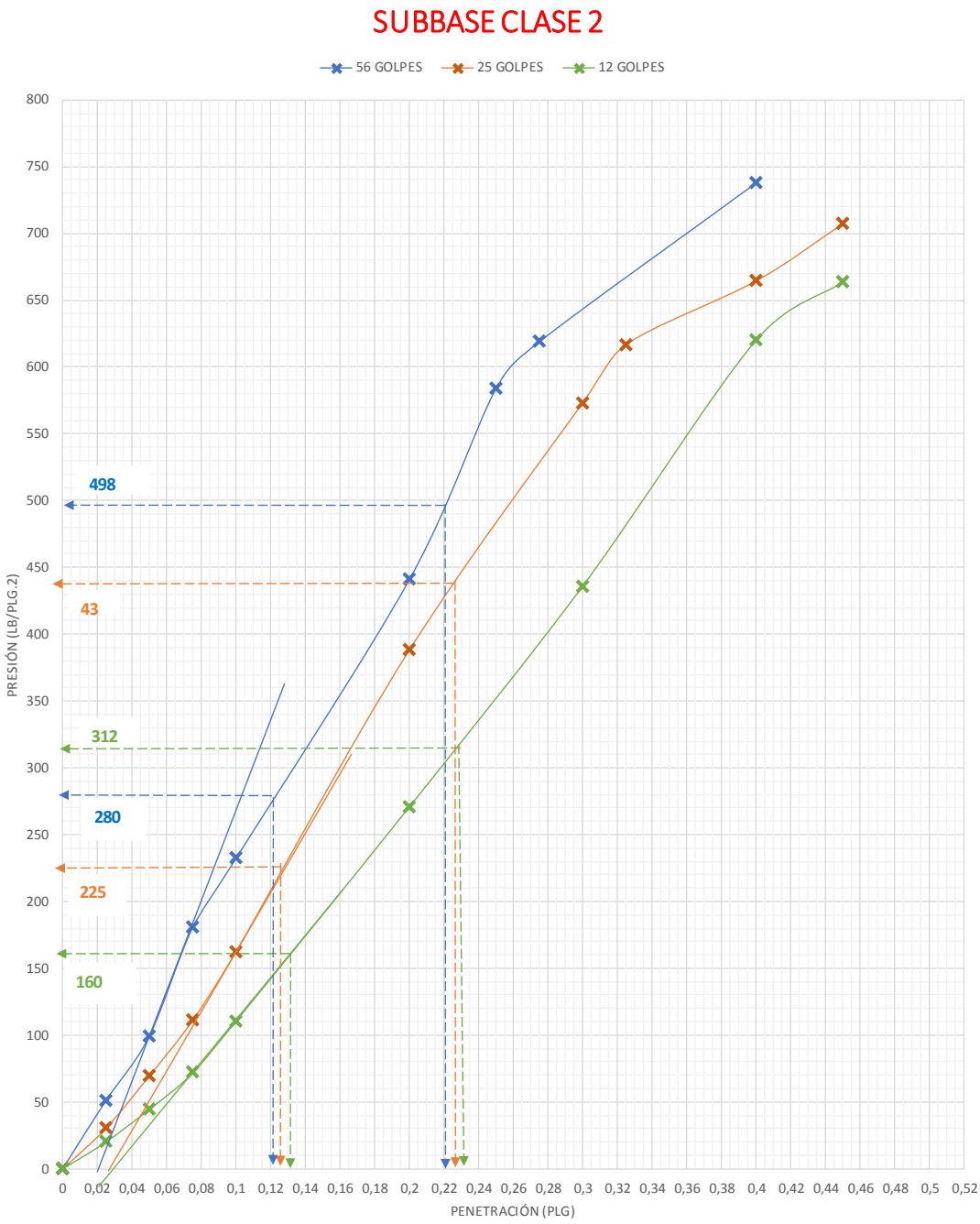


Ilustración 3.3.12: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

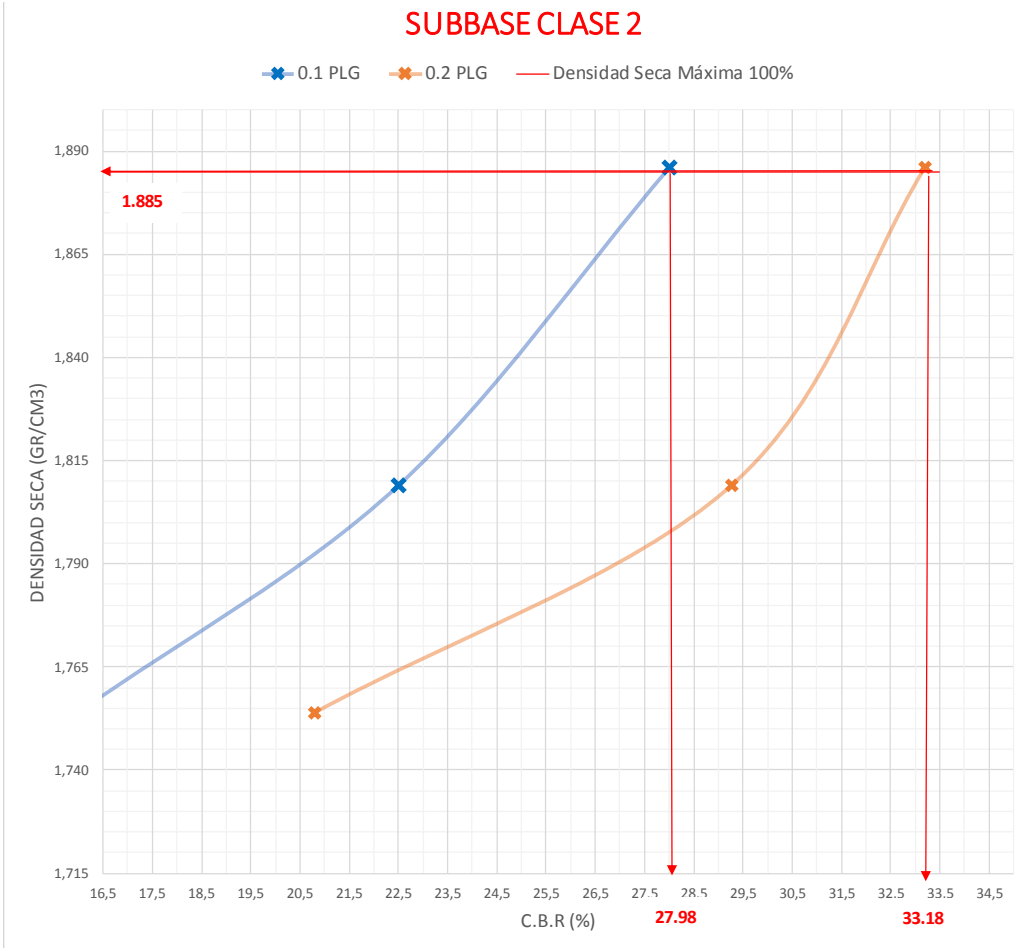


Ilustración 3.3.13: C.B.R. vs Densidad seca. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 3.3.24: C.B.R. Subbase Clase 2. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. (100%)			
GOLPES	**0.1 PLG**	**0.2 PLG**	**Densidad seca (gr/cm3)**
56	28,0	33,2	1,886
25	22,5	29,3	1,809
12	16,0	20,8	1,754
C.B.R. (100%)	**27,98**	**33,18**	

- **SUBBASE CLASE 3**

Tabla 3.3.25: Datos C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. SUBBASE CLASE 3						
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	**6,74**		**VOL. MOLDE (CM3)**		**2124**	
DATOS DE MOLDEO						
	56 GOLPES		**25 GOLPES**		**12 GOLPES**	
Identificación molde	5		007		7	
Peso molde (g)	6084		5512		6171	
Peso molde + suelo húmedo (g)	10338		9580		10118	
Identificación cápsula	H8	H3	H29	MS113	MS126	H6
Peso cápsula (g)	31,67	29,86	32,13	79,95	80,63	29,70
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	138,45	149,40	154,34	176,47	176,07	132,90
Peso cápsula + suelo seco (g)	132,09	142,42	146,85	170,75	170,25	126,80
Densidad seca (gr/cm3)	1,885		1,800		1,747	
Porcentaje de Humedad (%)	6,33	6,20	6,53	6,30	6,49	6,28
Porcentaje de humedad promedio (%)	6,27		6,41		6,39	
Diferencia con humedad óptima	0,47		0,33		0,35	
Densidad seca máxima (gr/cm3)	**1,885**					
DATOS DE EXPANSIÓN						
FECHA	**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**		**LECTURA DIAL**	
25-feb	100		100		100	
26-feb	75		85		95	
28-feb	70		80		92	
28-feb	70		80		91	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Peso molde + suelo húmedo (g)	10556		9824		10381	
Identificación cápsula	MS2	MS126	H27	H28	H6	H19
Peso cápsula (g)	65,79	80,63	32,05	31,44	29,68	30,78
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	301,45	424,74	253,63	256,86	254,69	287,74
Peso cápsula + suelo seco (g)	279,88	391,45	230,7	233,21	229,33	259,86
Porcentaje de Humedad (%)	10,08	10,71	11,54	11,72	12,70	12,17
Porcentaje de humedad promedio (%)	10,39		11,63		12,44	

Tabla 3.3.26: Datos penetración C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE LA PENETRACIÓN					
Tiempo	Penetración		Lectura Anillo (56 golpes)	Lectura Anillo (25 golpes)	Lectura Anillo (12 golpes)
minutos	mm	plg			
0,5	0,63	0,025	280	132	79
1	1,27	0,050	625	384	171
1,5	1,9	0,075	750	525	329
2	2,54	0,100	894	662	407
4	5,08	0,200	1450	1102	895
5	6,35	0,250	1790	-	-
5,5	6,98	0,275	1935	-	-
6	7,62	0,300	2030	1600	1350
8	10,16	0,400		-	1640
8,5	10,79	0,425		1850	-
10	12,7	0,500			1785

Tabla 3.3.27: Datos de presión C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

DATOS DE PRESIÓN Y PENETRACIÓN					
Diámetro Pistón (plg)		1,964			
Área Pistón (plg2)		3,029			
56 GOLPES		25 GOLPES		12 GOLPES	
Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)	Presión (lb/pulg2)	Penetración (plg)
0	0	0	0,000	0	0,000
84,22188204	0,025	39,70460153	0,025	23,76260243	0,025
187,9952724	0,050	115,5042954	0,050	51,43550653	0,050
225,5943269	0,075	157,9160288	0,075	98,96071139	0,075
268,9084376	0,100	199,1245925	0,100	122,4225214	0,100
436,149032	0,200	331,4732643	0,200	269,2092301	0,200
538,4184602	0,250	481,2678974	0,300	406,0697884	0,300
582,0333634	0,275	556,4660063	0,425	493,2995948	0,400
610,6086448	0,300	-	-	536,914498	0,500

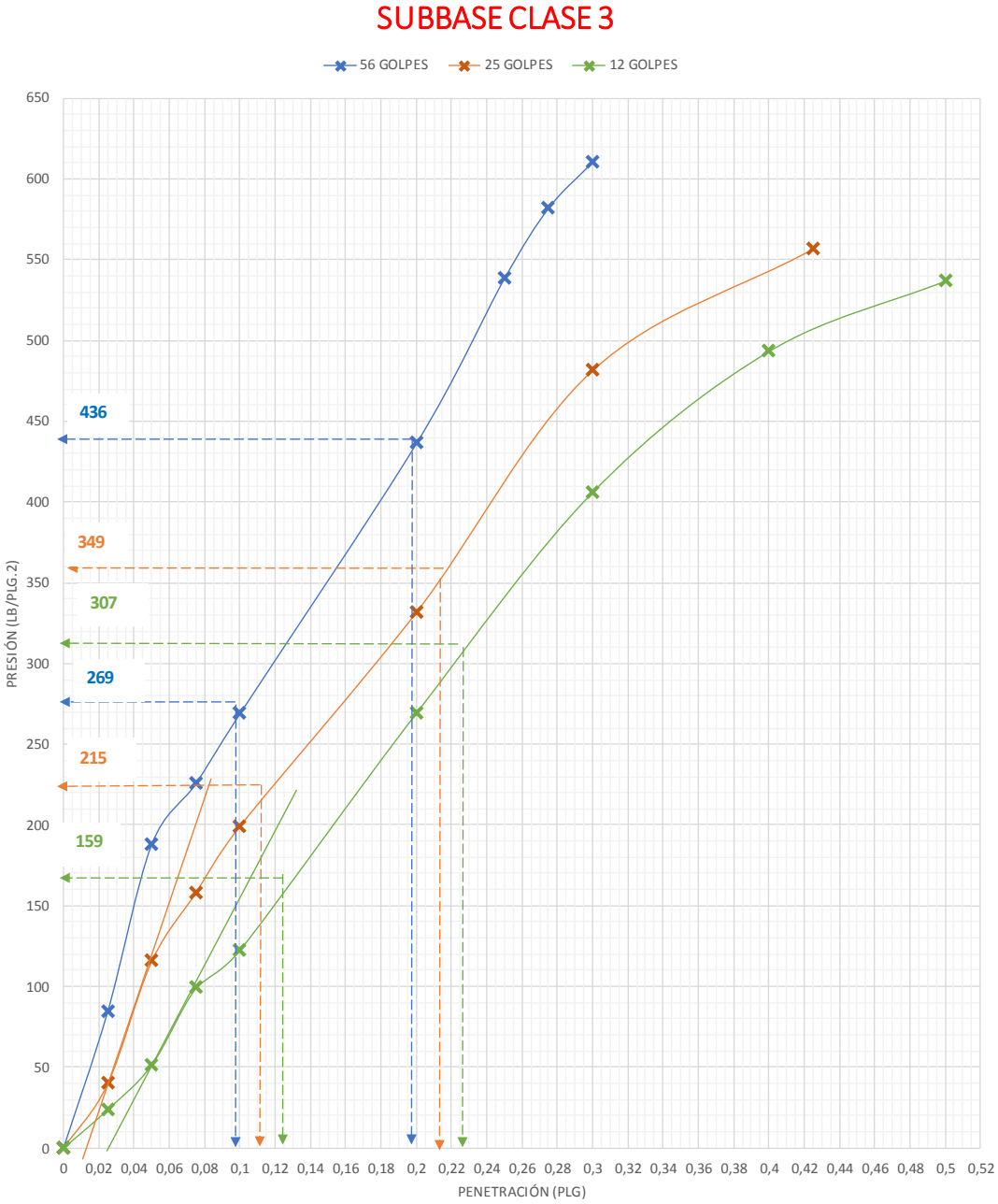


Ilustración 3.3.14: Gráfico Penetración vs Presión para C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

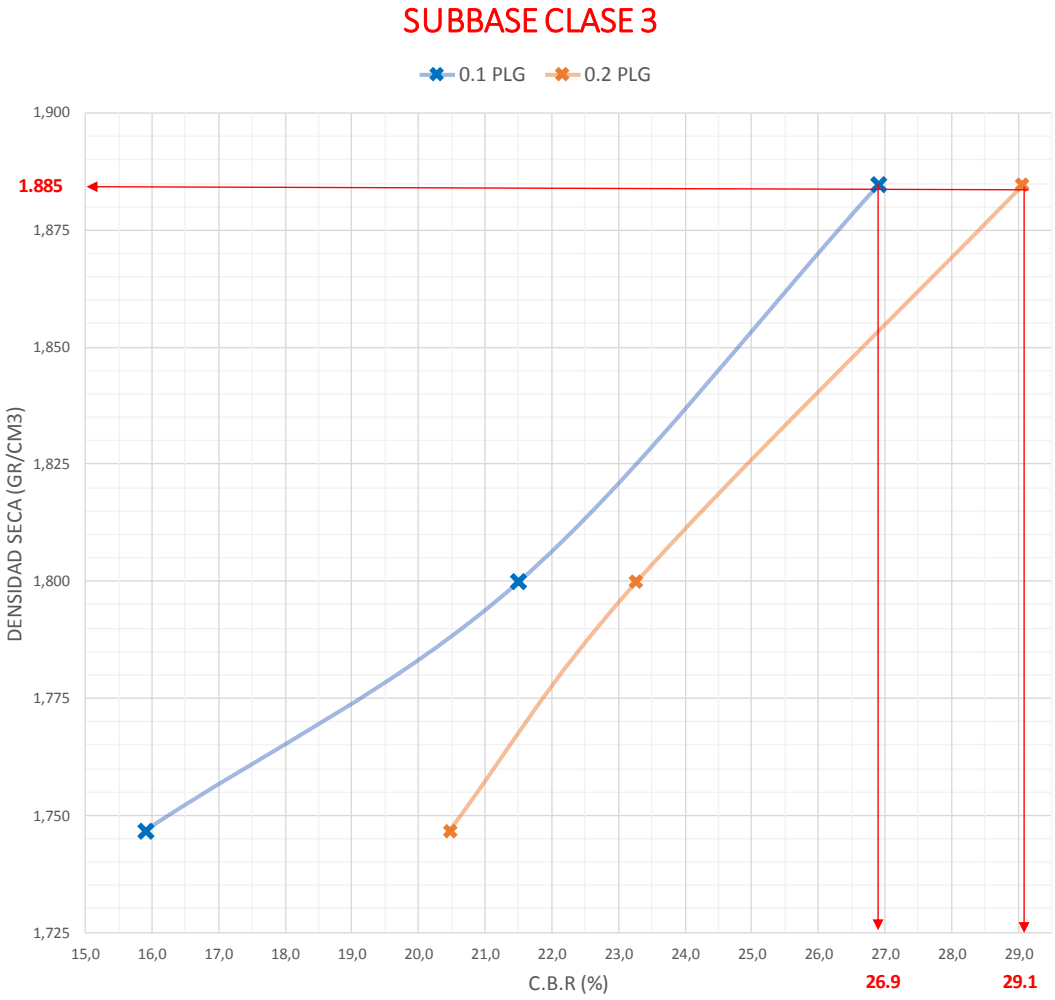


Ilustración 3.3.15: C.B.R. vs Densidad seca. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Tabla 3.3.28: C.B.R. Subbase Clase 3. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

C.B.R. (100%)			
GOLPES	**0.1 PLG**	**0.2 PLG**	**Densidad seca (gr/cm3)**
56	26,9	29,1	1,885
25	21,5	23,3	1,800
12	15,9	20,5	1,747
C.B.R. (100%)	**26,9**	**29,1**	

- **TABLA RESUMEN ENSAYO C.B.R.**

Tabla 3.3.29: Resumen ensayo C.B.R. Cantera San Joaquín (Cotopaxi)

RESUMEN ENSAYO C.B.R. CANTERA SAN JOAQUIN				
TIPO	DENSIDAD MÁXIMA (gr/cm3)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	C.B.R. (0.1") (%)	C.B.R. (0.2") (%)
BASE CLASE 1B	1,89	7,37	30,90	37,30
BASE CLASE 2	1,86	7,10	30,20	37,25
BASE CLASE 3	1,88	7,08	32,00	36,70
BASE CLASE 4	1,87	6,52	27,20	34,20
SUBBASE CLASE 1	1,89	7,09	29,00	34,20
SUBBASE CLASE 2	1,89	6,67	27,98	33,18
SUBBASE CLASE 3	1,89	6,74	26,90	29,10

Según la norma MOP-001-F 2002, el porcentaje de C.B.R. mínimo para Bases es del 80%, por lo que nuestro material no cumpliría con las especificaciones mínimas. Para el caso de las Subbases, el porcentaje de C.B.R. mínimo expuesto en la norma será del 30%, por lo que nuestro material si cumple con las especificaciones expuestas en la norma del Ministerio de Transportes y Obras Públicas (a excepción de la Subbase Clase 3).

4. MÓDULO DE YOUNG (GeoGauge)

4.1. Definición

El módulo de Young, o también conocido como módulo de elasticidad, es simplemente un valor de proporcionalidad entre el esfuerzo aplicado y su deformación.

Probablemente una de las características ingenieriles más representativas de un material, desde el punto de vista de definir su comportamiento en relación con las necesidades y los usos del ingeniero, es el conjunto de datos de un proceso incitación-respuesta que constituye lo que usualmente se llama la relación o relaciones esfuerzo-deformación. (Rodríguez, 2001)

El propósito de encontrar el valor de módulo de Young es el de correlacionarlo a módulo Resiliente. Como se explicó anteriormente, el módulo Resiliente es comúnmente utilizado en la guía de diseño AASHTO-

93 para pavimentos, utilizado para determinar el espesor de las diferentes capas de la estructura del pavimento.

Para encontrar el valor de módulo de Young de cada base y subbase, se utilizó un instrumento llamado GeoGauge (Ver Fotografía 4.1.1.). GeoGauge es una herramienta utilizada en campo que puede ser utilizado para verificar que se cumplan los valores de módulo/rigidez asumidos en las especificaciones mínimas de diseño de estructuras de pavimento nuevas o rehabilitadas. GeoGauge funciona aplicando una fuerza vibratoria a 25 frecuencias específicas, que producen pequeñas desviaciones en el material. El desplazamiento resultante se mide con GeoGauge y se muestra como rigidez determinada por la relación entre la fuerza y la deflexión. (COTECNO CORP., 2018)



Fotografía 4.1.1: Metodología para ensayo con GeoGauge

Fuente: Humboldt. (2019, Agosto 2). Humboldt Construction Materials Testing Equipment. Retrieved from https://www.humboldtmfg.com/geogauge.html

El GeoGauge puede determinar el valor de módulo de Young (módulo de elasticidad), y este posteriormente transformarlo en módulo resiliente. El GeoGauge puede ser utilizado para estimar el valor

de Módulo Resiliente, ya que la toma de medidas del GeoGauge es muy similar a la toma de medidas del módulo Resiliente.

Para poder aplicarlo en nuestro caso de estudio, se hicieron huecos de 1.20m x 1.20m con una profundidad de 40 cm (Ver Fotografía 4.1.2.), para posteriormente rellenarlos con las diferentes bases y subbases construidas con el material de la cantera San Joaquín de la provincia de Cotopaxi. El propósito de hacer esto, es de recrear una situación in situ de las diferentes bases y subbases, compactándolas (mediante sapo compactador) al 100% de su densidad y así medir su módulo de Young a una compactación completa (Ver Fotografía 4.1.3.). Esta densidad y compactación fue controlada por el densímetro nuclear. Posteriormente se colocó el GeoGauge sobre el suelo compactado y se tomaron varios datos en diferentes puntos, para tener un promedio de datos de módulo de Young.



Fotografía 4.1.2: Metodología para ensayo con GeoGauge



Fotografía 4.1.3: Metodología para ensayo con GeoGauge

4.2. Resultados GeoGauge

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos con el densímetro nuclear y con el GeoGauge, para obtener los resultados de Módulo resiliente con una compactación al 100%.

Tabla 4.2.1: Resultados de GeoGauge para bases y Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

Material	Densidad Seca Máxima Proctor Modificado (kg/m3)	Densidad Seca Medida con Densímetro Nuclear (kg/m3)		Densidad seca Densímetro Nuclear Promedio (kg/m3)	Porcentaje de Compactación Densímetro Nuclear (%)	Módulo de Young GeoGauge (Mpa)		Módulo de Young GeoGauge Promedio (Mpa)	Módulo Resiliente (psi)
Base clase 1B	1885,000	1699,000	1672,000	1685,500	89,416	85,990	84,650	85,320	12374,642
		1785,000	1793,000	1789,000	94,907	95,670	95,310	95,490	13849,679
		1884,000	1885,000	1884,500	99,973	105,360	104,470	104,915	**15216,662**
Base clase 2	1863,000	1690,000	1692,000	1691,000	90,768	85,920	86,210	86,065	12482,695
		1851,000	1838,000	1844,500	99,007	101,100	101,750	101,425	14710,479
		1864,000	1862,000	1863,000	100,000	105,020	104,300	104,660	**15179,677**
Base clase 3	1880,000	1702,000	1711,000	1706,500	90,771	83,210	82,350	82,780	12006,246
		1813,000	1821,000	1817,000	96,649	97,620	99,060	98,340	14263,037
		1880,000	1880,000	1880,000	100,000	105,320	101,250	103,285	**14980,250**
Base clase 4	1870,000	1717,000	1698,000	1707,500	91,310	79,150	78,820	78,985	11455,826
		1836,000	1828,000	1832,000	97,968	94,650	95,020	94,835	13754,679
		1871,000	1870,000	1870,500	100,027	97,890	98,950	98,420	**14274,640**
Subbase clase 1	1888,000	1794,000	1787,000	1790,500	94,836	81,020	79,880	80,450	11668,307
		1835,000	1828,000	1831,500	97,007	89,870	89,670	89,770	13020,061
		1888,000	1888,000	1888,000	100,000	97,210	97,680	97,445	**14133,228**
Subbase clase 2	1885,000	1731,000	1722,000	1726,500	91,592	76,290	74,140	75,215	10909,033
		1835,000	1842,000	1838,500	97,533	89,780	89,840	89,810	13025,863
		1885,000	1884,000	1884,500	99,973	96,620	95,020	95,820	**13897,541**
Subbase clase 3	1885,000	1725,000	1736,000	1730,500	91,804	72,650	69,330	70,990	10296,248
		1819,000	1822,000	1820,500	96,578	83,970	84,140	84,055	12191,169
		1886,000	1884,000	1885,000	100,000	91,110	89,740	90,425	**13115,061**

A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores de Módulo Resiliente correspondiente a cada base y subbase.

Tabla 4.2.2: Resultados de Módulo Resiliente para bases y Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

MÓDULO RESILIENTE		
TIPO	**M.R. (Mpa)**	**M.R. (psi)**
BASE CLASE 1B	104,92	15216,66
BASE CLASE 2	104,66	15179,68
BASE CLASE 3	103,29	14980,25
BASE CLASE 4	98,42	14274,64
SUBBASE CLASE 1	97,45	14133,23
SUBBASE CLASE 2	95,82	13897,54
SUBBASE CLASE 3	90,43	13115,06

5. CORRELACIÓN C.B.R. VS MÓDULO RESILIENTE

Una vez obtenidos los resultados de C.B.R. de laboratorio y de Módulo Resiliente, se realizará una correlación entre estos dos factores, con el propósito de encontrar una fórmula para encontrar el módulo resiliente para Bases y Subbases de la cantera San Joaquín de la provincia de Cotopaxi solo realizando el ensayo de C.B.R., sin necesidad de realizar el ensayo de Módulo Resiliente.

5.1. Correlación entre C.B.R. y Módulo Resiliente para Bases

A continuación, se presenta la correlación para C.B.R. vs Módulo Resiliente para las Bases de la Cantera San Joaquín.

Tabla 5.1.1: Datos para correlación de las Bases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

MÓDULO RESILIENTE		
TIPO	**C.B.R.**	**M.R. (psi) GeoGauge**
BASE CLASE 1B	37,30	15216,66
BASE CLASE 2	37,25	15179,68
BASE CLASE 3	36,70	14980,25
BASE CLASE 4	34,20	14274,64

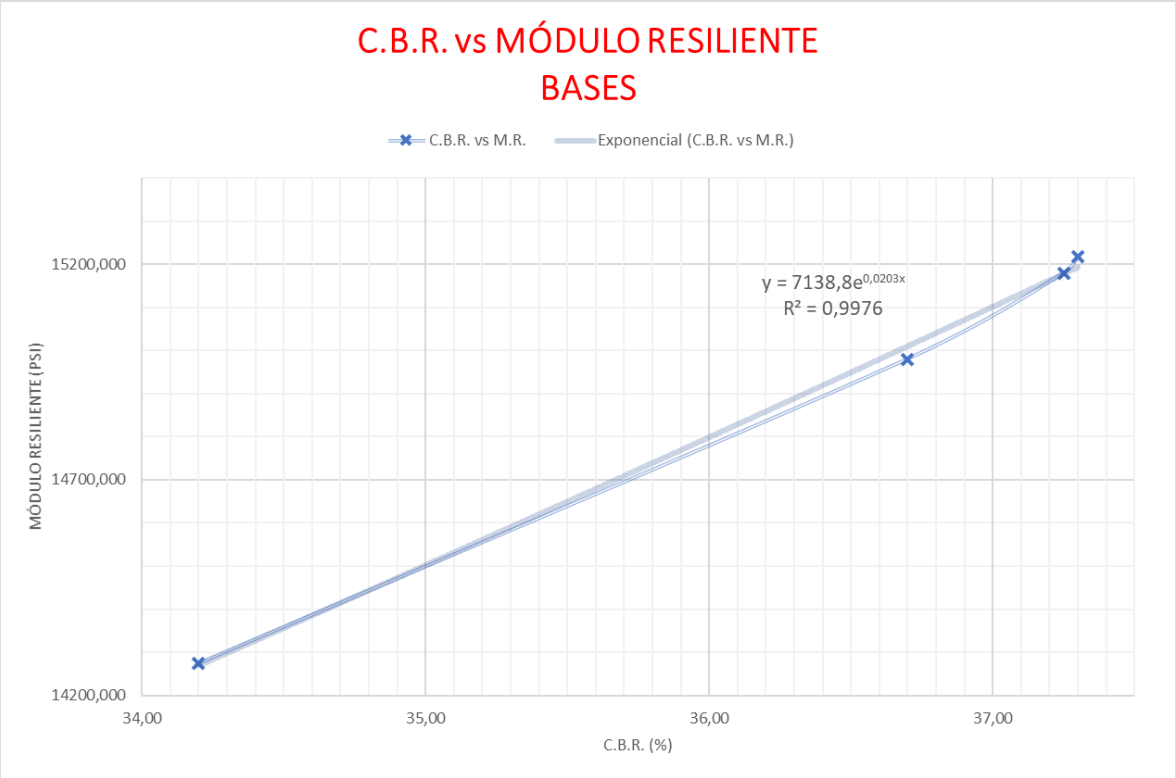


Ilustración 5.1.1: Resultados correlación C.B.R. vs Módulo Resiliente para bases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

La ecuación que se obtiene para correlacionar C.B.R. vs Módulo Resiliente para bases de la cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi es la siguiente:

$$M.R.\,(psi) = 7138.8e^{0.0203(\%C.B.R.)}$$

(Ecuación 5.1.1)

A continuación, se muestra una tabla con los valores encontrados de módulo resiliente con GeoGauge y con la correlación encontrada.

Tabla 5.1.2: Resultados C.B.R. y Módulo Resiliente de Bases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

MÓDULO RESILIENTE BASES			
TIPO	C.B.R.	M.R. (psi) GeoGauge	M.R. (psi) Correlación
BASE CLASE 1B	37,30	15216,66	15221,89
BASE CLASE 2	37,25	15179,68	15206,45
BASE CLASE 3	36,70	14980,25	15037,61
BASE CLASE 4	34,20	14274,64	14293,50

5.2. Correlación entre C.B.R. y Módulo Resiliente para Subbases

A continuación, se presenta la correlación para C.B.R. vs Módulo Resiliente para las Subbases de la Cantera San Joaquín.

Tabla 5.2.1: Datos para correlación de las Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

MÓDULO RESILIENTE		
TIPO	**C.B.R.**	**M.R. (psi) GeoGauge**
SUBBASE CLASE 1	34,20	14133,23
SUBBASE CLASE 2	33,18	13897,54
SUBBASE CLASE 3	29,10	13115,06

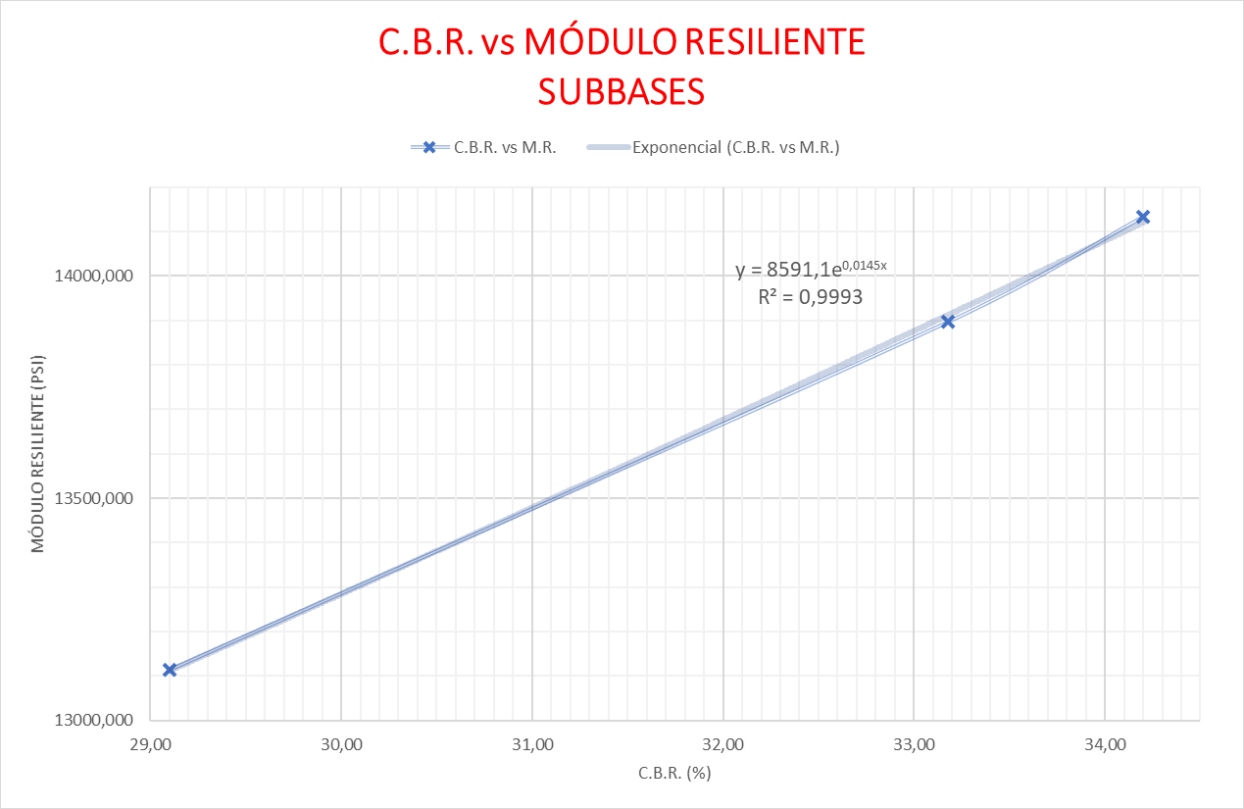


Ilustración 5.2.1: Resultados correlación C.B.R. vs Módulo Resiliente para Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

La ecuación que se obtiene para correlacionar C.B.R. vs Módulo Resiliente para subbases de la cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi es la siguiente:

$$M.R.(psi) = 8591.1e^{0.0145(\%C.B.R.)}$$

(Ecuación 5.2.1)

A continuación, se muestra una tabla con los valores encontrados de módulo resiliente con GeoGauge y con la correlación encontrada.

Tabla 5.2.2: Resultados C.B.R. y Módulo Resiliente de Subbases de la cantera San Joaquín (Cotopaxi)

MÓDULO RESILIENTE SUBBASES			
TIPO	C.B.R.	M.R. (psi) GeoGauge	M.R. (psi) Correlación
SUBBASE CLASE 1	34,20	14133,23	14106,37
SUBBASE CLASE 2	33,18	13897,54	13899,28
SUBBASE CLASE 3	29,10	13115,06	13100,85

6. EJERCICIO DE APLICACIÓN: DISEÑO PAVIMENTO FLEXIBLE

En este capítulo se realizará un diseño completo de un pavimento flexible según la norma AASHTO 1993. Se realizará el diseño con la correlación tradicional utilizada en la AASHTO 93 y con la correlación encontrada para la cantera San Joaquín (provincia de Cotopaxi). La metodología, al igual que las fórmulas para el cálculo, fueron obtenidas de la norma AASHTO 1993 "AASHTO Guide of Pavement Structures (4th Edition)".

6.1. Diseño basado en el método tradicional AASHTO-1993

Los datos del tráfico para el diseño se obtendrán de "Villafuerte Bermúdez L.E., & Ortega Calle, K.G. (2015). Evaluación estructural de pavimento flexible para suelos tipo arenoso. Quito, Ecuador". Los datos son los siguientes:

- El Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) encontrado para la vía es el siguiente:

Tabla 6.1.1: TPDA para ejercicio de aplicación

TRÁFICO PROMEDIO DIARIO ANUAL (TPDA)			
Livianos	**Buses**	**Pesados**	**Total (TPDA)**
171	15	142	328

Fuente: Villafuerte Bermúdez, L., & Ortega Calle, K. (2015). Evaluación estructural de pavimento flexible para suelos tipo arenoso. Quito, Ecuador.

- La Autopista que se desea diseñar se encuentra ubicada en el sector rural, por lo tanto, el nivel de confianza **R** seleccionado es del 90%.

Tabla 6.1.2: Niveles recomendados de confiabilidad R según AASHTO-93

Clasificación de la vía	Niveles recomendados de confiabilidad R	
	Urbano	**Rural**
Autopistas e Interestatales	85 – 99,9	80 – 99,9
Arteria Principal	90 – 99	75 – 95
Calle Colectora	80 – 95	75 – 95
Calle Local	50 – 80	50 – 80

Fuente: Villafuerte Bermúdez, L., & Ortega Calle, K. (2015). Evaluación estructural de pavimento flexible para suelos tipo limo arenoso. Quito, Ecuador.

- La desviación estándar (So) utilizada para la vía que se diseñará será So=0.44, según la siguiente tabla.

Tabla 6.1.3: Valores típicos de desviación estándar

VALORES DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR	
Descripción	**So**
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito.	0,44-0,34
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito	0,49-0,39

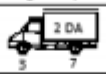
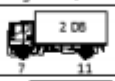
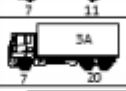
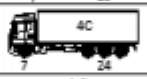
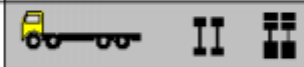
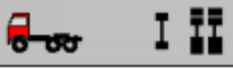
Fuente: Yánez, G. (2015). DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES., (pp. 39-40). Quito.

- En base al estudio de tráfico, se obtiene la distribución de tráfico de la vía (Dt). Esto depende del número de contadores que se utilizaron para encontrar el tráfico promedio diario anual (TPDA). En este caso se asume un solo contador para ambos sentidos, por lo tanto, el valor de la distribución de tráfico Dt es 50% (0.5).
- El período de diseño n seleccionado para la vía será de 10 años.
- Se considera una taza de crecimiento del tráfico (i) en un 3%.
- A continuación, se realiza la proyección del tráfico para saber qué cantidad de vehículos circularán sobre la vía.

De acuerdo con el tráfico promedio diario anual encontrado, se definen los tipos de vehículos que circularán sobre la vía según la siguiente tabla:

Ilustración 6.1.1: Tipos de vehículos para diseño de pavimentos según MTOP

CUADRO DEMOSTRATIVOS DE TIPO DE VEHÍCULOS MOTORIZADOS REMOLQUES Y SEMIREMOLQUES

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN		PESO MÁXIMO PERMITIDO (Ton.)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
					largo	Ancho	Alto
2 D			CAMIÓN DE 2 EJES PEQUEÑO	7	5,00	2,60	3,00
2DA			CAMIÓN DE 2 EJES MEDIANOS	10	7,50	2,60	3,50
2DB			CAMIÓN DE 2 EJES GRANDES	18	12,20	2,60	4,10
3-A			CAMIÓN DE 3 EJES	27	12,20	2,60	4,10
4-C			CAMIÓN DE 4 EJES	31	12,20	2,60	4,10
4-0			CAMIÓN CON TAMDEM DIRECCIONAL Y TAMDEM POSTERIOR	32	12,20	2,60	4,10
V2DB			VOLQUETA DE DOS EJES 8 m³	18	12,20	2,60	4,10
V3A			VOLQUETA DE TRES EJES 10-14 m³	27	12,20	2,60	4,10
VZS			VOLQUETA ZS DE 3 EJES 16 m³	27	12,20	2,60	4,10
T2			TRACTO CAMIÓN DE 2 EJES	18	8,50	2,60	4,10
T3			TRACTO CAMIÓN DE 3 EJES	27	8,50	2,60	4,10

Fuente: MINISTERIO DE TRANSPORTES Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR. (2013). NORMA ECUATORIANA VIAL NEVI-12-MTOP (Vol. 2). (S. D. TRANSPORTE, Ed.) Quito, Pichincha, Ecuador: NORMAS PARA ESTUDIOS Y DISEÑOS VIALES.

Los vehículos livianos, buses y pesados corresponden a los vehículos tipo 2D, 2DB y 3-A respectivamente. Para la proyección del tráfico se utilizará la siguiente fórmula con la cual calcularemos el número de vehículos en el periodo de diseño:

$$TPDA_f = TPDA_o * (1 + i)^n$$

(Ecuación 6.1.1)

Donde:

$TPDA_f$ es el tráfico promedio diario anual esperado al final del periodo de diseño.

$TPDA_o$es el tráfico promedio diario anual actual.

n es el periodo de diseño de la vía.

i es la tasa de crecimiento del tráfico.

A continuación, se calcula el TPDAf:

Tabla 6.1.4: Proyección TPDA

PROYECCIÓN TRÁFICO PROMEDIO DIARIO ANUAL			
Tipo de Vehículo Asignado	$TPDA_o$	**%**	$TPDA_f$
2D	171	52%	230
2DB	15	5%	20
3A	142	43%	191
Total	**328**	**100%**	**441**

- Se obtiene el factor de carga equivalente mediante las expresiones provistas por la AASHTO 93.

Eje Simple: $Fss = \left(\frac{Lss}{6,6}\right)^4$

(Ecuación 6.1.2)

Eje Doble: $Fsd = \left(\frac{Lsd}{8,2}\right)^4$

(Ecuación 6.1.3)

Eje Tándem: $Ft = \left(\frac{Lt}{15}\right)^4$

(Ecuación 6.1.4)

Dando como resultado lo siguiente:

Tabla 6.1.5: Cálculo de factor de carga equivalente

PROYECCIÓN TRÁFICO PROMEDIO DIARIO ANUAL				
Tipo de Vehículo Asignado	**CARGA TOTAL**	**CARGA POR EJE (Ton)**	**%**	**FACTOR CARGA EQUIVALENTE POR EJE**
2D	7	3	0,52	0,0222
		4		0,0702
2DB	18	7	0,05	0,0633
		11		0,1619
3A	27	7	0,43	0,5441
		20		1,3590
			FCE	**2,2207**

- Se obtiene el número de ejes de 8.2 Toneladas según la siguiente fórmula.

$$N(8{,}2\ T) = \left(\frac{TPDA_o + TPDA_f}{2}\right) * 365 * Dt * n * FCE$$

(Ecuación 6.1.5)

Dando como resultado un total de:

$$N(8.2\ T) = 1.56 * 10^6$$

- Se calcula el valor de Módulo Resiliente para la Subrasante según la fórmula propuesta por la norma, asumiendo un valor de C.B.R. de 11%.

$$Para\ C.B.R. > 10\% \qquad M.r. = 2555 * C.B.R.^{0.64}$$

(Ecuación 6.1.6)

$$M.R. = 11854.47\ psi$$

$$M.R. = 11000\ psi$$

- Se calcula la pérdida de serviciabilidad o también llamado índice por serviciabilidad (PSI):

Para calcular este índice, se selecciona los coeficientes de serviciabilidad inicial Po y serviciabilidad final Pt según la siguiente tabla provista por la AASHTO.

Tabla 6.1.6: Pérdida por serviciabilidad según AASHTO-93

PÉRDIDA POR SERVICIABILIDAD		
Po	4,2 a 4,5	
Pt	4 a 3	Bueno
	3 a 2	Regular
	2 a 1	Malo
	1 a 0	Muy Malo

Para este ejercicio, se seleccionó:

Po= 4

Pt= 2

$$\Delta PSI = Po - Pt = 4 - 2 = 2$$

(Ecuación 6.1.7)

ΔPSI = 2

- Se calcula el número estructural por capa por el método tradicional con la correlación de C.B.R. vs Módulo Resiliente. Se utilizó un programa de cálculo automático de número estructural que utiliza la metodología AASHTO-93.

Subrasante

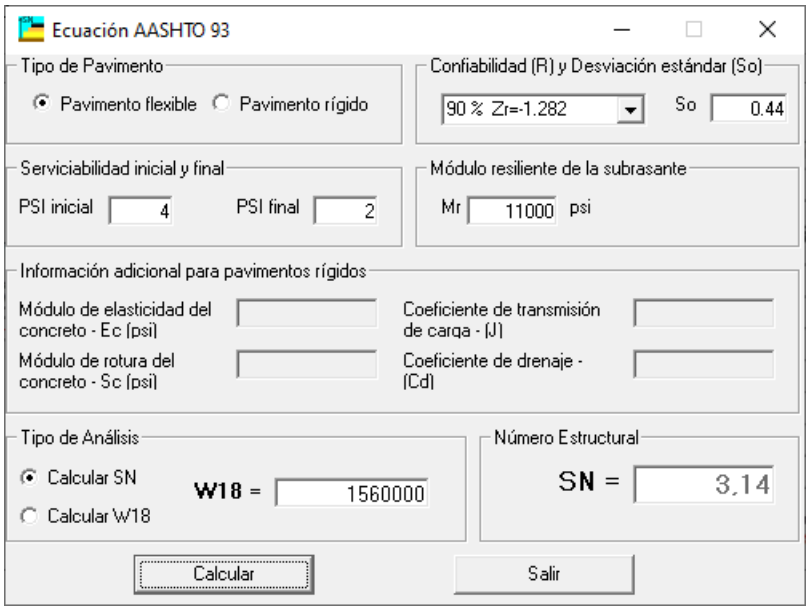
R = 90%

So = 0.44

N (8.2T) = 1.56 x 10^6

M.R. = 11000 psi

PSI = 2.0



Fotografía 6.1.1: Cálculo de Número Estructural para subrasante en el programa Ecuación AASHTO-93

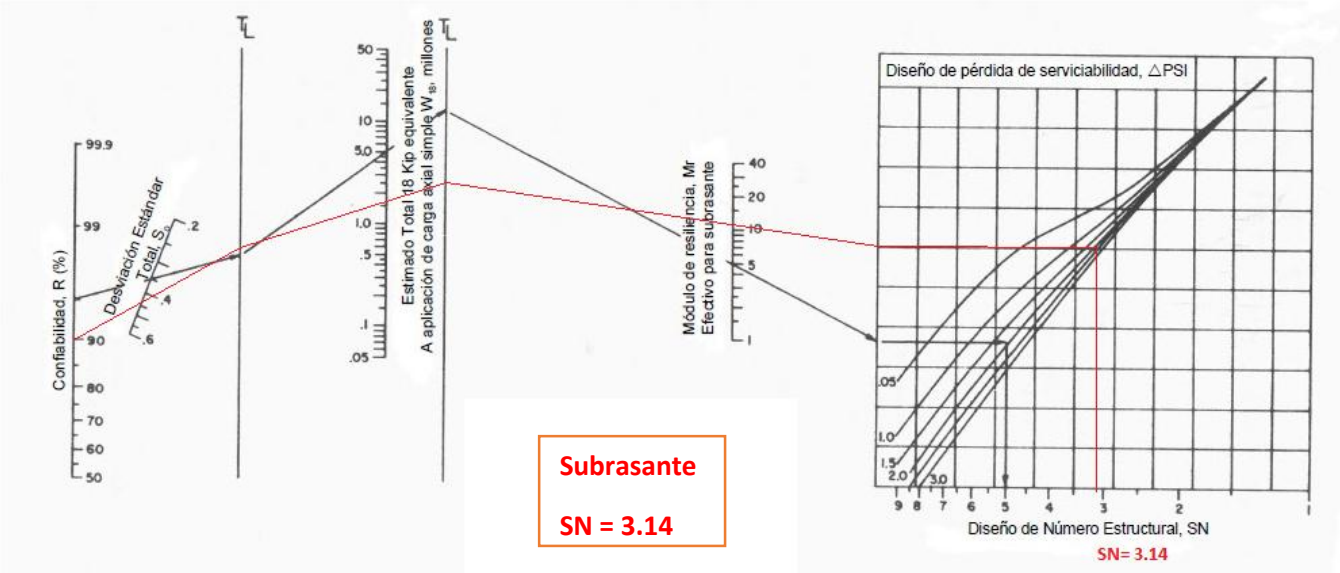


Ilustración 6.1.2: Cálculo de Número Estructural para subrasante según el nomograma AASHTO-93

Base

Para el cálculo del número estructural de la base, se utilizará la Base Clase 1 B de la cantera San Joaquín, con un valor de C.B.R. de 37.3%.

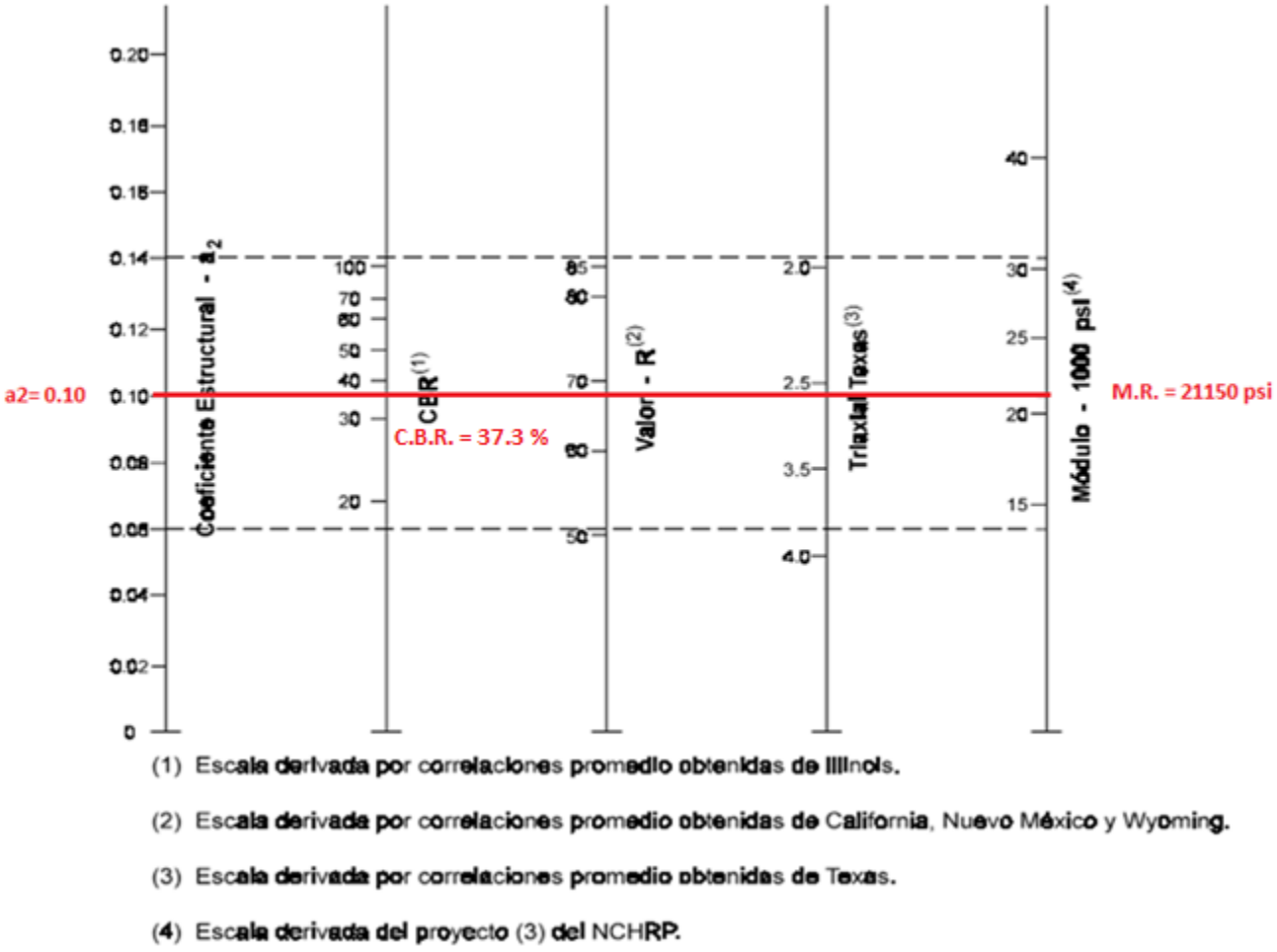
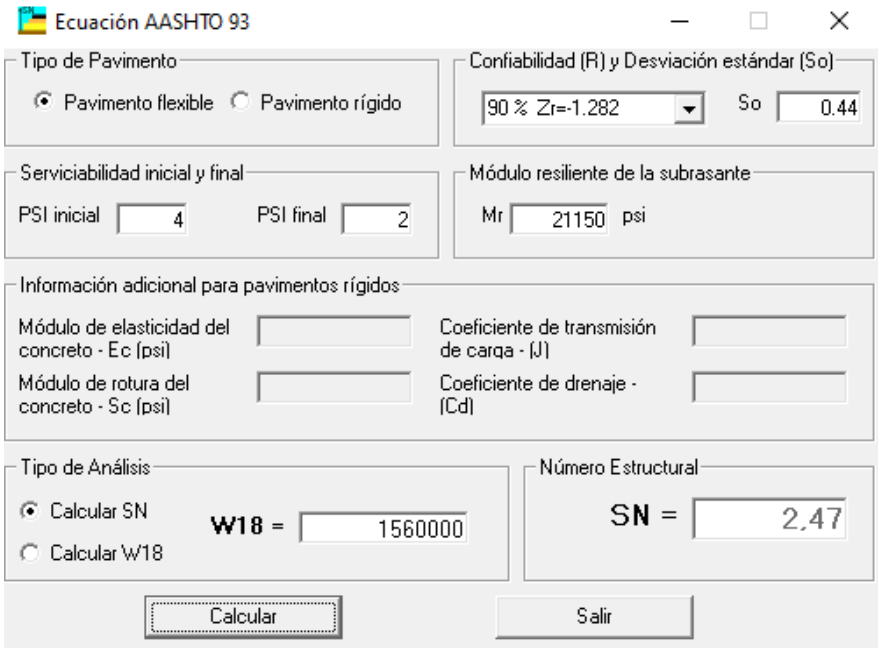


Ilustración 6.1.3: Cálculo de coeficiente estructural y Módulo Resiliente de la Base clase 1 B según método AASHTO-93

Los coeficientes encontrados, según el porcentaje de C.B.R., son los siguientes:

Coeficiente estructural a2 = 0.10 = 0.0394 cm

Módulo Resiliente (psi) = 21150 psi.



Fotografía 6.1.2: Cálculo de Número Estructural para base clase 1 B en el programa Ecuación AASHTO-93

El número estructural calculado para la Base Clase 1 B según la correlación tradicional de la AASHTO-93 es:

SN: 2.47

Subbase

Para el cálculo del número estructural de la subbase, se utilizará la Subbase Clase 1 de la cantera San Joaquín, con un valor de C.B.R. de 34.2%.

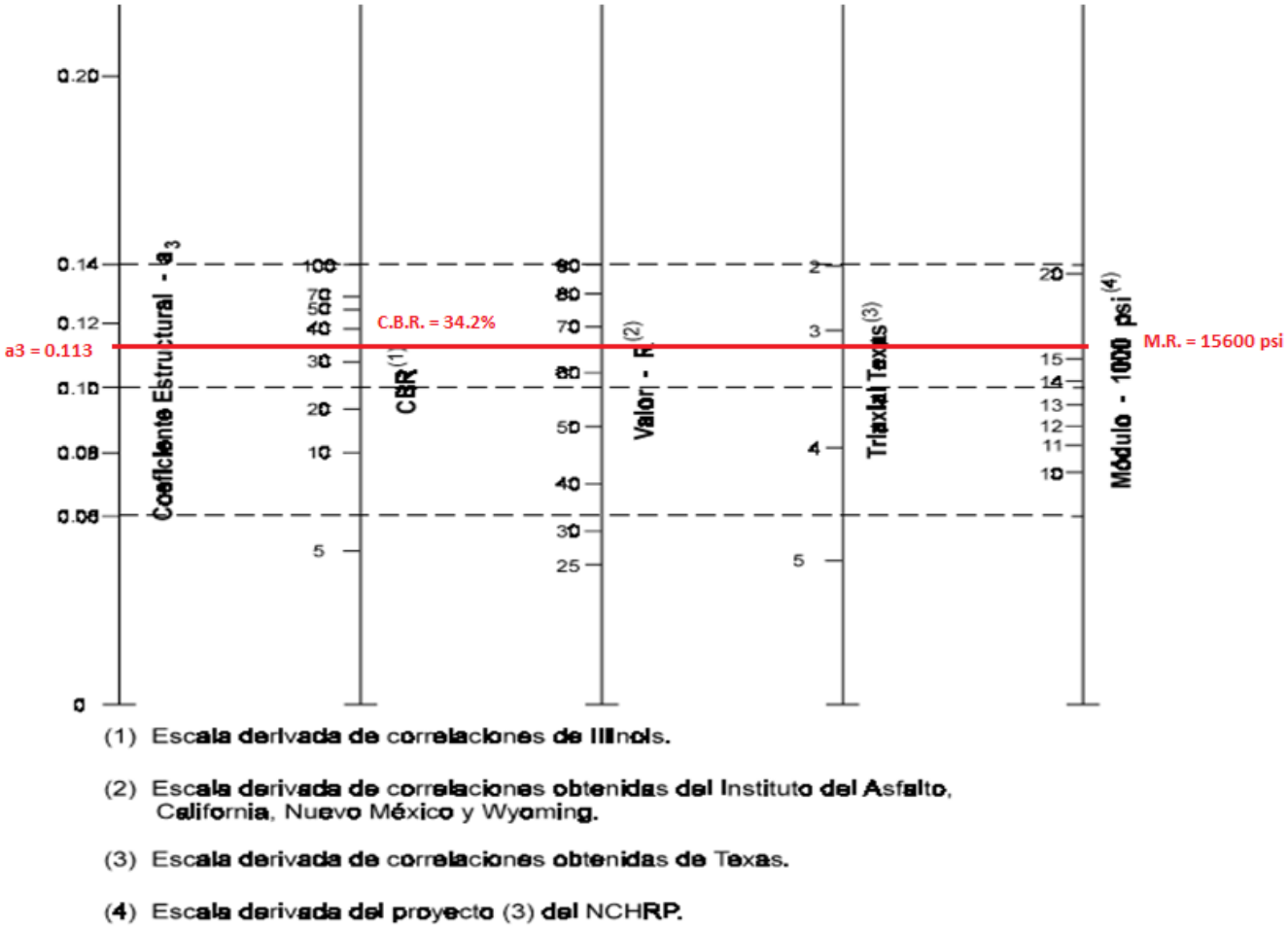
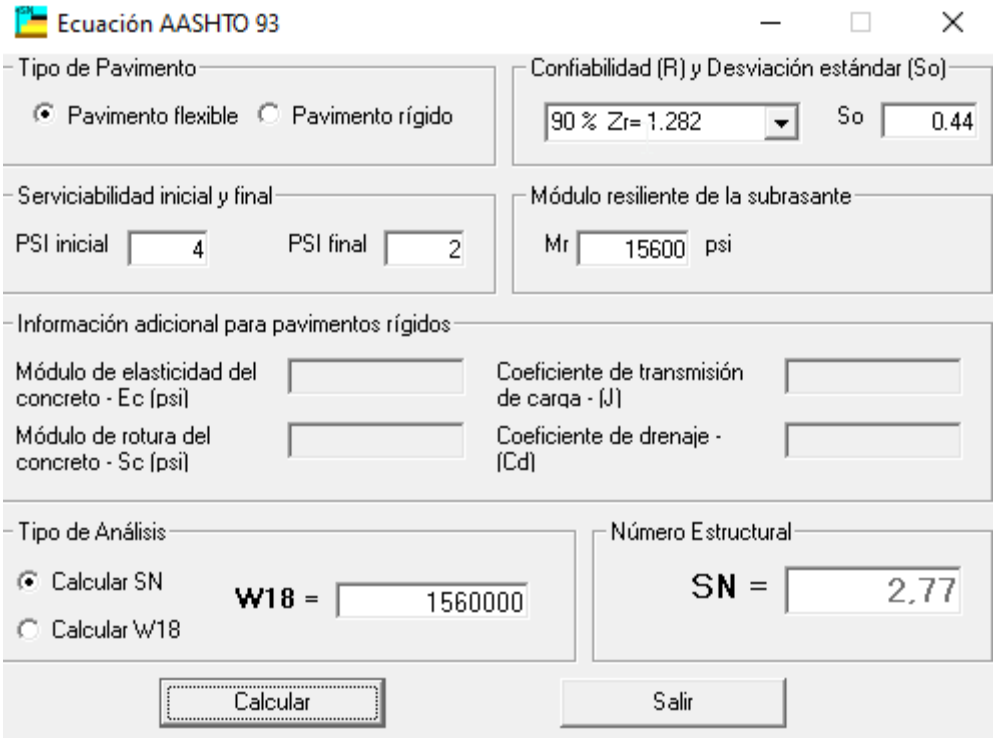


Ilustración 6.1.4: Cálculo de coeficiente estructural y Módulo Resiliente de la Subbase clase 1 según método AASHTO-93

Los coeficientes encontrados, según el porcentaje de C.B.R., son los siguientes:

Coeficiente estructural a3 = 0.113 = 0.0445 cm

Módulo Resiliente (psi) = 15600 psi. Asumiendo



Fotografía 6.1.3: Cálculo de Número Estructural para Subbase clase 1 en el programa Ecuación AASHTO-93

El número estructural calculado para la Subbase Clase 1 según la correlación tradicional de la AASHTO-93 es:

SN: 2.77

Carpeta Asfáltica

Comúnmente, el módulo resiliente utilizado en nuestro país para una carpeta asfáltica es de 400 000 psi. Utilizaremos el gráfico provisto por la AASHTO-93 para encontrar el coeficiente estructural de la carpeta asfáltica a1.

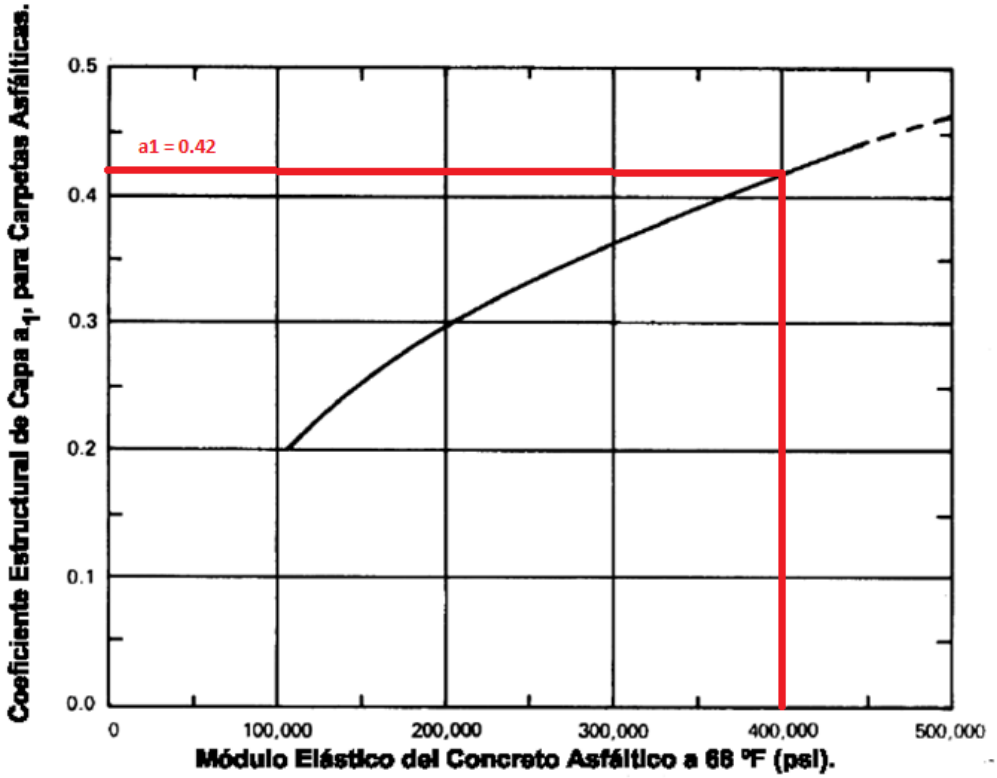


Ilustración 6.1.5: Cálculo de coeficiente estructural de la Carpeta Asfáltica según método AASHTO-93

El coeficiente estructural encontrado fue:

a1=0.42 = 0.165 cm

- Se calculan los espesores de las diferentes capas, asumiendo un coeficiente de drenaje m=1 según la siguiente tabla provista por la AASHTO.

Tabla 6.1.7: Valores recomendados para coeficiente de drenaje según método AASHTO-93

VALORES RECOMENDADOS PARA COEFICIENTE DE DRENAJE (m)					
Calidad del Drenaje		Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humendad cercana a saturación			
Condición	Tiempo de Evacuación	Menor que 1%	1-5%	5-25%	Mayor que 25%
Excelente	2 horas	1,40-1,35	1,35-1,30	1,30-1,20	1,20
Bueno	1 día	1,35-1,25	1,25-1,15	1,15-1,00	1,00
Regular	1 semana	1,25-1,15	1,15-1,05	1,00-0,80	0,80
Malo	1 mes	1,15-1,05	1,05-0,80	0,80-0,60	0,60
Muy Malo	No drena	1,05-0,95	0,95-0,75	0,75-0,40	0,40

Carpeta Asfáltica

$$D1 = \frac{2.47}{0.165 * 1} = 14.96\ cm\ \approx 10cm$$

$$SN\ real = 10\ cm * 0.165 * 1 = 1.65$$

Base Clase 1B

$$D2 = \frac{2.77 - 1.65}{0.0394 * 1} = 28.43\ cm \approx 20\ cm$$

$$SN\ real = 20\ cm * 0.0394 * 1 = 0.788$$

Subbase Clase 1

$$D3 = \frac{3.14 - 0.788 - 1.65}{0.0445 * 1} = 15.78\ cm \approx 20\ cm$$

$$SN\ real = 20\ cm * 0.0445 * 1 = 0.89$$

Comprobación

$$1.65 + 0.788 + 0.89 > 3.14$$

$$3.33 > 3.14 \quad \boldsymbol{OK\ CUMPLE}$$

- **Espesores finales con método tradicional AASHTO-93**

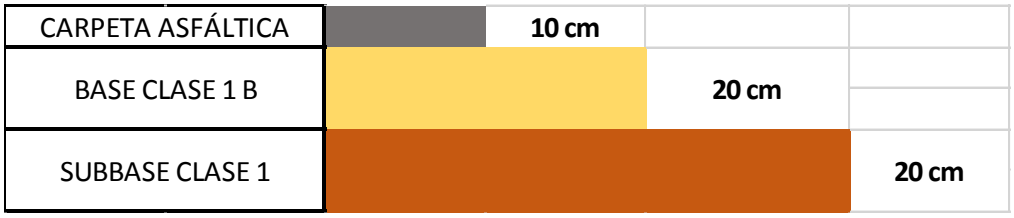


Ilustración 6.1.6: Espesores finales de la estructura del pavimento según método tradicional AASHTO-93

6.2. Diseño basado en la correlación encontrada para la cantera de estudio

- Con los datos iniciales del ejercicio anterior, se obtienen los números estructurales de las diferentes capas, ahora con los valores reales de módulo resiliente. El valor de Módulo resiliente de la subrasante asumiremos que es el mismo.

Subrasante

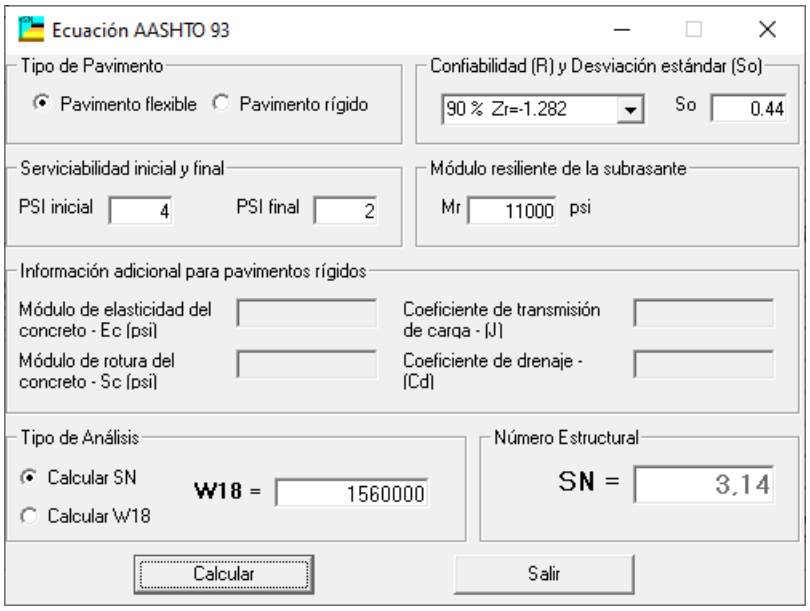
R = 90%

So = 0.44

N (8.2T) = 1.56 x 10^6

M.R. = 11000 psi

PSI = 2.0



Fotografía 6.2.1: Cálculo de Número Estructural para subrasante en el programa Ecuación AASHTO-93

SN = 3.14

Base clase 1 B

En el capítulo 5 de este trabajo, pudimos ver que el Módulo Resiliente encontrado con el GeoGauge de la Base Clase 1 B de la cantera San Joaquín, ubicada en la provincia de Cotopaxi, es de 15216.66 psi.

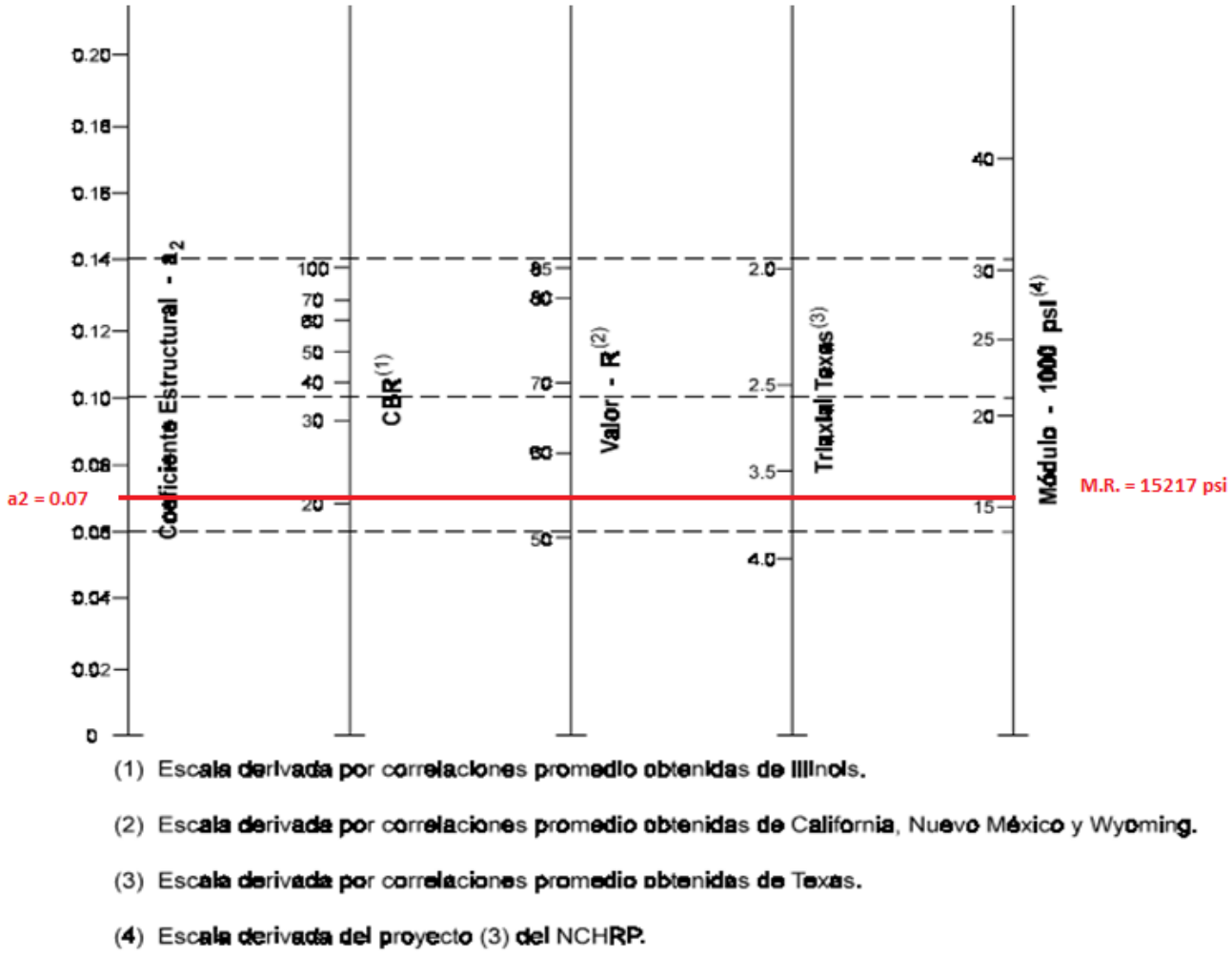
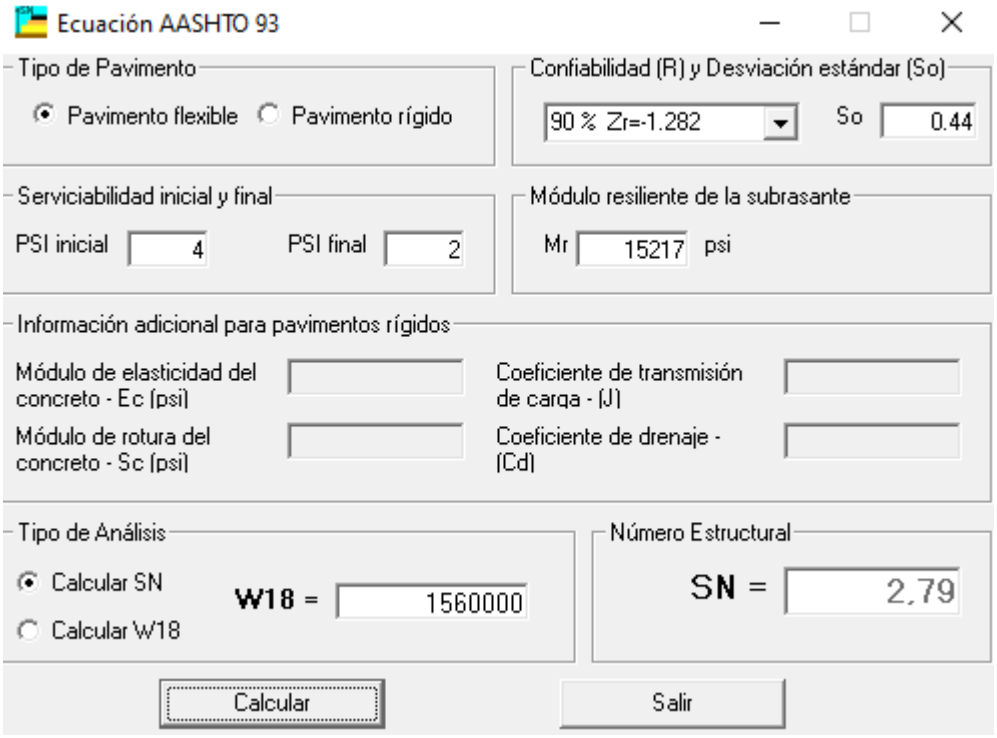


Ilustración 6.2.1: Cálculo de coeficiente estructural y Módulo Resiliente de la Base clase 1 B según Módulo Resiliente in situ

El coeficiente encontrado, según el valor verdadero de Módulo Resiliente, es el siguiente:

Coeficiente estructural a2 = 0.07 = 0.0275 cm



Fotografía 6.2.2: Cálculo de Número Estructural para base clase 1 B en el programa Ecuación AASHTO-93 según Módulo Resiliente in situ

El número estructural calculado para la Base Clase 1 B según el valor verdadero de Módulo Resiliente es:

SN: 2.79

Subbase Clase 1

En el capítulo 5 de esta Tesis, pudimos ver que el Módulo Resiliente Real de la Subbase Clase 1 de la cantera San Joaquín, ubicada en la provincia de Cotopaxi, es de 14133.23 psi.

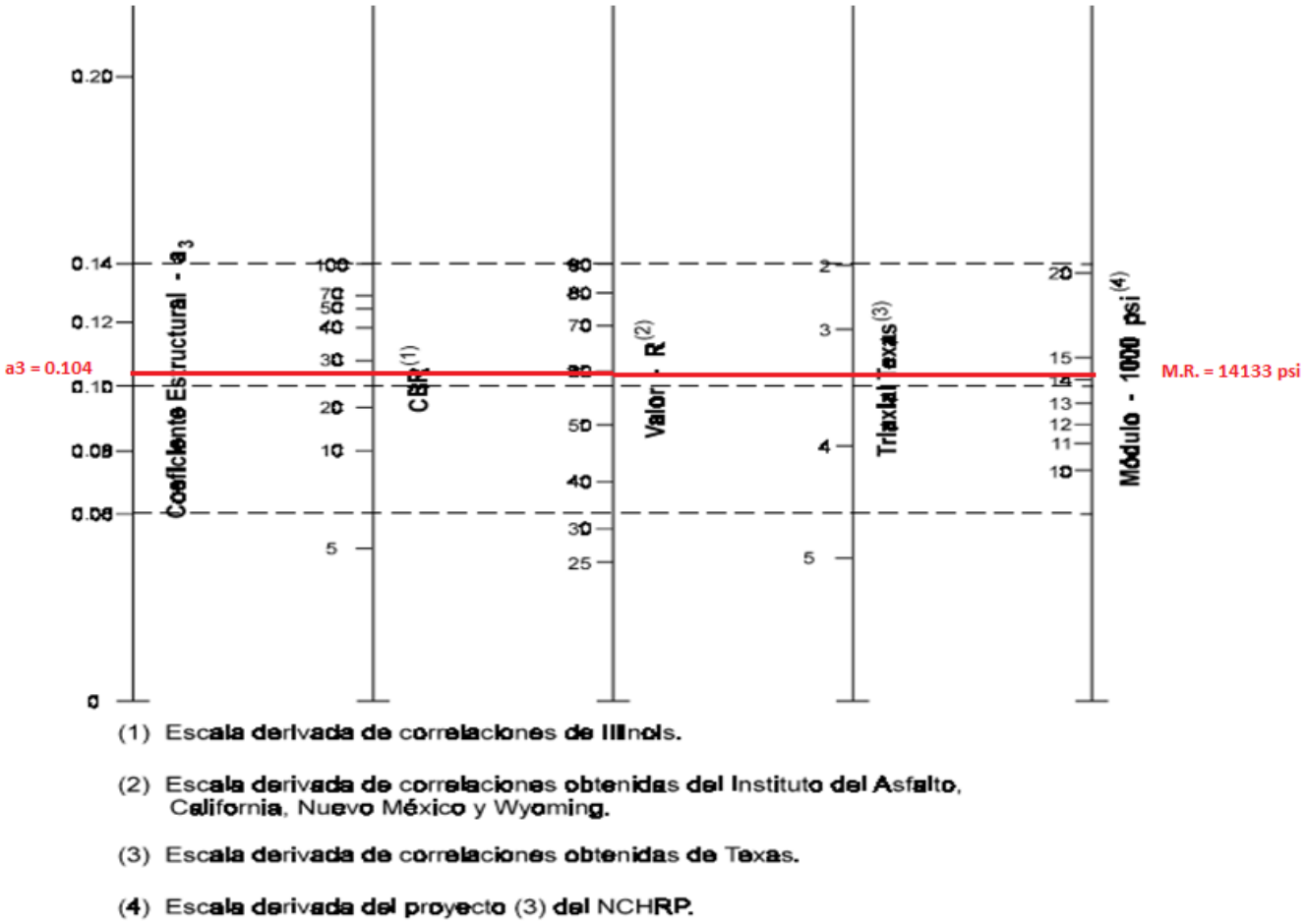
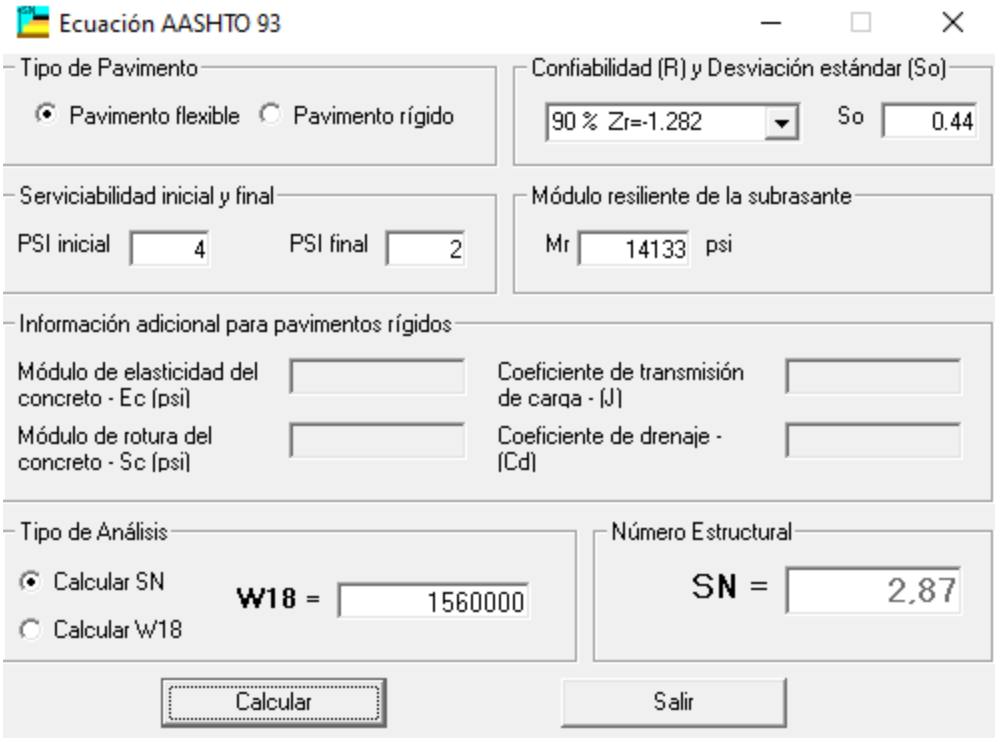


Ilustración 6.2.2: Cálculo de coeficiente estructural y Módulo Resiliente de la Subbase clase 1 según Módulo Resiliente in Situ

El coeficiente encontrado, según el valor verdadero de Módulo Resiliente, es el siguiente:

Coeficiente estructural a3 = 0.104 = 0.0409 cm



Fotografía 6.2.3: Cálculo de Número Estructural para Subbase clase 1 en el programa Ecuación AASHTO-93 según Módulo resiliente in situ (GeoGauge)

El número estructural calculado para la Subbase Clase 1 según el valor verdadero de Módulo Resiliente es:

SN: 2.87

Carpeta Asfáltica

Al igual que en el ejercicio anterior, obtenemos el coeficiente estructural de la carpeta asfáltica, asumiendo un Módulo Resiliente de 400 000 psi.

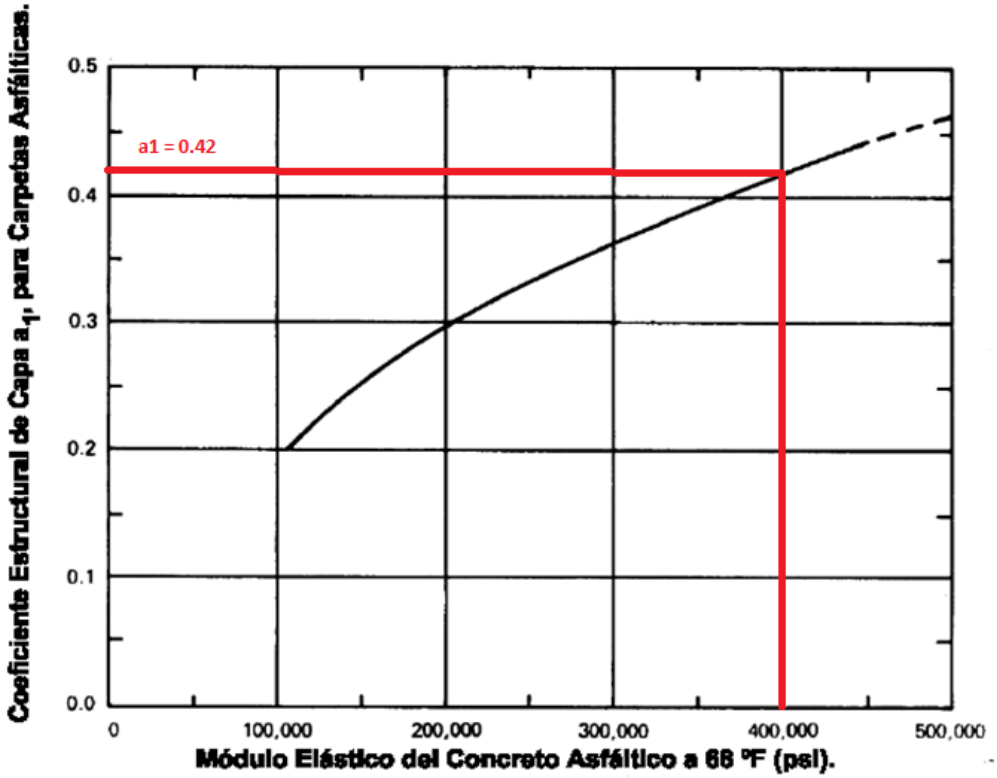


Ilustración 6.2.3: Cálculo de coeficiente estructural de la Carpeta Asfáltica según método AASHTO-93

El coeficiente estructural encontrado fue:

a1=0.42 = 0.165 cm

- Se calculan los espesores de las diferentes capas, asumiendo un coeficiente de drenaje m=1 al igual que el anterior ejercicio.

Carpeta Asfáltica

$$D1 = \frac{2.79}{0.165 * 1} = 16.91\ cm\ \approx 10cm$$

$$SN\ real = 10\ cm * 0.165 * 1 = 1.65$$

Base Clase 1 B

$$D2 = \frac{2.87 - 1.65}{0.0275 * 1} = 44.36\ cm \approx 25\ cm$$

$$SN\ real = 25\ cm * 0.0275 * 1 = 0.6875$$

Subbase Clase 1

$$D3 = \frac{3.14 - 0.6875 - 1.65}{0.0409 * 1} = 19.62\ cm \approx 25\ cm$$

$$SN\ real = 25\ cm * 0.0409 * 1 = 1.0225$$

Comprobación

$$1.65 + 0.6875 + 1.0225 > 3.14$$

$$3.36 > 3.14 \quad \boldsymbol{OK\ CUMPLE}$$

- **Espesores finales con los valores verdaderos de Módulo Resiliente**

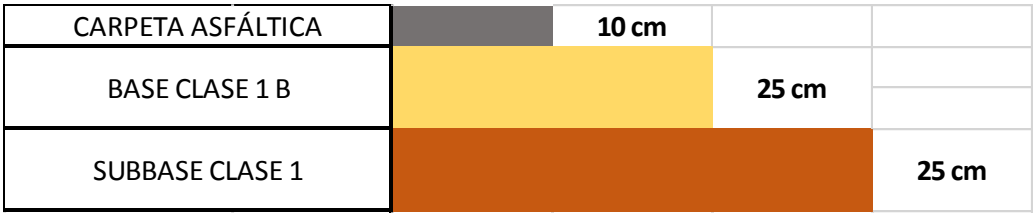


Ilustración 6.2.4: Espesores finales de la estructura del pavimento según el verdadero valor de Módulo Resiliente

6.3. Resumen de los diseños finales de los dos métodos utilizados

MÉTODO AASHTO-93		MÉTODO MÓDULO RESILIENTE GEOGAUGE	
CARPETA ASFÁLTICA	10 cm	CARPETA ASFÁLTICA	10 cm
BASE CLASE 1 B	20 cm	BASE CLASE 1 B	25 cm
SUBBASE CLASE 1	20 cm	SUBBASE CLASE 1	25 cm

Ilustración 6.3.1: Espesores finales de la estructura del pavimento en ambos métodos

6.4. Cálculo de Coeficientes estructurales para las Bases y Subbases de la cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi.

El cálculo de los coeficientes estructurales es esencial para un diseño rápido de los espesores de la carpeta asfáltica. En este caso se calcularán los coeficientes estructurales de acuerdo con los gráficos obtenidos en la AASHTO-93, utilizando el Módulo Resiliente obtenido mediante el GeoGauge.

Base Clase 1B

El módulo resiliente de la Base Clase 1 B de la Cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi, es de 15216.66 psi.

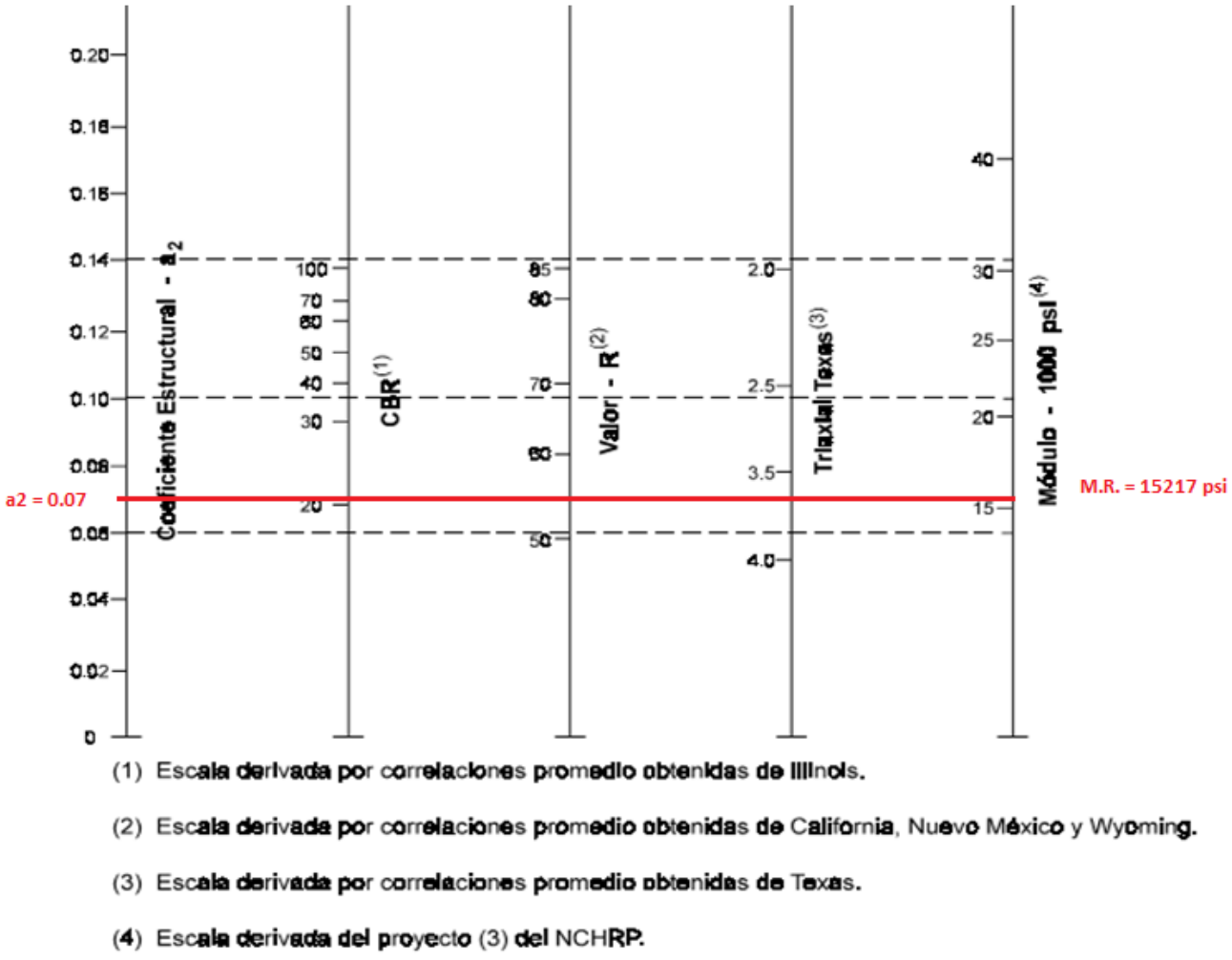


Ilustración 6.4.1: Cálculo de coeficiente estructural a2 para Base Clase 1 B de la Cantera San Joaquín.

El coeficiente estructural a2 obtenido para la Base Clase 1 B es de 0.07 dando un coeficiente estructural en cm de 0.028.

Base Clase 2

El módulo resiliente de la Base Clase 2 de la Cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi, es de 15179.68 psi.

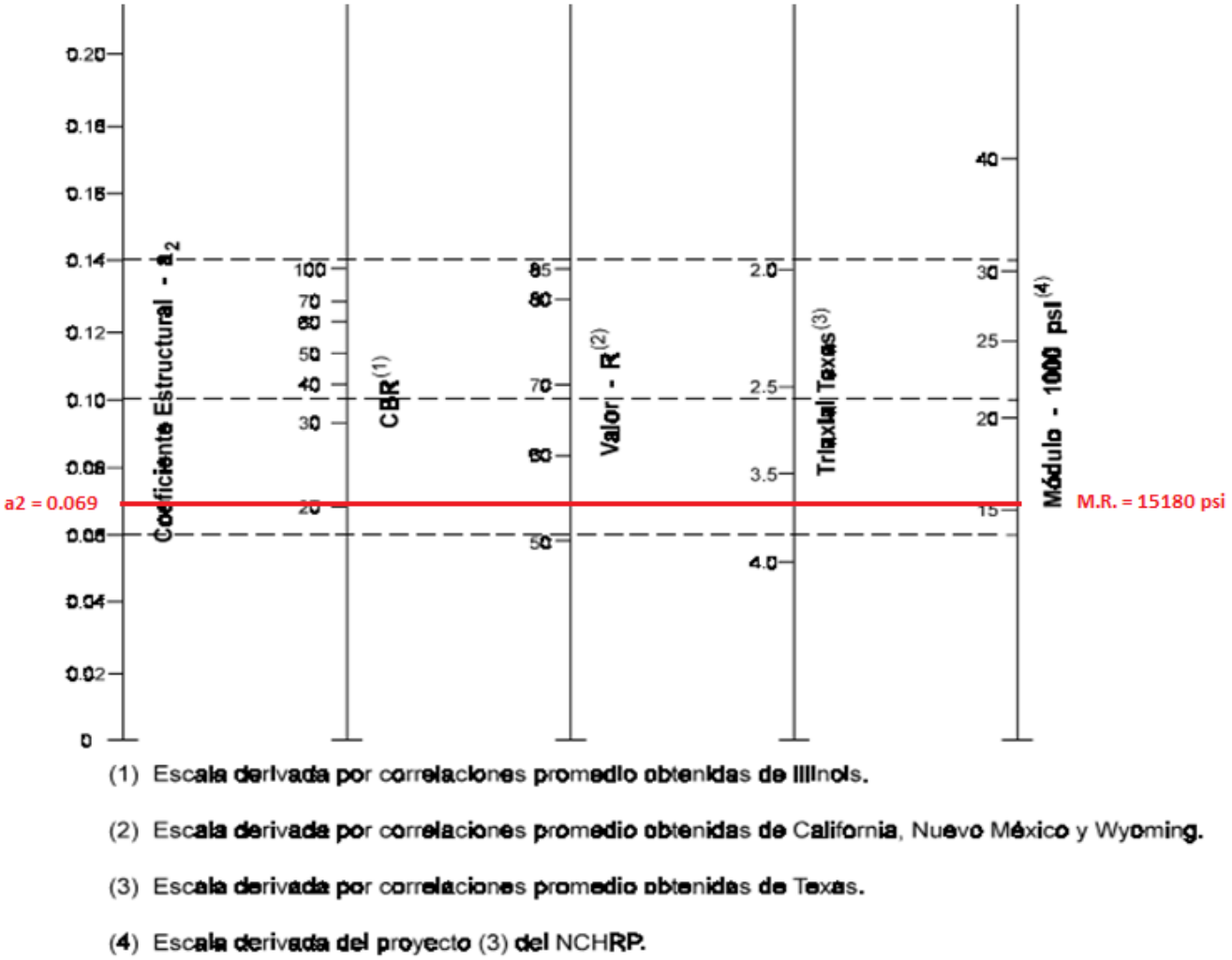


Ilustración 6.4.2: Cálculo de coeficiente estructural a2 para Base Clase 2 de la Cantera San Joaquín.

El coeficiente estructural a2 obtenido para la Base Clase 2 es de 0.069 dando un coeficiente estructural en cm de 0.027.

Base Clase 3

El módulo resiliente de la Base Clase 3 de la Cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi, es de 14980.25 psi.

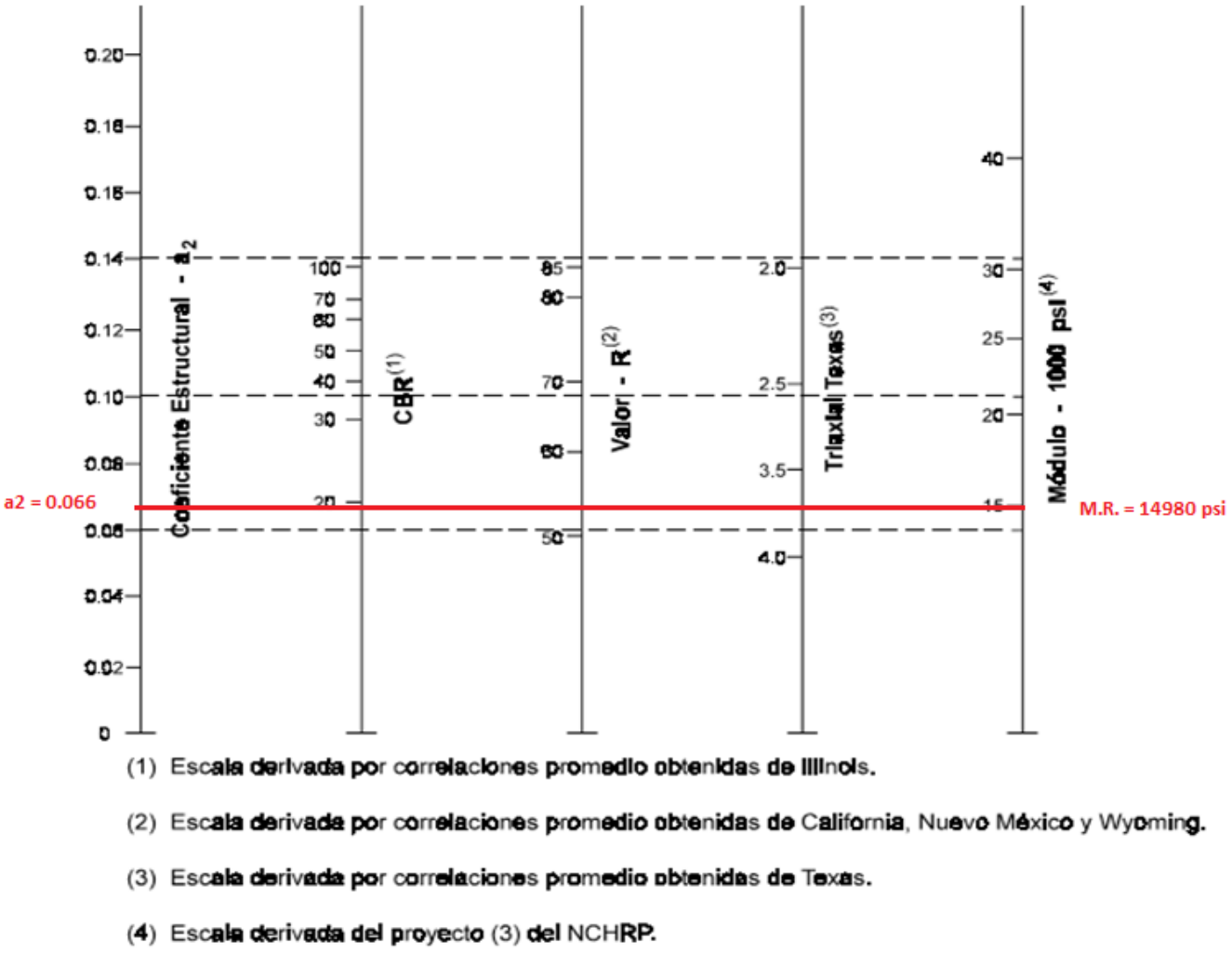


Ilustración 6.4.3: Cálculo de coeficiente estructural a2 para Base Clase 3 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi).

El coeficiente estructural a2 obtenido para la Base Clase 3 es de 0.066 dando un coeficiente estructural en cm de 0.026.

Base Clase 4

El módulo resiliente de la Base Clase 4 de la Cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi, es de 14274.64 psi.

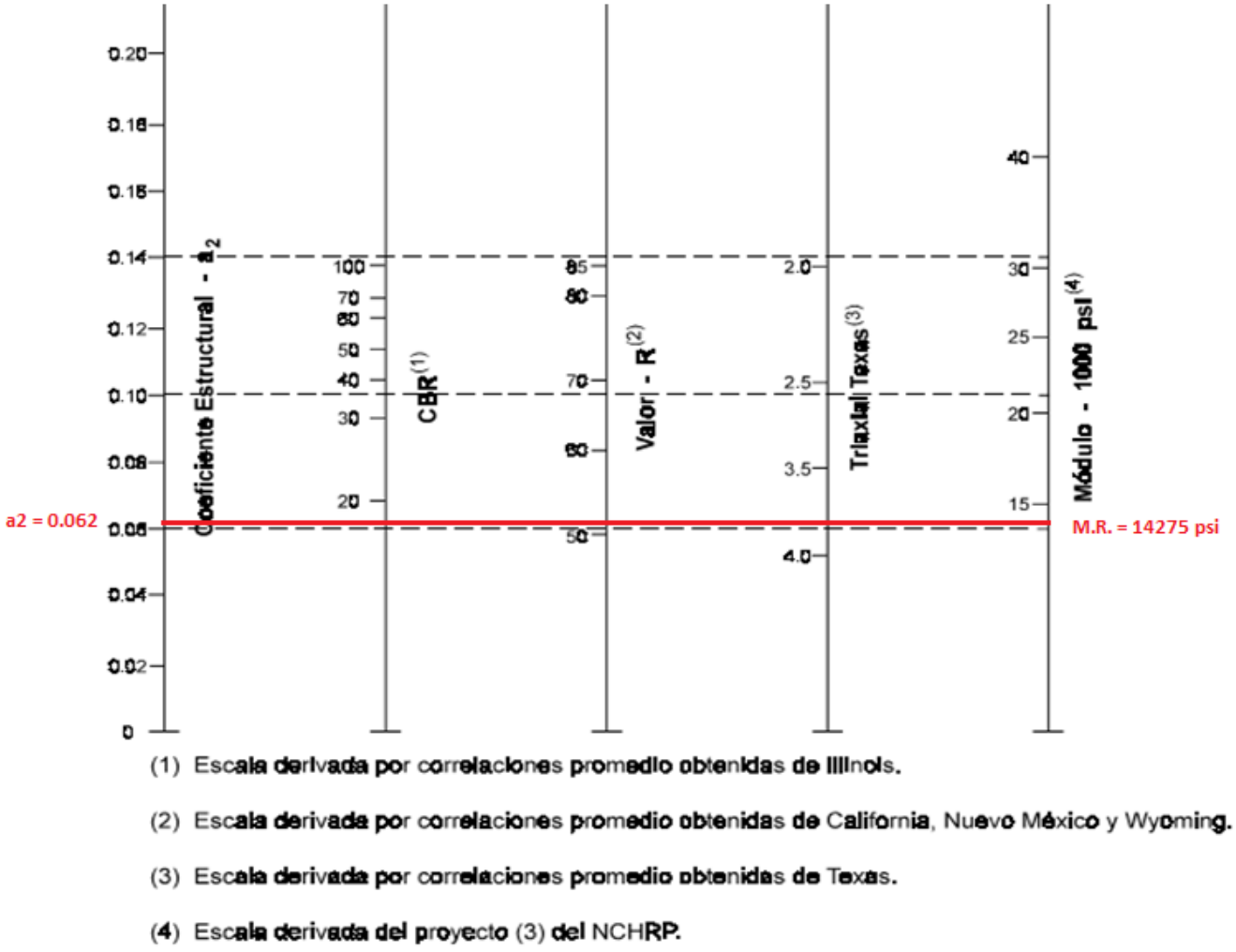


Ilustración 6.4.4: Cálculo de coeficiente estructural a2 para Base Clase 4 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi).

El coeficiente estructural a2 obtenido para la Base Clase 4 es de 0.062 dando un coeficiente estructural en cm de 0.024.

Subbase Clase 1

El módulo resiliente de la Subbase Clase 1 de la Cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi, es de 14133.23 psi.

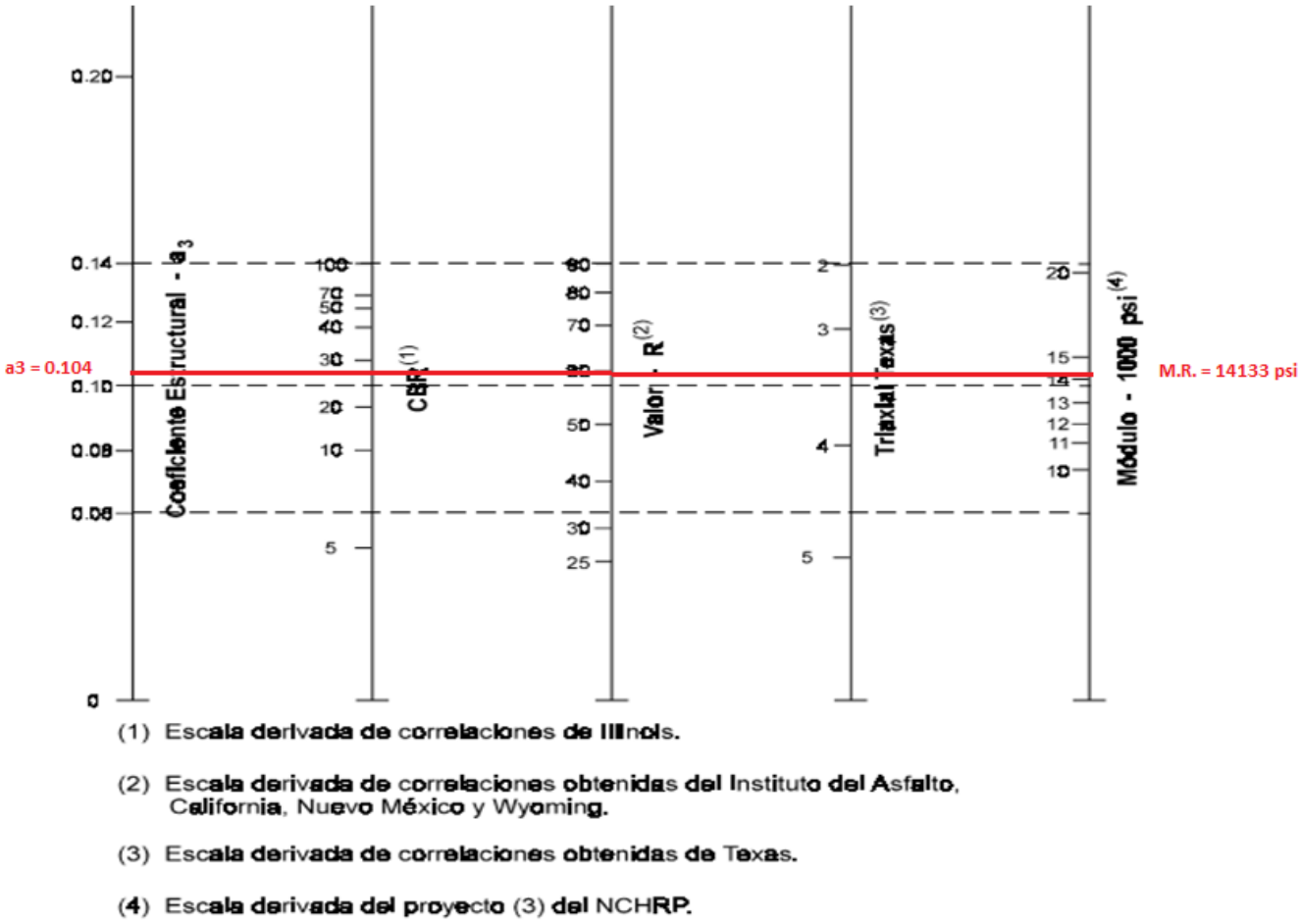


Ilustración 6.4.5: Cálculo de coeficiente estructural a3 para Subbase Clase 1 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi).

El coeficiente estructural a3 obtenido para la Subbase Clase 1 es de 0.104 dando un coeficiente estructural en cm de 0.041.

Subbase Clase 2

El módulo resiliente de la Subbase Clase 2 de la Cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi, es de 13897.54 psi.

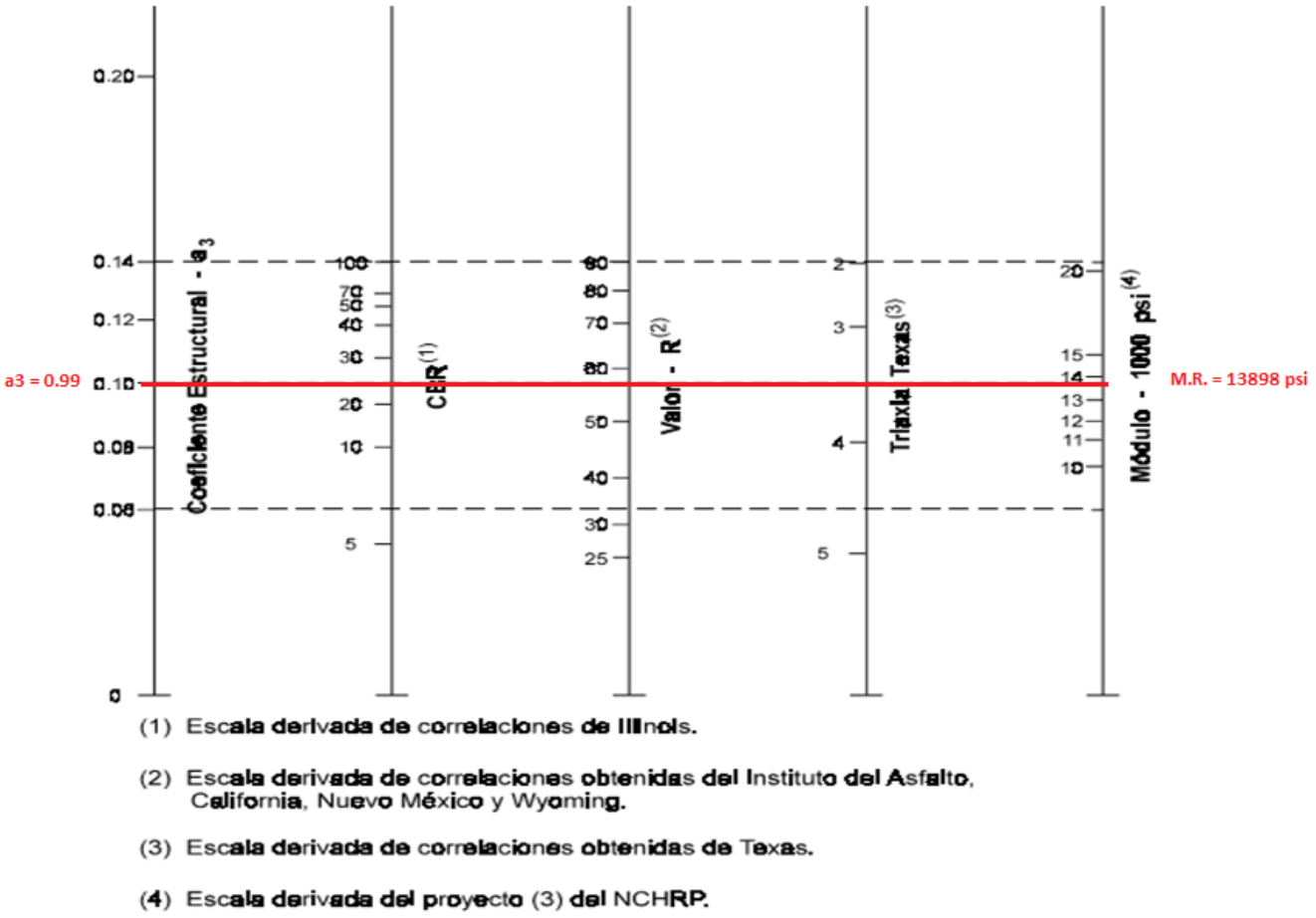


Ilustración 6.4.6: Cálculo de coeficiente estructural a3 para Subbase Clase 2 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi).

El coeficiente estructural a3 obtenido para la Subbase Clase 2 es de 0.099 dando un coeficiente estructural en cm de 0.039

Subbase Clase 3

El módulo resiliente de la Subbase Clase 3 de la Cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi, es de 13115.06 psi.

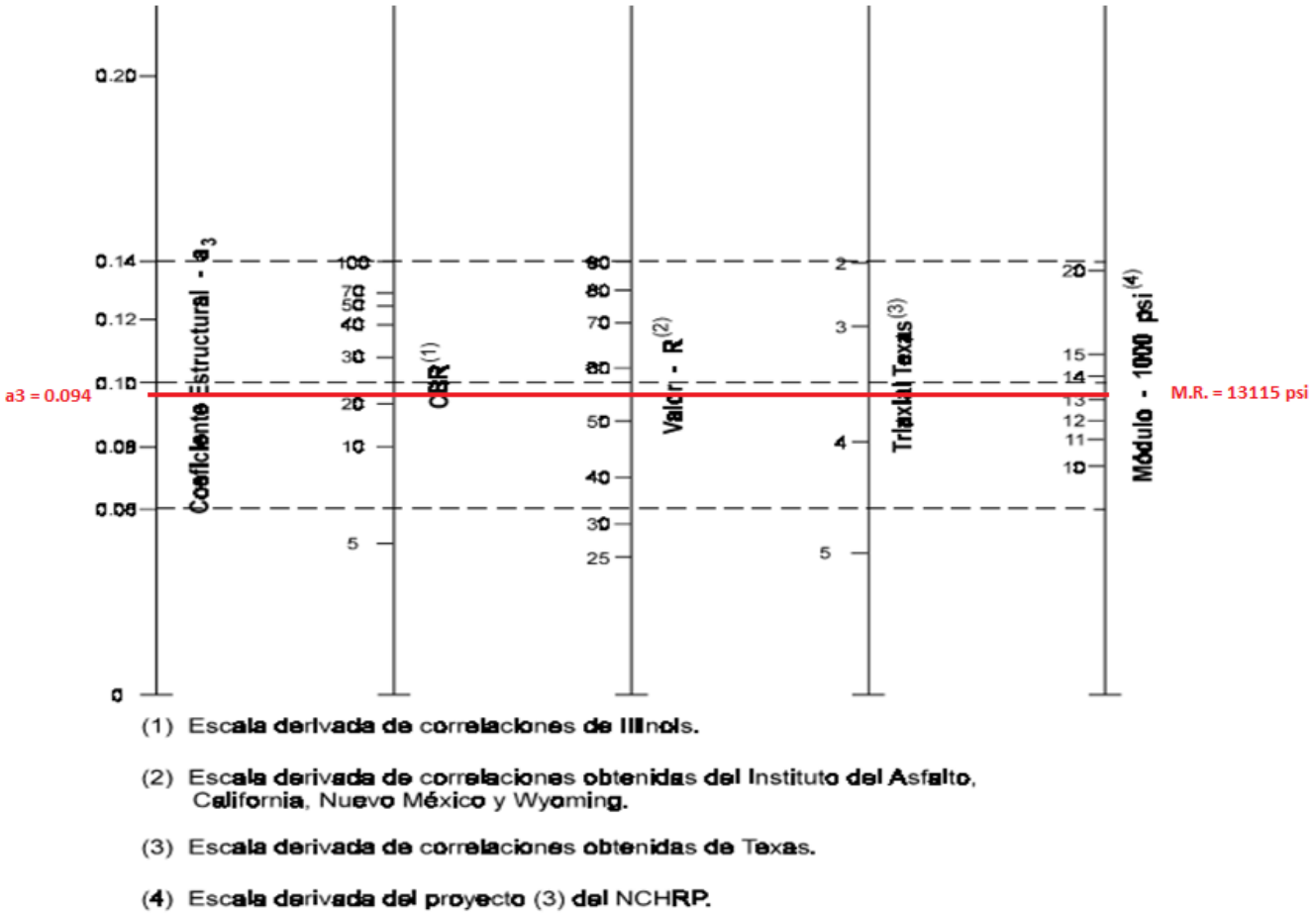


Ilustración 6.4.7: Cálculo de coeficiente estructural a3 para Subbase Clase 3 de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi).

El coeficiente estructural a3 obtenido para la Subbase Clase 3 es de 0.094 dando un coeficiente estructural en cm de 0.037

A continuación, se muestra una tabla resumen donde están los coeficientes estructurales para Bases y Subbases de la Cantera San Joaquín.

Tabla 6.4.1: Coeficientes estructurales de Bases y Subbases de la Cantera San Joaquín (Cotopaxi).

COEFICIENTES ESTRUCTURALES CANTERA SAN JOAQUÍN		
TIPO	**COEFICIENTE ESTRUCTURAL (a)**	**COEFICIENTE ESTRUCTURAL (a) cm**
BASE CLASE 1B	0,070	0,028
BASE CLASE 2	0,069	0,027
BASE CLASE 3	0,066	0,026
BASE CLASE 4	0,062	0,024
SUBBASE CLASE 1	0,104	0,041
SUBBASE CLASE 2	0,099	0,039
SUBBASE CLASE 3	0,094	0,037

6.5. Comparación de los coeficientes estructurales con la tabla de referencias AASHTO -93

En esta sección, se compararán los coeficientes estructurales obtenidos en la Tabla 6.4.1., con los rangos típicos de los coeficientes estructurales en la norma AASHTO-93. Los coeficientes de la norma AASHTO-93 son rangos en los cuales se encuentran típicamente los coeficientes de las diferentes capas del pavimento. En la siguiente tabla se muestran los rangos típicos:

Tabla 6.5.1: Coeficientes estructurales típicos según AASHTO-93

COEFICIENTE DE CAPAS DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES METODO AASHTO-93		
CLASE DE MATERIAL	**NORMAS**	**COEFICIENTE (cm)**
CAPA DE SUPERFICIE		
CONCRETO ASFALTICO	ESTABILIDAD DE MARSHALL 1000 - 1800 LBS	0.134 - 0.173
ARENA ASFALTICA	ESTABILIDAD DE MARSHALL 500 - 600 LBS	0.079 - 0.118
CARPETA BITUMINOSA MEZCLADA EN EL CAMINO	ESTABILIDAD DE MARSHALL 300 - 600 LBS	0.059 - 0.098
CAPA DE BASE		
AGREGADOS TRITURADOS GRADUADOS UNIFORMEMENTE	P.I. 0 - 4, CBR > 100%	0.047 - 0.056
GRAVA GRADUADA UNIFORMEMENTE	P.I. 0 - 4, CBR 30 - 60%	0.028 - 0.051
CONCRETO ASFALTICO	ESTABILIDAD DE MARSHALL 1000 - 1600 LBS	0.098 - 0.138
ARENA ASFALTICA	ESTABILIDAD DE MARSHALL 500 - 600 LBS	0.059 - 0.098
AGREGADO GRUESO ESTABILIZADO CON CEMENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESION 28 - 46 kg/cm2	0.079 - 0.139
AGREGADO GRUESO ESTABILIZADO CON CAL	RESISTENCIA A LA COMPRESION 7 kg/cm2	0.089 - 0.119
SUELO – CEMENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESION 18 - 32 kg/cm2	0.047 - 0.079
CAPA DE SUB – BASE		
ARENA - GRAVA, GRADUADA UNIFORMEMENTE	P.I. 0 - 6, CBR 30%	0.032 - 0.043
SUELO – CEMENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESION 18 - 22 kg/cm2	0.025 - 0.071
SUELO – CAL	RESISTENCIA A LA COMPRESION 8 kg/cm2	0.059 - 0.071
MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE		
ARENA O SUELO SELECCIONADO	P.I. 0 – 10	0.020 - 0.025
SUELO CON CAL	3% MINIMO DE CAL EN PESO DE LOS SUELOS	0.028 - 0.029
TRATAMIENTO SUPERFICIAL BITUMINOSO		
TRIPLE RIEGO		* 0.40
DOBLE RIEGO		* 0.25
SIMPLE RIEGO		* 0.15
	* USAR ESTOS VALORES PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE TRATAMIENTOS BITUMINOSOS, SIN CALCULAR ESPESORES	

Fuente: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (1993). AASHTO Guide For Design of Pavement Structures. Washington, USA: AASHTO.

El tipo de material en el caso de las Bases de la Cantera San Joaquín corresponde a una grava uniformemente graduada, por lo que los coeficientes encontrados deberían estar dentro del rango propuesto (0.028 cm - 0.051 cm), sin embargo, solo la Base Clase 1B cumple con el rango propuesto. La Base Clase 2,3 y 4 no cumplen dentro del rango típico que propone la AASHTO-93.

Para las Subbases, el material de la cantera San Joaquín corresponde igualmente a una grava uniformemente graduada, por lo que el rango propuesto por la AASHTO-93 para las subbases (0.032 cm - 0.043 cm) si cumple con los coeficientes estructurales encontrados en las Subbases de la cantera estudiada.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- El material adquirido para el presente estudio como base y subbase de la cantera San Joaquín corresponde a una Base clase 2 y a una Subbase clase 2 respectivamente, cumpliendo con la granulometría propuesta por el Ministerio de Obras Públicas para la clasificación.
- El material de la cantera San Joaquín no posee contenido orgánico de acuerdo con el ensayo de determinación de impurezas orgánicas (ASTM C40).
- Según el ensayo de determinación de terrones de arcilla en los agregados naturales (ASTM C142), el material, de la Cantera San Joaquín ubicada en la provincia de Cotopaxi, cumple con las especificaciones mínimas que especifica el Ministerio de Obras Públicas en la norma MOP-001-F 2002 (máximo 3% en agregado fino y máximo 5% en el agregado grueso). En este caso se tuvo un porcentaje de 1.8% para el agregado fino y un 0.48% en el agregado grueso.
- En cuanto al ensayo de determinación del equivalente de arena (ASTM D2419), el material de la cantera San Joaquín cumple con las especificaciones de la norma MOP-001-F 2002 (mínimo 50%), obteniéndose así un porcentaje de 80.2%.
- En cuanto a la resistencia al desgaste del agregado por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles (ASTM C131), el material de la cantera San Joaquín cumple con las especificaciones de la norma MOP-001-F 2002 (máximo 40% para bases y máximo 50% para subbases). En este caso

se obtuvo un porcentaje de desgaste de 34.14%, por lo que el material podría ser utilizado tanto para bases y subbases.

- Según el ensayo para determinar el desgaste de los agregados ante la acción de los sulfatos (ASTM C88), el material de la cantera San Joaquín, tanto el agregado fino y el agregado grueso no cumplen con los requerimientos mínimos que solicita la norma MOP-001-F 2002 (máximo 12% para el agregado fino y para el agregado grueso). En este caso se obtuvo 16.62% de desgaste en el agregado grueso y 21.49% de desgaste en el agregado fino. En Ecuador, este ensayo no es tan importante, ya que este ensayo es realizado para comprobar la resistencia del agregado frente a condiciones de climas extremos, y en Ecuador existen muy pocas zonas en las que sucede este tipo de situaciones.
- En el caso de las Bases, el porcentaje de C.B.R. no cumple con las especificaciones mínimas que solicita la norma MOP-001-F 2002 (mínimo 80%), pero en el caso de las Subbases, el material si cumple con el porcentaje mínimo que especifica la norma (mínimo 30%) (a excepción de la Subbase Clase 3). En consecuencia, el material si puede ser utilizado para la conformación de subbases. La razón por la que el porcentaje de C.B.R. es tan bajo, es debido a que la piedra que conforma el material es una roca ígnea de origen volcánico de muy baja densidad y de muy poca resistencia.
- En cuanto a los diseños de la estructura del pavimento con ambos métodos, se puede observar que los espesores de Base y de Subbase obtenidos con el módulo resiliente del GeoGauge son más grandes. La razón por la que son más grandes es debido a que la correlación tradicional de la AASHTO-93 sobreestima la capacidad del suelo otorgándole valores altos de Módulo Resiliente, por lo que, si se realizaba el diseño con la correlación tradicional, el pavimento hubiera tenido un desempeño no óptimo para el mismo tráfico esperado, teniendo una menor vida útil.
- La comparación de los coeficientes estructurales obtenidos para las diferentes Bases y Subbases de la Cantera San Joaquín con la tabla de los rangos típicos según la norma AASHTO-93, nos mostró que en el caso de las Bases (a excepción de la Base Clase 1B), los coeficientes no se encuentran dentro del rango propuesto por la norma. En el caso de las Subbases, los valores de coeficiente estructural encontrados si se encuentran dentro del rango propuesto.

7.2. Recomendaciones

- Se recomienda que, si se desea utilizar el material de la Cantera San Joaquín para la conformación de una Base, se utilice algún otro tipo de mejoramiento, para garantizar mejores características y propiedades mecánicas del material y así cumplir con las especificaciones mínimas que solicita la norma MOP-001-F 2002.
- Se recomienda tener especial atención en la obtención del porcentaje de humedad óptima mediante el Proctor Modificado, ya que de esta variable dependen muchos ensayos (C.B.R., Módulo Resiliente) que influyen en el resultado final (correlación para C.B.R. vs Módulo Resiliente).
- Luego del estudio de la presente tesis, se recomienda que el material de la cantera San Joaquín sea utilizado para la conformación de subbases, ya que las propiedades mecánicas del éste garantizan un mejor desempeño como subbase según la norma MOP-001-F 2002.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

8. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. (2004). *Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes M145-91 (2004).* Washington, D.C., Estados Unidos.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (1993). *AASHTO Guide For Design of Pavement Structures.* Washington, USA: AASHTO.

ASTM INTERNATIONAL. (1998). *Práctica estándar para la Reducción de muestras de agregado a Prueba de Tamaño C702.* West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (2003). *Práctica Normativa para el Muestreo de Agregados D75.* West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3)) D1557-12.* West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (2014). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.* West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (2014). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates ASTM C136.* West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (2016). *Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils D1883.* West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (2017). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) ASTM D2487.* West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (2017). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates C142.* West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (2018). *Especificación estándar para agregados para hormigón C33.* West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (2018). *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate C88.* West Conshohocken, Estados Unidos.

Chang, I. L. (2010). C.B.R. (Californa Bearing Ratio). (pág. 6). Lima: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID).

COTECNO CORP. (28 de enero de 2018). *Geogauge, calibrador de rigidez del suelo -H-4140*. Obtenido de Geogauge, calibrador de rigidez del suelo -H-4140: https://www.cotecno.cl/nuestros-productos/geogauge-calibrador-de-rigidez-del-suelo-s-n/

Humboldt. (2 de Agosto de 2019). *Humboldt Construction Materials Testing Equipment*. Obtenido de https://www.humboldtmfg.com/geogauge.html

Laboratorio de Mecánica de Suelos Universidad Nacional de Ingeniería. (2006). *CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.)* (Vol. 1). (U. N. Ingeniería, Ed.) Lima, Perú.

Martín, F. M. (1996). *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico.* Madrid, España: Complutense.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR. (2013). *NORMA ECUATORIANA VIAL NEVI-12-MTOP* (Vol. 2). (S. D. TRANSPORTE, Ed.) Quito, Pichincha, Ecuador: NORMAS PARA ESTUDIOS Y DISEÑOS VIALES.

Reed Business Information. (2006). Proyectos con adoquín cerámico (y ll). *Arte y Cemento: Revista de la construccion y su entorno*, 56.

Rodríguez, A. R. (2001). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres: Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas* (Vol. 1). México: Limusa Noriega Editores.

Villafuerte Bermúdez, L., & Ortega Calle, K. (2015). *Evaluación estructural de pavimento flexible para suelos tipo arenoso.* Quito, Ecuador.

Yánez, G. (2015). DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES., (págs. 39-40). Quito.