

21/11/2013
66642

T
MZ69i
2013



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Influencia del Contenido de Maicillo Incorporado a Bases Granulares en el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles

Por

Tatiana Patricia Mancilla Rafagello

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y título de Ingeniero Civil

Prof. Guía Guillermo Brante Lara

Diciembre, 2013

- Pavimentos
- Diseño Estructural
- Maicillo

R. 16899

No pierdas mucho tiempo pensando en el problema.
Dedica toda tu energía y sapiencia en buscar soluciones...

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a mi familia que amo con todo mi corazón, siempre sintiendo el apoyo de cada uno de ustedes en este importante propósito de mi vida. A mis padres y hermana que siempre estuvieron conmigo dándome fuerzas para seguir adelante.

A mis amigos, por todas esas vibras depositadas en mí que ayudaron a lograr este gran desafío. Aníbal, Christian y Valentina, ustedes están y estarán siempre en mi corazón.

Para ti, Amaro, que me contuviste y ayudaste en los momentos más difíciles, que celebraste mis momentos de grandes logros y por ser un pilar fundamental en mi vida.

A mi profesor guía Guillermo Brante, por la confianza, orientación y tiempo entregado, sin usted esto no podría haber sido posible.

Finalmente expresar mi gratitud a toda la Unidad de Laboratorio y Gestión de Calidad de la Dirección de Vialidad, Región de Valparaíso, por entregar las herramientas y conocimientos para lograr llevar a cabo esta memoria de título y por sobre todo la disposición y buenas vibras. Conocí bellas personas y me llevo un gran recuerdo de todos ustedes.

Índice

1. Generalidades	20
1.1 Introducción	20
1.2 Planteamiento del Problema	21
1.3 Objetivos.....	23
1.3.1 Objetivo General	23
1.3.2 Objetivos Específicos	23
1.4 Alcances	23
1.5 Metodología de Trabajo	24
1.6 Antecedentes Generales.....	27
2. Pavimentos Flexibles	28
2.1 Características de los Pavimentos Flexibles.....	28
2.2 Capas que conforman los Pavimentos Flexibles	28
2.2.1 Carpeta de Rodadura.....	29
2.2.2 Base Granular	29
2.2.3 Sub-base Granular	30
2.2.4 Subrasante	30
3. Maicillo	31
3.1 Maicillo en la Literatura	32
4. Ensayos y Especificaciones Técnicas para caracterizar las Bases Granulares	33
4.1 Ensayos para caracterizar las Bases Granulares.....	33
4.1.1 Granulometría (MC-8.102.1)	33
4.1.2 Cubicidad de Partículas (MC-V8.202.6).....	33
4.1.3 Límites de Atterberg (MC-V8.102.3 / MC-V8.102.4).....	34
4.1.4 Clasificación del material.....	35
4.1.5 Densidad de Partículas Sólidas (MC-V8.102.10).....	36
4.1.6 Desgaste de Los Ángeles (MC-V8.202.11).....	36
4.1.7 Proctor Modificado (MC-V8.102.7).....	36
4.1.8 Capacidad de Soporte CBR (MC-V8.102.11)	37
4.2 Especificaciones para Caracterizar las Bases Granulares	37
4.2.1 Requisitos Generales	37

4.2.2 Bases Granulares de graduación Cerrada, Bajo la Capa de Rodadura	38
4.2.3 Bandas Granulométricas	38
5. Drenaje	39
5.1 Fallas inducidas por humedad	39
5.2 Consideraciones de drenaje en el diseño de pavimentos según AASTHO 93'	40
5.3 Ensayo Permeabilidad a Carga Constante (ASTM D-2434).....	44
6. Módulo de Resiliencia.....	46
6.1 Factores que afectan el Módulo de Resiliencia en Materiales Granulares.....	47
6.2 Método AASTHO. Módulo de Resiliencia en capas granulares	47
6.3 Correlaciones entre Módulo de Resiliencia y Capacidad de Soporte CBR	48
6.4 Ensayo Triaxial Cíclico Dinámico (AASTHO T-307)	49
7. Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles	50
7.1 Metodología AASTHO.....	51
7.2 Diseño Estructural	52
7.2.1 Número Estructural Total	52
7.2.2 Números Estructurales (NEi).....	52
7.2.3 Coeficientes Estructurales.....	52
7.2.4 Coeficiente Estructural para Concretos Asfálticos	53
7.2.5 Coeficiente Estructural para las Capas Granulares	54
7.2.6 Coeficientes de Drenaje	56
7.2.7 Serviciabilidad	57
7.2.8 Solicitaciones	57
7.2.9 Confiabilidad.....	58
7.2.10 Módulos Resilientes Subrasante.....	59
7.2.11 Diseño con verificación por capas	59
7.2.12 Variante Presente en Manual de Carreteras Volumen 3	61
8. Presentación y Análisis de Resultados	62
8.1 Caracterización y Análisis de Materiales.	63
8.1.1 Arena arcillosa (maicillo con plasticidad)	64
8.1.2 Arena limosa (maicillo sin plasticidad)	65
8.1.3 Mezclas base granular con arena-arcillosa.....	66

8.1.4 Mezclas base granular con arena-limosa	68
8.2 Drenaje	71
8.2.1 Coeficiente de Permeabilidad de mezclas realizadas	71
8.2.2 Coeficiente de Drenaje	73
8.3 Módulo de Resiliencia de mezclas base granular con arena-limosa	74
8.4 Análisis Estadístico de Resultados Obtenidos.....	76
8.4.1 Porcentaje de arena-limosa Vs capacidad de soporte CBR.....	77
8.4.2 Porcentaje de arena-limosa Vs Módulo de Resiliencia Real	78
8.4.3 Capacidad de soporte CBR Vs Módulo de Resiliencia Real	79
8.5 Módulo de Resiliencia Teórico Vs Módulo de Resiliencia Real	80
8.6 Determinación de valor máximo de maicillo a incorporar para la creación de un nuevo tipo de base granular.....	82
8.7 Diseño Estructural de pavimento flexible tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay	83
8.7.1 Generalidades	83
8.7.2 Caso N°1, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia Teórico	85
8.7.3 Caso N°2, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia Real.....	86
8.7.4 Caso N°3, Diseño Estructural con Programa PAVIVIAL.....	87
8.7.5 Caso N°4, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia de la base granular Limpia.....	88
9. Análisis de Costos	89
9.1 Costo Producción base granular con maicillo	89
9.2 Costo Producción de Nueva Base Granular en Tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay	91
9.3 Costo Diseño Espesores.....	92
10. Recomendaciones.....	93
11. Conclusiones	94
Referencias Bibliográficas.....	97
ANEXOS	100
ANEXO A: Ensayos realizados para caracterizar las Bases Granulares	101
ANEXO B: Coeficiente de permeabilidad y Coeficiente de Drenaje	131
ANEXO C: Ensayo Triaxial Cíclico Dinámico (TMS).....	137
ANEXO D: Diseño Estructural.....	145
ANEXO E: Analisis de Costos.....	151

ANEXO F: Láminas para Determinar el NE_A para Diseño Estructural PAVIVIAL.....	156
ANEXO G: Clasificación del material.....	158
Glosario.....	8
Lista de Abreviaturas.....	9
Lista de Símbolos.....	10
Lista de Tablas.....	12
Lista de Figuras.....	16
Resumen Memoria.....	19

Glosario

Abrasión: proceso de desgaste producido en una superficie por pérdida de material causadas por agentes externos.

Ahuellamiento (Pavimentos Flexibles): Depresión longitudinal del pavimento que coincide con la zona donde pasan con mayor frecuencia las ruedas de los vehículos (huella).

Arcilla: Suelo de granos finos (compuesto por partículas menores a 5 micrones), que posee alta plasticidad dentro de ciertos límites de contenido de humedad y que, secado al aire, adquiere una resistencia importante.

Arena: Material resultante de la desintegración, molienda o trituración de la roca, cuyas partículas pasan por el tamiz 5 mm y son retenidas por el 0.08 mm.

Base Asfáltica (capa intermedia): Capa conformada por agregados pétreos, ligados con un producto asfáltico y que cumple con ciertos requisitos (generalmente se coloca entre la capa asfáltica de rodadura y la base asfáltica).

Capas granulares no tratadas: capas del paquete estructural de un pavimento flexible conformadas exclusivamente por una mezcla de suelo, que habitualmente cumplen con ciertos requisitos en cuanto a granulometría, límites de Atterberg, capacidad de soporte y otros.

Concreto Asfáltico de Rodadura: Mezcla conformada por agregados pétreos ligados con un producto asfáltico y que cumple con los requisitos para soportar las sollicitaciones que genera el tránsito.

Esponjamiento: Aumento de volumen que experimenta un suelo al ser removido de su estado natural.

Limo: Suelo de grano fino con poca o ninguna plasticidad que en estado seco tiene apenas la cohesión necesaria para formar terrones fácilmente friables. El tamaño de sus partículas está comprendido entre 0.005 mm y 0.08 mm.

Número Estructural: Número que evalúa la calidad del paquete estructural de un pavimento. Se determina como la suma ponderada de los espesores por los coeficientes estructurales, determinados experimentalmente, los coeficientes estructurales son correlacionables con los módulos de las capas estructurales.

Partículas Chancadas: partículas preparadas por métodos mecanizados (chancadores), que tienen dos o más caras fracturadas y que por ello poseen al menos una arista. No se consideran como chancado aquellas partículas que aun teniendo dos o más caras fracturadas, presenten cantos redondeados.

Partículas Lajeadas: partículas en que la razón o cociente entre las dimensiones máxima y mínima, referida a un prisma rectangular circunscrito, es mayor que 5.

Partículas Rodadas: Partículas que no poseen aristas.

Riego de Liga: Aplicación de un ligante asfáltico en estado líquido sobre la superficie de una capa de mezcla asfáltica, a fin de producir su adherencia con la capa inmediatamente superior.

Lista de Abreviaturas

AASHO	<i>American Association of State Highway Officials (USA)</i>
AASTHO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials (USA)</i>
MEPDG	<i>Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (USA)</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials (USA)</i>
CBR	Razón de Soporte California (%)
CSIR	<i>Council for Scientific and Industrial Research (South Africa)</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
LNV	Laboratorio Nacional de Vialidad
MC-VN°	Manual de Carreteras, Volumen N° 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ó 9, según corresponda
MOP	Ministerio de Obras Públicas
M _R	Módulo de Resiliencia (MPa)
TMAPA	Temperatura Media Anual Ponderada del Aire
TRRL	<i>Transport and Road Research Laboratory (Gran Bretaña)</i>
USACE	<i>United State Army Corps of Engineers (USA)</i>

Lista de Símbolos

w_l	Límite líquido (%)
w_p	Límite plástico (%)
IP	Índice de plasticidad (%)
Φ	Diámetro de partícula de suelo (mm)
C_u	Coefficiente de Uniformidad
C_c	Coefficiente de Curvatura
$\Phi_{60}, \Phi_{10}, \Phi_{30}$	Aberturas de tamices por donde pasan el 60%, 10% y 30% respectivamente
IG	Índice de Grupo
F	Porcentaje que pasa por 0.08 mm (%)
W	Ancho de capa (m)
S_L	Pendiente Longitudinal (m/m)
S_x	Pendiente Transversal (m/m)
H	Espesor de capa (m)
V_s	Volumen del Sólido (cm^3)
W_s	Peso del Sólido (gr)
G_s	Densidad de partículas Sólidas (gr/cm^3)
V_v o $N_{e_{\max}}$	Volumen de vacios o porosidad máxima (cm^3)
V_t	Volumen Total (cm^3)
C	Cantidad de agua drenada por gravedad (%)
N_e	Porosidad Efectiva (cm^3)
t	Tiempo de drenaje (hrs)
T	Factor de tiempo en evacuar el 50% de agua
M	Factor "m" (días)
K	Coefficiente de permeabilidad (m/día)
S	Días de deshielo de primavera (días)
R	Días con lluvia si el pavimento puede drenar el 85% del grado de saturación en 24 horas o menos. Si el tiempo de drenaje excede 24 horas, deben usarse los días de Lluvia multiplicados por el tiempo de drenaje en días (días)
i	Gradiente Hidráulico (cm/cm)
t	Tiempo de descarga (s)
Q	Volumen de agua drenada (cm^3)
L	Distancia entre piezómetro (cm)
A	Área sección transversal de la muestra (cm^2)
ΔH	Diferencia de carga (altura) entre la entrada y salida de flujo de agua (cm)
v	Velocidad de descarga (cm/s)
k_{20}	Coefficiente de permeabilidad normalizado (cm/s)

k_T	Coefficiente de Permeabilidad a una temperatura T (cm/s)
η_T	Viscosidad del agua a temperatura T (kg/m*s)
η_{20}	Viscosidad del agua a 20°C (kg/m*s)
θ_3	Suma de esfuerzos principales = $3 * \sigma_3 + \sigma_d$ (MPa)
K_1, K_2	Coefficientes de regresión
σ_1	Esfuerzo principal mayor (MPa)
σ_3	Esfuerzo principal menor (MPa)
Δhr	Desplazamiento relativo resiliente de las abrazaderas que soportan los transductores de deformación (mm)
b	Base de medida entre las abrazaderas-soportes (mm)
σ_d	Esfuerzo desviador ((MPa)
ϵ_r	Deformación unitaria recuperada
EE	Ejes equivalentes de 80 KN acumulados durante la vida de diseño (Millones)
NE_i	Número estructural de la capa i (mm)
Z_R	Coefficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte
M_{Ri}	Módulo de Resiliencia de la capa i (MPa)
p_i	Índice de serviciabilidad inicial
p_f	Índice de serviciabilidad final
a_i	Coefficiente estructural de la capa i
h_i	Espesor de la capa i (mm)
m_i	Coefficiente de drenaje de las capas no tratadas (bases y sub-bases granulares)
E_M	Estabilidad Marshall del concreto asfáltico (N)
D_i	Espesor de la capa i (mm)
D_i^*	Espesor real de la capa i utilizado (mm)
NE_i^*	Número estructural de la capa i real utilizado (mm)

Lista de Tablas

Tabla 4.1 - Requisitos para bases granulares según tipo capa de rodadura	38
Tabla 4.2 - Bandas granulométricas para bases granulares	38
Tabla 5.1 - Cantidad de agua que puede drenar por gravedad, C	41
Tabla 5.2 - Calidad del drenaje de bases y subbases granulares	41
Tabla 5.3 - Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles	43
Tabla 5.4 - Valores de k para diferentes tipos de suelo.....	45
Tabla 7.1 - Coeficientes estructurales para capas de pavimento flexibles.....	56
Tabla 7.2 - Coeficientes de drenaje (m_i)	56
Tabla 7.3 - Índice de serviciabilidad	57
Tabla 7.4 - Vida de diseño	57
Tabla 7.5 - Nivel de confianza y valor del S_0	58
Tabla 7.6 - Nivel de confianza y coeficiente estadístico	58
Tabla 7.7 - Espesores mínimos capas pavimentos flexibles.....	60
Tabla 8.1 - Granulometría arena-arcillosa	64
Tabla 8.2 - Características arena-arcillosa	64
Tabla 8.3 - Granulometría arena-limosa	65
Tabla 8.4 - Características arena-limosa	65
Tabla 8.5 - Granulometría de base granular y mezcla con arena-arcillosa	66
Tabla 8.6 - Restricción granulométrica de base granular y mezcla con arena-arcillosa	67
Tabla 8.7 - Densidad de partículas sólidas de mezcla base granular con arena-arcillosa.....	67
Tabla 8.8 - Requisitos generales de base granular y mezcla con arena-arcillosa	67
Tabla 8.9 - Clasificación de material de base granular y mezcla con arena-arcillosa.....	67
Tabla 8.10 - Granulometría de base granular y mezclas con arena-limosa	68
Tabla 8.11 - Restricción granulométrica de base granular y mezclas con arena-limosa	69
Tabla 8.12 - Densidad de partículas sólidas de base granular y mezclas con arena-limosa.....	69
Tabla 8.13 - Requisitos generales de base granular y mezclas con arena-limosa	69
Tabla 8.14 - Clasificación de material de base granular y mezclas con arena-limosa.....	70
Tabla 8.15 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, promedio de valores.....	71
Tabla 8.16 - Coeficientes de permeabilidad normalizados de cada mezcla.....	72
Tabla 8.17 - Valores característicos de cada mezcla	73
Tabla 8.18 - Coeficientes de drenaje de cada muestra	73
Tabla 8.19 - Resumen valores ensayo triaxial cíclico dinámico	74
Tabla 8.20 - Porcentajes de mezclas y capacidad de soporte CBR.....	76
Tabla 8.21 - Resumen valores estadísticos de regresión cuadrática CBR vs maicillo.....	77
Tabla 8.22 - Resumen valores del análisis de varianza CBR vs maicillo	77

Tabla 8.23 - Resumen de valores estadísticos e intervalos finales CBR vs maicillo.....	77
Tabla 8.24 - Resumen valores estadísticos de regresión Lineal M_R vs maicillo.....	78
Tabla 8.25 - Resumen valores del análisis de varianza M_R vs maicillo.....	78
Tabla 8.26 - Resumen de valores estadísticos e intervalos finales M_R vs maicillo.....	78
Tabla 8.27 - Resumen valores estadísticos de la regresión cuadrática M_R vs CBR.....	79
Tabla 8.28 - Resumen valores del análisis de varianza M_R vs CBR.....	79
Tabla 8.29 - Resumen de valores estadísticos e intervalos finales M_R vs CBR.....	79
Tabla 8.30 - M_R teórico y M_R real.....	80
Tabla 8.31 - a_2 teórico y a_2 real.....	81
Tabla 8.32 - Resumen características base granular 85% - 15%.....	82
Tabla 8.33 - Ejes Equivalentes considerados en el diseño estructural.....	83
Tabla 8.34 - Confiabilidad y Z_R considerados en el diseño estructural.....	84
Tabla 8.35 - Resumen coeficientes estructurales a considerar en el diseño estructural.....	84
Tabla 8.36 - Características base granular con 15% de arena-limosa a través de M_R teórico.....	85
Tabla 8.37 - Diseño de la estructura de pavimento flexible, caso N°1 a través de AASTHO 93'.....	85
Tabla 8.38 - Diseño de la estructura de pavimento flexible, caso N°2 a través de AASTHO 93'.....	86
Tabla 8.39 - Diseño de la estructura de pavimento flexible, caso N°3 a través de AASTHO 93'.....	88
Tabla 9.1 - Resumen de costos asociados a base granular para 1,000 (m) de largo.....	89
Tabla 9.2 - Resumen de costos asociados a maicillo para 1,000 (m) de largo.....	90
Tabla 9.3 - Resumen de costos asociados a base granular para 16,343.6 (m) de largo.....	91
Tabla 9.4 - Resumen de costos asociados a maicillo para 16,343.6 (m) de largo.....	91
Tabla 9.5 - Costos asociados al diseño estructural, casos N°1, N°2, N°3 y N°4.....	92
Tabla A.1 - Cálculo granulometría, arena-arcillosa.....	101
Tabla A.2 - Cálculo límites de Atterberg, arena-arcillosa.....	101
Tabla A.3 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, arena-arcillosa.....	102
Tabla A.4 - Cálculo Capacidad de soporte CBR, arena-arcillosa.....	103
Tabla A.5 - Cálculo granulometría, arena-limosa.....	105
Tabla A.6 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, arena-limosa.....	106
Tabla A.7 - Cálculo capacidad de soporte CBR, arena-limosa.....	107
Tabla A.8 - Cálculo granulometría, base granular.....	109
Tabla A.9 - Cálculo cubicidad de partículas, base granular.....	109
Tabla A.10 - Cálculo desgaste de Los Ángeles, base granular.....	110
Tabla A.11 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, base granular.....	111
Tabla A.12 - Cálculo capacidad de soporte CBR, base granular.....	112
Tabla A.13 - Cálculo granulometría, 90% - 10% (arena-arcillosa).....	114
Tabla A.14 - Cálculo cubicidad de partículas, 90% - 10% (arena-arcillosa).....	114
Tabla A.15 - Cálculo límites de Atterberg, 90% - 10% (arena-arcillosa).....	115

Tabla A.16 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, 90% - 10% (arena-arcillosa)	116
Tabla A.17 - Cálculo capacidad de soporte CBR, 90% - 10% (arena-arcillosa).....	117
Tabla A.18 - Cálculo granulometría, 90% - 10%.....	119
Tabla A.19 - Cálculo cubicidad de partículas, 90% - 10%.....	119
Tabla A.20 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, 90% - 10%.....	120
Tabla A.21 - Cálculo capacidad de soporte CBR, 90% - 10%.....	121
Tabla A.22 - Cálculo granulometría, 85% - 15%.....	123
Tabla A.23 - Cálculo cubicidad de partículas, 85% - 15%.....	123
Tabla A.24 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, 85% - 15%.....	124
Tabla A.25 - Cálculo capacidad de soporte CBR, 85% - 15%.....	125
Tabla A.26 - Cálculo granulometría, 80% - 20%.....	127
Tabla A.27 - Cubicidad de partículas, 80% - 20%	127
Tabla A.28 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, 80% - 20%.....	128
Tabla A.29 - Cálculo capacidad de soporte CBR, 80% - 20%.....	129
Tabla B.1 - Datos ensayo, base granular.....	131
Tabla B.2 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, base granular	131
Tabla B.3 - Corrección del coeficiente de permeabilidad, base granular	132
Tabla B.4 - Datos ensayo, 90% - 10%	132
Tabla B.5 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, 90% - 10%.....	132
Tabla B.6 - Corrección del coeficiente de permeabilidad, 90% - 10%.....	133
Tabla B.7 - Datos ensayo, 85% - 15%	133
Tabla B.8 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, 85% - 15%.....	133
Tabla B.9 - Corrección del coeficiente de permeabilidad, 85% -15%.....	134
Tabla B.10 - Datos ensayo, 80% - 20%	134
Tabla B.11 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, 80% - 20%.....	134
Tabla B.12 - Corrección del coeficiente de permeabilidad, 80% - 20%.....	135
Tabla B.13 - Densidad y viscosidad cinética del agua con respecto a la temperatura.....	135
Tabla B.14 - Valores característicos de cada mezcla.....	136
Tabla B.15 - Tiempo necesario para drenar el 50% de agua de cada mezcla.....	136
Tabla B.16 - Coeficiente de drenaje de cada mezcla	136
Tabla C.1 - Datos ensayo triaxial, base granular	137
Tabla C.2 - Datos ensayo triaxial, 90% - 10%	139
Tabla C.3 - Datos ensayo triaxial, 85% - 15%	141
Tabla C.4 - Datos ensayo triaxial, 80% - 20%	143
Tabla D.1 - Características base granular con 15% de arena-limosa	145
Tabla D.2 - Determinación espesores capas asfálticas, caso N°1	145

Tabla D.3 - Determinación espesores capa base granular, caso N°1	145
Tabla D.4 - Determinación espesor capa sub-base granular, caso N°1	146
Tabla D.5 - Determinación espesores capas asfálticas, caso N°2	147
Tabla D.6 - Determinación espesor capa base granular, caso N°2.....	147
Tabla D.7 - Determinación espesor capa sub-base granular, caso N°2.....	148
Tabla D.5 - Determinación espesores capas asfálticas, caso N°3	149
Tabla D.6 - Determinación espesor capa base granular, caso N°3.....	149
Tabla D.7 - Determinación espesor capa sub-base granular, caso N°3.....	150
Tabla E.1 - Características de cada base granular.....	151
Tabla E.2 - Descripción de precios a considerar	151
Tabla E.3 - Cálculo de costos asociados a base granular para 1,000 (m) de largo.....	152
Tabla E.4 - Cálculo de costos asociados a maicillo para 1,000 (m) de largo	152
Tabla E.5 - Características de base granular y mezcla con 15% de arena-limosa	153
Tabla E.6 - Cálculo de costos asociados a base granular para 16,343.6 (m) de largo.....	153
Tabla E.7 - Cálculo de costos asociados a maicillo para 16,343.6 (m) de largo	154
Tabla E.8 - Cálculo de costos asociados al diseño estructural, caso N°1.....	155
Tabla E.9 - Cálculo de costos asociados al diseño estructural, caso N°2.....	155
Tabla E.10 - Cálculo de costos asociados al diseño estructural, caso N°3 y N°4.....	155
Tabla G.1 - Sistema de clasificación USCS para materiales gruesos	158
Tabla G.2- Sistema de clasificación USCS para materiales finos	159
Tabla G.3- Sistema de clasificación AASHTO para materiales finos	159
Tabla G.4- Sistema de clasificación AASHTO para materiales gruesos	159

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Diagrama de flujo.....	24
Figura 1.2 - Aspectos geométricos del diseño estructural de mejoramiento Ruta F-50.....	27
Figura 3.1 - Corte de cerro Granítico (1)	31
Figura 3.2 - Corte de cerro Granítico (2).....	31
Figura 3.3 - Esquema general de ladera en suelo residual de granito	32
Figura 4.1 - Determinación partículas lajeadas.....	33
Figura 4.2 - Partículas rodadas.....	33
Figura 4.3 - Estados de consistencias según humedad	34
Figura 4.4 - Gráfico relación humedad-densidad, ensayo proctor modificado	36
Figura 4.5 - Máquina CBR.....	37
Figura 4.6 - Molde con material penetrado	37
Figura 5.1 - Fuente de humedad en pavimentos	39
Figura 5.2 - Parámetros geométricos a considerar en el tiempo de drenaje	40
Figura 5.3 - Factor de tiempo para un drenaje del 50%.....	42
Figura 5.4 - Zona de flujos	44
Figura 7.1 - Coeficientes estructurales para capa asfáltica	53
Figura 7.2 - Coeficientes estructurales para bases granulares	54
Figura 7.3 - Coeficientes estructurales para sub-bases granulares	55
Figura 7.4 - Estimación del coeficiente de permeabilidad	57
Figura 7.5 - Determinación de espesores de las capas de pavimentos flexibles	59
Figura 8.1 - Base granular.....	63
Figura 8.2 - Mezcla base granular con arena-limosa.....	63
Figura 8.3 - Mezcla base granular con arena-arcillosa.....	63
Figura 8.4 - Maicillo tipo arena-arcillosa	64
Figura 8.6 - Maicillo tipo arena-limosa	65
Figura 8.7 - Curvas granulométricas de base granular y mezcla con arena-arcillosa.....	66
Figura 8.8 - Curvas granulométricas de base granular y mezclas con arena-limosa.....	68
Figura 8.9 - Gráfico de dispersión de muestras ensayadas	71
Figura 8.10 - Permeámetro a carga constante	72
Figura 8.11 - Molde con material compactado.....	72
Figura 8.12 - Líneas de tendencia de gráfico $\log(M_R)$ vs $\log(\theta)$	74
Figura 8.13 - Muestra 80%-20% antes del ensayo	75
Figura 8.14 - Muestra 80%-20% después del ensayo	75
Figura 8.15 - Línea de tendencia, gráfico de dispersión CBR vs maicillo.....	77
Figura 8.16 - Línea de tendencia, gráfico de dispersión M_R vs maicillo	78

Figura 8.17 - Línea de tendencia, gráfico de dispersión M_R vs CBR.....	79
Figura 8.18 - Líneas de tendencia, diferencia entre M_R teórico y M_R real vs maicillo.....	80
Figura 8.19 - Líneas de tendencia, diferencia entre M_R teórico y M_R real vs CBR.....	80
Figura 8.20 - Nomograma para el cálculo de parámetros según porcentajes de maicillo.....	81
Figura 8.21 - Ubicación geográfica del lugar en estudio.....	83
Figura 8.22 - Esquema de la estructura de pavimento flexible, caso N°1.....	85
Figura 8.23 - Esquema de la estructura de pavimento flexible, caso N°2.....	86
Figura 8.24 - Diseño de la estructura de pavimento flexible, caso N°4 a través de PAVIVIAL.....	87
Figura 8.25 - Esquema de la estructura de pavimento flexible, caso N°4.....	87
Figura 8.26 - Esquema de la estructura de pavimento flexible, caso N°3.....	88
Figura 9.1 - Gráfico ahorro vs largo de camino.....	90
Figura A.1 - Gráfico curva de fluidez, arena-arcillosa.....	101
Figura A.2 - Curva proctor modificado y curva de saturación, arena-arcillosa.....	104
Figura A.3 - Curvas de penetración, arena-arcillosa.....	104
Figura A.4 - Curva capacidad de soporte CBR, arena-arcillosa.....	104
Figura A.5 - Curva proctor modificado y curva de saturación, arena-limosa.....	108
Figura A.6 - Curvas de penetración, arena-limosa.....	108
Figura A.7 - Curva capacidad de soporte CBR, arena-limosa.....	108
Figura A.8 - Curva proctor modificado y curva de saturación, base granular.....	113
Figura A.9 - Curvas de penetración, base granular.....	113
Figura A.10 - Curva capacidad de soporte CBR, base granular.....	113
Figura A.11 - Gráfico curva de fluidez, 90% - 10% (arena-arcillosa).....	115
Figura A.12 - Curva proctor modificado y curva de saturación, 90% - 10% (arena-arcillosa).....	118
Figura A.13 - Curvas de penetración, 90% - 10% (arena-arcillosa).....	118
Figura A.14 - Curva capacidad de soporte CBR, 90% - 10% (arena-arcillosa).....	118
Figura A.15 - Curva proctor modificado y curva de saturación, 90% - 10%.....	122
Figura A.16 - Curvas de penetración, 90% - 10%.....	122
Figura A.17 - Curva capacidad de soporte CBR, 90% - 10%.....	122
Figura A.18 - Curva proctor modificado y curva de saturación, 85% - 15%.....	126
Figura A.19 - Curvas de penetración, 85% - 15%.....	126
Figura A.20 - Curva capacidad de soporte CBR, 85% - 15%.....	126
Figura A.21 - Curva proctor modificado y curva de saturación, 80% - 20%.....	130
Figura A.22 - Curvas de penetración, 80% - 20%.....	130
Figura A.23 - Curva capacidad de soporte CBR, 80% - 20%.....	130
Figura B.1 - Gráfico de dispersión gradiente Hidráulico vs velocidad de descarga, base granular.....	131
Figura B.2 - Gráfico de dispersión gradiente Hidráulico vs velocidad de descarga, 90% - 10%.....	132
Figura B.3 - Gráfico de dispersión gradiente Hidráulico vs velocidad de descarga, 85% - 15%.....	133

Figura B.4 - Gráfico de dispersión gradiente Hidráulico vs velocidad de descarga, 80% - 20%....	134
Figura C.1 - Gráfico de dispersión log (θ) vs log (MR), base granular	138
Figura C.2 - Gráfico de dispersión log (θ) vs log (MR), 90% - 10%.....	140
Figura C.3 - Gráfico de dispersión log (θ) vs log (MR), 85% - 15%.....	142
Figura C.4 - Gráfico de dispersión log (θ) vs log (MR), 80% - 20%.....	144
Figura E.1 - Medidas de base granular para 15 cm de espesor.....	151
Figura F.1 - TMMA y TMPA para diseño de pavimentos flexibles, según MC-V3.....	156
Figura F.2 - Número estructural de capas asfálticas para TMDAP 14 °C, según el MC-V3	157

Resumen Memoria

Los métodos actuales de diseño estructural de pavimentos flexibles, utilizan como indicador de la capacidad estructural de las capas granulares el Módulo Resiliente (M_R). Sin embargo en Chile, los materiales granulares sólo se especifican según el valor de CBR, y al incorporar maicillo a una base granular, se está creando un nuevo material con distintas características y distinto comportamiento.

Para lograr la elaboración del siguiente trabajo se recopiló y analizó información bibliográfica sobre pavimentos flexibles, maicillo, especificaciones de bases granules según el Manual de Carretas, diseño estructural según metodología AASTHO 93' y la influencia de material fino en el Módulo de Resiliencia de bases granulares.

El objetivo del presente estudio es poder definir un porcentaje de maicillo máximo a incorporar en bases granulares para poder ahorrar costos en la construcción de pavimentos flexibles y a su vez definir la influencia de esta incorporación de material en el diseño estructural. Para ello se realizaron varias mezclas con distintos porcentajes de maicillo y se analizó el comportamiento de cada una. Adicionalmente, se realizaron modelos matemáticos para poder analizar los resultados de ensayos en laboratorio y dotar de nuevas correlaciones representativas del material.

Finalmente, se realizó un diseño estructural del tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay, correspondiente al mejoramiento de la Ruta F-50, para luego realizar un estudio de costos asociados a la construcción y al diseño estructural para analizar la influencia en este ámbito de la incorporación de maicillo a una base granular limpia.

Los resultados obtenidos permitieron determinar que la mezcla entre base granular y maicillo tipo Arena-Arcillosa no cumple con las especificaciones de base granular por lo cual se descarta su utilización. La incorporación de maicillo tipo Arena-Limosa a la base granular afecta en mayor cantidad entre la abertura de 10 mm hasta 0.1 mm de la granulometría aportando material de tipo Arena fina y siendo un 15% el porcentaje máximo a utilizar. El coeficiente de drenaje no se ve afectado aunque el coeficiente de permeabilidad varíe. Las correlaciones entregadas por el Manual de Carreteras Volumen 3 son muy conservadoras para este tipo de mezclas ya que los Módulos de Resiliencia Reales son mayores a los estimados indirectamente. Finalmente, el Diseño Estructural basado en el Módulo de Resiliencia de la base granular sin incorporación de Arena-Limosa resulta ser el más económico satisfaciendo los requerimientos estructurales analizados mediante AASTHO 93'.

Palabras-claves: módulo de resiliencia, bases granulares, maicillo, diseño estructural, pavimentos flexibles, permeabilidad.

CAPÍTULO 1

Generalidades

1.1 Introducción

Las carreteras son un sistema de transporte terrestre que permiten conectar a un país afectando directamente en el desarrollo socio-económico de este. Garantizar un sistema de transporte rápido y seguro favorece entre otros factores a la calidad de vida de los habitantes, por lo que el estudio de caminos es una importante rama de la Ingeniería Civil, apoyando en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de los pavimentos para caminos y aeropuertos.

Chile tiene una red vial de 77,603.17 (km) de los cuales sólo 18,436.74 (km) se encuentran pavimentados. La construcción de pavimentos involucra altos costos económicos, por lo cual, se hace indispensable profundizar los conocimientos acerca del comportamiento de los pavimentos a través de estudios teóricos y experimentales.

Con el fin de abaratar costos asociados a la construcción de pavimentos flexibles, en la Región de Valparaíso se ha ideado realizar mezclas de base granular limpia con material proveniente de la descomposición de rocas graníticas conocido comúnmente como maicillo.

Cuando las bases granulares tienen un buen desempeño se pueden obtener beneficios tanto técnicos como económicos por reducción de tiempo en los procesos constructivos utilizando materiales nativos, disminución del impacto ambiental, disminución de costos y a la vez se formulan nuevas alternativas de construcción de pavimentos flexibles.

Al crear un nuevo tipo de base granular, aparte de cumplir con todas las especificaciones que exige el Manual de Carreteras, es primordial, para el diseño estructural de pavimentos, poder caracterizar de mejor manera el material a utilizar, esto implica, la determinación del Módulo de Resiliencia real y la Permeabilidad o Drenaje del mismo. Es importante tener en cuenta que la estimación en forma indirecta del Módulo de Resiliencia es sólo una aproximación al valor real y en algunos casos no es 100% representativo.

En este estudio se busca poder establecer la influencia en el diseño estructural que tiene la incorporación de maicillo a una base granular limpia, determinando un porcentaje máximo de mezcla que logre cumplir con los requisitos de diseño estipulados en el Manual de Carreteras Volumen 3 y con las exigencias mínimas de resistencia que deben cumplir las bases granulares estipuladas en el Manual de Carreteras Volumen 5.

El estudio de las propiedades de los materiales propuestos en este trabajo y las correlaciones entre estas, son necesarias, ya que en el diseño de estructuras de pavimentos dichas variables son determinantes, los valores utilizados hasta la fecha son extraídos de correlaciones de estudios realizados entre otros países o simplemente son asumidos como valores constantes que pueden no adaptarse a las condiciones locales, generando diseños poco exactos. Por lo que se busca optimizar el uso de maicillo desde el punto de vista de porcentajes y espesores.

Así mismo, se pretende mejorar las practicas relacionadas con el maicillo, proporcionando la información obtenida, la cual será de gran ayuda para que la utilización de este material sea más eficiente, ya que en la actualidad se cae en el error de no diseñar las mezclas y/o utilizar porcentajes que no siempre serán los que mejor se adapten a los requerimientos específicos de un proyecto.

1.2 Planteamiento del Problema

Para cualquier país y Chile no es la excepción, el principal motor del desarrollo son sus carreteras, dado que permiten conectar sus centros de población con zonas comerciales, agrícolas y ganaderas [1], aportando a la economía y bienestar de su población. Dada la importancia estratégica y el impacto económico que tiene la construcción de carreteras, se tiene la urgente necesidad de lograr significativos ahorros en construcción, operación y mantenimiento de caminos [2].

Uno de los principales pavimentos confeccionados para la utilización de carreteras son los pavimentos flexibles conocidos también como pavimentos asfálticos. Estos se deflexan al ser sometidos a cargas de tránsito vehicular, sufriendo deformación y recuperación al cesar las cargas. Las tensiones que experimentan las estructuras de estos pavimentos se producen en todo el paquete estructural, disminuyendo su influencia con la profundidad [3-10].

Los pavimentos flexibles están compuestos comúnmente por tres capas que interactúan entre sí; carpeta de rodadura asfáltica, base granular y sub-base granular apoyadas sobre la subrasante del camino.

La capa de base granular, viene ubicada inmediatamente bajo la carpeta de rodado. Esta capa es la que tiene mayor importancia dentro del paquete estructural, ya que absorbe la mayor parte de las tensiones que generan las cargas solicitantes. Al realizar un buen análisis de las bases granulares, se pueden evitar varios problemas asociados a éstas como, por ejemplo, la vida útil del pavimento.

Se utilizan dos métodos como criterio para determinar un buen comportamiento de los pavimentos flexibles, y en particular de las bases granulares; un "método constructivo", en el cual se define el parámetro CBR que mide la capacidad de soporte estático que tendrán las bases granulares y se puede interpretar como una medida relativa de resistencia al corte bajo condiciones muy particulares de carga, y un "método de diseño", dado por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) en el cual se define el parámetro del Módulo de Resiliencia que mide la deformación elástica dinámica o resiliente de las capas granulares bajo cargas cíclicas producidas por el tránsito vehicular.

El método de diseño se refiere a un método para poder determinar los tipos y espesores de las capas que resulten más económicas para lograr dotar al camino de un sistema estructuralmente resistente. El Módulo de Resiliencia es considerado la propiedad fundamental para caracterizar los materiales del paquete estructural de los pavimentos flexibles según el método AASHTO, el cual es utilizado hoy en día por el manual de carreteras.

En Chile, se le ha dado mayor importancia al parámetro CBR para la caracterización de las capas granulares, dejando de lado el valor del Módulo de Resiliencia de estas capas, esto se ve reflejado en el programa Pavivial que se utiliza en Chile para el diseño estructural de Pavimentos Flexibles, la contribución de las capas granulares al desempeño de todo el pavimento se ha asumido como un valor fijo y tampoco se consideran sus características de deformación.

La determinación del Módulo de Resiliencia en la mayoría de las ocasiones no es posible o no resulta práctico realizar su ensayo de laboratorio, ya que requiere de equipos especializado, personal entrenado y consume un tiempo significativo, por lo cual se recurre a estimarlo de forma indirecta a través del ensayo CBR ya que su realización es más simple y económica pero no representa el comportamiento real de las capas granulares. Es importante tener en cuenta que la estimación en forma indirecta del Módulo de Resiliencia es sólo una aproximación al valor real y en algunos casos no es 100% representativo del suelo específico en estudio. Cabe destacar que en

algunos estudios no se encontraron correlaciones entre el CBR y el Módulo de Resiliencia, concluyendo que la rigidez de un material no es una simple función del CBR [13-16].

Por otro lado, los materiales utilizados en Chile para producir bases granulares son de muy buena calidad, de tal manera que sobrepasan la calidad de los que fueron utilizados cuando empíricamente se creó el método AASHTO en California, Estados Unidos, lo que implica tener valores muchos más altos que los mínimos establecidos por este método, en especial en el CBR, por lo cual, en la Región de Valparaíso, se ha ideado utilizar una mezcla de dos materiales, uno granular y otro fino, en la construcción de bases granulares. El material fino a utilizar se denomina comúnmente como maicillo (granito en descomposición) el cual se clasifica según la USCS (sistema unificado de clasificación de suelos), como un tipo de arena limosa o arena arcillosa. El maicillo es un recurso regional que se encuentra en abundancia, por ende, tendrá costo muy bajo en su utilización, lo que significa una disminución en el valor de la construcción de pavimentos flexibles.

Estudios realizados en La Unidad de Laboratorio y Gestión de Calidad de la Dirección de Vialidad, Región de Valparaíso, perteneciente al Ministerio de Obras Públicas (MOP) verifican que existe una pérdida de CBR en mezclas con distintos porcentajes de maicillo, definiendo un 20% a 30% el porcentaje máximo para cumplir con el requisito mínimo constructivo normado en el Manual de Carreteras (CBR>80%).

El problema que genera esta mezcla de bases granulares, es que no existe mayor investigación en el campo del comportamiento del maicillo, por ende especular que con el parámetro de Módulo de Resiliencia en función del CBR se podrá realizar un buen diseño estructural quizás no es del todo correcto.

Cabe destacar, que estudios sobre granulometría y cantidad de finos de bases granulares presentan una gran contradicción en el comportamiento del Módulo de Resiliencia [17]. Por un lado en el 2002 se reporta que, dependiendo del tipo de material y granulometría escogida, el tamaño del espécimen puede influir en las mediciones del Módulo de Resiliencia [14]. Unos años antes, se reportaba lo contrario, pequeñas diferencias en los valores del Módulo de Resiliencia de 7 tipos de materiales granulares distintos [18]. Por otro lado, varios autores concluyen que entre mayor es la presencia de finos en un material granular la rigidez tiende a disminuir [19-21]. A su vez, un estudio realizado sobre 6 materiales granulares diferentes, determina que no existe una tendencia general en la evolución del valor del Módulo de Resiliencia con el contenido de finos, y su grado de influencia depende del tipo de material estudiado [13].

Por otro lado, el manual de carreteras habla sobre el "Concepto Integral de un Buen Diseño", el cual expresa que un buen diseño resulta de representar en el modelo, un conocimiento completo de todos los factores que se deben valorizar, en especial las propiedades y comportamiento de los suelos locales y del clima y teniendo como referencia experiencias de otras obras que estén prestando un servicio satisfactorio.

Otro criterio importante a tener en cuenta en el diseño de pavimentos flexibles es la permeabilidad de las capas que componen el paquete estructural, ya que esta propiedad juega un papel importante en la estabilidad de las capas. Al introducir material fino a una base granular, se está creando una nueva base más impermeable, lo que podría crear fallas al buen funcionamiento de la estructura.

Por lo anterior, se hace indispensable realizar un estudio más minucioso y específico sobre el material llamado maicillo y sobre el comportamiento de la mezcla de base granular con agregado fino dentro del paquete estructural, obteniendo una mejor caracterización del pavimento flexible y así poder eventualmente abaratar costos en la construcción de pavimentos flexibles en la Región de Valparaíso.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Determinar el porcentaje máximo de maicillo a incorporar en bases granulares de materiales inertes que permita cumplir con las exigencias técnicas y de diseño del método AASHTO, descritas en el Manual de Carreteras Volumen 5 y 3 respectivamente.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer un modelo matemático que permita definir una relación entre Módulo de Resiliencia y porcentajes de maicillo incorporado a bases granulares.
- Determinar la relación entre pérdida de CBR y pérdida del Módulo de Resiliencia para distintos porcentajes de maicillo incorporado a bases granulares.
- Determinar si el porcentaje máximo aceptado de maicillo incorporado a bases granulares según el Manual de Carreteras Volumen 5 es factible a nivel de costos asociados a la producción de base granular con maicillo versus producción de base granular limpia.
- Determinar si el porcentaje máximo aceptado de maicillo incorporado a bases granulares es factible a nivel de costos asociados al Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles.

1.4 Alcances

- El estudio se limitará para la zona de la Región de Valparaíso.
- En el estudio se utilizará la banda granulométrica TM-50c.
- La base granular a utilizar será proveniente del río La ligua, Provincia de Petorca, Región de Valparaíso. Constructora Tricam.
- Se utilizará material fino sin plasticidad proveniente de la carretera F-50, Lo-Orozco, Quilpué, Provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso.
- Se utilizará material fino con plasticidad proveniente de recinto Pangal, Limache, Provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso.

1.5 Metodología de Trabajo

Es importante destacar que el maicillo que se estudiará, se presenta en la naturaleza como material con plasticidad (arena arcillosa) y como material sin plasticidad (arena limosa), por lo tanto, se hace necesario analizar estas dos condiciones.

Se parte el análisis con la siguiente hipótesis,

Existe pérdida en el Módulo de Resiliencia para distintos porcentajes de material fino (maicillo) en la mezcla de bases granulares, ya que, existe pérdida de CBR para distintos porcentajes de maicillo en la mezcla de bases granulares para pavimentos flexibles, la cual no necesariamente es equivalente a la calculada con las ecuaciones de correlación que ofrece el método AASHTO.

La metodología de trabajo sigue el esquema de la figura 1.1

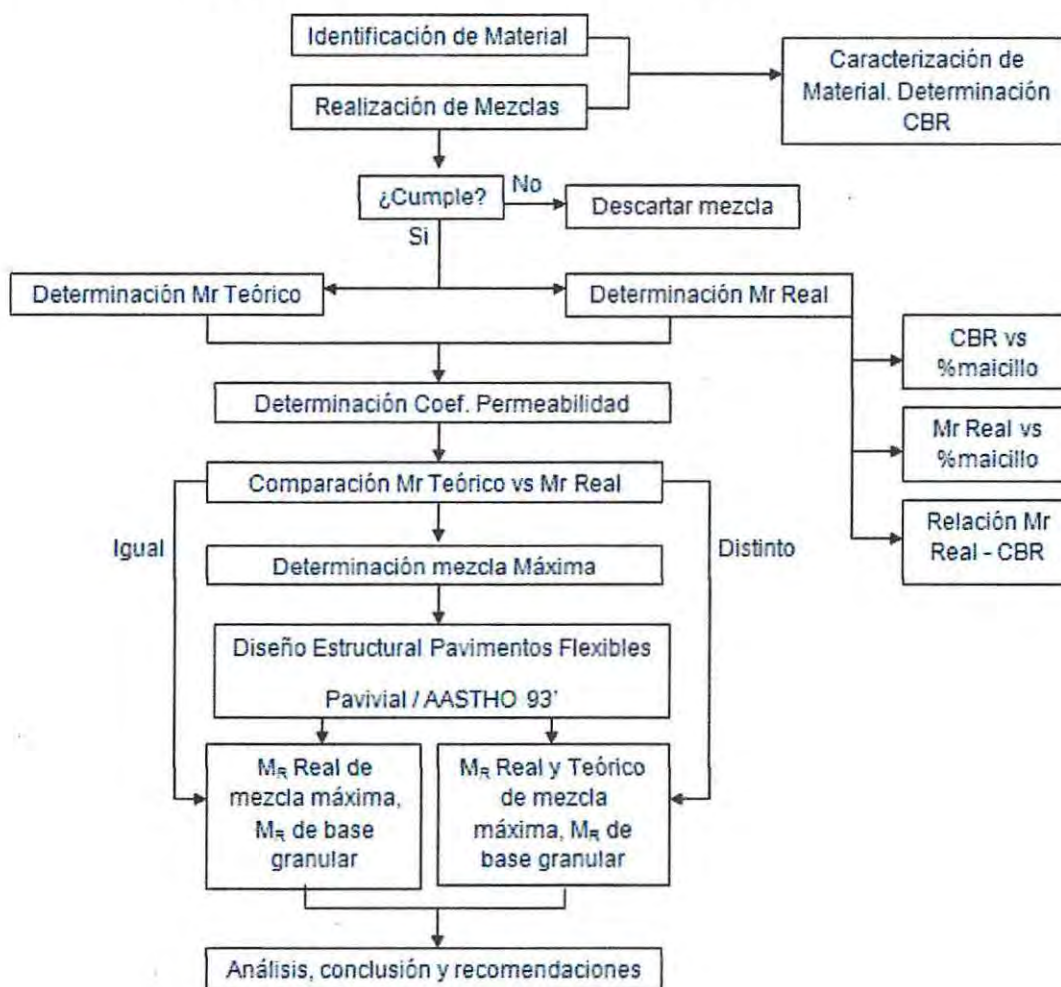


Figura 1.1 - Diagrama de flujo

I. Primera Parte: Investigación y Toma de Datos

- 1) Se realiza una revisión bibliográfica sobre pavimentos flexibles y como los parámetros de diseño afectan en su comportamiento dando mayor énfasis al parámetro del Módulo de Resiliencia de los materiales granulares.
- 2) Se determinan las características físicas y mecánicas de los tres materiales empleados; arena arcillosa (maicillo plástico), arena limosa (maicillo no plástico) y base granular según los siguientes ensayos estipulados en el Manual de Carreteras Volumen 8.
 - Granulometría
 - Límite de Atterberg
 - Densidad de Partículas Sólidas
 - Desgaste de Los Ángeles
 - Cubicidad de Partículas
 - Proctor Modificado
 - Capacidad de Soporte CBR
- 3) Se realizan mezclas con distintos porcentajes de base granular - arena arcillosa y base granular - arena limosa determinando las características físicas y mecánicas de cada una realizando los ensayos descritos en 2).
- 4) Es importante y necesario descartar las mezclas que no cumplen con las especificaciones técnicas para bases granulares descritas en el Manual de Carreteras Volumen 5.
- 5) Se realiza la determinación del coeficiente de permeabilidad de las mezclas, por lo que se necesita realizar el ensayo de permeabilidad estipulado en la norma ASTM D-2434.
- 6) Luego, se realiza el ensayo Triaxial Dinámico estipulado en la norma AASTHO T-307 para poder determinar el Módulo de Resiliencia Real de cada una de las mezclas.

II. Segunda Parte: Análisis de Resultado

- 1) Se analizan los siguientes puntos.
 - Pérdida de capacidad de soporte CBR con respecto a los distintos porcentajes de mezcla.
 - Pérdida de Módulo de Resiliencia Real con respecto a los distintos porcentajes de mezcla.
- 2) Se establece una relación entre Módulo de Resiliencia Real y Capacidad de Soporte CBR
- 3) Luego, se determina si existen diferencias entre Módulo de Resiliencia Real obtenido directamente a través del ensayo Triaxial Dinámico y Módulo de Resiliencia Teórico obtenido indirectamente a través de correlaciones en función de la Capacidad de Soporte CBR dadas por el método AASHTO.

III. Tercera Parte: Diseño Estructural

- 1) En base al Análisis de Resultado, se logra determinar un valor máximo de mezcla.
- 2) Teniendo todos los valores relevantes que caracterizan la mezcla máxima, sus características físicas, mecánicas y permeabilidad, se realiza un diseño estructural de pavimentos flexibles, para determinar los espesores de las capas que componen el paquete estructural, utilizando el Módulo de Resiliencia Real, el Módulo de Resiliencia Teórico y el Módulo de Resiliencia de la base granular cumpliendo con las especificaciones entregadas por el Manual de Carreteras Volumen 3 y comparando con el diseño estructural realizado por el programa PAVIVIAL.
- 3) Se analizan los datos obtenidos, concluyendo si existe influencia en el diseño de material fino dentro de las bases granules y realizar recomendaciones en la utilización de material fino (maicillo) para la creación de nuevas bases granulares.

1.6 Antecedentes Generales

Dada la creciente necesidad de optimizar los diseños y ahorrar costos en la construcción de pavimentos flexibles y el desafío de implementar caminos seguros y de buena calidad, la Dirección de Vialidad ha implementado en la Región de Valparaíso la utilización de maicillo incorporado a bases granulares limpias. Existen grandes proyectos en los cuales se ha utilizado maicillo en las capas granulares del paquete estructural, el Camino la Pólvora, Valparaíso y actualmente construyendo el mejoramiento de la Ruta F-50, Camino Lo-Orozco, Quilpué

Existe un gran debate sobre la utilización de este material ya que se han presentado varios problemas asociados, como fallas tempranas en el camino La Pólvora, es por esto, que analizar el comportamiento del maicillo en el diseño estructural se hace tan importante.

Con el objetivo de determinar la influencia que tiene la incorporación de maicillo a bases granulares limpias, se utilizará un estudio de Ingeniería realizado por la consultora INGELOG en el año 2007, en el cual se analizará un tramo ubicado en la Ruta F-50 en el sector lo Orozco-Quilpué, siendo más específicos tramo Ruta F-68 – Acceso a Colliguay teniendo los siguientes aspectos geométricos,

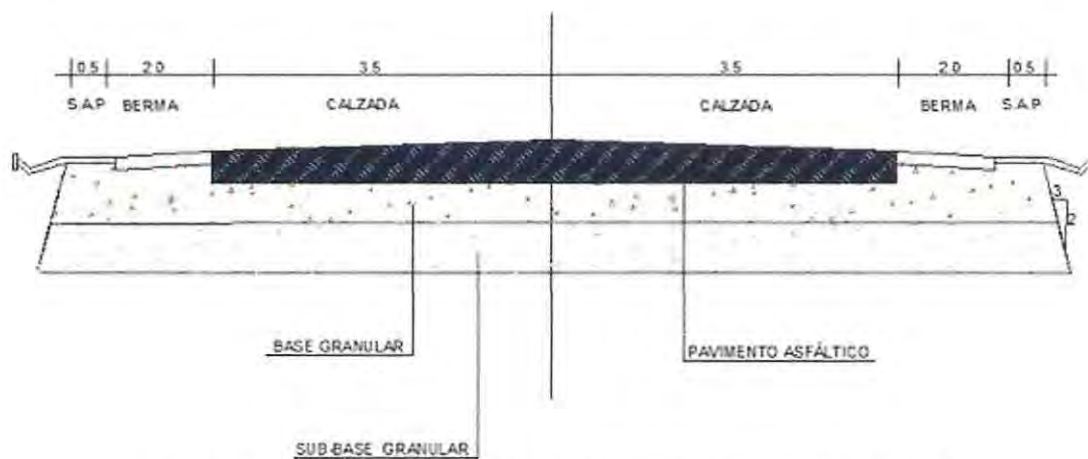


Figura 1.2 - Aspectos geométricos del diseño estructural de mejoramiento Ruta F-50

CAPÍTULO 2

Pavimentos Flexibles

La estructura total de un pavimento está compuesta por un conjunto de capas relativamente horizontales, dispuestas de tal forma que puedan realizar las funciones para lo cual fueron diseñadas, de manera eficiente y económica. Tal estructura está caracterizada por las propiedades, espesores y acomodo de distintos materiales apropiados que reciben en forma directa las cargas del tránsito vehicular y las transmiten en forma disipada a cada una de ellas, transmitiendo adecuadamente los esfuerzos a la subrasante, de modo que ésta no se deforme de manera perjudicial. Deben proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

La resistencia de cada capa debe ser adecuada para soportar los esfuerzos destructivos provocados por el tránsito vehicular y los factores climatológicos, en especial, factores como temperatura y humedad, ya que estos producen los efectos más adversos en el comportamiento de los materiales que constituyen las capas del paquete estructural. Es importante mencionar que la resistencia de las capas no depende solamente del material que lo constituye, si no también, de la influencia en el procedimiento constructivo.

2.1 Características de los Pavimentos Flexibles

A continuación se presentan las características principales que deben cumplir los pavimentos flexibles,

- Resistencia estructural
- Deformabilidad
- Durabilidad
- Economía
- Requerimiento de conservación
- Comodidad
- Seguridad

2.2 Capas que conforman los Pavimentos Flexibles

Los pavimentos flexibles se caracterizan por el funcionamiento de su sistema multicapa, donde la estructura total se deflecta al ser sometida a cargas de tránsito vehicular, sufriendo deformación y recuperación al cesar las cargas. Los esfuerzos verticales asociados a las cargas, decrecen a medida que aumenta la profundidad (ver figura 2.2), por lo que, las capas están dispuestas de manera tal que la mayor capacidad de carga se encuentra en las capas superiores y la menor capacidad de carga en las capas inferiores.

Este tipo de pavimento está compuesto comúnmente por 3 capas que interactúan entre sí; capa de rodadura asfáltica, base granular y sub-base granular, todo esto apoyado sobre la subrasante (ver figura 2.1).

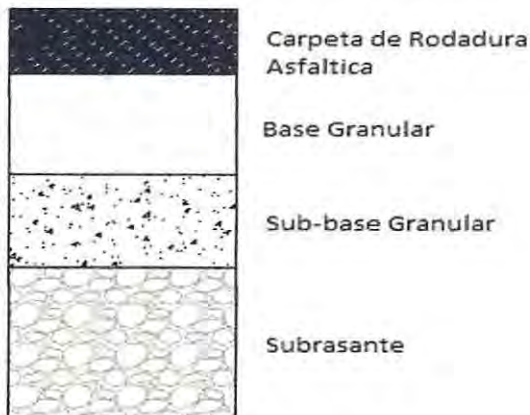


Figura 2.1 - Estructura pavimentos flexibles

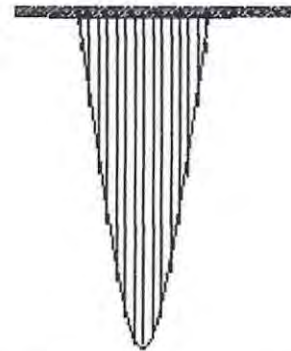


Figura 2.2 - Distribución de deformación

2.2.1 Carpeta de Rodadura

Es la capa superficial del paquete estructural que soporta directamente el tránsito vehicular y se encarga de brindar las características funcionales al pavimento, proporcionando una superficie de rodadura segura, confortable y estética, debe ser resistente al deslizamiento, a la abrasión y a la desintegración por efectos ambientales. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y transmite los verticales hacia las capas que yacen bajo ella. La carpeta está construida con mezclas asfálticas o concreto asfáltico (una o varias capas compactadas de una mezcla de agregados minerales y asfalto líquido) [22], además puede contener algún agente modificador para mejorar alguna característica, de acuerdo a la temperatura o la intensidad pluvial de la zona en la que se construya. Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos.

2.2.2 Base Granular

Es la capa situada inmediatamente bajo la carpeta de rodadura asfáltica y su función es resistir los esfuerzos verticales producidos por las cargas vehiculares y transmitirlos en forma uniforme a la capa de sub-base ubicada bajo esta. Esta capa granular es la que tiene mayor importancia dentro del paquete estructural, ya que absorbe la mayor parte de las tensiones que generan las cargas solicitantes y debe contar con la suficiente rigidez para no deformarse bajo la repetición constante del tránsito vehicular.

Al tener un buen análisis de las bases granulares, se pueden evitar varios problemas asociados, como por ejemplo, el deterioro de la superficie de rodadura, el deterioro por fatiga, la vida útil del pavimento, entre otros. Está compuesta por materiales granulares no tratados de buena calidad como grava y por combinaciones como grava-arenas o pequeñas cantidades de fino y de materiales estabilizados con cemento, cal o asfalto.

Los parámetros de diseño para bases granulares son:

- Resistencia (Granulometría, Densidad, CBR, Plasticidad)
- Módulo Resiliente
- Requerimiento de Permeabilidad

2.2.3 Sub-base Granular

Es la capa construida bajo la base granular y sobre la subrasante, siendo utilizada como capa de transición. Su función principal es poder proporcionar un apoyo uniforme y permanente, para la correcta colocación y compactación de la base, debe ser una capa permeable para poder cumplir una acción drenante, por lo cual, debe carecer de material fino. Si el suelo de fundación o subrasante es de muy buena calidad se puede descartar la utilización de esta capa granular.

2.2.4 Subrasante

La subrasante es el plano superior del movimiento de tierras definido como suelo de fundación de un pavimento, debe ser capaz de resistir los esfuerzos transmitidos por todo el paquete estructural, por ende, el espesor que debe tener un pavimento depende en gran parte de la calidad de esta capa. Su función es proteger la estructura conservando su integridad en todo momento, proporcionando condiciones de apoyo uniforme y permanente. Los materiales que constituyen la subrasante, deben ser necesariamente suelos compactables, teniendo por lo menos un 95% de su grado de compactación. Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de humedad (hinchamiento-retracción) [36].

CAPÍTULO 3

Maicillo

En casi toda la zona central y en particular, en la Región de Valparaíso, es común encontrar un material de textura arenosa llamado maicillo (ver figura 3.1 y 3.2). Proviene de roca granítica atacada por distintos grados de meteorización, es por esto que se considera como una arena de grano fino a grueso, siendo en la fase final de descomposición un suelo tipo residual completamente arcilloso. Se puede encontrar un tipo de arena arcillosa en superficie, para transformarse en arena limosa, la cual se encuentra en mayor cantidad y con mayor coherencia en profundidad [24]. Es importante destacar que en la zona de Valparaíso, para los proyectos de camino Las Palmas y camino La Pólvora, se pudo establecer que estos espesores de roca amaicillada llegaron hasta profundidades de 30 metros. Al contar con recursos de agua, pueden dar origen a napas de relativa importancia como por ejemplo la cuenca de Casablanca, Yali al sur oeste de Melipilla o como en El Salto en Viña del Mar.

El Maicillo es un material con plasticidad media a nula y sus propiedades físicas son las siguientes [23],

- Granos finos
- Escasa coherencia
- Fácilmente arrastrable por las aguas lluvias
- Débil resistencia a la erosión
- Baja permeabilidad
- Compresibilidad media
- Muy inestable en taludes sin protección
- Fácil para ser excavado, con pala mecánica



Figura 3.1 - Corte de cerro Granítico (1)



Figura 3.2 - Corte de cerro Granítico (2)

3.1 Maicillo en la Literatura

El término maicillo es muy utilizado en Chile, pero corresponde en rigor a un Arenosols. Según la clasificación de la FAO en 2006, Arenosols se forman en mantos de meteorización de grano grueso de rocas sílfceas principalmente granito, areniscas y cuarcitas y en ambiente marino, litoral o arenas lacustres.

En la literatura, es posible encontrar al maicillo también con el nombre de saprolito granítico, el cual se refiere al proceso de generar arenas desde los cuerpos graníticos como arenización. El término de saprolito granítico, viene desde la mecánica de suelos, donde se denomina saprolito o regolito al macizo rocoso meteorizado que conserva la estructura rocosa (ver figura 3.3), aunque la composición de la roca matriz se haya alterado y tenga menos resistencia que la roca sana, pudiendo presentar, además de las discontinuidades originales del macizo, otros planos de debilidad por alteración preferencial. Según el grado de meteorización pueden conservar los bloques de matriz rocosa o presentar un comportamiento de suelos. De esta forma, ante la meteorización de un cuerpo granítico, si este aun conserva la estructura del macizo parental pudiendo además presentar nuevas discontinuidades, es posible llamarlo saprolito granítico [24].

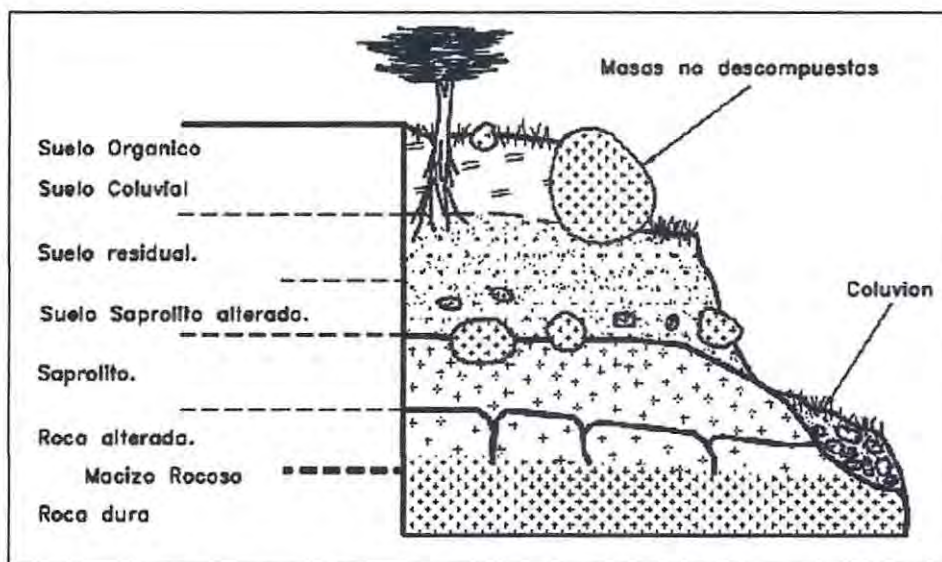


Figura 3.3 - Esquema general de ladera en suelo residual de granito

Fuente: Suarez, J, 2002

CAPÍTULO 4

Ensayos y Especificaciones Técnicas para caracterizar las Bases Granulares

4.1 Ensayos para caracterizar las Bases Granulares

Los ensayos pertinentes para caracterizar la resistencia de las bases granulares vienen especificados en el Manual de Carreteras, Volumen 8.

- Granulometría
- Cubicidad de Partículas
- Límite de Atterberg
- Densidad de Partículas Sólidas
- Desgaste de Los Ángeles
- Proctor Modificado
- Capacidad de Soporte CBR

Por otro lado, existen dos ensayos para caracterizar las bases granulares como parámetros del diseño estructural de las capas que conforman un pavimento flexible especificados en las normas ASTM y AASTHO.

- Ensayo Permeabilidad a Carga Constante (Descrito en Capítulo 5)
- Ensayo Triaxial Cíclico Dinámico (Descrito en Capítulo 6)

4.1.1 Granulometría (MC-8.102.1)

Este método permite analizar la distribución de partículas que existe en la composición de los suelos para posterior clasificación del material. El tamaño de las partículas se determina mediante tamizado, con una serie de tamices normalizados de diferentes aberturas y numerados según diferentes escalas. El objetivo de este ensayo es poder determinar el porcentaje de los diferentes tamaños de las partículas, para poder construir su curva granulométrica y así analizar a que banda granulométrica se aplica mejor.

4.1.2 Cubicidad de Partículas (MC-V8.202.6)

Este método establece el procedimiento para determinar el contenido porcentual de partículas chancadas, rodadas y lajeadas de la fracción retenida en el tamiz 5 mm (ver figura 4.1 y 4.2). El objetivo de este ensayo es tener un conocimiento más profundo de la morfología de los materiales y estimarlos o desestimarlos para su uso.



Figura 4.1 - Determinación partículas lajeadas

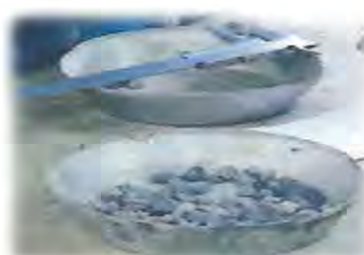


Figura 4.2 - Partículas rodadas

4.1.3 Límites de Atterberg (MC-V8.102.3 / MC-V8.102.4)

Se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Si bien un análisis granulométrico es suficiente para gravas y arenas, cuando se trata de arcillas y limos, se debe complementar el estudio con ensayos que definan la plasticidad del material.

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo fino sólo existen cuatro estados de consistencias según su humedad como se muestra en la siguiente figura,

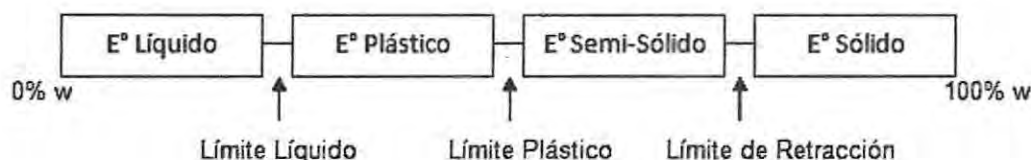


Figura 4.3 - Estados de consistencias según humedad

Los contenidos de humedad en los puntos de transición de estos estados se denominan límites de consistencia o límites de Atterberg. Estos límites son propiedades o índices de los suelos, con que se define la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de los suelos. Generalmente sólo se determina el límite líquido y el límite plástico, debido a que el límite de contracción es un ensayo más complicado y puede ser tóxico debido a que involucra mercurio.

a. Límite líquido (w_l)

Representa el menor contenido de agua necesario para reducir la masa del suelo a una condición Semi-fluido, con una cohesión insignificante. En este sentido, dicho contenido de humedad puede considerarse como un límite de saturación [35].

b. Límite Plástico (w_p)

Es el contenido de humedad sobre el cual las partículas de suelo están bien lubricadas y pueden ser moldeadas en una masa plástica. Una menor cantidad de agua lleva al suelo a un estado Semi-sólido, quebradizo, en el cual se evidencian características granulares. Por otra parte, una mayor cantidad de agua hace al suelo más plástico como resultado de una disminución de su cohesión. El límite plástico es el menor contenido de agua para el cual el suelo mantiene características plásticas [35].

c. Índice de Plasticidad (IP)

La capacidad de un suelo de absorber agua sin perder su cohesión o pasar al estado Semi-fluido queda expresado por la diferencia de los límites líquidos y plásticos recibiendo el nombre de Índice de Plasticidad [35].

Cuando no pueda determinar uno de los dos límites (w_l o w_p), o la diferencia resulte negativa, se informa el Índice de Plasticidad como NP (no plástico).

4.1.4 Clasificación del material

Teniendo en cuenta que en la naturaleza existe una gran variedad de suelos, la ingeniería de los suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación para poder diferenciar que tipo de material se está estudiando. En la actualidad, los sistemas más utilizados en estudios para diseño de pavimentos son el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Unified Soil Classification System (USCS). Para poder realizar una correcta clasificación, es necesario identificar las partículas individuales dependiendo del diámetro que están tengan.

Grava:	$2 \text{ mm} < \Phi < 64 \text{ mm}$
Arena:	$0.074 \text{ mm} < \Phi < 2 \text{ mm}$
Limo:	$0.002 \text{ mm} < \Phi < 0.074 \text{ mm}$
Arcilla:	$\Phi < 0.002 \text{ mm}$

En términos de plasticidad, un material se considera limoso si las fracciones de finos del material tienen un índice de plasticidad de 10% o menor y se considera arcillosa si las fracciones de finos del material tienen un índice de plasticidad de 11% o mayor [37].

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)

Se identifican y agrupan los suelos según características de tamaño y plasticidad (ver Anexo E). Para poder realizar esta clasificación es necesario conocer con anterioridad la granulometría y los límites de Atterberg. Los suelos se designan por símbolos de grupo, el símbolo de cada grupo consta de un prefijo (iniciales de los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelos) y un sufijo (indican subdivisiones en dichos grupos) [36].

- Sistema de Clasificación AASTHO

En 1929 el Departamento de Caminos Públicos de Estados Unidos, introdujo uno de los primeros sistema de clasificación de suelos para vialidad. Hoy en día se conoce como sistema AASTHO. Clasifica los suelos en 7 grupos, basándose en la granulometría y límites de Atterberg. Cabe destacar, que las tablas de este sistema se aplican de izquierda a derecha, si no cumple con el primer grupo, se procede a verificar el siguiente.

Se define un Índice de Grupo que indica la posición relativa del material dentro del grupo, se expresa en número entero y si da un valor negativo se expresa como 0. Para los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 siempre es 0.

$$IG = (F-35) \cdot [0.2 + 0.005 \cdot (w_l - 40)] + 0.1 \cdot [F - 15 \cdot (IP - 10)] \quad (\text{ec. 4.1})$$

$$IG = 0.01 \cdot (F - 15) \cdot (IP - 10), \text{ para grupos A-2-6 y A-2-7.} \quad (\text{ec. 4.2})$$

Donde,

IG: Índice de Grupo

F: Porcentaje que pasa por 0.08 mm (%).

w_l : Límite Líquido (%).

IP: Índice de Plasticidad (%).

4.1.5 Densidad de Partículas Sólidas (MC-V8.102.10)

Este método sirve para comprender mejor las propiedades físico-químicas del suelo y se utiliza para calcular el espacio poroso que ocupa el aire y el agua en una muestra de suelo. Se consigue una mayor comprensión de la función del suelo y se logra interpretar mejor las mediciones de humedad del suelo. Mide la masa de la muestra en un volumen dado. Se centra sólo en las partículas del suelo y no en el volumen total que ocupan dichas partículas.

4.1.6 Desgaste de Los Ángeles (MC-V8.202.11)

Es un método que consiste en poder analizar la granulometría de la parte gruesa del material en estudio, para poder determinar la resistencia al desgaste o fragmentación del material mediante la máquina de Los Ángeles. La muestra de material será sometida a abrasión para luego poder expresar el desgaste o pérdida de material como el porcentaje de pérdida de masa con respecto a la masa inicial.

4.1.7 Proctor Modificado (MC-V8.102.7)

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre humedad y densidad de un suelo compactado en un molde normalizado, mediante un pisón en caída libre, con una energía específica de compactación. Al compactar un suelo se mejora su resistencia y disminuye la compresibilidad del mismo. La densidad final que alcanza un suelo, depende de varios factores. Entre los principales se pueden mencionar la humedad, energía de compactación aplicada y tipo de suelo que se trate.

a. Relación Humedad – Densidad

Se construye un gráfico con la densidad seca del suelo compactado en las ordenadas y la humedad real en las abscisas. Se expresa la humedad óptima como la correspondiente al punto máximo de la curva y la densidad seca máxima como la correspondiente a la humedad óptima.

b. Curva de Saturación

Sirve para determinar si un suelo es susceptible de adquirir mayor humedad o densidad fácilmente. Tiene por objetivo comprobar si la prueba de proctor fue correctamente efectuada, ya que la curva proctor y la de saturación nunca deben cortarse dado que es imposible en la práctica llenar totalmente con agua los huecos que dejan las partículas del suelo compactado [25] (ver figura 4.4).

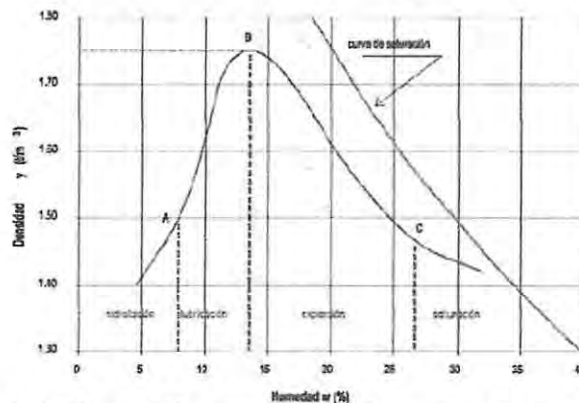


Figura 4.4 - Gráfico relación humedad-densidad, ensayo proctor modificado
Fuente: Manual de Carreteras Vol.3

4.1.8 Capacidad de Soporte CBR (MC-V8.102.11)

Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, conocido como Razón de Soporte de California (CBR). El ensayo se realiza normalmente a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables [26] (ver figura 4.5 y 4.6). Se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, bases y capas de rodadura granulares.



Figura 4.5 - Máquina CBR



Figura 4.6 - Molde con material penetrado

4.2 Especificaciones Técnicas para Caracterizar las Bases Granulares

Estas especificaciones definen las calidades y graduaciones de mezclas de arena – arcillas; gravas o escorias seleccionadas; arenas o material triturado proveniente de pétreos o escoria o cualquier combinación de estos materiales, para ser utilizados como bases granulares. Estos requerimientos son aplicables únicamente a materiales que tienen densidades netas entre 2,000 y 3,000 kg/m³ y absorciones y graduaciones características y vienen estipulados en el Manual de Carreteras Volumen 5 en la Sección 5.302.

4.2.1 Requisitos Generales

Los agregados gruesos, retenidos sobre tamiz 5 mm, deben ser partículas resistentes, durables, constituidas de fragmentos de roca, grava o escorias. Materiales que se quiebran con los ciclos de hielo-deshielo y humedad-sequedad, no deben ser usados.

Los agregados finos, que pasan por el tamiz 5 mm, deben ser constituidos por arenas naturales o trituradas y por partículas minerales que pasan por tamiz 0.08 mm.

Las fracciones que pasan por el tamiz 0.08 mm no deberán ser mayores que los dos tercios de la fracción que pasa por tamiz 0.05 mm. Deben tener un Límite líquido máximo de 35% y un Índice de Plasticidad máximo de 6%. Todo el material debe estar libre de materias orgánicas y terrones de arcillas.

4.2.2 Bases Granulares de graduación Cerrada, Bajo la Capa de Rodadura

Las bases granulares de graduación cerrada deberán ajustarse a la banda granulométrica TM-50b, TM-50c o TM-25 que vienen dadas en la Tabla 4.2.

Cuando se trata de un tratamiento superficial doble, su tamaño máximo absoluto será de 40 mm y su índice de Plasticidad (IP) máximo será de 4%.

En cuanto a las propiedades mecánicas, la fracción gruesa debe tener una resistencia al desgaste, mediante ensaye de Los Ángeles de no más de un 35%, la capacidad de soporte CBR y el porcentaje de chancado varían según el tipo de capa de rodadura a construir sobre la base granular. Los requisitos correspondientes se indican en la siguiente tabla,

Tabla 4.1 - Requisitos para bases granulares según tipo capa de rodadura

Descripción	Concreto Asfáltico	Tratamiento Superficial	Tratamiento Superficial Alto Tránsito
Capacidad de Soporte (CBR) al 95% de la D.M.C.S.	min. 80%	min. 100 %	min. 120%
Material Chancado	min. 50%	min. 70%	min. 90%

4.2.3 Bandas Granulométricas

Las bandas granulométricas indican una zona de trabajo para la distribución de tamaños del material en estudio indicando un mínimo y un máximo establecido. Sirven para especificar y limitar los materiales para así cumplir con las especificaciones técnicas necesarias.

El Manual de Carreteras especifica que se podrán ocupar bases granulares que cumplan con las siguientes bandas,

Tabla 4.2 - Bandas granulométricas para bases granulares

Tamiz mm	A.S.T.M	% que pasa					
		TM-50b		TM-50c		TM-25	
50	2"	100		100		-	
40	1 1/2"	70	100	-		-	
25	1"	55	85	70	100	100	
20	3/4"	45	75	60	90	70	100
10	3/8"	35	65	40	75	50	80
5	N°4	25	55	30	60	35	65
2	N°10	15	45	15	45	25	50
0.5	N°40	5	25	10	30	10	30
0.08	N°200	0	10	0	15	0	15

CAPÍTULO 5

Drenaje

La humedad tiene una gran influencia sobre las propiedades de los materiales que constituyen el paquete estructural y sobre el comportamiento de los pavimentos en general. La presencia de agua juega un papel importante en el método AASTHO 93' ya que incorpora un coeficiente de drenaje en la ecuación de diseño estructural, que afecta a las capas granulares (base y sub-base granular). Las bases granulares son un sistema de drenaje subterráneo, por lo cual tienen que ser permeables, es por esto que la cantidad de finos se restringe desde un principio. Al compactar las bases granulares se crea una capa más resistente sin disminuir sus propiedades drenantes.

Para la realización de un buen diseño estructural es conveniente dotar al pavimento con un sistema de drenaje con colectores longitudinales (cunetas y/o tubos colectores) ya que no conviene proyectar la base para que drene directamente a la atmósfera.

5.1 Fallas inducidas por humedad

La infiltración a través de la superficie, niveles freáticos altos, ascenso capilar, entre otros (ver figura 5.1) contribuyen al desarrollo de fallas en los pavimentos. Las fallas en pavimentos flexibles están caracterizadas por excesiva deflexión, fisuración, bajo valor de soporte subrasante y desintegración.

Es un hecho bien conocido que la presencia de agua es muy perjudicial para los pavimentos. Cedergreen demostró que las cargas dinámicas producen incrementos más importantes de la presión de poros justo en el momento que pasa la carga y en consecuencia, hay reducción notable de la capacidad de carga.



Figura 5.1 - Fuente de humedad en pavimentos
Fuente: Guía AASTHO 93'

5.2 Consideraciones de drenaje en el diseño de pavimentos según AASTHO 93'

El coeficiente de drenaje permite ajustar el coeficiente estructural de las capas granulares no tratadas, en función de las condiciones de drenaje del proyecto en análisis. La tabla 5.2 indica la clasificación de la calidad del drenaje de las bases granulares en función del tiempo que demora la evacuación del 50% del agua de saturación, según la definición del método AASTHO. Esta calidad de drenaje se expresa en la fórmula de dimensionamiento (ec. 7.3) a través de unos coeficientes de drenaje m_i que afectan a las capas no ligadas.

Para elegir alguno de los coeficientes presentes en la tabla 5.3 se deben seguir los siguientes pasos

1. Calcular el tiempo de drenaje de cada capa no ligada para pavimentos flexibles.
2. Seleccionar una calidad de drenaje en función del tiempo de drenaje calculado.
3. Estimar el tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.
4. Con la calidad de drenaje y el porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación, se elige el coeficiente de drenaje m_i .

- Expresión de Resultados

Los datos de entrada para este análisis en lo que respecta a la geometría de la base (ver fig. 5.2) son:

- Longitud resultante de la base: $L_R = W \cdot \left[\left(\frac{S_L}{S_x} \right)^2 + 1 \right]^{0.5}$ (ec. 5.1)

- Pendiente resultante de la base: $S_R = (S_L^2 + S_x^2)^{0.5}$ (ec. 5.2)

- Factor de pendiente: $S_T = \frac{L_R \cdot S_R}{H}$ (ec. 5.3)

Donde,

W: Ancho de capa (m).

S: Pendiente Longitudinal (m/m).

S_x : Pendiente Transversal (m/m).

H: Espesor de capa (m).

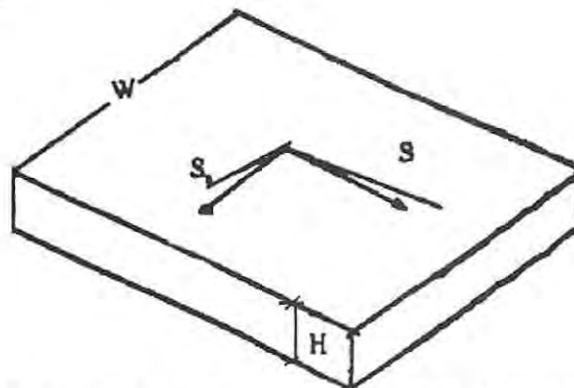


Figura 5.2 - Parámetros geométricos a considerar en el tiempo de drenaje
Fuente: Guía AASTHO 93'

Los cálculos a realizar para cuantificar las propiedades drenantes del pavimento son:

$$- \text{Volumen del Sólido: } V_s = \frac{W_s}{G_s} \quad (\text{ec. 5.4})$$

$$- \text{Volumen de vacíos o Porosidad Máxima: } V_v = N_{e\text{max}} = V_t - V_s \quad (\text{ec. 5.5})$$

$$- \text{Porosidad efectiva: } N_e = \frac{N_{e\text{max}} \cdot C}{100} \quad (\text{ec. 5.6})$$

Se supone un volumen total igual 1.

Donde,

V_s : Volumen del Sólido (cm^3).

W_s : Peso del Sólido (gr).

G_s : Densidad de partículas Sólidas (gr/cm^3).

V_v o $N_{e\text{max}}$: Volumen de vacíos o porosidad máxima (cm^3).

V_t : Volumen Total (cm^3).

C : Cantidad de agua drenada por gravedad (%) (Ver tabla 5.1).

N_e : Porosidad Efectiva (cm^3).

Tabla 5.1 - Cantidad de agua que puede drenar por gravedad, C

Material Predominante	Cantidad de finos								
	< 2.5%			5%			10%		
	Tipos de finos			Tipos de finos			Tipos de finos		
	Filler	Limo	Arcilla	Filler	Limo	Arcilla	Filler	Limo	Arcilla
Grava	70	60	40	60	40	20	40	30	10
Arena	57	50	35	50	35	15	25	18	8

a. Tiempo de Drenaje

El tiempo de drenaje o tiempo de evacuación se calcula de la siguiente fórmula,

$$t' = T_{50} \cdot m \cdot 24 \quad (\text{ec. 5.7})$$

Donde,

t' : Tiempo de drenaje (hrs).

T_{50} : Factor de tiempo en evacuar el 50% de agua.

m : Factor "m" (días).

Dependiendo del tiempo de evacuación se puede clasificar la calidad del drenaje a través de la siguiente tabla,

Tabla 5.2 - Calidad del drenaje de bases y subbases granulares

Calidad del Drenaje	Tiempo de Evacuación
Excelente	2 Horas
Bueno	1 Día
Regular	1 Semana
Pobre	1 Mes
Muy Pobre	El agua no drena

EL factor de tiempo T_{50} se determina a partir del siguiente gráfico,

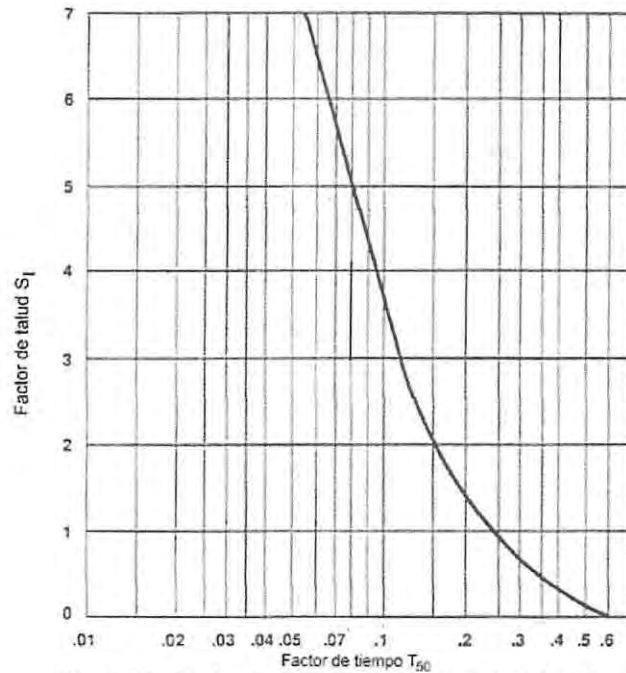


Figura 5.3 - Factor de tiempo para un drenaje del 50%
Fuente: Guía AASTHO 93'

El factor m se calcula a través de la siguiente fórmula,

$$m = \frac{N_e \cdot L_R^2}{H \cdot k} \quad (\text{ec. 5.8})$$

Donde,

k : Coeficiente de permeabilidad (m/día)

El coeficiente de permeabilidad se puede determinar a través del ensayo de permeabilidad a carga constante (Descrito en 5.3).

b. Porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación

Para determinar el porcentaje de tiempo en que el pavimento está próximo a la saturación se utiliza la siguiente fórmula,

$$P = \frac{(S + R)}{365} \cdot 100 \quad (\text{ec. 5.9})$$

Donde,

S: Días de deshielo de primavera (días).

R: Días con lluvia si el pavimento puede drenar el 85% del grado de saturación en 24 horas o menos. Si el tiempo de drenaje excede 24 horas, deben usarse los días de lluvia multiplicados por el tiempo de drenaje en días (días).

Con el tiempo de drenaje y el porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación es posible determinar el coeficiente de drenaje a través de la siguiente tabla,

Tabla 5.3 - Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles

Calidad de drenaje	% de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Regular	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy Pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Si el drenaje no es bueno el coeficiente será menor que 1 y obligará a hacer un paquete estructural de mayor espesor para resistir de iguales condiciones de tránsito. Es necesario aclarar que ese paquete estructural de mayor espesor no es un sustituto de un buen drenaje

En un análisis de drenaje se deben estudiar las granulometrías y permeabilidades de los distintos materiales presentes en el proyecto. La permeabilidad puede determinarse in situ o en laboratorio

5.3 Ensayo Permeabilidad a Carga Constante (ASTM D-2434)

Este método establece el procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad de gravas, arenas y combinación de grava-arena. Consiste en utilizar un permeámetro que se coloca en la muestra haciendo circular un caudal definido en un intervalo de tiempo, manteniendo constante la entrada y salida de carga. Permite medir con cuanta facilidad el agua puede atravesar los poros del material granular, y el tiempo en que el fenómeno ocurre, es decir, la constante de permeabilidad es una velocidad característica de cada material. Se debe asegurar que el ensayo se realice en la zona de flujo laminar para que se cumpla la ley de Darcy que describe las características del movimiento del agua a través de un medio poroso (ver figura 5.4)



Figura 5.4 - Zona de flujos

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Braja Das, 2001

- Expresión de Resultados

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{ec. 5.10})$$

$$v = k \cdot i \quad (\text{ec. 5.11})$$

$$v = \frac{Q}{A \cdot t} \quad (\text{ec. 5.12})$$

La ecuación 5.10 y 5.11 se sustituyen en la ecuación 5.12 y se obtiene

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t} \quad (\text{ec. 5.13})$$

Donde,

i: Gradiente Hidráulico (cm/cm).

Q: Volumen de agua drenada (cm³).

L: Distancia entre piezómetro (cm).

A: Área sección transversal de la muestra (cm²).

ΔH: Diferencia de carga (altura) entre la entrada y salida de flujo de agua (cm).

t: Tiempo de descarga (s).

v: Velocidad de descarga (cm/s).

k: Coeficiente de Permeabilidad (cm/s).

A medida que aumenta la temperatura, la viscosidad del agua disminuye y el coeficiente de permeabilidad aumenta, es por esto que el coeficiente de permeabilidad se ha normalizado a una temperatura de 20°C, por medio de la siguiente fórmula

$$k_{20} = k_T \cdot \frac{n_T}{n_{20}} \quad (\text{ec. 5.14})$$

Donde,

k_{20} : Coeficiente de permeabilidad normalizado (cm/s).

k_T : Coeficiente de Permeabilidad a una temperatura T (cm/s).

n_T : viscosidad del agua a temperatura T (kg/m*s).

n_{20} : viscosidad del agua a 20°C (kg/m*s).

Obs.: El ensayo se aplica a suelos granulares donde pase menos del 10% por la malla N°200.

Se presenta a continuación los valores típicos de coeficiente de permeabilidad para diferentes tipos de suelos,

Tabla 5.4 - Valores de k para diferentes tipos de suelo

Tipo de Suelo	k (cm/s)
Grava Limpia	100 - 1
Arena Gruesa	1.0 - 0.01
Arena fina	0.01 - 0.001
Arcilla limosa	0.001 - 0.00001
Arcilla	0.000001

CAPÍTULO 6

Módulo de Resiliencia

Actualmente el método más utilizado para el diseño estructural de pavimentos flexibles es el determinado por la AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials), donde se considera que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales que constituyen el paquete estructural de un pavimento flexible es el parámetro denominado "Módulo de Resiliencia", concepto que fue introducido por Seed et al en 1962 para caracterizar el suelo de la subrasante, pero en los últimos años ha ganado reconocimiento como propiedad que caracteriza de manera satisfactoria el comportamiento resiliente (pseudo-elástico) de los materiales granulares [28].

El Módulo de Resiliencia se define como un parámetro que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables que tendrán los materiales granulares no tratados de la estructura de un pavimento flexible [27]. Este parámetro surge ya que la respuesta real de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos flexibles y suelo de fundación, al ser sometidos a un gran número de aplicaciones de cargas, como el tránsito vehicular, o sea, que se ven afectados por esfuerzos de fatiga, empiezan a acumular deformaciones, el comportamiento esfuerzo-deformación se puede visualizar en la figura 6.1, se observa que después de descargar gradualmente el material casi toda la deformación a la que estuvo sometida es recuperada, existiendo una pequeña deformación permanente, siendo más específico, al repetir el ciclo carga-descarga, la deformación permanente se va acumulando, aunque dicha deformación en cada ciclo va disminuyendo hasta llegar a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente, ya que como la deformación permanente es muy pequeña, se considera para fines de análisis, que el comportamiento del material es fundamentalmente elástico o pseudo-elástico durante cada ciclo de carga. La relación entre el esfuerzo desviador y la correspondiente deformación unitaria recuperada se denomina "Módulo de Resiliencia"

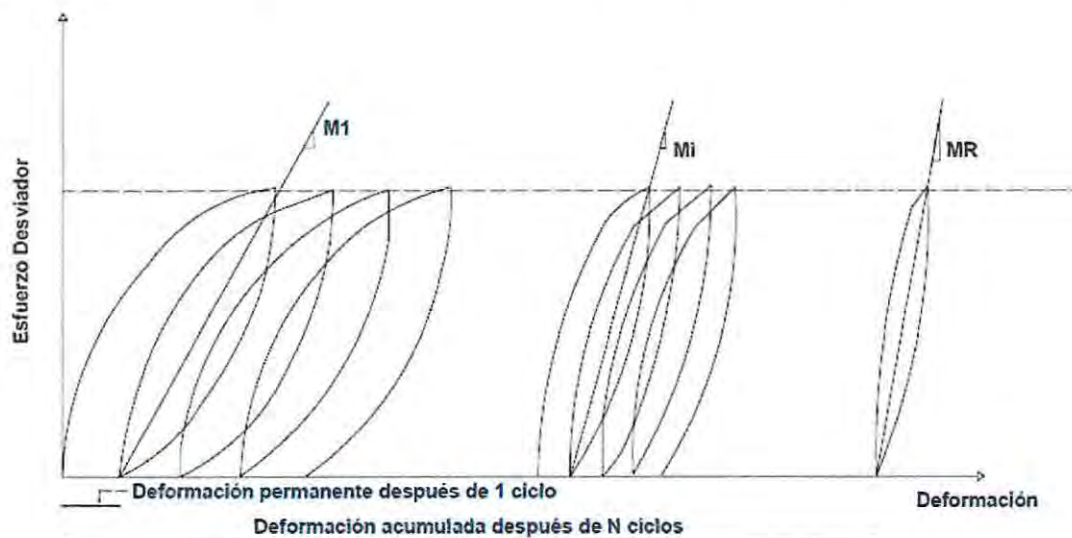


Figura 6.1 - Mecanismo de deformación permanente
Fuente: Huang, 2004

6.1 Factores que afectan el Módulo de Resiliencia en Materiales Granulares

Son varios los factores que afectan el Módulo de Resiliencia de un material granular; se pueden clasificar en dos grupos: el primero es el tipo de material, y sus características. En el otro grupo es el nivel de esfuerzos aplicado y duración de la carga. Para materia de este estudio nos centraremos en el primer grupo [38].

Los factores que afectan en el tipo de material son la gradación, naturaleza mineralógica, contenido de finos, tamaño máximo, la granulometría y la forma de las partículas sólidas. Se han efectuado diversos estudios, los cuales han dado conclusiones contradictorias [17]. El efecto de la granulometría y el contenido de fino no es claro y en muchos casos presentan contradicciones en la influencia sobre el Módulo de Resiliencia.

Cabe destacar que estudios sobre una grava arcillosa llegaron a la conclusión que puede tener Módulos de Resiliencia del orden de 375 MPa; en tanto que una grava arenosa alcanza valores de 650 MPa [39]. Por otro lado, existen estimaciones de Módulos de Resiliencia del orden de 100 MPa para bases granulares de buena calidad, y de 40 MPa para bases granulares deficientes [40].

Diversos autores concluyen que entre mayor es la presencia de finos en un material granular la rigidez tiende a disminuir [19] [29] [21]. Por otro lado se ha observado que en materiales densos bien gradados usualmente tienen alta resistencia mecánica con contenido de finos bajo el 9% [32], siendo más específico algunas investigaciones han reportado un incremento notable en el Módulo de Resiliencia cuando el contenido de fino aumenta de 7% a 10% [33]. Es importante destacar que estudios realizados sobre 6 materiales granulares diferentes concluyen que no existe tendencia general de la evolución del valor del Módulo con el contenido de finos y su grado de influencia depende del tipo de material estudiado [13].

6.2 Método AASTHO. Módulo de Resiliencia en capas granulares

Este parámetro depende de las tensiones aplicadas y responde a la siguiente expresión:

$$M_R = K_1 \cdot (\theta_3)^{K_2} \quad (\text{ec. 6.1})$$

Donde,

θ_3 : suma de esfuerzos principales = $3 \cdot \sigma_3 + \sigma_d$ (MPa)

K_1, K_2 : Coeficientes de regresión.

Los valores más comunes de K_1 y K_2 son 9600 y 0.55 respectivamente. Los valores típicos de presión de confinamiento varían entre 34 kpa hasta elevadas presiones de 345 kpa, dependiendo del espesor de la capa y de la carga. El valor del módulo resiliente para estas condiciones varía entre 163 MPa a 580 MPa [27].

6.3 Correlaciones entre Módulo de Resiliencia y Capacidad de Soporte CBR

El Módulo de Resiliencia para diseñar pavimentos en trazados nuevos, habitualmente se define en forma indirecta, estimándolo a partir de resultados de ensayos que determinan la capacidad de soporte CBR. El método de diseño AASTHO 93' a través de la siguiente figura relaciona el Módulo de Resiliencia y la capacidad de soporte CBR para las capas granulares que componen los pavimentos flexibles.

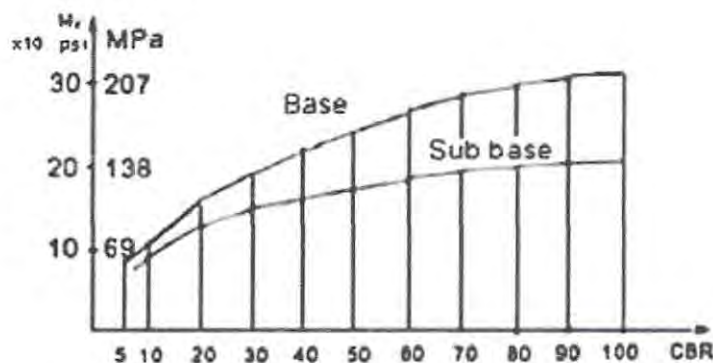


Figura 6.2 - Relación entre M_R y CBR para base y subbase
Fuente: Guía AASTHO 93'

Diversos estudios, realizados en diferentes lugares han dado origen a una cantidad de correlaciones para relacionar el Módulo de Resiliencia con el ensayo CBR como se puede apreciar en la figura 6.3, estas diferencias se originan porque los resultados son muy sensibles a una variedad de factores tales como las propiedades de los suelos, su contenido de humedad, nivel de compactación, estado tensiones de la muestra y procedimientos utilizados en el ensayo. Es importante tener en cuenta que muchas de las correlaciones son más de tipo regional, lo que debe limitar el uso indiferente para cualquier tipo de suelo. Solamente, con una gran experiencia y criterio, el ingeniero podrá seleccionar la correlación más adecuada para un proyecto específico y deben ser usadas solo como un primer acercamiento al Módulo de Resiliencia en los métodos de diseño de pavimentos [42].

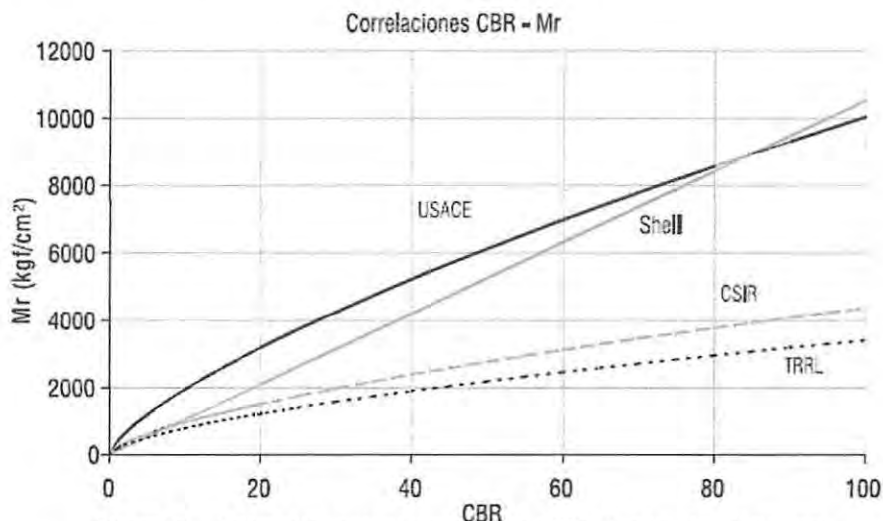


Figura 6.3 - Diferencias entre correlaciones CBR- M_R a través del tiempo
Fuente: Vidal, J y Osorio, R, 2002

6.4 Ensayo Triaxial Cíclico Dinámico (AASTHO T-307)

Este método permite determinar los datos necesarios para poder calcular el Módulo de Resiliencia de los suelos o materiales no tratados que conforman el paquete estructural de un pavimento flexible según la norma AASTHO T-307. Consiste en construir una probeta cilíndrica de aproximadamente 150 mm de diámetro y 300 mm de altura la cual se confina en una celda Triaxial que permite aplicar una presión de confinamiento que varíe con el esfuerzo desviador tratando de simular o reproducir las condiciones más desfavorables de cargas a las que estará sometido el material como parte sustentable del pavimento flexible (ver figura 6.4), sin embargo, es difícil de simular en laboratorio, por lo que la presión de confinamiento (σ_3) se mantiene constante y el esfuerzo desviador es el que se aplica en forma repetida.

- Expresión de Resultados

La medición de los registros obtenidos permite el cálculo del esfuerzo desviador, la deformación específica resiliente y el valor del Módulo de Resiliencia de la siguiente forma,

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (\text{ec. 6.2})$$

$$\epsilon_r = \frac{\Delta hr}{b} \quad (\text{ec. 6.3})$$

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (\text{ec. 6.4})$$

Donde,

σ_1 : Esfuerzo principal mayor (MPa).

σ_3 : Esfuerzo principal menor (MPa).

Δhr : Desplazamiento relativo resiliente de las abrazaderas que soportan los transductores de deformación (mm).

b: base de medida entre las abrazaderas-soportes (mm).

M_R : Módulo de Resiliencia (MPa).

σ_d : Esfuerzo desviador (MPa).

ϵ_r : Deformación unitaria recuperada.

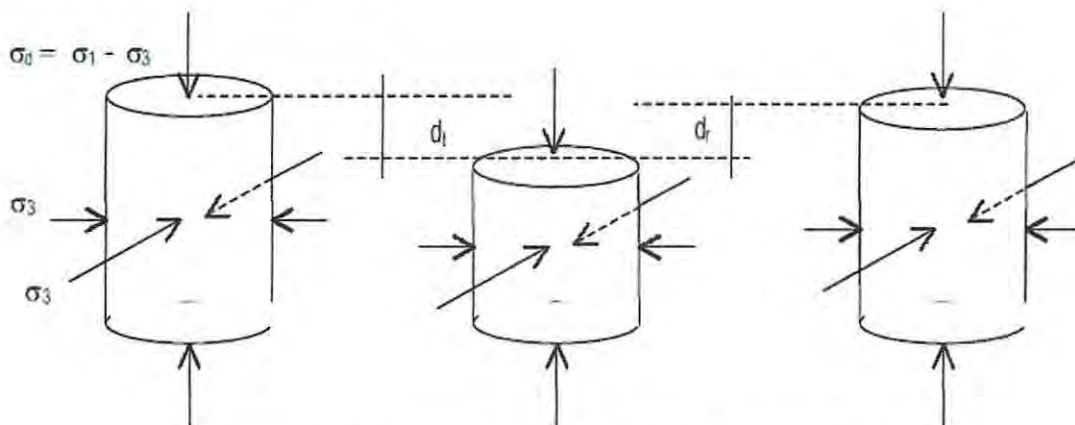


Figura 6.4 - Esquema de esfuerzos al que son sometidos las muestras de ensayo

Fuente: Vidal, J y Osorio, R, 2002

CAPÍTULO 7

Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles

El diseño de pavimentos flexibles ha tenido cambios significativos en los últimos años. Se trabajan enfoques empíricos, semi-empíricos y mecanicistas, como consecuencia de diversos resultados obtenidos en el diseño estructural de este tipo de pavimentos, tratando cada uno de estos obtener una mejor solución de diseño para resolver el espesor de cada capa y la calidad que deben tener los pavimentos. Son deducidas para cada sitio en particular, estableciendo modelos, conocimiento y comportamiento de los materiales que integran las capas del paquete estructural.

Al diseñar, se busca obtener una estructura resistente, donde exista un balance entre cada capa, utilizar alternativas de diseño que permitan ocupar materiales locales, cumpliendo con las especificaciones técnicas de diseño y constructivas, obteniendo así, un modelo al menor costo asociado posible.

Es importante mencionar el concepto integral de un buen diseño, el cual resulta de representar en el modelo estructural, un conocimiento completo de todos los factores que se deben valorizar, en especial las propiedades y comportamiento de los suelos locales y del clima, teniendo en cuenta como referencia, experiencias de otras obras que estén prestando servicio [35].

Llegar a obtener una metodología de diseño para pavimentos en un país, es un trabajo complejo, es por esto que en Chile, la Dirección de Vialidad, ha elegido como procedimiento de diseño el método empírico AASHTO 93' ajustando algunos conceptos con procedimientos de tipo semi-empíricos y utilizando complementos para asemejarlo más a la realidad chilena, tomando relevancia sólo la caracterización real (Módulo de Resiliencia) de la subrasante y dejando de lado dicha caracterización en las capas granulares no tratadas, reemplazándola con un análisis de factores ambientales y climáticos a través de la determinación de la temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA), considerando el Módulo de Resiliencia sólo como un valor no independiente entre capas sucesivas. Además, para facilitar el diseño, la Dirección de Vialidad integró el software PAVIVIAL, el cual recopila la metodología descrita anteriormente.

Las tendencias actuales de diseño estructural de pavimentos flexibles son métodos mecánico-empíricos y se fundamentan en la correlación entre la respuesta predicha de un pavimento a través de modelos elásticos o mediante análisis por elementos finitos y las mediciones observadas in situ. Aunque están tomando mayor fuerza en los últimos años metodologías de diseño que toman en cuenta los estados de esfuerzos y deformaciones permanentes que se producen en las capas granulares y modelos para predecir dichas deformaciones, capaces de reproducir el comportamiento de estos materiales bajo diversas trayectorias de carga cíclica y condiciones del medio ambiente. Lo anterior está generando que en el mundo se estén reemplazando los métodos de diseño empíricos por métodos de diseño basados en aproximaciones analíticas o mecanicistas [41].

Cuando los materiales que conforman la sección estructural de un pavimento se ven sometidos a un gran número de aplicaciones de carga, es decir son afectados por esfuerzos de fatiga, debido a repetidas solicitaciones, estos materiales empiezan a fracturarse o bien a acumular deformaciones dependiendo de su rigidez inicial, y esta es la principal causa del deterioro observado en la superficie de los pavimentos. De hecho, podemos mencionar que dichos agrietamientos y deformaciones aparecen para esfuerzos muy por debajo de los que se supone debería resistir el material por sí mismo.

La importancia que la deformación tiene en los pavimentos es debida a que en los métodos de diseño actuales la deformabilidad es el punto básico a considerar y, de hecho, la mayoría de ellos se centran en mantenerla en límites razonables.

7.1 Metodología AASTHO

Este método empírico se analizó en una pista de prueba creando diversos tipos de combinaciones de pavimentos, bases y sub-bases y de estos estudios se obtuvo un método de diseño, siendo así, un procedimiento de amplia aceptación para el diseño de pavimentos flexibles, se publicó por primera vez en 1972 y existen revisiones hasta 2012.

Fue el último de los grandes ensayos a escala natural de carreteras realizados en Estados Unidos. Se efectuó entre 1958 y 1960 cerca de Ottawa, Illinois. Se eligió esta zona por poseer características de suelos uniformes y un clima típico en gran parte del país.

Primero se construyeron pistas de prueba de Laboratorio para luego pasar a pistas de prueba a escala natural. La primera pista de importancia fue construida por la AASHO en Idaho, Estados Unidos, en 1954. De los estudios realizados en esta pista se concluyó que era insuficiente por lo cual se programó por la AASHTO una pista en gran escala en Illinois en 1958.

La AASTHO considero la posibilidad de implementar un método mecánico-empírico en la guía de diseño de 1986, pero finalmente se adopto un método empírico por la gran aceptación que habían tenido estos entre los usuarios y por el hecho de que un método mecánico-empírico necesita muchas verificaciones. No obstante, la tendencia es ir hacia soluciones mecánicas y hacia allí apuntan las investigaciones [11], como por ejemplo el método AASTHO-MEPDG el cual considera que diseñar un pavimento es mucho más que la simple elección de las capas que conforman la estructura del pavimento. Hay que tener en consideración el requerimiento de materiales, procedimientos constructivos y asegurar la calidad a través de una supervisión adecuada y apta, que permitan a las estructuras de pavimentos comportarse de acuerdo con las expectativas del diseñador.

7.2 Diseño Estructural

La fórmula general de diseño estructural entregada por AASTHO 93' relaciona la cantidad de ejes equivalentes solicitantes con el número estructural y el nivel de confianza, de manera que la estructura experimente una pérdida de serviciabilidad determinada [34]. La ecuación es la siguiente:

$$EE = (NE_i + 25.4)^{9.36} \cdot 10^{-(16.4 + z_R \cdot S_o)} \cdot M_{Ri}^{2.32} \cdot \left[\frac{p_i - p_f}{p_i - 1.5} \right]^{1/\beta} \quad (\text{ec. 7.1})$$

$$\beta = 0.40 + \left[\frac{97.81}{(NE + 25.4)} \right]^{5.19} \quad (\text{ec. 7.2})$$

Donde,

EE: Ejes equivalentes de 80 KN acumulados durante la vida de diseño.

NE_i: números estructurales (mm).

Z_R: coeficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte.

M_{Ri}: Módulo de Resiliencia de la capa i (MPa).

p_i: índice de serviciabilidad inicial.

p_f: índice de serviciabilidad final.

7.2.1 Número Estructural Total

Lo primero que se debe hacer es determinar el número estructural que se requiere sobre la subrasante, mediante un algoritmo desarrollado por AASTHO.

$$NE_T = a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot h_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot h_3 \cdot m_3 \quad (\text{ec. 7.3})$$

Donde,

a_i, h_i: Coeficiente estructural y espesor (mm) de cada una de las capas del paquete estructural.

m_i: Coeficiente de drenaje de las capas no tratadas (bases y sub-bases granulares).

La ecuación del número estructural total no tiene una solución única ya que existen varias combinaciones que satisfagan el número estructural.

7.2.2 Números Estructurales (NE_i)

NE₁: Número estructural calculado a partir del módulo resiliente de la Base.

NE₂: Número estructural calculado a partir del módulo resiliente de la Subbase.

NE₃ o NE_T: Número estructural calculado a partir del módulo resiliente de la Subrasante.

7.2.3 Coeficientes Estructurales

En la versión del método AASTHO de 1993 se enfatiza en la conveniencia de asignar un coeficiente estructural adecuado a cada capa de un pavimento flexible, teniendo en consideración las propiedades reales de los materiales que constituyen el paquete estructural. El coeficiente estructural depende directamente del Módulo de Resiliencia del material que compone cada capa, por lo que la mejor manera de obtenerlo es a través de esa propiedad. Consecuentemente, se deben realizar los ensayos correspondientes para determinar el módulo elástico de las bases y sub-bases. Los ensayos para determinar el Módulo de Resiliencia requieren de equipos especiales

y difíciles de utilizar, por lo que se aplican procedimientos indirectos para poder determinar el coeficiente estructural.

7.2.4 Coeficiente Estructural para Concretos Asfálticos

Se estima el coeficiente estructural para concretos asfálticos en función del Módulo de Resiliencia o de la estabilidad Marshall con las siguientes relaciones,

$$a_1 = 0.00052 \cdot M_R^{0.555} \quad (\text{ec. 7.4})$$

Donde,

M_R : Módulo de Resiliencia del concreto asfáltico (MPa)

$$a_1 = 0.00078 \cdot E_M^{0.441} \quad (\text{ec. 7.5})$$

Donde,

E_M : Estabilidad Marshall del concreto asfáltico (N).

La guía AASTHO 93¹ presenta el siguiente monograma donde relaciona varios ensayos para la obtención del coeficiente estructural para la capa asfáltica.

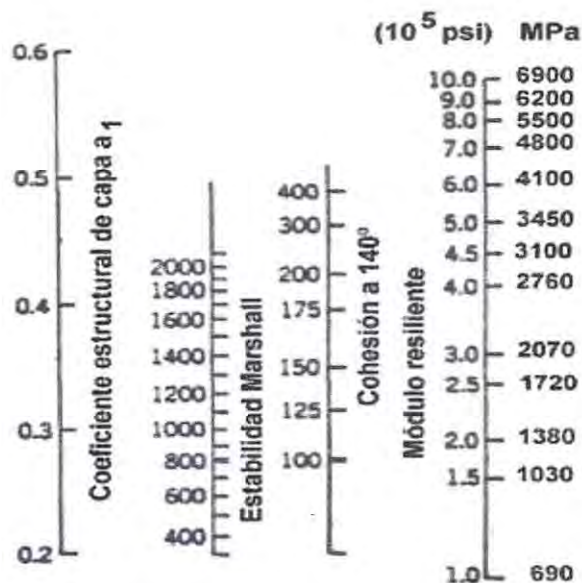


Figura 7.1 - Coeficientes estructurales para capa asfáltica
Fuente: Guía AASTHO 93¹

7.2.5 Coeficiente Estructural para las Capas Granulares

Se estima el coeficiente estructural para las bases granulares y sub-bases granulares no tratadas a partir de las siguientes correlaciones dependiendo de la capacidad de soporte CBR según el Manual de Carreteras Volumen 3 y a partir del Módulo de Resiliencia según AASTHO 93',

- Coeficiente estructural de Bases Granulares

$$a_2 = 0.032 \cdot \text{CBR}^{0.32} \quad (\text{ec. 7.6})$$

$$a_2 = 0.249 \cdot \log(M_R) - 0.977 \quad (\text{ec. 7.7})$$

Donde,

CBR: Capacidad de Soporte de la Base Granular (%).

M_R : Módulo de Resiliencia de la Base Granular (psi).

La guía AASTHO 93' presenta el siguiente monograma donde relaciona varios parámetros resistentes para la obtención del coeficiente estructural para base granular.

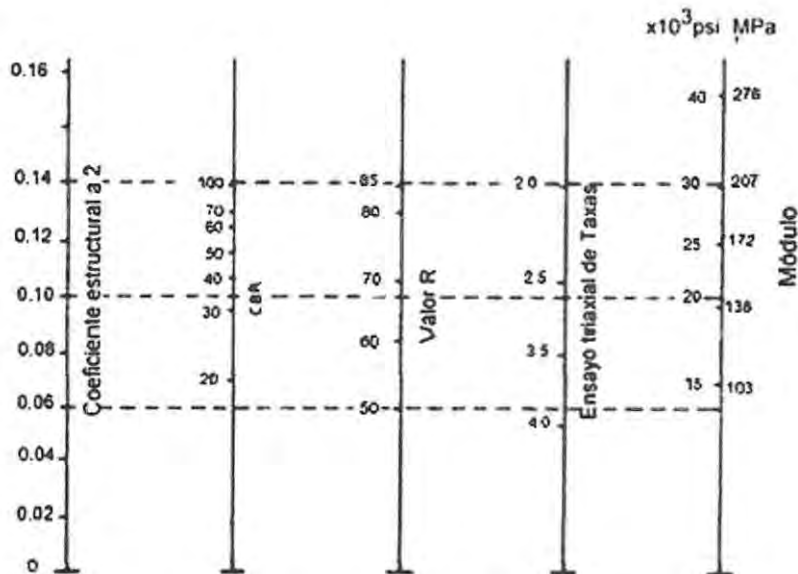


Figura 7.2 - Coeficientes estructurales para bases granulares
Fuente: Guía AASTHO 93'

- **Coefficiente estructural de sub-bases granulares**

$$a_3 = 0.058 \cdot \text{CBR}^{0.19} \quad (\text{ec. 7.8})$$

$$a_3 = 0.227 \cdot \log (M_R) - 0.839 \quad (\text{ec. 7.9})$$

Donde,

CBR: Capacidad de Soporte de la sub-base granular (%).

M_R : Módulo de Resiliencia de la sub-base granular en (Psi).

La guía AASTHO 93' presenta el siguiente monograma donde relaciona varios parámetros resistentes para la obtención del coeficiente estructural para sub-base granular.

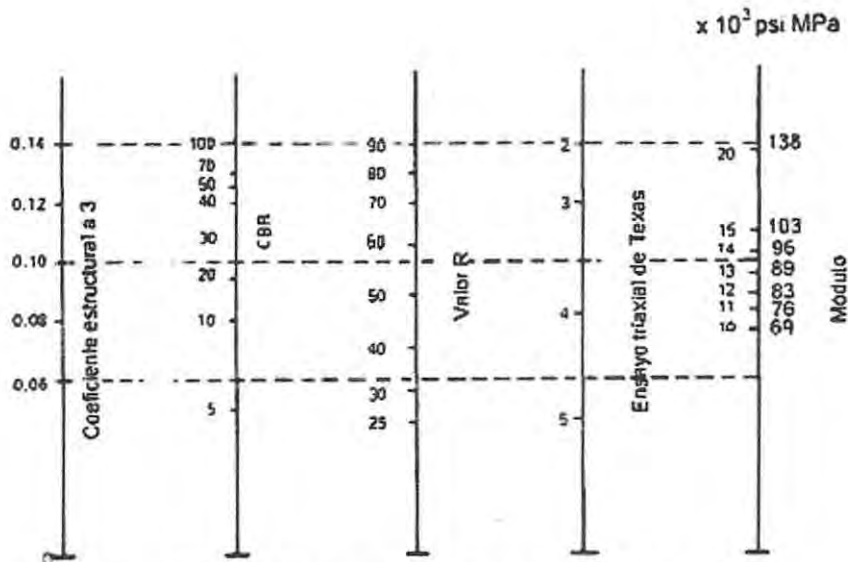


Figura 7.3 - Coeficientes estructurales para sub-bases granulares
Fuente: Guía AASTHO 93'

Como se puede observar en las ecuaciones mostradas, para estos valores de coeficientes estructurales se tienen valores de Módulos de Resiliencia asociados, los que deberían ser controlados para garantizar que se cumpla la hipótesis de diseño preliminar dado por el Manual de Carreteras Volumen 3

Para condiciones normales de diseño, con las especificaciones de construcción habituales, se recomienda adoptar los coeficientes estructurales que se indican en la Tabla 7.1, sin embargo, para condiciones especiales, debidamente justificadas, se deberán utilizar los coeficientes apropiados a esas situaciones.

Tabla 7.1 - Coeficientes estructurales para capas de pavimento flexibles

CAPA	Características	Coefficiente Estructural
Subbase Granular	CBR = 40%	0.12
Base Granular	CBR = 80%	0.13
Base Asfáltica Grad. Gruesa	6.000 N	0.33
Base Asfáltica Grad. Abierta		0.28
Grava-emulsión		0.30
C. Asfáltico, Capa Interm.	8.000 N	0.41
C. Asfáltico de Superficie	9.000 N	0.43
Mezclas drenantes		0.32
Microaglomerado discontinuo en caliente		0.40
mezcla SMA (Stone Mastic Asphalt)		0.43

7.2.6 Coeficientes de Drenaje

Los coeficientes de drenaje (m_i) a utilizar dependen tanto de la calidad del drenaje como del tiempo durante el cual la estructura del pavimento se verá expuestas a niveles de humedad cercanas a la saturación. La Tabla 7.2 muestra los coeficientes de drenaje que se proponen para el país; corresponden a un resumen de los resultados obtenidos en un estudio realizado especialmente con ese propósito.

Tabla 7.2 - Coeficientes de drenaje (m_i)

Región	Precip.	Base Permeable	Base: Finos hasta 10%		Base: Mas 10% Finos	
			Subras. Gran.	Subras. Finos	Subras. Gran.	Subras. Finos
IV	≤ 100 mm	1.40 - 1.35	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.25 - 1.15	1.05
	> 100 mm	1.40 - 1.35	1.35 - 1.25	1.15 - 1.00	1.15 - 1.00	1.05 - 0.8
V A VI	≤ 150 mm	1.40 - 1.35	1.35 - 1.25	1.15 - 1.00	1.15 - 1.00	1.00
	> 150 mm	1.40 - 1.35	1.35 - 1.25	1.15 - 1.00	1.00	1.00 - 0.800
VII A IX	≤ 350 mm	1.40 - 1.35	1.35 - 1.25	1.00	1.00	0.80
	> 350 mm	1.40 - 1.35	1.35 - 1.25	1.00	1.00 - 0.80	0.80
X	≤ 1500 mm	1.40 - 1.35	1.25 - 1.15	1.00 - 0.80	1.00 - 0.80	0.80 - 0.60
	> 1500 mm	1.35 - 1.30	1.25 - 1.15	0.80	0.80	0.60
XI A XII	≤ 500 mm	1.40 - 1.35	1.15 - 1.00	1.00	1.00	1.00 - 0.60
	> 500 mm	1.40 - 1.35	1.25 - 1.15	0.80	0.80	0.80

Base permeable: menos 3% de finos y/o coeficiente de permeabilidad > 0.01 cm/s.

Subras Gran.: subrasante granular, máximo 35% pasa tamiz de 0.08 mm.

Subras Finos: subrasante de suelo fino.

El manual de Carreteras presenta también el siguiente gráfico para la estimación del coeficiente de permeabilidad para bases y sub-bases granulares dependiendo de la cantidad de material fino que pasa por la malla N°200,

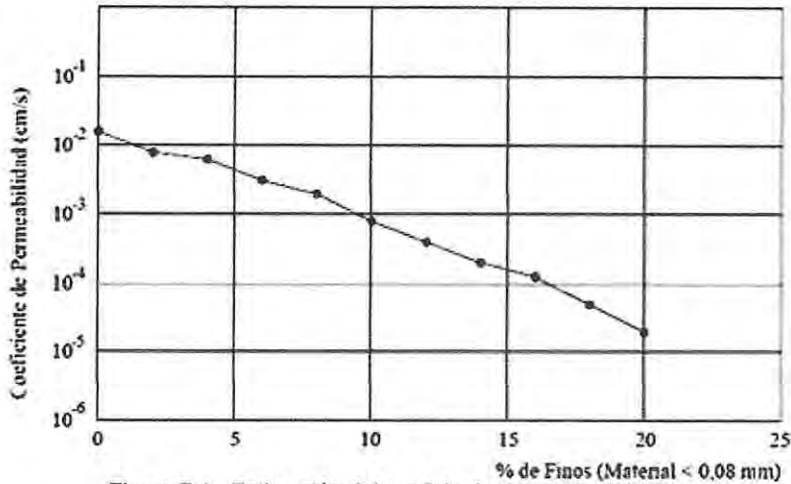


Figura 7.4 - Estimación del coeficiente de permeabilidad

Fuente: Manual de Carreteras Vol. 3

7.2.7 Serviciabilidad

El pavimento se diseña para una determinada vida de diseño, que se refiere al período durante el cual la serviciabilidad se mantiene dentro de ciertos límites; terminada la vida útil de diseño deberá rehabilitarse. La ecuación de diseño establece un estado inicial del pavimento (p_i), que depende exclusivamente de las posibilidades tecnológicas disponibles para construirlo y un nivel de deterioro considerado como final o inconveniente para transitar (p_f). En la Tabla 7.3 se entregan los valores que se recomiendan para estos parámetros.

Tabla 7.3 - Índice de serviciabilidad

Índice de Serviciabilidad Inicial (p_i)	4.2
Índice de Serviciabilidad Final (p_f)	2

7.2.8 Solicitaciones

Las sollicitaciones que afectan la estructura se expresan como los Ejes Equivalentes acumulados durante el período de vida de diseño definido. Salvo que se indique o autorice especialmente de otra manera, normalmente los pavimentos se deberán diseñar en una sola etapa y para las vidas útiles que se indican en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4 - Vida de diseño

Clasificación del Camino	Vida de Diseño (años)
De alto Tránsito en Zonas Urbanas	20 - 30
Caminos Nacionales	10 - 20
Regionales Principales	10 - 20
Regionales Secundarios	10 - 20

7.2.9 Confiabilidad

El grado de confiabilidad del diseño se controla por el factor de confiabilidad (F_R) que es función de un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal (Z_R) y de la desviación normal del error combinado (S_0) de todos los parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento. Para las situaciones normales, la Tabla 7.5 indica los niveles de confianza a utilizar en los diseños y los correspondientes valores del coeficiente estadístico Z_R .

La desviación normal del error combinado (S_0), incluye las dispersiones inherentes a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento, entre los cuales tienen una participación preponderante los errores que pudieran darse en la predicción del tránsito solicitante y el grado de variabilidad que presentan los suelos de la subrasante. La Tabla 7.5 indica los valores que se recomienda utilizar en los diseños de pavimentos flexibles en función de las solicitudes esperadas y del coeficiente de variación (coeficiente de variación = desviación estándar / promedio) de la serie de valores representativos de las características de los suelos de la subrasante.

Tabla 7.5 - Nivel de confianza y valor del S_0

EE Solicitantes (millones)	Confiabilidad (%)	Z_R	S_0 en función del coeficiente variación de los suelos				
			15%	20%	30%	40%	50%
< 5	60	-0.253	0.45	0.46	0.47	0.49	0.50
5 - 15	60 - 70	-0.253 -0.524	0.45	0.46	0.47	0.49	0.50
15 - 30	60 - 75	-0.253 -0.674	0.45	0.46	0.47	0.49	0.50
30 - 50	70 - 80	-0.524 -0.841	0.44	0.45	0.46	0.48	0.49
50 - 70	70 - 85	-0.524 -1.037	0.42	0.43	0.44	0.47	0.48
70 - 90	70 - 90	-0.524 -1.282	0.40	0.41	0.42	0.45	0.46

El factor de confiabilidad (F_R) se determina con los valores del Z_R y S_0 que se adopten, según la ecuación,

$$\text{Log } F_R = - Z_R \cdot S_0 \quad (\text{ec. 6.10})$$

En términos generales,

Tabla 7.6 - Nivel de confianza y coeficiente estadístico

Tipo de Vía	Confiabilidad R (%)	Coficiente Estadístico Z_R
Metropolitanas	80	-0.841
Troncales	75	-0.674
Colectores	60	-0.253
Servicio o locales	50	0

7.2.10 Módulos Resilientes Subrasante

El manual de Carreteras estipula que para la determinación del Módulo de Resiliencia de la subrasante se deben utilizar las correlaciones determinadas por el Transport and Road Research Laboratory (TRRL) en el año 1987

$$M_R \text{ (MPa)} = 17.6 \cdot \text{CBR}^{0.64} \quad \text{CBR} < 12\% \quad \text{(ec. 7.11)}$$

$$M_R \text{ (MPa)} = 22.1 \cdot \text{CBR}^{0.55} \quad 12\% \leq \text{CBR} \leq 80\% \quad \text{(ec. 7.12)}$$

Es importante señalar que la relación entre los Módulos de Resiliencia dos capas no ligadas (granulares) sucesivas, no debe ser mayor que 4

7.2.11 Diseño con verificación por capas

Para cada una de las capas se verifica que existe el suficiente espesor por encima de la misma para prevenir ahuellamientos y daños estructurales (ver figura 7.5).

$$D_{\text{asf}}^* \geq NE_1 / a_{\text{asf}} \quad \text{(ec. 7.13)}$$

$$NE_1^* = a_{\text{asf}} \cdot D_{\text{asf}}^* \geq NE_1 \quad \text{(ec. 7.14)}$$

$$D_{\text{base}}^* \geq (NE_2 - NE_1^*) / a_{\text{base}} \cdot m_{\text{base}} \quad \text{(ec. 7.15)}$$

$$NE_2^* + NE_1^* \geq NE_2 \quad \text{(ec. 7.16)}$$

$$D_{\text{sub-base}}^* \geq (NE_3 - (NE_1^* + NE_2^*)) / a_{\text{sub-base}} \cdot m_{\text{sub-base}} \quad \text{(ec. 7.17)}$$

$$NE_2^* + NE_1^* + NE_3^* \geq NE_3 \quad \text{(ec. 7.18)}$$

Donde,

D_i : Espesor de la capa i (mm).

NE_i : Número estructural de la capa i (mm).

a_i : Coeficiente estructural de la capa i .

m_i : Coeficiente de drenaje de la capa i .

D_i^* : Espesor real de la capa i utilizado (mm).

NE_i^* : Número estructural de la capa i real utilizado (mm).

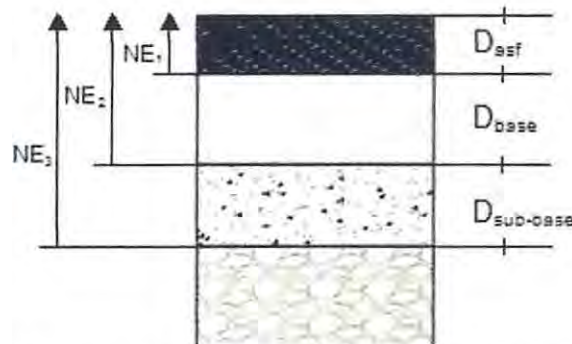


Figura 7.5 - Determinación de espesores de las capas de pavimentos flexibles

La metodología establecida por SHELL propone una forma para poder limitar los espesores de las capas granulares no tratadas a través de una verificación de potencial de rigidez, la cual viene dada por las siguientes fórmulas,

- **Verificación Espesor de Subbase Granular**

Se debe verificar:

$$k_1 \cdot M_{R_{\text{subrasante}}} \geq M_{R_{\text{subbase}}} \quad (\text{ec. 7.19})$$

$$k_1 = 0.2 \cdot D_{\text{sub-base}}^{0.45} \quad (\text{ec. 7.20})$$

Donde:

$D_{\text{sub-base}}$: Espesor capa sub-base granular (mm).

M_{R_i} : Módulo de Resiliencia de la capa i (MPa).

Para $D_{\text{sub-base}}$ expresada en mm. Si no cumple aumentar $D_{\text{sub-base}}$

- **Verificación Espesor de Base Granular**

Se debe verificar:

$$k_2 \cdot (k_1 \cdot M_{R_{\text{subrasante}}}) \geq M_{R_{\text{base}}} \quad (\text{ec. 7.21})$$

$$k_2 = 0.2 \cdot D_{\text{base}}^{0.45} \quad (\text{ec. 7.22})$$

Donde:

D_{base} : Espesor capa base granular (mm).

M_{R_i} : Módulo de Resiliencia de la capa i (MPa).

Para D_{base} expresada en mm. Si no cumple aumentar D_{base}

Por razones constructivas y para evitar proliferación excesiva de diferentes diseños, los espesores de las capas ligadas (asfálticas) deben redondearse a los 5 mm, en tanto que los de las capas ligadas, a los 10 mm. En la siguiente tabla se muestran los espesores mínimos que deben tener las capas que conforman en paquete estructural,

Tabla 7.7 - Espesores mínimos capas pavimentos flexibles

CAPA	Espesor (mm)
Cada capa asfáltica individual, min.	50*
Capa granular no tratada, min.	150

*Para las capas con mezclas convencionales dependiendo del clima y condiciones de la zona el espesor podrá ser 10 mm menos al indicado en la tabla 7.7.

7.2.12 Variante Presente en Manual de Carreteras Volumen 3

Luego de haber determinado el Coeficiente Estructural Total (NE_T) dependiendo del Módulo de Resiliencia de la Subrasante, se establecen los espesores mínimos de capas asfálticas a colocar para que las tensiones que se generan no originen fallas en la subrasante ni en las propias capas asfálticas; para tales efectos se presentan tablas y gráficos que permitan determinar el número estructural mínimo a colocar sobre la base granular (NE_A), en función de las solicitaciones previstas y de la temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA) del lugar donde se localiza la obra. El número estructural para las capas no ligadas (subbase y base granular) se determina como la diferencia entre el NE_T y NE_A . Este tipo de procedimiento se basa en análisis teórico-empírico sustentado en la experiencia nacional [35]. En el Anexo F se presentan las láminas que representan las condiciones de la Región de Valparaíso.

$$(NE_T - NE_A) = a_2 \cdot h_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot h_3 \cdot m_3 \quad (\text{ec. 7.23})$$

$$NE_A = f(\text{TMAPA}, \text{EE}) \quad (\text{ec. 7.24})$$

El Diseño Descrito por el Manual de Carreteras, Volumen 3 puede realizarse con la ayuda del programa computacional PAVIVIAL.

CAPÍTULO 8

Presentación y Análisis de Resultados

El estudio experimental consistió en determinar todas las características de las mezclas realizadas con distintos porcentajes de maicillo según lo especificado por el Manual de Carreteras Volumen 8 y verificando si cumplen con los requisitos de base granular según el Manual de Carreteras Volumen 5, ensayos descritos en el Capítulo 4, como también las características de diseño descritas en los Capítulos 5 y 6.

Para poder establecer los porcentajes de maicillo (con y sin plasticidad) a incorporar a la base granular de tipo grava-chancada bien graduada se tuvieron dos puntos importantes en consideración,

1. Comodidad de producir y utilizar las mezclas en terreno: Las mezclas se realizaron con porcentajes múltiplos de 5.
2. Factor de costos asociados a la producción de mezcla: Todo porcentaje menor a 10% de maicillo (con y sin plasticidad) para agregar a una mezcla no se considerará ya que el ahorro en costos es muy bajo con respecto a un 10% tal y como se demuestra en el Capítulo 9.

En base a lo anterior, se realizaron las siguientes mezclas,

Mezcla base granular con arena arcillosa

- 90% base granular con un 10% arena arcillosa

Mezcla Base Granular con Arena Limosa

- 90% base granular con un 10% arena limosa
- 85% base granular con un 15% arena limosa
- 80% base granular con un 20% arena limosa

8.1 Caracterización y Análisis de Materiales.

Los materiales utilizados en el estudio (ver figura 8.1, 8.2 y 8.3) se describen a continuación,

- Material Grava Chancada de buena calidad utilizada como base granular predominante, proveniente del río La Iguá, Provincia de Petorca, Región de Valparaíso. Constructora Tricam.
- Material Arena Arcillosa (maicillo plástico) utilizado para la creación de un nuevo tipo de Base Granular con plasticidad, proveniente de recinto Pangal, Limache, Provincia Marga-Marga, Región de Valparaíso.
- Material Arena Limosa (maicillo no plástico) utilizado para la creación de un nuevo tipo de Base Granular sin plasticidad, proveniente de la carretera F-50, Lo-Orozco, Quilpué, Provincia de Marga-Marga, Región de Valparaíso.



Figura 8.1 - Base granular



Figura 8.2 - Mezcla base granular con arena-limosa



Figura 8.3 - Mezcla base granular con arena-arcillosa

Se presenta un resumen de los ensayos realizados en la Unidad de Laboratorio y Gestión de Calidad de la Dirección de Vialidad, Región de Valparaíso, junto a un análisis que describe de mejor forma los datos obtenidos. Todos los cálculos realizados en este Ítem se encuentran en el Anexo A.

8.1.1 Arena arcillosa (maicillo con plasticidad)

Tabla 8.1 - Granulometría arena-arcillosa

Granulometría		
Abertura (mm)	Tamiz	% que Pasa
40	1 1/2"	
25	1"	
20	3/4"	
10	3/8"	
5	N°4	100
2	N°10	94
0.5	N°40	57
0.08	N°200	33



Figura 8.4 - Maicillo tipo arena-arcillosa

Tabla 8.2 - Características arena-arcillosa

Características	Valor	Unidad
Límite Líquido	32.1	(%)
Límite Plástico	17.6	(%)
Índice de Plasticidad	15	(%)
Densidad de Partículas Sólidas	2595	(kg/m ³)
Densidad Máxima Compactada Húmeda	2163	(kg/m ³)
Densidad Máxima Compactada Seca	1935	(kg/m ³)
Humedad Óptima	11.8	(%)
CBR al 95% de la Densidad Máxima Compactada Seca	14	(%)
Clasificación del Material		
USCS: SC, Arena Arcillosa		
AASHTO: A-2-6(1), Gravas, Arenas limosas y Arcillosas		

Este tipo de maicillo (ver figura 8.4) contiene un 67% de arena fina y un 33% de material fino que pasa por la malla N°200 como se aprecia en la tabla 8.1. El material presenta plasticidad media (ver tabla 8.2).

8.1.2 Arena limosa (maicillo sin plasticidad)

Tabla 8.3 - Granulometría arena-limosa

Granulometría		
Abertura (mm)	Tamiz	% que Pasa
40	1 1/2"	
25	1"	
20	3/4"	
10	3/8"	100
5	N°4	95
2	N°10	62
0.5	N°40	19
0.08	N°200	5



Figura 8.5 - Maicillo tipo arena-limosa

Tabla 8.4 - Características arena-limosa

Características	Valor	Unidad
Límite Líquido	-	(%)
Límite Plástico	-	(%)
Índice de Plasticidad	NP	(%)
Densidad de Partículas Sólidas	2761	(kg/m ³)
Densidad Máxima Compactada Húmeda	2181	(kg/m ³)
Densidad Máxima Compactada Seca	1981	(kg/m ³)
Humedad Óptima	10.1	(%)
CBR al 95% de la Densidad Máxima Compactada Seca	23	(%)
Clasificación del Material		
USCS: SW-SM, Arena bien graduada, Arena Limosa		
AASHTO: A-1-b(0), Piedras, Gravas y Arenas		

Este tipo de maicillo (ver figura 8.5) contiene un 90% de Arena fina y un 5% de material fino que pasa por la malla N°200 como se aprecia en la tabla 8.3.

El límite líquido no pudo ser determinado ya que el material se desplazaba dentro de la máquina Casagrande a medida que aumentaba la cantidad de golpes. El límite plástico tampoco pudo ser determinado debido a que no fue posible realizar cilindros del diámetro especificado en la norma. De acuerdo a los resultados el material es reportado como No Plástico (ver tabla 8.4).

8.1.3 Mezclas base granular con arena-arcillosa

a. Granulometría

La banda granulométrica utilizada es la TM-50c, ya que es de gradación más abierta que las bandas granulométricas TM-50b y TM-25, por lo cual permite introducir mayor cantidad de material fino.

Tabla 8.5 - Granulometría de base granular y mezcla con arena-arcillosa

Abertura (mm)	Tamiz	Granulometría		TM-50c
		100% - 0%	90% - 10%	
		% que Pasa	% que Pasa	
40	1 1/2"	100	100	100
25	1"	96	96	70 - 100
20	3/4"	82	81	60 - 90
10	3/8"	55	56	40 - 75
5	N°4	40	41	30 - 60
2	N°10	26	30	15 - 45
0.5	N°40	10	14	10 - 30
0.08	N°200	3	5	0 - 15

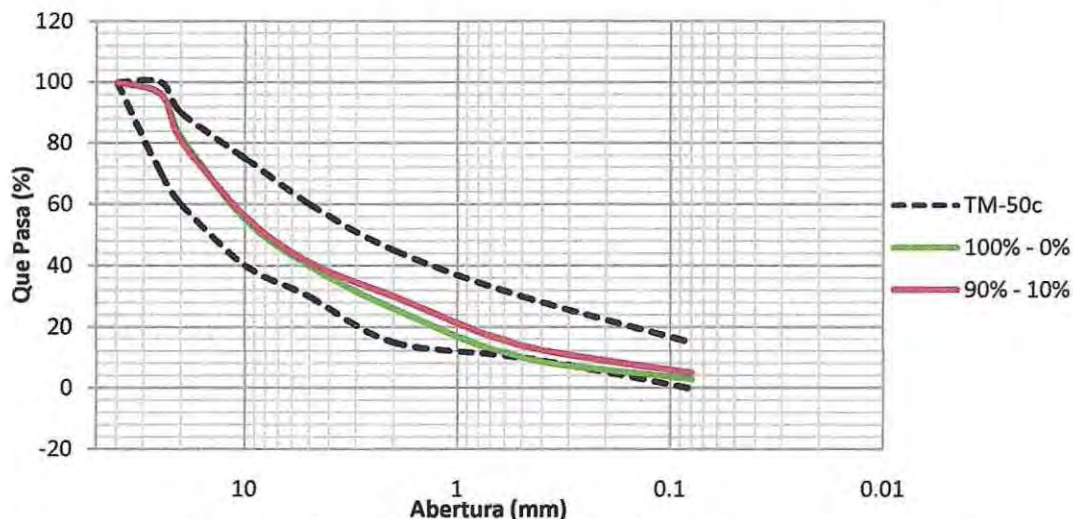


Figura 8.6 - Curvas granulométricas de base granular y mezcla con arena-arcillosa

La mezcla 90% - 10% cumple con la banda granulométrica utilizada (ver tabla 8.5), la semejanza de la granulometría de la base granular y de la mezcla 90% - 10% se hace evidente en la figura 8.6 existiendo leves diferencias bajo 3 mm, esto se debe al porcentaje incorporados de arena-arcillosa, aportando en mayor cantidad material que pasa por 3 mm hasta 0.8 mm, esto significa que el mayor aporte a la mezcla es material tipo arena fina.

b. Restricción Granulométrica

La fracción que pasa por abertura 0.08 mm, debe ser menor a 2/3 de la fracción que pasa por abertura 0.5 mm (ver tabla 8.6).

Tabla 8.6 - Restricción granulométrica de base granular y mezcla con arena-arcillosa

100% - 0%		90% - 10%	
4% < 6%	Cumple	5% < 10%	Cumple

c. Densidad de Partículas Sólidas

La Densidad de Partículas Sólidas debe estar entre 2,000 y 3,000 kg/m³ (ver tabla 8.7).

Tabla 8.7 - Densidad de partículas sólidas de mezcla base granular con arena-arcillosa

100% - 0%		90% - 10%	
2,769 kg/m ³	Cumple	2,746 kg/m ³	Cumple

d. Requisitos Generales Para Bases Granulares

Tabla 8.8 - Requisitos generales de base granular y mezcla con arena-arcillosa

Requisitos Generales Para Bases Granulares		Mezclas Base Granular - Arena-arcillosa	
		100% - 0%	90% - 10%
Capacidad de Soporte CBR	≥ 80%	116%	106%
Límite Líquido	≤ 25%	-	20.3%
Índice de Plasticidad	≤ 6%	NP	7%
Desgaste de Los Ángeles	≤ 35%	16%	17%
Porcentaje de Chancado	≥ 70%	71%	72%

La pérdida de Capacidad de Soporte CBR se hace evidente al introducir arena-arcillosa en la mezcla con base granular (ver tabla 8.8). La incorporación de un 10% de arena-arcillosa cumple con la mayoría de los criterios para la utilización como base granular, el índice de plasticidad que adquiere el material es de un 7%, esto significa que el material tiene baja plasticidad pero aun así supera los límites establecidos en el Manual de Carreteras Volumen 5, por lo cual, este tipo de mezcla es NO APTA para la utilización como base granular en pavimentos asfálticos. Cabe destacar, que todo porcentaje mayor o igual a 10% de arena-arcillosa para agregar a una nueva mezcla no cumplirá con las especificaciones técnicas que requieren tener las bases granulares.

e. Clasificación del Material

En la siguiente tabla se observa la clasificación que adopta la base granular y la mezcla 90% - 10% según la clasificación USCS y AASTHO,

Tabla 8.9 - Clasificación de material de base granular y mezcla con arena-arcillosa

Porcentajes	Coeficientes	Clasificación del Material	
		USCS	GW, Grava bien graduada
100% - 0%	Cu=11.85	AASHTO	A-1-a (0), Piedras, Gravas y Arenas
	Cc=2.09	USCS	GW-GM, Grava bien graduada, Grava Limosa
90% - 10%	Cu=28.19	AASHTO	A-2-4(0), Gravas, Arenas Limosas y Arcillosas
	Cc=2.89		

8.1.4 Mezclas base granular con arena-limosa

a. Granulometría

La banda granulométrica utilizada es la TM-50c, ya que es de gradación más abierta que las bandas granulométricas TM-50b y TM-25, por lo cual permite introducir mayor cantidad de material fino.

Tabla 8.10 - Granulometría de base granular y mezclas con arena-limosa

Granulometría						
Abertura (mm)	Tamiz	100% - 0%	90% - 10%	85% - 15%	80% - 20%	TM-50c
		% que Pasa	% que Pasa	% que Pasa	% que Pasa	
40	1 1/2"	100	100	100	100	100
25	1"	96	96	95	95	70 - 100
20	3/4"	82	81	80	82	60 - 90
10	3/8"	55	58	59	64	40 - 75
5	N°4	40	45	48	53	30 - 60
2	N°10	26	33	34	36	15 - 45
0.5	N°40	10	14	14	15	10 - 30
0.08	N°200	3	5	5	5	0 - 15

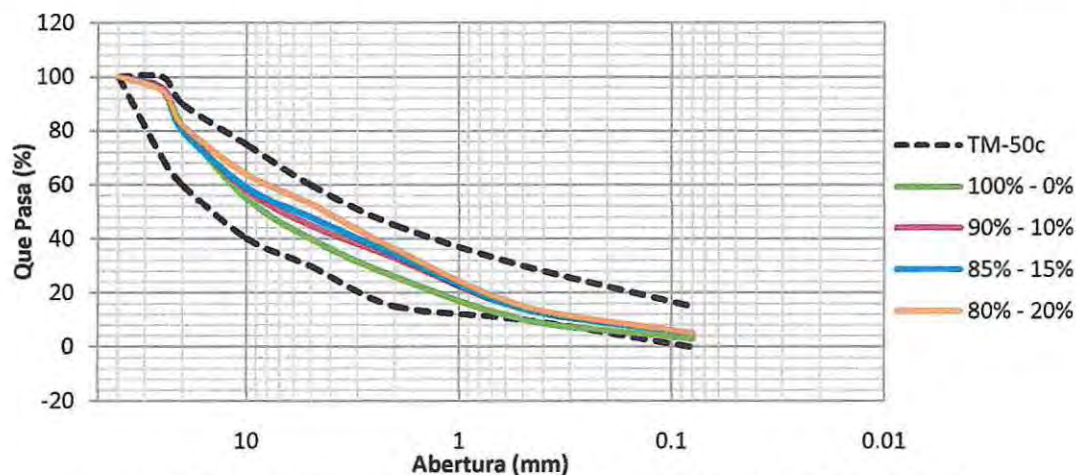


Figura 8.7 - Curvas granulométricas de base granular y mezclas con arena-limosa

Todas las mezclas cumplen con la banda granulométrica TM-50c (ver tabla 8.10), la semejanza de cada granulometría se hace evidente en la figura 8.7, existiendo mayores diferencias bajo un diámetro de 10.7 mm, esto se debe a los porcentajes incorporados de arena-limosa, aportando en mayor cantidad material que pasa por 10 mm hasta 0.1 mm, esto significa que el mayor aporte a la mezcla es material tipo arena fina.

b. Restricción Granulométrica

La fracción que pasa por abertura 0.08 mm, debe ser menor a 2/3 de la fracción que pasa por abertura 0.5 mm (ver tabla 8.11).

Tabla 8.11 - Restricción granulométrica de base granular y mezclas con arena-limosa

100% - 0%		90% - 10%		85% - 15%		80% - 20%	
4% < 6%	Cumple	5% < 9%	Cumple	5% < 9%	Cumple	5% < 10%	Cumple

c. Densidad de Partículas Sólidas

La Densidad de Partículas Sólidas debe estar entre 2,000 y 3,000 kg/m³ (ver tabla 8.12).

Tabla 8.12 - Densidad de partículas sólidas de base granular y mezclas con arena-limosa

100% - 0%		90% - 10%		85% - 15%		80% - 20%	
2,769 Kg/m ³	Cumple	2,776 Kg/m ³	Cumple	2,779 Kg/m ³	Cumple	2,784 Kg/m ³	Cumple

La densidad de partículas sólidas de cada mezcla cumple con el rango permitido para bases granulares y se observa un leve aumento en cada una de estas, deduciendo que el aporte de arena-limosa influye en la densidad de cada mezcla.

d. Requisitos generales para bases granulares

Tabla 8.13 - Requisitos generales de base granular y mezclas con arena-limosa

Requisitos Generales Para Bases Granulares		Mezclas Base Granular - Arena-Limosa			
		100% - 0%	90% - 10%	85% - 15%	80% - 20%
Capacidad de Soporte CBR	≥ 80%	120%	109%	87%	76%
Límite Líquido	≤ 25 %	-	-	-	-
Índice de Plasticidad	≤ 6%	NP	NP	NP	NP
Desgaste de Los Ángeles	≤ 35%	16%	16%	16%	16%
Porcentaje de Chancado	≥ 70%	71%	72%	72%	74%

El límite líquido de las mezclas no pudo ser determinado ya que el material se desplazaba dentro de la máquina Casagrande a medida que aumentaba la cantidad de golpes. El límite plástico tampoco pudo ser determinado debido a que no fue posible realizar cilindros del diámetro especificado en la norma. De acuerdo a los resultados las mezclas son reportadas como materiales No Plásticos (ver tabla 8.13).

La pérdida de capacidad de soporte CBR se hace evidente a medida que aumenta el porcentaje de arena-limosa en la mezcla con base granular (ver tabla 8.13). Las mezclas con un 10% y 15% respectivamente cumplieron con todos los requisitos presentados por el Manual de Carreteras Volumen 5 para ser utilizados como un nuevo tipo de base granular para pavimentos asfálticos. La incorporación de un 20% de arena-limosa no cumplió con el parámetro Capacidad de Soporte CBR dando un valor de 76%, esto implica, que todo porcentaje mayor o igual a 20% no podrá ser utilizado. El valor máximo de porcentaje de maicillo sin plasticidad a utilizar es de 15%, cumpliendo con un CBR de 87%.

e. Clasificación del Material

En la siguiente tabla se observa la clasificación que adopta la base granular y las mezclas realizadas según la clasificación USCS y AASTHO,

Tabla 8.14 - Clasificación de material de base granular y mezclas con arena-limosa

Porcentajes	Coeficientes	Clasificación del Material	
100% - 0%	Cu=11.85	USCS	GW, Grava bien graduada
	Cc=2.09	AASHTO	A-1-a(0), Piedras, Gravas y Arenas
90% - 10%	Cu=5.22	USCS	GW-GM, Grava bien graduada, Grava Limosa
	Cc=3.07	AASHTO	A-1-a(0), Piedras, Gravas y Arenas
85% - 15%	Cu=4.95	USCS	GW-GM, Grava bien graduada, Grava Limosa
	Cc=3.00	AASHTO	A-1-a(0), Piedras, Gravas y Arenas
80% - 20%	Cu=12.08	USCS	SW-SM, Arena bien Graduada, Arena Limosa
	Cc=1.23	AASHTO	A-1-a(0), Piedras, Gravas y Arenas

Se observa que el aumento de porcentaje de arena-limosa en un 20% cambia la clasificación del material, esto se debe, al aumento de fino en la mezcla.

8.2 Drenaje

Se presenta un resumen de los ensayos realizados en Laboratorio de Mecánica de Suelos y Hormigón de la Universidad de Valparaíso en la tabla 8.15, junto a un análisis que describe de mejor forma los datos obtenidos. Todos los cálculos realizados en este ítem se encuentran en el Anexo B.

8.2.1 Coeficiente de Permeabilidad de mezclas realizadas

Compactando las muestras a un 95% de la DMCS y variando las alturas manteniendo la condición de carga constante, es posible obtener el gradiente hidráulico y la velocidad media a partir de las ecuaciones 5.10 y 5.12 respectivamente (ver figura 8.9 y 8.10).

Tabla 8.15 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, promedio de valores

	Promedios				i	v (cm/s)
	ΔH (cm)	Vol. (cm ³)	t (s)	T(°C)		
100%	4	99.99	162.19	14.97	0.342	0.008
	6	75.17	100.65	14.50	0.513	0.009
	8	63.81	40.64	14.50	0.684	0.020
	10	42.23	21.68	14.50	0.855	0.026
	12	30.12	10.10	14.00	1.026	0.037
90% - 10%	4	95.18	305.22	14.30	0.342	0.004
	6	80.95	123.36	14.50	0.513	0.008
	8	57.13	52.18	14.50	0.684	0.014
	10	37.29	22.34	14.13	0.855	0.021
	12	30.17	15.22	14.50	1.026	0.025
85% - 15%	4	118.05	424.33	14.30	0.342	0.003
	6	102.09	177.41	14.50	0.513	0.007
	8	80.76	90.26	14.50	0.684	0.011
	10	38.13	37.31	14.70	0.855	0.013
	12	30.26	23.15	15.00	1.026	0.016
80% - 20%	4	117.29	2400.95	14.97	0.342	0.001
	6	82.55	480.39	14.90	0.513	0.002
	8	61.07	198.15	14.50	0.684	0.004
	10	42.38	80.51	14.13	0.855	0.007
	12	32.31	43.56	14.00	1.026	0.009

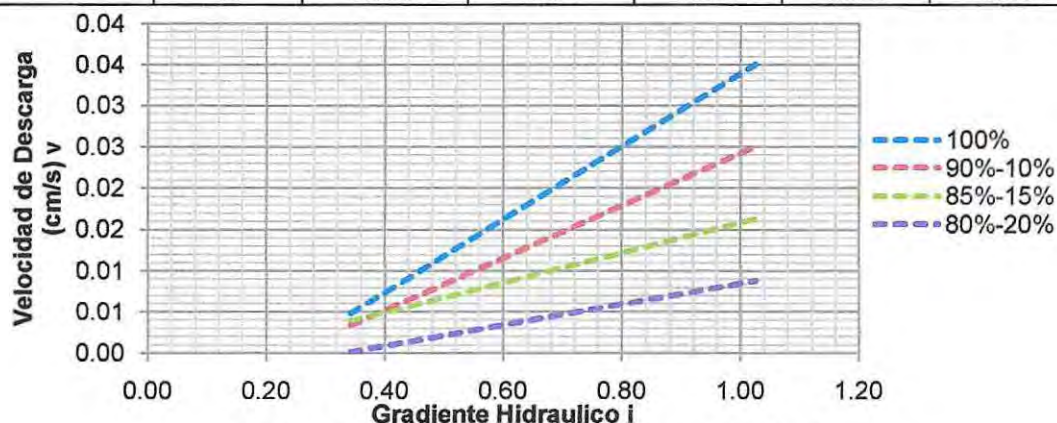


Figura 8.8 - Gráfico de dispersión de muestras ensayadas

En la figura 8.8 se puede observar la relación lineal entre la velocidad de descarga y el gradiente hidráulico de cada muestra, esto demuestra que se está dentro de un flujo laminar y con ello la utilización de la ley de Darcy para la obtención del Coeficiente de Permeabilidad (ver figura 5.4).

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad de las mezcla es necesario conocer la pendiente de cada recta y la temperatura promedio de cada muestra ensayada para poder normalizar el coeficiente de permeabilidad a una temperatura de 20°C.

- **Modelo Matemático de cada muestra**

Base Granular, $v = 0.044 \cdot i - 0.010$, $T^{\circ}\text{C} = 14.50$.
 90% Base Granular – 10% Arena Limosa, $v = 0.031 \cdot i - 0.007$, $T^{\circ}\text{C} = 14.39$.
 85% Base Granular – 15% Arena Limosa, $v = 0.018 \cdot i - 0.002$, $T^{\circ}\text{C} = 14.54$.
 80% Base Granular – 20% Arena Limosa, $v = 0.012 \cdot i - 0.004$, $T^{\circ}\text{C} = 14.50$.

Utilizando la ecuación 5.14 se obtienen los siguientes coeficientes de permeabilidad de cada mezcla,

Tabla 8.16 - Coeficientes de permeabilidad normalizados de cada mezcla

	100%	90% - 10%	85% - 15%	80% - 20%
k (cm/s)	51×10^{-3}	36×10^{-3}	21×10^{-3}	14×10^{-3}

Es importante destacar que el coeficiente de permeabilidad teórico basándose en el Manual de Carreteras volumen 3 (ver figura 7.4) para materiales donde pasa un 5% por la malla N°200 debiera ser aproximadamente de 70×10^{-3} cm/s y los valores obtenidos en este ensayo pertenecen a materiales con porcentaje de entre un 5.5% a 9% que pasa por la malla N°200 dependiendo de la cantidad de maicillo que tenga la muestra.

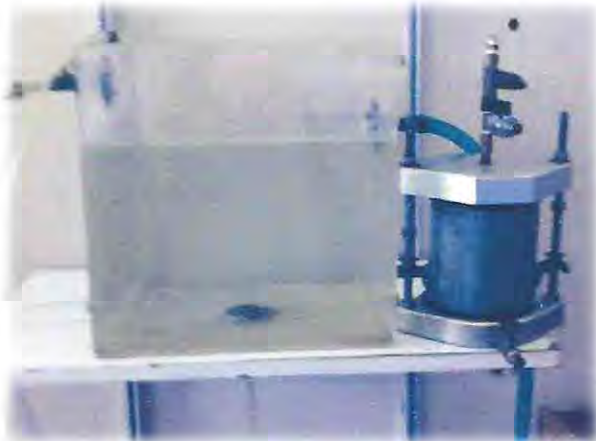


Figura 8.9 - Permeámetro a carga constante



Figura 8.10 - Molde con material compactado

8.2.2 Coeficiente de Drenaje

a. Datos geométricos del tramo Ruta 68 - Acceso a Colliguay

- Pendiente Longitudinal: 0.02 m/m
- Pendiente Transversal: 0.025 m/m
- Ancho base granular: 6 m
- Espesor Base granular: 0.15 m

b. Datos de cada mezcla

En la siguiente tabla se presentan los datos relevantes obtenidos para cada mezcla,

Tabla 8.17 - Valores característicos de cada mezcla

	100%	90% - 10%	85% - 15%	80% - 20%
DMCS	2.158	2.163	2.165	2.169
95%DMCS	2.05	2.055	2.057	2.061
G_s	2.769	2.776	2.779	2.784
N_e máx.	0.26	0.26	0.26	0.26
N_e	0.104	0.104	0.104	0.104
k	44.064	31.104	18.000	12.096

Donde,

DMCS: Densidad Máxima Compactada Seca (gr/cm^3).

G_s : Densidad de los Sólidos (gr/cm^3).

N_e : Volumen de Vacíos (cm^3).

k: Coeficiente de permeabilidad (m/día).

Mediante la tabla 5.2 e iterando con respecto a la tabla 5.3, utilizando las ecuaciones 5.7 y 5.9, es posible obtener los coeficientes de drenajes de cada muestra indicados en la siguiente tabla,

Tabla 8.18 - Coeficientes de drenaje de cada muestra

	100%	90% - 10%	85% - 15%	80% - 20%
t' (horas)	3.785	5.364	9.272	13.791
P (%)	4.930	4.930	4.930	4.930
Coef. de Drenaje (m_i)	1.15	1.15	1.15	1.15

8.3 Módulo de Resiliencia de mezclas base granular con arena-limosa

Se presenta un resumen de los ensayos realizados en el Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV) en la tabla 8.19, junto a un análisis que describe de mejor forma los datos obtenidos. Todos los cálculos realizados en este ítem se encuentran en el Anexo C.

Tabla 8.19 - Resumen valores ensayo triaxial cíclico dinámico

σ_3 (kpa)	100%		90% - 10%		85% - 15%		80% - 20%	
	θ (kpa)	MR (MPa)	θ (kpa)	MR (MPa)	θ (kpa)	MR (MPa)	θ (kpa)	MR (MPa)
20.68	81.36	193.04	81.38	148.65	81.47	138.69	81.53	114.55
20.68	101.77	172.68	102.23	140.07	103.32	147.39	104.17	168.48
20.68	124.05	151.2	123.05	142.11	126.17	139.38	125.75	127.40
34.47	139.18	170.29	137.02	162.64	138.77	168.33	139.02	148.33
34.47	172.37	176.78	171.92	164.93	175.63	164.12	175.56	153.48
34.47	210.78	195.19	212.42	168.57	210.83	170.49	210.84	160.32
68.95	276.15	277.22	274.81	224.89	280.04	215.29	279.86	197.35
68.95	355.4	251.79	353.75	229.65	356.43	226.64	350.27	214.07
68.95	428.86	258.16	427.43	234.97	423.61	233.08	430.38	221.32
103.42	381.35	309.07	380.11	261.12	383.4	228.53	383.42	221.69
103.42	420.56	275.74	420.94	254.76	419.6	232.63	418.72	216.92
103.42	530.15	323.36	531.82	279.49	526.14	248.13	535.20	234.3
137.90	523.80	407.80	524.84	293.43	523.09	260.47	522.87	222.82
137.90	560.10	375.42	561.90	318.18	557.30	276.18	557.39	231.78
137.90	654.15	400.77	655.77	342.17	652.81	284.67	-	-
	M_R Real	262.57	M_R Real	224.38	M_R Real	208.94	M_R Real	188.06

Los 5 últimos ciclos de la mezcla 80%-20% no se obtuvieron ya que la muestra falló tal y como se observa en la figura 8.12 y 8.13.

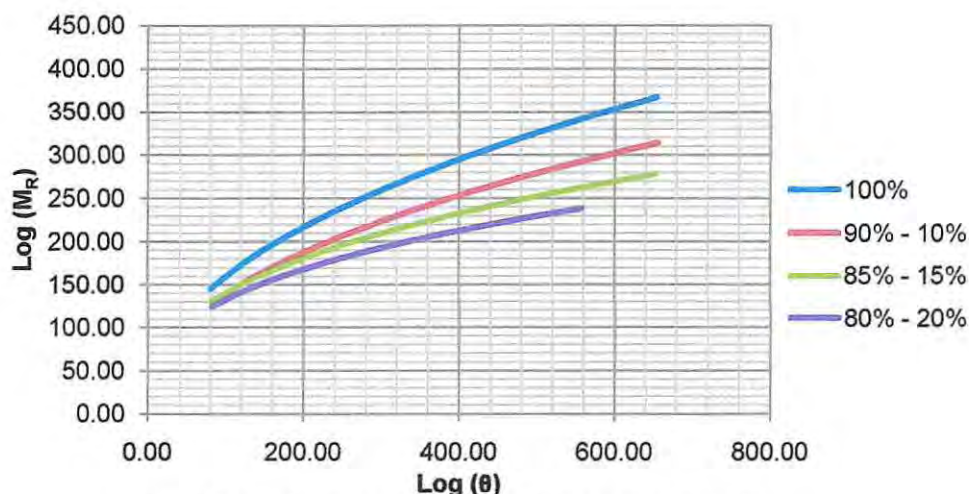


Figura 8.11 - Líneas de tendencia de gráfico $\log(M_R)$ vs $\log(\theta)$

Como se observa en la figura 8.11 existe pérdida de Módulo de Resiliencia con respecto a la incorporación de maicillo tipo arena-limosa a la base granular.

- **Modelo Matemático de cada muestra**

A los resultados obtenidos en laboratorio se ajustó la regresión establecida por la AASTHO 93' indicadas en el capítulo 6.

100% base granular,	$M_R = 20.81 \cdot \theta^{0.442}$
90% base granular – 10% arena-limosa,	$M_R = 18.87 \cdot \theta^{0.433}$
85% base granular – 15% arena-limosa,	$M_R = 26.46 \cdot \theta^{0.363}$
80% base granular – 20% arena-limosa,	$M_R = 27.73 \cdot \theta^{0.340}$



Figura 8.12 - Muestra 80%-20% antes del ensayo Figura 8.13 - Muestra 80%-20% después del ensayo

8.4 Análisis Estadístico de Resultados Obtenidos

Para poder analizar los resultados que se obtuvieron de los ensayos realizados, es necesario realizar un análisis estadístico. En todo estudio donde se requiera hacer uso de ensayos o procesos de laboratorio, intervienen una serie de variables en el proceso que afectan los resultados esperados, inclusive cuando se realizan procedimientos normales o estandarizados. Estas discrepancias entre resultados obtenidos y esperados se pueden atribuir a factores ambientales, instrumentales, de procedimiento, experiencia de quien realiza los ensayos, entre otros.

El análisis de regresión da la capacidad de representar una serie de datos o resultados, por medio de un modelo matemático que describa con exactitud su comportamiento respecto a determinadas variables. Dentro de la estadística clásica y de este tipo de análisis el mejor método para ajustar una serie de datos a un modelo matemático que describa el fenómeno, es el método de los mínimos cuadrados. Para el caso de un fenómeno que sea posible describir mediante la relación de dos variables (una dependiente y otra independiente), este método ayuda a encontrar la curva que mejor se adapte al diagrama de dispersión. Parte de la hipótesis que la distribución de los residuos es normal y su varianza es constante. Vale la pena aclarar que el método no arroja el modelo matemático que describa el fenómeno, pero sí, ayuda a identificar de entre los posibles modelos matemáticos, aquel que mejor describa los valores obtenidos y a encontrar las constantes que el modelo posee.

El análisis ANOVA sirve para probar hipótesis de diseños experimentales y es utilizada para confrontar la variabilidad de varias fuentes de datos y verificar si dicha variabilidad es significativa (test F y Estadístico t).

Se presentan a continuación modelos matemáticos que permitan entender la relación existente entre porcentaje de maicillo incorporado a base granular limpia con respecto a la capacidad de soporte CBR y el Módulo de Resiliencia de las mezclas, así como también encontrar una relación entre los dos últimos parámetros mencionados.

De los resultados expuestos en 8.1, 8.2 y 8.3 se presenta la siguiente tabla,

Tabla 8.20 - Porcentajes de mezclas y capacidad de soporte CBR

Base Granular (%)	Maicillo (%)	Capacidad de Soporte CBR (%)	M _R Real Efectivo (MPa)
100	0	120	262.57
90	10	109	224.38
85	15	87	208.94
80	20	76	188.06

8.4.1 Porcentaje de arena-limosa Vs capacidad de soporte CBR

En la figura 8.14 se puede observar la tendencia de la curva de las 3 mezclas especificadas anteriormente con distintos porcentajes de maicillo tipo arena-limosa vs la capacidad de soporte CBR obtenida para cada una.

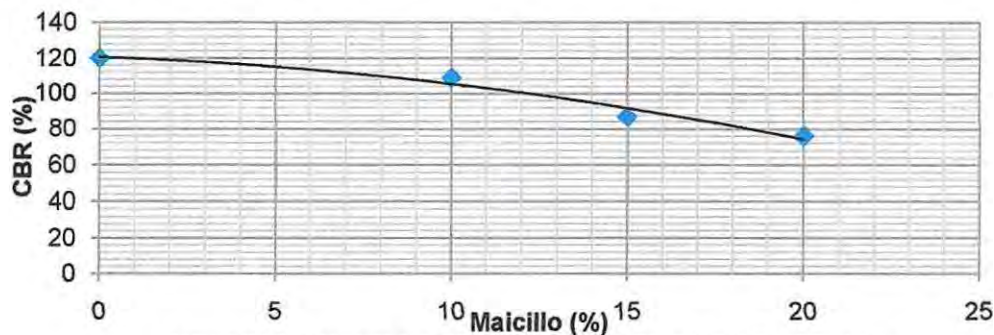


Figura 8.14 - Línea de tendencia, gráfico de dispersión CBR vs maicillo

De la regresión cuadrática se pueden deducir los siguientes parámetros estadísticos,

Tabla 8.21 - Resumen valores estadísticos de regresión cuadrática CBR vs maicillo

Estadísticas de la Regresión	
Coefficiente de correlación múltiple r	-0.984
Coefficiente de determinación r ²	0.967
r ² ajustado	0.902
Error típico	6.293

El análisis de varianza o ANOVA entrega los siguientes resultados,

Tabla 8.22 - Resumen valores del análisis de varianza CBR vs maicillo

Características	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	Test F	Valor crítico de F
Regresión	2	1170.4	585.2	14.78	0.181
Residuos	1	39.6	39.6		
Total	3	1210			

Debido a que F calculada es mayor al valor crítico del mismo, se concluye que el modelo si explica el fenómeno en estudio y que los resultados obtenidos no se deben a la casualidad.

Tabla 8.23 - Resumen de valores estadísticos e intervalos finales CBR vs maicillo

Características	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inf. 95%	Sup. 95%
Intercepción	120.6	6.26	19.25	0.03	41.01	200.19
M	-0.72	1.43	-0.50	0.70	-18.94	17.50
M ²	-0.08	0.071	-1.13	0.46	-0.98	0.82

- Modelo Matemático de Regresión Cuadrática

$$\text{CBR} (\%) = -0.08 \cdot M^2 - 0.72 \cdot M + 120.6$$

Donde,

CBR: Capacidad de Soporte (%)

M: Maicillo (%)

8.4.2 Porcentaje de arena-limosa Vs Módulo de Resiliencia Real

En la figura 8.15 se puede observar la tendencia de la curva de las 3 mezclas especificadas anteriormente con distintos porcentajes de arena-limosa vs el Módulo de Resiliencia Real obtenida para cada una.

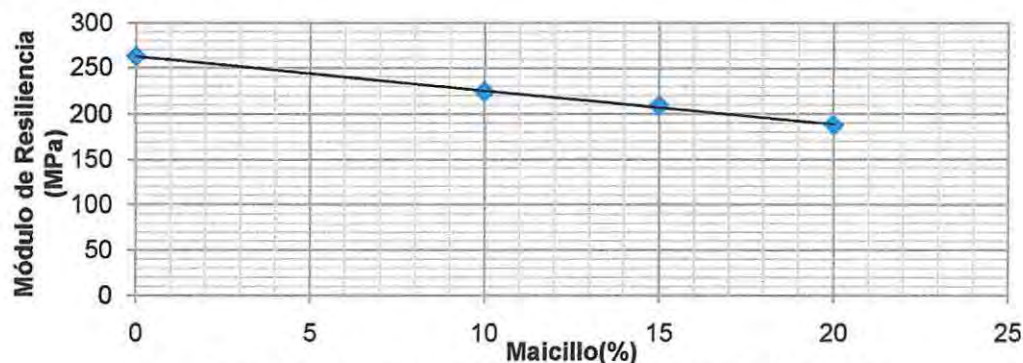


Figura 8.15 - Línea de tendencia, gráfico de dispersión M_R vs maicillo

De la regresión lineal se pueden deducir los siguientes parámetros estadísticos,

Tabla 8.24 - Resumen valores estadísticos de regresión Lineal M_R vs maicillo

Estadísticas de la Regresión	
Coefficiente de correlación múltiple r	-0.999
Coefficiente de determinación r^2	0.998
r^2 ajustado	0.997
Error típico	1.596

El análisis de varianza o ANOVA entrega los siguientes resultados,

Tabla 8.25 - Resumen valores del análisis de varianza M_R vs maicillo

Características	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	Test F	Valor crítico de F
Regresión	2.00	2964.88	2964.88	1164.67	0.00086
Residuos	1.00	5.09	2.55		
Total	3.00	2969.98			

Debido a que F calculada es mayor al valor crítico del mismo, se concluye que el modelo si explica el fenómeno en estudio y que los resultados obtenidos no se deben a la casualidad.

Tabla 8.26 - Resumen de valores estadísticos e intervalos finales M_R vs maicillo

Características	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inf. 95%	Sup. 95%
Intercepción	262.405	1.452	180.678	0.000	256.156	268.654
M	-3.682	0.108	-34.127	0.001	-4.146	-3.217

- Modelo Matemático de Regresión Lineal

$$M_R \text{ (MPa)} = -3.682 \cdot M + 262.405$$

Donde,

M_R : Módulo de Resiliencia (MPa)

M: Maicillo (%)

8.4.3 Capacidad de soporte CBR Vs Módulo de Resiliencia Real

En la figura 8.16 se puede observar la tendencia de la curva de las 3 mezclas especificadas anteriormente para la capacidad de soporte CBR vs el Módulo de Resiliencia Real obtenida para cada una.

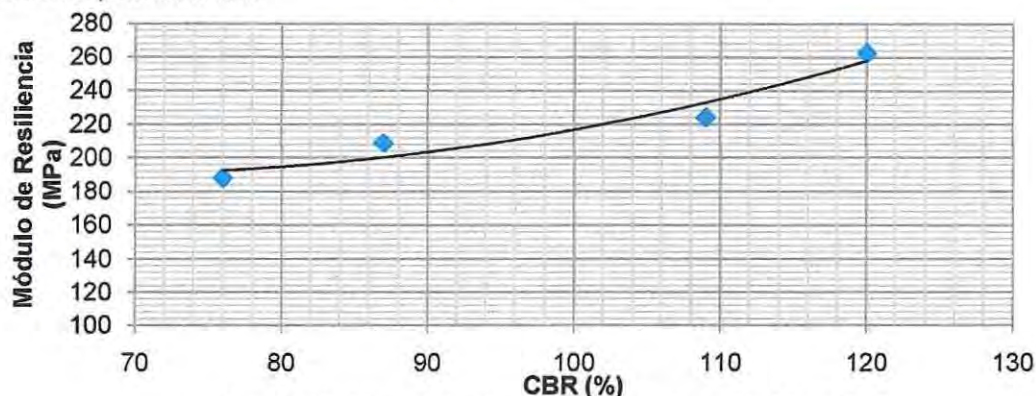


Figura 8.16 - Línea de tendencia, gráfico de dispersión M_R vs CBR

De la regresión cuadrática se pueden deducir los siguientes parámetros estadísticos,

Tabla 8.27 - Resumen valores estadísticos de la regresión cuadrática M_R vs CBR

Estadísticas de la Regresión	
Coefficiente de correlación múltiple r	0.967
Coefficiente de determinación r^2	0.936
r^2 ajustado	0.808
Error típico	13.797

El análisis de varianza o ANOVA entrega los siguientes resultados,

Tabla 8.28 - Resumen valores del análisis de varianza M_R vs CBR

Características	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	Test F	Valor crítico de F
Regresión	1	2779.62	1389.81	7.30	0.25
Residuos	2	190.36	190.36		
Total	3	2969.96			

Debido a que F calculada es mayor al valor crítico del mismo, se concluye que el modelo si explica el fenómeno en estudio y que los resultados obtenidos no se deben a la casualidad.

Tabla 8.29 - Resumen de valores estadísticos e intervalos finales M_R vs CBR

Características	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inf. 95%	Sup. 95%
Intercepción	296.24	355.73	0.83	0.56	-4223.76	4816.24
CBR	-3.178	7.46	-0.43	0.74	-97.97	91.61
CBR^2	0.023	0.04	0.63	0.64	-0.46	0.51

- Modelo Matemático de Regresión Cuadrática

$$M_R \text{ (MPa)} = 0.023 \cdot CBR^2 - 3.178 \cdot CBR + 296.2$$

Donde,

M_R : Módulo de Resiliencia (MPa)
 CBR: Capacidad de Soporte (%)

8.5 Módulo de Resiliencia Teórico Vs Módulo de Resiliencia Real

Se presenta en la tabla 8.30 los valores de CBR, M_R Teórico y M_R Real para cada mezcla realizada. La determinación del Módulo de Resiliencia Teórico se efectuó a través de las ecuaciones 7.6 y 7.7. Se utiliza para efectos comparativos el Módulo de Resiliencia Real Efectivo de cada mezcla.

Tabla 8.30 - M_R teórico y M_R real

Material	CBR (%)	M_R Teórico (MPa)	M_R Real (MPa)
100%	120	227.46	262.57
90% - 10%	109	218.22	224.38
85% - 15%	87	198.96	208.94
80% - 20%	76	188.82	188.06

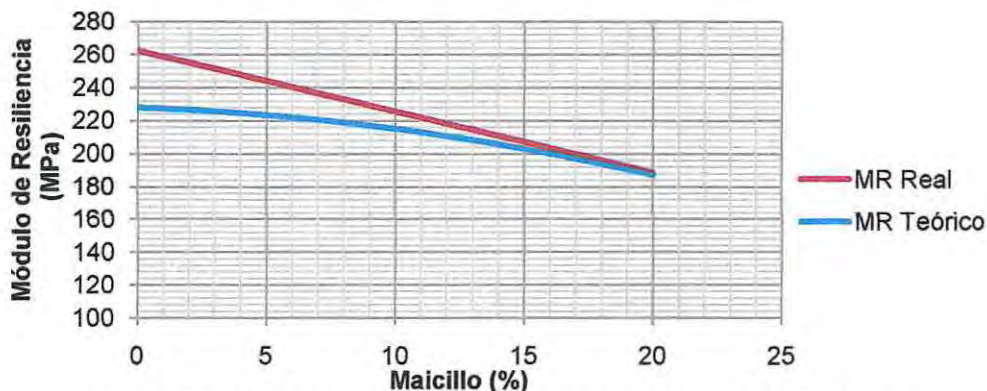


Figura 8.17 - Líneas de tendencia, diferencia entre M_R teórico y M_R real vs maicillo

Como se observa en la figura 8.17 existe diferencia entre el Módulo de Resiliencia Teórico y el Módulo de Resiliencia Real salvo para la mezcla 80% - 20%, aunque es importante destacar que esta mezcla no entra en los parámetros de base granular ya que no cumple con el CBR mínimo de 80%.

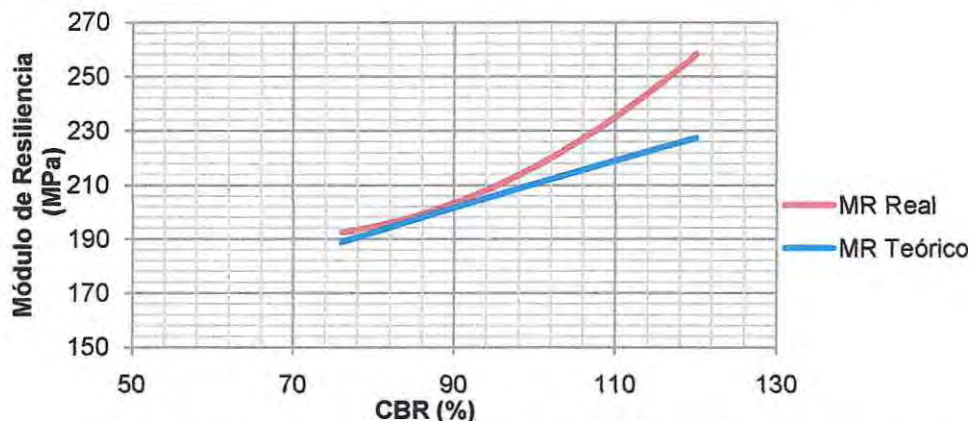


Figura 8.18 - Líneas de tendencia, diferencia entre M_R teórico y M_R real vs CBR

Existe una diferencia relevante entre la teoría y los datos reales tomados en laboratorio (ver figura 8.18), esto implica, que la determinación del Módulo de Resiliencia indirectamente a través de la capacidad de soporte CBR no es representativa.

Tabla 8.31 - a_2 teórico y a_2 real

Material	MR	CBR	a_2 Teórico	a_2 Real
100%	262.57	120	0.148	0.164
90% - 10%	224.38	109	0.144	0.147
85% - 15%	208.94	87	0.134	0.139
80% - 20%	188.06	76	0.128	0.128

El coeficiente estructural también se ve afectado dependiendo del porcentaje de maicillo incorporado a la base granular limpia. Como se observa en la tabla 8.13 al utilizar el Módulo de Resiliencia determinado en laboratorio, el coeficiente estructural de la base granular aumenta, salvo en el caso 80% - 20%, aunque como se analizó anteriormente, esta mezcla no entra en los parámetros de Base Granular ya que no cumple con el CBR mínimo de 80%.

- Nomograma

A modo de ayuda y para entender mejor el comportamiento de las mezclas con distintos porcentajes de maicillo tipo Arena-Limosa incorporados a una base granular limpia de tipo Grava-Chancada, se ha realizado un nomograma con todos los valores obtenidos a través de los ensayos experimentales analizados anteriormente.

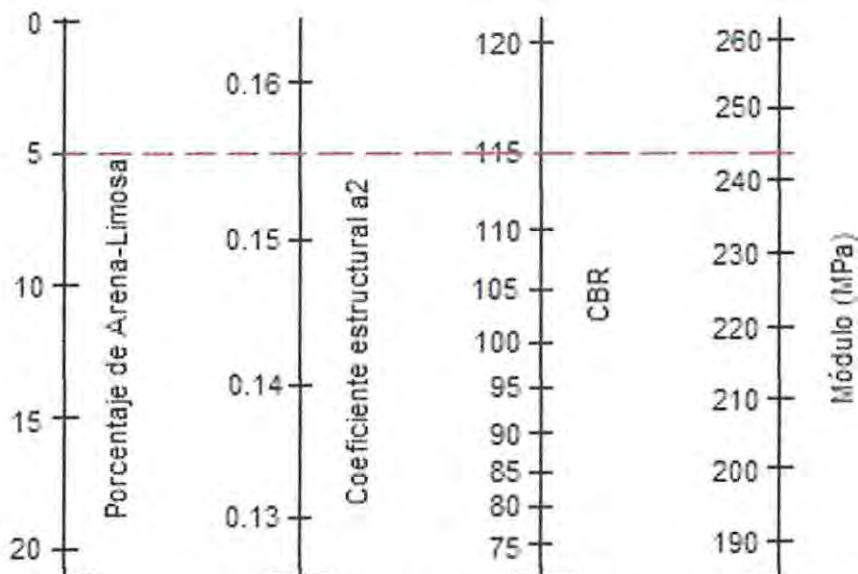


Figura 8.19 - Nomograma para el cálculo de parámetros según porcentajes de maicillo

8.6 Determinación de valor máximo de maicillo a incorporar para la creación de un nuevo tipo de base granular

En base a los resultados expuestos y analizados previamente, considerando que la nueva Base Granular que se pretende establecer a partir de la incorporación de arena-limosa a una base granular de tipo grava-chancada cumpla con todos los parámetros constructivos y de diseño descritos en el Manual de Carreteras volumen 5 y volumen 3 respectivamente, se deduce que el porcentaje máximo de arena-limosa (maicillo sin plasticidad) es de un 15%. A continuación, se presenta un resumen con las características de este material,

Tabla 8.32 - Resumen características base granular 85% - 15%

Características	Valor	Unidad
Chancado Total	72	%
Humedad Optima	6.7	%
DMCS	2,166	kg/m ³
CBR	87	%
Índice de Plasticidad	NP	%
Desgaste L.A	16	%
Dens. Partículas Sólidas	2,779	kg/m ³
Coef de Permeabilidad	21x10 ⁻³	cm/s
Coef. de Drenaje	1.15	-
Módulo de Resiliencia	209	MPa

8.7 Diseño Estructural de pavimento flexible tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay

8.7.1 Generalidades

Para el Diseño Estructural se utiliza un estudio de ingeniería realizado por la consultora INGELOG en el año 2007. Contempla un tramo de mejoramiento en la Ruta F-50, sector Lo Orozco-Quilpué, Región de Valparaíso, específicamente el tramo Ruta 68 - Acceso a Colliguay. Todos los valores excepto los que caracterizan la capa de base granular serán representativos de este estudio (ver Anexo D).



Figura 8.20 - Ubicación geográfica del lugar en estudio

Se presentan a continuación los parámetros obtenidos para el diseño estructural de pavimentos flexibles que afectan en la ecuación general de la metodología AASTHO 93' (ver ec.7.1).

- Tránsitos y Ejes Equivalentes

De acuerdo al estudio de tránsito se tienen los siguientes Ejes Equivalentes acumulados a 10 y 20 años de vida de diseño. En el Diseño Estructural se considera una vida útil de diseño de 20 años.

Tabla 8.33 - Ejes Equivalentes considerados en el diseño estructural

Tramo	Dm.		Longitud (m)	EE 10 Años	EE 20 Años
	DE	A			
Ruta 68 - Acceso a Colliguay	295.73	16,639.33	16,343.60	3,237,194	9,398,123

- Nivel de Confianza y Desviación Estándar

El nivel de confiabilidad se obtiene de la Tabla 7.5 y es función de la sollicitación de tránsito (EE), que experimentará el camino. Se adopta una desviación estándar de 0.45, considerando que el coeficiente de variación es menor a un 15%.

Tabla 8.34 - Confiabilidad y Zr considerados en el diseño estructural

Tramo	Dm.		Confiabilidad	Zr
	DE	A		
Ruta 68 - Acceso a Colliguay	295.73	16,639.33	60%	0.253

- Pérdida de serviciabilidad en la vida de diseño

Para un pavimento de asfalto se considera un nivel de serviciabilidad inicial y final de 4,2 y 2,0 respectivamente, según lo indicado en la Tabla 7.3.

- Módulo Resiliente de la Subrasante

De acuerdo a los antecedentes de mecánica de suelos realizados por la consultora INGELOG en el año 2007, se adopta un Módulo de Resiliencia de 76.8 MPa.

- Módulo Resiliente de la Sub-base Granular

Se considera una capacidad de soporte CBR mínima de 40% compactado al 95% de la Densidad Máxima Compactada Seca y con un 0.2" de Penetración lo que implica un Módulo de Resiliencia de 112 (MPa). El material presenta un Coeficiente de Drenaje de 1.15.

- Coeficientes Estructurales

Se definen los coeficientes estructurales en conformidad con lo recomendado por el Manual de Carreteras Volumen 3,

Tabla 8.35 - Resumen coeficientes estructurales a considerar en el diseño estructural

CAPA	Características	Coefficiente Estructural
C. Asfáltico de Superficie	9.000 N	0.43
C. Asfáltico, Capa Interm.	8.000 N	0.41
Base Asfáltica Grad. Gruesa	6.000 N	0.33
Subbase Granular	CBR = 40%	0.12

- Temperatura Media Anual Ponderada del Aire (TMAPA)

Valor utilizado para el diseño estructural basado en el programa PAVIVAL, se determina a partir de las láminas mostradas en el Anexo F, adoptándose el valor correspondiente a una estación que posea una temperatura similar a la de la zona en estudio. De este modo, se escoge la Estación Valparaíso – Punta Ángeles, la cual posee un TMAPA de 14,3 °C.

Se presenta a continuación 3 casos pertinentes para el análisis,

- Caso N°1, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia Teórico.
- Caso N°2, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia Real.
- Caso N°3, Diseño Estructural con Programa Pavivial.
- Caso N°4, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia de la base granular Limpia

8.7.2 Caso N°1, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia Teórico

Para la nueva base granular se considera una capacidad de soporte CBR compactado al 95% de la Densidad Máxima Compactada Seca y con un 0.2" de Penetración. El material presenta un Coeficiente de Drenaje de 1.15.

Tabla 8.36 - Características base granular con 15% de arena-limosa a través de M_R teórico

Material	CBR (%)	a_2	$\log(M_R)$	M_{RT} (psi)	M_{RT} (MPa)
85% – 15%	87	0.134	4.46	28855	198.96

Tabla 8.37 - Diseño de la estructura de pavimento flexible, caso N°1 a través de AASTHO 93'

Capas Asfálticas	Coef. Estructural	Espesor (cm)	Número Estructural Parcial (cm)
C. Asfáltico de Superficie	0.430	5	21.50
C. Asfáltico, Capa Interm.	0.410	5.5	22.55
Base Asfáltica Grad. Gruesa	0.330	6	19.80
Base Granular	0.134	15	23.12
Sub-base Granular	0.120	15	20.70
Total		46.5	107.67

Esta solución implica un número estructural sobre la base granular de 63.85 mm determinado mediante la iteración de la ecuación general de la metodología AASTHO 93' (ec. 7.1) obteniendo la igualdad de ésta, y un número estructural total de 107.67 mm (ver figura 8.21).

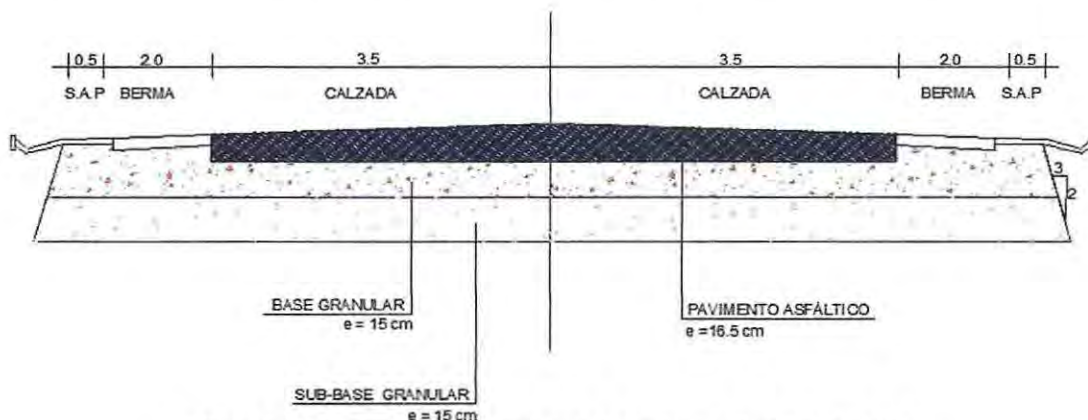


Figura 8.21 - Esquema de la estructura de pavimento flexible, caso N°1

8.7.3 Caso N°2, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia Real

Para la nueva base granular se considera un Módulo de Resiliencia de **208.94 (MPa)** el cual a través de la ecuación 7.7 presenta un coeficiente estructural de 0.139. El material presenta un Coeficiente de Drenaje de 1.15.

Tabla 8.38 - Diseño de la estructura de pavimento flexible, caso N°2 a través de AASTHO 93'

Capas Asfálticas	Coef. Estructural	Espesor (cm)	Número Estructural Parcial (cm)
C. Asfáltico de Superficie	0.430	5	21.50
C. Asfáltico, Capa Interm.	0.410	5.5	22.55
Base Asfáltica Grad. Gruesa	0.330	5.5	18.15
Base Granular	0.139	15	23.98
Sub-base Granular	0.120	15	20.70
Total		46.5	106.88

Esta solución implica un número estructural sobre la base granular de 62.20 mm determinado mediante la iteración de la ecuación general de la metodología AASTHO 93' (ec. 7.1) obteniendo la igualdad de ésta, y un número estructural total de 106.88 mm (ver figura 8.22).

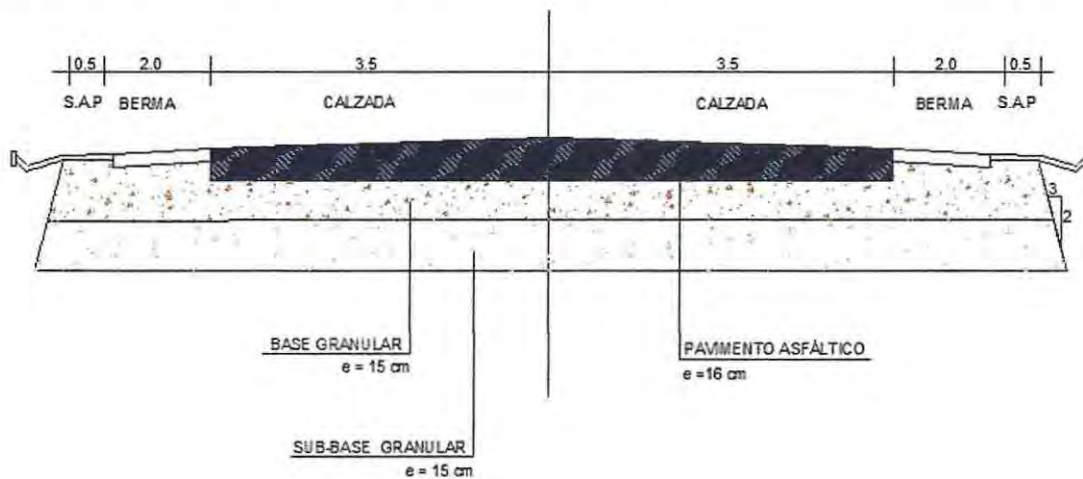


Figura 8.22 - Esquema de la estructura de pavimento flexible, caso N°2

8.7.4 Caso N°3, Diseño Estructural con Programa PAVIVAL

TEMP MEDIA ANUAL PONDERADA DEL AIRE [°C]				14.3	[TMAPA]
(En la zona de proyecto)					
NUMERO ESTRUCTURAL:					
SOBRE LA BASE (mm) :		54	CALCULAR N E BASE		
TOTAL (mm) :		82	CALCULAR N E TOTAL		
ESPEORES DE LAS CAPAS					
	ESPEOR (mm)	COEFICIENTE ESTRUCT	DRENAJE	N. ESTRUCTURAL PARCIAL [mm]	
CAPAS LIGADAS					
CARPETA ASFALTICA	50	0.43		=	21.5
CAPA INTERMEDIA	50	0.41		=	20.5
BASE ASFALTICA	50	0.33		=	16.5
				=	
				=	
CAPAS NO LIGADAS				A NIVEL DE BASE [mm] : 59	
BASE GRANULAR	150	0.13	1.15	=	22.4
SUBBASE GRANULAR	150	0.12	1.15	=	20.7
				TOTAL [mm] : 102	
VERIFICACIÓN DE NUMERO ESTRUCTURAL					
A NIVEL DE BASE: >= QUE LO REQUERIDO					
TOTAL: >= QUE LO REQUERIDO					

Figura 8.23 - Diseño de la estructura de pavimento flexible, caso N°4 a través de PAVIVAL

Esta solución implica un número estructural sobre la base granular de 59 mm determinado mediante la iteración de la ecuación 7.22 obteniendo la igualdad de ésta, y un número estructural total de 102 mm (ver figura 8.24).

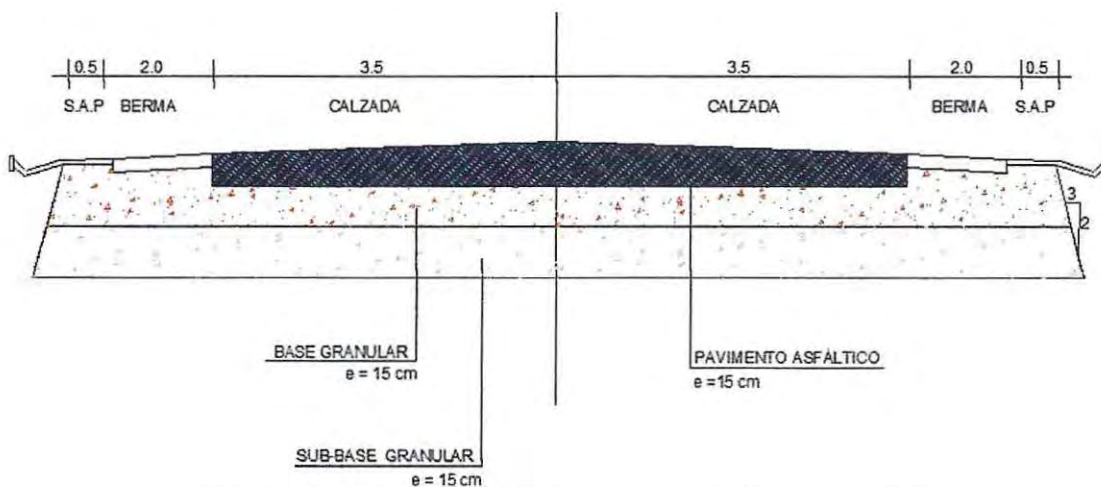


Figura 8.24 - Esquema de la estructura de pavimento flexible, caso N°4

8.7.5 Caso N°4, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia de la base granular Limpia

Para la base granular limpia se considera un Módulo de Resiliencia de **262.57** (MPa) el cual a través de la ecuación 7.7 presenta un coeficiente estructural de 0.164. El material presenta un Coeficiente de Drenaje de 1.15.

Tabla 8.39 - Diseño de la estructura de pavimento flexible, caso N°3 a través de AASTHO 93'

Capas Asfálticas	Coef. Estructural	Espesor (cm)	Número Estructural Parcial (cm)
C. Asfáltico de Superficie	0.430	5	21.50
C. Asfáltico, Capa Interm.	0.410	5	20.50
Base Asfáltica Grad. Gruesa	0.330	5	16.50
Base Granular	0.164	15	28.29
Sub-base Granular	0.120	15	20.70
Total		45	107.49

Esta solución implica un número estructural sobre la base granular de 58.50 mm determinado mediante la iteración de la ecuación general de la metodología AASTHO 93' (ec. 7.1) obteniendo la igualdad de ésta, y un número estructural total de 107.49 mm (ver figura 8.25).

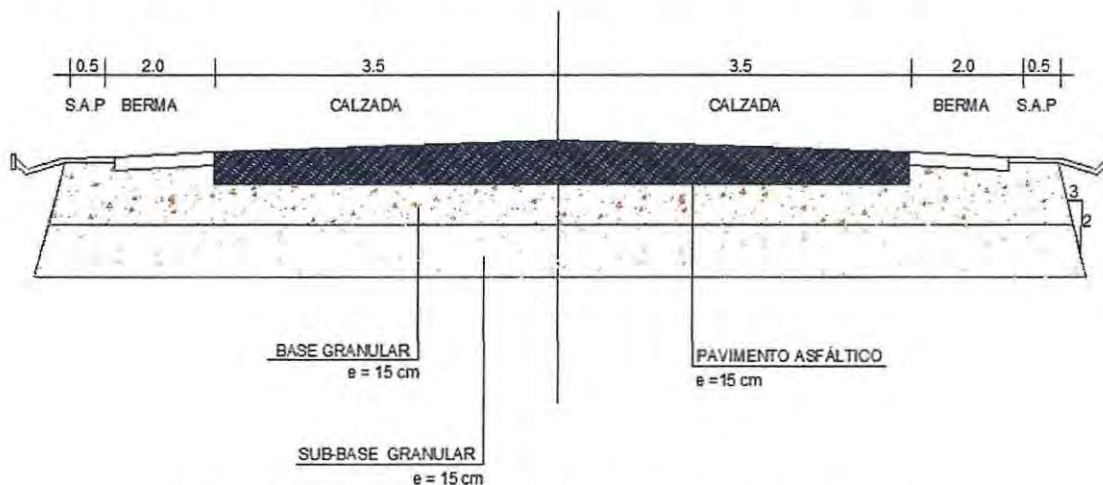


Figura 8.25 - Esquema de la estructura de pavimento flexible, caso N°3

CAPÍTULO 9

Análisis de Costos

Se presenta a continuación un análisis de costos asociados a la producción de maicillo incorporado a bases granulares limpias, considerando la extracción de este material en su estado natural. Todos los cálculos realizados en este capítulo se encuentran en el Anexo E.

- Comparación entre un 5% y un 10% de maicillo incorporado a bases granulares limpias
- Ahorro asociado a tramo Ruta 68 – acceso a Colliguay

Por otro lado, se analizan los costos asociados al diseño estructural de pavimentos flexibles, comparando la utilización de la metodología AASTHO 93 con programa computacional Pavivial, los 3 casos utilizados en el diseño estructural del capítulo 8.

- Caso N°1, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia Teórico
- Caso N°2, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia Real
- Caso N°3, Diseño Estructural con Programa Pavivial
- Caso N°4, Diseño Estructural a través del Módulo de Resiliencia de la base granular Limpia

9.1 Costo Producción base granular con maicillo

Considerando los siguientes parámetros,

- Largo de camino = 1,000 metros
- Espesor mínimo Capa Base Granular = 0.15 metros
- Ancho de Calzada = 3.5 metros por lado
- Ancho de Berma = 2.0 metros por lado
- S.A.P = 0.5 metro por lado

Se obtienen los costos Asociados a 100%, 95% y 90% de base granular.

Tabla 9.1 - Resumen de costos asociados a base granular para 1,000 (m) de largo

Características	Unidad	Largo de camino: 1,000 (m)		
		100%	95%	90%
Porcentaje Base Granular	%	100%	95%	90%
Volumen Suelto con humedad natural	m ³	2,213	2,102	1,991
Costo Base Granular	\$	12,833,418	12,191,747	11,550,076

- **Ahorro utilización Base Granular 95% = \$641,671**
- **Ahorro utilización Base Granular 90% = \$1,283,342**

Para la utilización de maicillo, teniendo en cuenta una jornada laboral de 8 horas y realizando la excavación de maicillo en ese periodo de tiempo para los dos casos, se consideran los siguientes costos,

Tabla 9.2 - Resumen de costos asociados a maicillo para 1,000 (m) de largo

Características	Unidad	Largo de camino: 1,000 (m)	
		5%	10%
Porcentaje maicillo	%	5%	10%
Arriendo retroexcavadora con operador incluido	\$	128,000	128,000
Excavación de corte en terreno	\$	279,826	559,653
Arriendo camión para transporte de material	\$	50,000	50,000
Mano de Obra (3)	\$	60,000	60,000
Costo Total	\$	517,826	797,653

- **Ahorro Final 95% Base Granular con 5%Maicillo = \$123,844**
- **Ahorro Final 90% Base Granular con 10%Maicillo = \$485,689**

El ahorro asociado a un 5% de maicillo es muy bajo y es casi 3 veces menor al asociado a un 10% de maicillo, esta tendencia se mantiene al aumentar el largo del camino tal y como se muestra en la figura 9.1. Es importante tener en consideración el tiempo que demora la utilización de este material en obra, ya que aumentará la fecha límite de entrega, por lo cual vienen asociados gastos extras. En base a los dos criterios planteados anteriormente y para la finalidad de este estudio, no se considera la utilización de un 5% de maicillo.

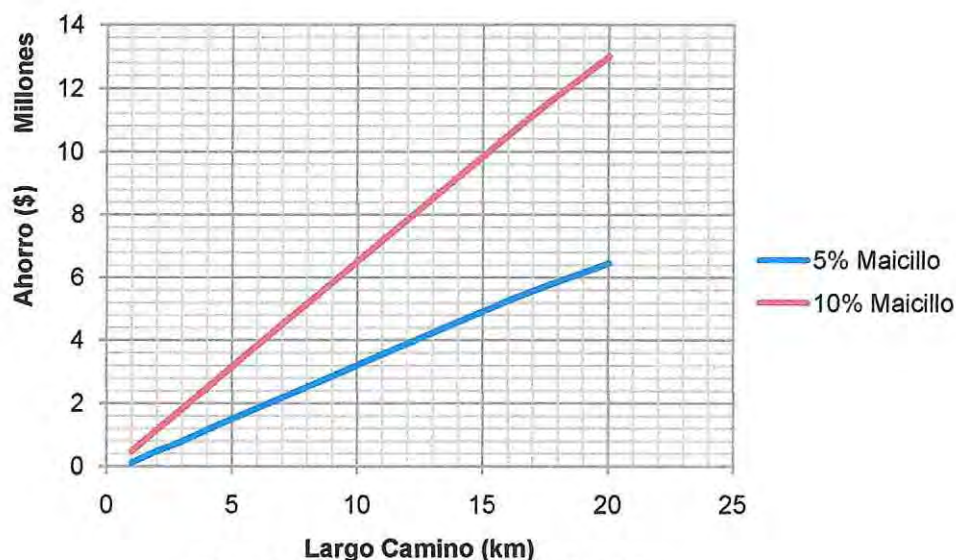


Figura 9.1 - Gráfico ahorro vs largo de camino

9.2 Costo Producción de Nueva Base Granular en Tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay

Considerando los siguientes parámetros,

- Largo de camino = 16,343.6 metros
- Espesor Capa Base Granular = 0.15 metros
- Ancho de Calzada = 3.5 metros por lado
- Ancho de Berma = 2.0 metros por lado
- S.A.P = 0.5 metro por lado

Se obtienen los costos Asociados a 100% y 85% de base granular.

Tabla 9.3 - Resumen de costos asociados a base granular para 16,343.6 (m) de largo

Características	Unidad	Largo de camino: 16,343.6 (m)	
		100%	85%
Porcentaje Base Granular	%	100%	85%
Volumen Suelto con humedad natural	m ³	36,162	30,216
Costo Base Granular	\$	209,744,251	175,255,658

- **Ahorro utilización Base Granular 85% = \$34,488,594**

Para la utilización de maicillo, teniendo en cuenta una jornada laboral de 8 horas y realizando la excavación de maicillo en un periodo de tiempo de 4 jornadas laborales y utilizando 5 camiones transportadores de material, se consideran los siguientes costos,

Tabla 9.4 - Resumen de costos asociados a maicillo para 16,343.6 (m) de largo

Características	Unidad	Largo de camino:
		16,343.6 (m)
Porcentaje maicillo	%	15%
Arriendo retroexcavadora con operador incluido	\$	512,000
Excavación de corte en terreno	\$	13,343,685
Arriendo camión para transporte de material	\$	1,400,000
Mano de Obra (3)	\$	240,000
Costo Total	\$	15,495,685

- **Ahorro Final 85% Base Granular con 15%Maicillo = \$18,992,909**

Cabe destacar que si un proyecto de caminos nuevos donde necesariamente se deben realizar cortes en el terreno, el maicillo se obtendría gratis y los ítem de producción y utilización de maicillo no se considerarían por lo cual el ahorro sería mucho mayor llegando a los **\$34,488,594**.

9.3 Costo Diseño Espesores

Considerando los siguientes parámetros,

- Largo de camino = 16,343.6 metros
- Espesor Capa Base Granular = 0.15 metros
- Ancho de Calzada = 3.5 metros por lado
- Ancho de Berma = 2.0 metros por lado
- S.A.P = 0.5 metro por lado

Tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay

Tabla 9.5 - Costos asociados al diseño estructural, casos N°1, N°2, N°3 y N°4

Capas	P. Unitario (\$)	Costo por capa (\$)		
		Caso 1	Caso 2	Caso 3 y 4
C.A. de Rodadura	117,376	671,421,238	671,421,238	671,421,238
C.A. Capa Intermedia	105,476	663,685,158	663,685,158	603,350,144
B.A en Cal de Grad. Gruesa	99,526	683,177,516	626,246,056	569,314,597
Base Granular	11,488	344,296,239	344,296,239	344,296,239
Sub-base Granular	6,658	206,885,828	206,885,828	206,885,828
Riego de Liga	280	96,100,368	96,100,368	96,100,368
Total	340,804	2,665,566,347	2,608,634,887	2,491,368,413

El caso 3 y 4 correspondientes al Diseño Estructural del programa PAVIVAL y de la base granular limpia a través de AASTHO 93' presentan espesores iguales por ende los costos asociados al Diseño son idénticos.

Existe una diferencia de \$56,931,460 entre el Diseño Estructural con el Módulo de Resiliencia Teórico y el Diseño Estructural con el Módulo de Resiliencia Real.

Existe una diferencia de \$117,266,474 entre el Diseño Estructural con el Módulo de Resiliencia Real y el Diseño Estructural con el Módulo de Resiliencia de la base granular limpia.

CAPÍTULO 10

Recomendaciones

El uso de las correlaciones entregadas en este estudio debe ser únicamente para materiales con condiciones similares a los utilizados y son admisibles sólo en etapas de anteproyecto y nunca para el diseño final.

Si se desea ocupar este material en otras regiones del país es de vital importancia poder determinar el coeficiente de drenaje que presenta el material, ya que en regiones más lluviosas podría presentar graves problemas estructurales.

Sería de gran ayuda incorporar los ensayos de Permeabilidad y Triaxial Cíclico Dinámico en el Manual de Carreteras para lograr establecer un diseño estructural responsable y de calidad.

Es importante dotar a Chile de las nuevas tendencias en el Diseño Estructural a nivel mundial ya que explican de mejor manera el comportamiento general de los pavimentos flexibles. Cuando la tecnología avance y la caracterización de los materiales sea en el rango no lineal sería interesante analizar la influencia que tendría este tipo de mezclas para poder comprender y entender de mejor manera su comportamiento.

Como el maicillo es un material degradable podría suceder que los valores obtenidos en este estudio no sean los mismos después de un periodo de tiempo puesto en servicio, por lo cual sería importante analizar la influencia del maicillo a través del tiempo a nivel estructural.

CAPÍTULO 11

Conclusiones

En este trabajo se han presentado aspectos geotécnicos relacionados con el diseño estructural de pavimentos flexibles en carreteras. Se ha realizado un estudio experimental sobre el comportamiento mecánico de mezclas con un suelo característico de la Región de Valparaíso denominado maicillo correspondiente a una arena-arcillosa y/o arena-limosa y base granular de tipo grava-chancada. En base a los resultados experimentales y revisión bibliográfica realizada en este estudio, se puede concluir lo siguiente:

Se descarta por completo la utilización de material fino con plasticidad (arena-arcillosa) en la realización de un nuevo tipo de bases granulares ya que no cumple con el Índice de Plasticidad requerido para bases granulares.

La incorporación de maicillo a la base granular afecta en mayor medida entre la abertura de 10 mm hasta 0.1 mm de la granulometría, aportando a la mezcla material de tipo arena fina, siendo esta característica importante en la influencia que tiene sobre la pérdida de capacidad de soporte CBR a medida que aumenta el porcentaje de maicillo tipo arena-limosa.

Se establece una restricción de porcentaje de maicillo tipo arena-limosa a incorporar a la base granular de 15%, valores mayores no son aceptados ya que no cumplen con las condiciones aceptables para bases granulares. Es importante destacar que a partir de 20% de arena-limosa incorporada a la base granular limpia, la clasificación del material cambia con respecto a los porcentajes menores.

Otro criterio importante a tener en cuenta en el Diseño Estructural de pavimentos flexibles es la permeabilidad de las capas que componen el paquete estructural, ya que esta propiedad juega un papel importante en la estabilidad de cada una. Al introducir material fino a una base granular, se está creando una nueva base más impermeable, lo que podría generar fallas en la estructura. La incorporación de maicillo tipo arena-limosa influye de forma considerable en la permeabilidad del material aún cuando el porcentaje de finos que pasa por la malla N°200 es siempre de un 5%. La figura que entrega el manual de carreteras volumen 3 para obtener el coeficiente de permeabilidad basándose en el material que pasa por la malla N°200 no es representativa para este tipo de mezclas, ya que la mayor influencia en la granulometría es entre la abertura de 10 mm hasta 0.1 mm.

A pesar de lo anterior, el coeficiente de drenaje de las mezclas realizadas no varía aunque se vea afectada la permeabilidad de éstas, ya que el rango entregado por AASTHO 93' es muy amplio, por lo que la capacidad drenante de este tipo de mezclas no influye en el Diseño Estructural pero podría provocar fallas al buen funcionamiento de la estructura.

Con respecto al Módulo de Resiliencia, este tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de maicillo. Se concluye que entre mayor es la presencia de material que pasan por la malla N°4 y N°10 la rigidez del material disminuye, asemejándose al comportamiento de los materiales estudiados por Hicks en el año 1973, Hicks et al en 1988 y Tutumluer et al en 2003.

La incorporación de maicillo hasta un 15% a la base granular clasifica al material como grava-arenosa, alcanzando Módulos muchos más bajos que el planteado por C.S Corro en 1985, los cuales alcanzaban valores de 650 MPa, aunque según Brown en su investigación de 1994 estima que módulos de resiliencia de 100 MPa representan una base de buena calidad, por lo cual las mezclas realizadas que cumplen como base granular entran en este rango.

Tras analizar el Módulo de Resiliencia Teórico con el Módulo de Resiliencia Real se observan diferencias notorias, siendo los valores reales mayores a los teóricos, lo que implica una caracterización imprecisa de la propiedad fundamental para el diseño estructural de este tipo de bases granulares, por lo que la ecuación entregada por el Manual de Carreteras Volumen 3 resulta ser conservadora en la estimación de este parámetro, afectando también en el coeficiente estructural de las mismas.

Por otro lado, el Diseño Estructural realizado por el programa computacional PAVIVIAL para el tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay, no se ve afectado con respecto a la utilización de la nueva base granular, ya que este tipo de diseño no considera el Módulo de Resiliencia de las capas granulares en forma directa, considerando sólo los CBR establecidos de estas capas, bajo estas condiciones, el único valor que marca la diferencia es el Módulo de Resiliencia de la subrasante.

Al Diseñar según la metodología AASTHO 93' el tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay, tomando en cuenta los Módulos de Resiliencia de todas las capas granulares que componen el paquete estructural de un pavimento flexible, la utilización de maicillo incorporado a una base granular afecta netamente en los espesores finales de las capas asfálticas, ya que estas dependen del Número Estructural calculado a partir de las características de la base granular.

Al Diseñar la estructura de pavimento flexible con el Módulo de Resiliencia Real de la mezcla 85% - 15% la carpeta asfáltica disminuye en **0.5 cm** con respecto al diseño estructural realizado con el Módulo de Resiliencia Teórico. Sin embargo, a través del programa PAVIVIAL esta diferencia se hace aún más notoria disminuyendo en **1 cm** la carpeta asfáltica con respecto al diseño realizado con el Módulo de Resiliencia Real de la mezcla 85% - 15%. Esta disminución es importante más allá del valor económico que implica, ya que la caracterización de la rigidez no es la correcta, lo cual podría originar problemas estructurales tales como agrietamientos tempranos en la superficie o simplemente no dure la vida útil para el cual fue diseñado. Es por esto, que es indispensable realizar un análisis de Esfuerzo – Deformación a todo el paquete estructural, lo cual son las tendencias actuales a nivel mundial para poder entender de mejor manera el comportamiento general de un pavimento flexible.

El ahorro relacionado a la producción de la nueva base granular depende netamente de la longitud a construir ya que aumenta a medida que aumenta el kilometraje. Considerando lo anterior y utilizando en el análisis tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay que tiene alrededor de 16.3 kilómetros de largo, el ahorro equivale a un **16%** si no existen gastos asociados a la producción de Arena-Limosa y a un **6%** si se consideran los gastos asociados.

Como en el Diseño Estructural propuesto por la Dirección de Vialidad no afecta directamente el Módulo de Resiliencia de las capas granulares existe sólo un Diseño Estructural representativo del tramo Ruta 68 – Acceso A Colliguay, siendo este diseño el más económico de todos.

El Diseño Estructural del tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay realizado con la mezcla 85% - 15% basado en la metodología AASTHO 93', el cual involucra el valor del Módulo de Resiliencia de los materiales, se ve afectado en gran medida en la utilización de éste obtenido de manera teórica como de manera experimental. Los costos involucrados varían netamente en las capas asfálticas del paquete estructural siendo estas las más costosas. Existe una diferencia de **8,3%** de ahorro utilizando el valor real, lo que significa **\$56,931,460**.

Sin embargo, la mejor solución desde el punto de vista económico para satisfacer los requerimientos estructurales analizados mediante AASTHO 93' resulta ser la utilización de una base granular sin incorporación de Arena-Limosa el cual presenta un Módulo de Resiliencia de 262.57 MPa, que permite ahorrar hasta **\$117,226,474** en las capas asfálticas en comparación con la mezcla 85% - 15%.

Las carreteras tienen una gran importancia estratégica e impacto económico en el país, pero a su vez, se le asocian altos costos involucrados en su construcción, es por esto, que es indispensable lograr dotar al camino de un buen diseño estructural. La evolución de los métodos de diseño se hace patente a nivel internacional y el parámetro del Módulo de Resiliencia es el que rige en la actualidad ya que es la propiedad básica de los materiales, consolidándose como la medida de las propiedades elásticas pero también reconociendo la existencia de características no lineales en su comportamiento. No basta sólo con la determinación del parámetro CBR para la caracterización de los materiales granulares no tratados, ya que los ensayos deben considerar lo más real posible el comportamiento que pueden experimentar estos materiales bajo cargas cíclicas y distintas condiciones ambientales. Sin embargo, el Diseño Estructural propuesto por la Dirección de Vialidad considera solamente la caracterización real de deformación de la subrasante asumiendo el desempeño de las capas granulares como un valor fijo, lo que implica que lo diseñado no será lo puesto en servicio y podrían existir fallas importantes, por lo que se debe comenzar a considerar que la acumulación de la deformación resiliente y permanente es la suma de las deformaciones que se generan en cada una de las capas de la estructura y no solamente en la subrasante, ya que la deformación real se produce en todo el paquete estructural.

En base a lo anterior, se deben establecer los verdaderos valores asociados a cada diseño estructural. La utilización de nuevos materiales no se debe basar solamente en la caracterización de las especificaciones técnicas basadas en su resistencia (Manual de Carreteras Vol.5) si no, incorporar los ensayos de permeabilidad y Triaxial cíclico dinámico para lograr establecer un diseño estructural responsable y de calidad.

Referencias Bibliográficas

- [1] Yoder, E. J. y Witzack, M.W. (1990). Principles of Pavement Design. John Wiley and Sons.
- [2] Garnica, P.A. et ál (2004). Módulo de Resiliencia de Agregados Provenientes de Rocas Altamente Intemperizadas. Publicación Técnica N° 256. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCl) , Instituto Mexicano de Transporte (IMT). Sanfandila, México.
- [3] Lister, N. W. (1972). The Transient and Long Term Performance of Pavements in Relation to Temperature.' Proc. 3rd. Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor.
- [4] Bonaquist, R. (1992). Summary of Pavement Performance Test Using the Accelerated Loading Facility, 1986 – 1990. Transportation Research Record, 1354, Transportation Research Board, Washington, D. C.
- [5] Little, P. H. (1993). The Design of Unsurfaced Roads Using Geosynthetics. Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham.
- [6] Collop, A. C., Cebon, D. y Hardy (1995). M. S. A. Viscoelastic Approach to Rutting in Flexible Pavements. Journal of Transportation Engineering.
- [7] Brown, S.F. (1996). Soil Mechanics in Pavement Engineering. The 36th Rankine Lecture of the British Geotechnical Society, Geotechnique 46, n° 3, 383-426.
- [8] Pidwerbesky, B. D. (1996). Fundamental Behaviour of Unbound Granular Pavements Subjected to Various Loading Conditions and Accelerated Trafficking. Ph D Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [9] Archilla, A.R. y Madanat, S. (2002). Estimation of Rutting Models by Combining Data from Different Sources. Journal Transportation Engineering, 127 (5), p. 379-389.
- [10] Ingason, T., Wiman, L. G. y Haraldsson, H. (2002). HVS – Testing of Iceland Low Volume Road Structures. ISAP – 9th International Conference on Design of Asphalt Pavements.
- [11] Erlingsson, S. (2004). Mechanistic Pavement Design Methods – A Road to Better Understanding of Pavement Performance. Via Nordica 2004 – NRA's 19th Road Congress, C8: Berekräftige vegkonstruksjonar.
- [12] Erlingsson, S. e Ingason, T. (2004). Performance of Two Thin Pavement Structures During Accelerated Pavement Testing Using a Heavy Vehicle Simulator. 2nd International Conferences on Accelerated Pavement Testing, University of Minnesota.
- [13] Rada, C. y Witczak, W.M. (1981). Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Module Results for granular Materials. Transportation Research Record, 810, Transportation Research Board Washington D.C.
- [14] Sweere, G.T. (1990). Unbound granular bases for Roads. Ph. D. Thesis, University of Delft. Netherlands.
- [15] Zaman, M., Chen, D. y Laguros, J. (1994). Resilient Moduli of Granular Materials. Journal of Transportation Engineering, Vol. 120, No. 6, 967-988.

- [16] McDowell, G. R. & Hau, K. W. (2004). The Use of a Kinematic Hardening Model for Estimating Subgrade Stiffness in Layered-elastic Analyses. En: International Journal of Pavement Engineering, Vol. 5.
- [17] Rondón, H. Q. y Reyes, F.L (2007). Comportamiento Resiliente de Materiales Granulares en Pavimentos Flexibles: Estado del Conocimiento. Vol. 6 N° 077, Universidad de Medellín, Colombia.
- [18] Thompson, M.R. y Smith, K.L. (1990). Repeated Triaxial Characterization of Granular Bases". Transportation Research record, 1278, Transportation Research Board, Washington D.C.,7-17.
- [19] Hicks, R.G y Monismith, C.L. (1971). Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials.
- [20] Barksdale, R.D. e Itani, S.Y. (1989), Influence of Aggregate Shape on Base Courses. 3rd Interamerican Conference on Materials – Technology, Brazil.
- [21] Tutumluer, E., Little, D.N. y Kim,S.H. (2003). Validated model for Predicting Field Performance of Aggregate Base Courses. Transportation Research Record, 1837, Transportation Research Board, Washington D.C.
- [22] Tomala, M. J., Laica, P. J. y Santos, B. E (2007). Mantenimiento de la Capa de Rodadura de Concreto asfáltico en un Pavimento Flexible. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil-Ecuador.
- [23] Soto, J. E. (2000). Utilización del maicillo en la confección de terraplenes de gran altura. Memoria de Titulo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- [24] Toro K. A. (2007). Influencia de las características Geológicas en las Propiedades Geotécnicas de granitoides jurasicos y Suelos Asociados en la Ruta 68. Memoria de Titulo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- [25] Crespo, V. C. (2004). Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Quinta Edición, Limusa, México.
- [26] Nch 1852 (1981). Mecánica de Suelos. Determinación de la Razón de Soporte de Suelos Compactados en Laboratorio.
- [27] AASTHO, (1993). American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for Design of Pavements Structures. Washington, D.C.
- [28] Angelone, S. y Martínez, F. (1988). Módulo Resiliente de Suelos y Materiales Granulares No Tratados. Aplicación al Diseño Estructural de Pavimentos en la Argentina. Segunda Parte- Universidad nacional de Rosario, Argentina.
- [29] Barksdale, R. D. y Hicks, R. G. (1973). Evaluation of Materials for Granular Base Courses. 3rd Interamerican Conference on Materials – Technology, Brazil.
- [30] Allen, J. J. y Thompson, M. R. (1974). Resilient Response of Granular Materials Subjected to Time-Dependent Lateral Stresses. Transportation Research Record, 510, Transportation Research Board, Washington, D. C.

- [31] Dawson, A. R., Mundy, M. J. & Huhtala, M. (2000). European Research into Granular Material for Pavement Bases and Subbases. Transportation Research Record, 1721, Transportation Research Board, Washington, D. C.
- [32] Coronado, O., Fleureau, J.-M., Gomes Correia, A. y Caicedo, B. (2000). Influence of Suction on the Properties of two Granular Road Materials. 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Norway, 2005. COST 337 - Unbound Granular Materials for Road Pavements, Final Report of the Action. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- [33] Rondón, H. Q. et ál. (2008). Comportamiento de un Material Granular No tratado en Ensayos Triaxiales Cíclicos con Presión de Confinamiento Constante y Variable. Revista chilena de ingeniería, Vol. 16, Núm. 3, diciembre, 2008. Universidad de Tarapacá, Chile.
- [34] Manual de Carretera, Vol. N° 8. (2012). Especificaciones y métodos de Muestreo, Ensaye y Control.
- [35] Manual de carreteras, Vol. 3. (2002). Instrucciones y Criterios de Diseño.
- [36] Montejo, A. F. (2002). Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, Segunda Edición, Universidad católica de Colombia.
- [37] Braja M. D. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, California State Univeristy, Sacramento.
- [38] Garnica P.A, Pérez, N.G. y Gómez, A. L. (2001). Módulos de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares. Publicación Técnica N° 142. Instituto Mexicano del Transporte.
- [39] Corro C. S. (1985). "Comportamiento de bases granulares para carretera". Publicación del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- [40] Brown, S.F. (1994). "Behaviour of Layered Systems Under Repetitive Loading". XIII ICSMFE. New Delhi, India.
- [41] Rondón, H. Q. et ál. (2007). Metodología de Diseño de Pavimentos Flexibles: Tendencias, Alcances y Limitaciones. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, pp. 41-65. Diciembre 2007. Bogotá
- [42] Vidal, J. y Osorio, R. (2002). Módulo de Resiliencia de Suelos Finogranulares. Revista universidad EAFIT N° 125, Colombia.

ANEXOS

ANEXO A: Ensayos realizados para caracterizar las Bases Granulares

Arena arcillosa (maicillo con plasticidad)

Granulometría

Peso seco inicial pasa 5 mm: 563 (gr)

Peso seco cuarteo lavado 5 mm: 385 (gr)

Tabla A.1 - Cálculo granulometría, arena-arcillosa

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
20	3/4"			
10	3/8"			
5	N°4	0	0	100
2	N°10	36	6	94
0.5	N°40	203	37	57
0.08	N°200	136	24	33
Residuo		10		

Límites de Atterberg

Tabla A.2 - Cálculo límites de Atterberg, arena-arcillosa

Ensayo	Límite Plástico			Límite Líquido				
	1	2	3	1	2	3	4	5
Cápsula	33	17	C	5	E	11	B	51
N° de Golpes	-	-	-	13	18	23	28	33
Cáp.+Suelo Húmedo	14.30	15.13	15.54	24	24.66	23.27	22.49	23.63
Cáp.+Suelo Seco	13.67	14.51	14.82	20.48	21.31	20.25	19.37	20.35
Peso Cáp.	10.02	11.04	10.71	9.8	10.99	10.95	9.66	9.84
Peso Agua	0.63	0.62	0.72	3.52	3.35	3.02	3.12	3.28
Peso Suelo Seco	3.65	3.47	4.11	10.68	10.32	9.3	9.71	10.51
Humedad Real	17.3	17.9	17.5	33.0	32.5	32.5	32.1	31.2
Promedio Límite Plástico	17.6							

Curva de Fluidez

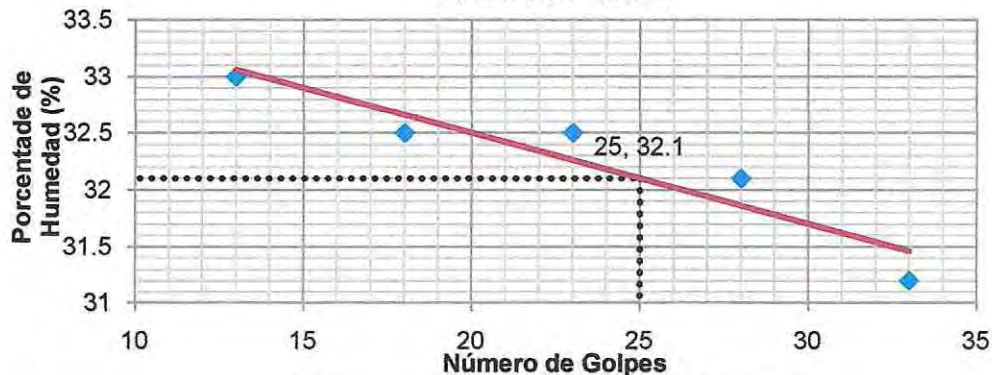


Figura A.1 - Gráfico curva de fluidez, arena-arcillosa

IP=32.1-17.6

IP=14.5 = 15%

Proctor Modificado

Tabla A.3 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, arena-arcillosa

Datos de Compactación											
Determinación	1		2		3		4		5		
Molde	z1		z1		z1		z1		z1		N°
Humedad Agregada	8		10		12		14		16		(%)
Agua Agregada	520		652		780		910		1040		(cm ³)
Humedad Real	8.6		10.5		12.5		14.3		16.4		(%)
Peso Molde + Material	6835		7258		7372		7287		7142		(gr)
Peso Molde Solo	2768		2768		2768		2768		2768		(gr)
Peso Material Solo	4067		4490		4604		4519		4374		(gr)
Volumen del Molde	2126		2126		2126		2126		2126		(cm ³)
Densidad Comp. Húmeda	1913		2112		2166		2126		2057		(kg/m ³)
Densidad Comp. Seca	1760		1910		1930		1860		1770		(kg/m ³)
Determinación de la Humedad											
Hum. Aparente	8		10		12		14		16		
Cápsula	F	G	O	W	Q	A	W	O	A	G	
Peso Cáp.	90.7	91.7	95.7	92.0	78.3	78.2	92.0	95.7	78.2	91.7	
Cáp+Suelo Húm.	797.6	991.5	939.9	842.0	939.7	793.1	892.1	986.2	760.9	666.2	
Cáp+Suelo Seco	742.1	919.0	860.4	770.4	844.1	713.7	793.5	873.2	664.2	585.7	
Agua	55.5	72.5	79.5	71.6	95.6	79.4	98.6	113.0	96.7	80.5	
Peso Suelo Seco	651.4	827.3	764.7	678.4	765.8	635.5	701.5	777.5	586.0	494.0	
Humedad Real	8.5	8.8	10.4	10.6	12.5	12.5	14.1	14.5	16.5	16.3	
Promedio	8.6		10.5		12.5		14.5		16.4		
Densidad de Partículas Sólidas											
Peso matraz+agua	657.1									(gr)	
Peso Seco	74.3									(gr)	
Peso Total Matraz	702.77									(gr)	
Densidad Gsf	2595									(kg/m ³)	
Índice de huecos	0.3		0.3		0.3		0.3		0.3		(%)
Porosidad	0.2		0.2		0.2		0.2		0.2		(%)
Humedad de Saturación	16.7		15.9		15.8		15.9		16.8		(%)

CBR

Tabla A.4 - Cálculo Capacidad de soporte CBR, arena-arcillosa

Datos de Compactación						
Golpes	56		25		10	
Molde	I		F		D	
Humedad Agregada	11.4		11.4		11.4	
Agua Agregada	684		684		684	
Humedad Real	11.1		11.2		11.4	
Peso Molde + Material	9400		8922		8654	
Peso Molde Solo	4784		4540		4593	
Peso Material Solo	4616		4382		4061	
Volumen del Molde	2135		2111		2122	
Densidad Comp. Húmeda	2162		2076		1914	
Densidad Comp. Seca	1950		1870		1720	
Determinación de la Humedad						
	1.0		2.0		3.0	
Capsula	116.0	100.0	W	O	a	G
Peso Cáp.	101.8	78.2	92.1	95.7	78.2	91.6
Peso Cáp. + Suelo Húmedo	751.2	695.2	678.5	715.8	697.5	659.3
Peso Cáp. + Suelo Seco	685.9	633.5	619.9	652.6	632.9	601.9
Agua	65.3	61.7	58.6	63.2	64.6	57.4
Peso Suelo Seco	584.1	555.3	527.8	556.9	554.7	510.3
Humedad Real	11.2	11.1	11.1	11.3	11.6	11.2
Promedio	11.1		11.2		11.4	
Datos de Penetración						
56 Golpes		25 Golpes		10 Golpes		
Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.025	2.7	0.025	0.2	0.025	0.3	
0.050	6.4	0.050	1.1	0.050	1.1	
0.075	10.3	0.075	2.6	0.075	2.0	
0.100	15.7	0.100	4.6	0.100	3.2	
0.125	19.6	0.125	6.1	0.125	4.3	
0.150		0.150	7.9	0.150	5.5	
0.175		0.175	9.4	0.175	6.6	
0.200		0.200	11.0	0.200	7.8	
0.225		0.225	13.0	0.225	8.7	
0.250		0.250	14.4	0.250		
0.275		0.275		0.275		
0.300		0.300		0.300		

Curva Proctor Modificado, Curva de Saturación

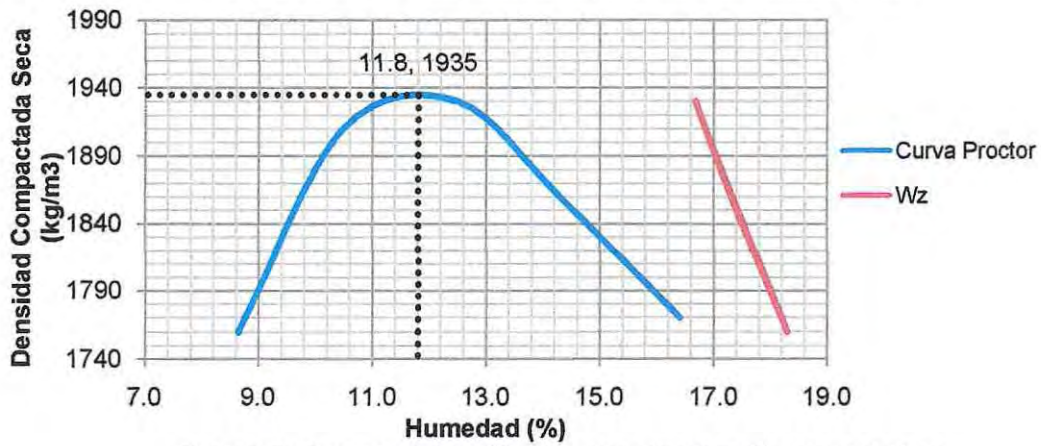


Figura A.2 - Curva proctor modificado y curva de saturación, arena-arcillosa

Curvas de Penetración

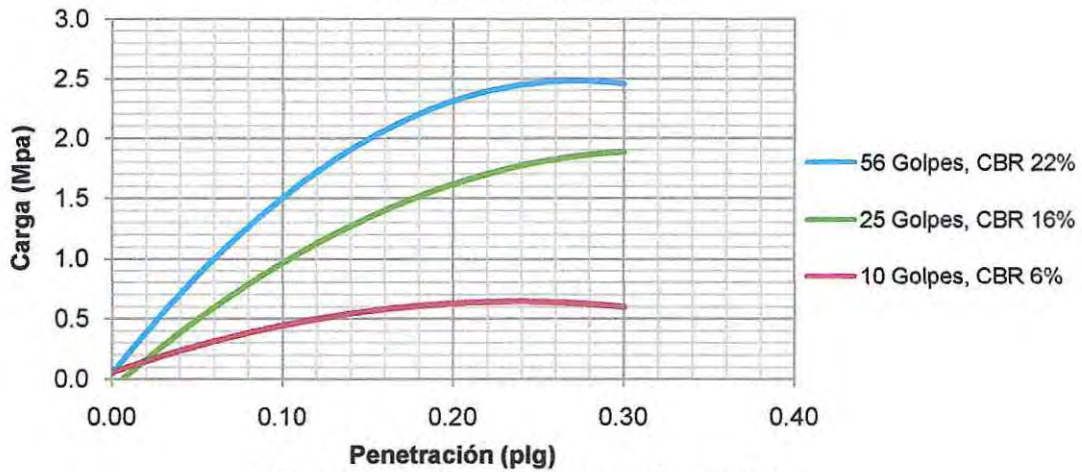


Figura A.3 - Curvas de penetración, arena-arcillosa

Curva Capacidad de Soporte CBR

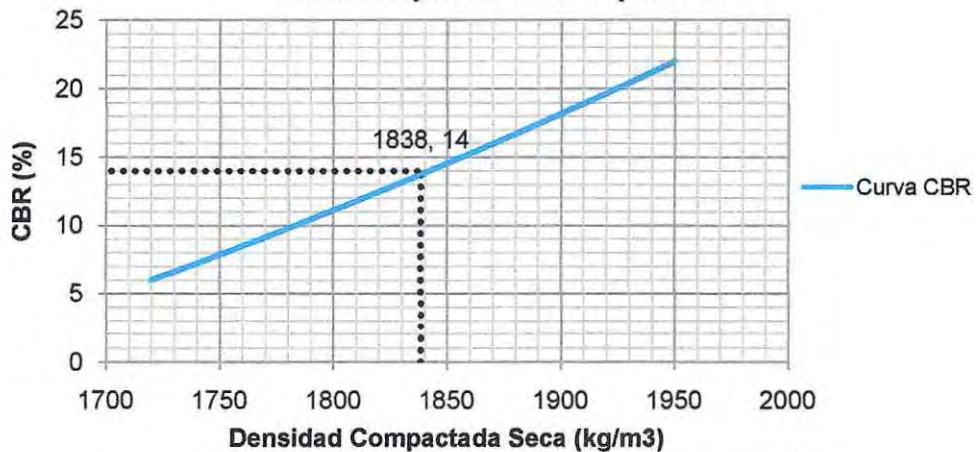


Figura A.4 - Curva capacidad de soporte CBR, arena-arcillosa

Arena limosa (maicillo sin plasticidad)

Granulometría

Peso muestra total seca a tamizar: 2325(gr)

Peso seco cuarteo lavado: 2240 (gr)

Tabla A.5 - Cálculo granulometría, arena-limosa

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
50	2"			
40	1 1/2"			
25	1"			
20	3/4"			
10	3/8"	0	0	100
5	N°4	125	5.4	95
Residuo		0		
Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
2	N°10	752	32.3	62
0.5	N°49	1012	43.5	19
0.08	N°200	330.1	14.2	5
Residuo		20.9		

Límites de Atterberg

El Límite líquido y Límite plástico son indeterminados

Proctor Modificado

Tabla A.6 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, arena-limosa

Datos de Compactación										
Determinación	1	2	3	4	5					
Molde	z1	z1	z1	z1	z1	N°				
Humedad Agregada	6	8	10	12	14	(%)				
Agua Agregada	260	390	520	650	780	(cm ³)				
Humedad Real	6.0	8.0	9.8	11.4	13.4	(%)				
Peso Molde + Material	7143	7253	7373	7423	7454	(gr)				
Peso Molde Solo	2768	2768	2768	2768	2768	(gr)				
Peso Material Solo	4375	4485	4605	4655	4686	(gr)				
Volumen del Molde	2126	2126	2126	2126	2126	(cm ³)				
Densidad Comp. Húmeda	2058	2110	2166	2190	2204	(kg/m ³)				
Densidad Comp. Seca	1940	1950	1980	1970	1940	(kg/m ³)				
Determinación de la Humedad										
Hum. Aparente	6		8		10		12		14	
Cápsula	A	U	J	O	P	W	113.0	E	100.0	112.0
Peso Cáp.	91.6	90.3	93.5	95.7	88.4	92.0	96.0	94.2	91.1	89.7
Cáp+Suelo Húm.	674.4	800.3	735.8	778.3	761.3	686.1	795.6	774.4	772.6	780.7
Cáp+Suelo Seco	641.2	760.4	687.5	728.1	701.2	633.6	721.7	706.9	684.4	706.6
Agua	33.2	39.9	48.3	50.2	60.1	52.5	73.9	67.5	88.2	74.1
Peso Suelo Seco	549.6	670.1	594.0	632.4	612.8	541.6	625.7	612.7	593.3	616.9
Humedad Real	6.0	6.0	8.1	7.9	9.8	9.7	11.8	11.0	14.9	12.0
Promedio	6.0		8.0		9.8		11.4		13.4	
Densidad de Partículas Sólidas										
Peso matraz+agua	655.9					(gr)				
Peso Seco	82					(gr)				
Peso Total Matraz	708.2					(gr)				
Densidad Gsf	2761					(kg/m ³)				
Índice de huecos	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	(%)
Porosidad	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	(%)
Humedad de Saturación	15.3	15.2	15.1	15.1	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	(%)

CBR

Tabla A.7 - Cálculo capacidad de soporte CBR, arena-limosa

Datos de Compactación						
Golpes	56		25		10	
Molde	I		L		D	
Humedad Agregada	8.0		8.0		8.0	
Agua Agregada	480		480		480	
Humedad Real	9.5		9.6		9.5	
Peso Molde + Material	9496		9018		8802	
Peso Molde Solo	4784		4493		4593	
Peso Material Solo	4712		4525		4209	
Volumen del Molde	2135		2123		2122	
Densidad Comp. Húmeda	2207		2131		1984	
Densidad Comp. Seca	2020		1950		1810	
Determinación de la Humedad						
	1.0		2.0		3.0	
Capsula	E	O	J	ED	101.0	S
Peso Cáp.	94.1	95.7	93.4	95.3	92.0	100.6
Peso Cáp. + Suelo Húmedo	906.7	867.7	921.6	839.2	867.9	706.5
Peso Cáp. + Suelo Seco	835.5	801.6	847.6	775.7	800.0	654.6
Agua	71.2	66.1	74.0	63.5	67.9	51.9
Peso Suelo Seco	741.4	705.9	754.2	680.4	708.0	554.0
Humedad Real	9.6	9.4	9.8	9.3	9.6	9.4
Promedio	9.5		9.6		9.5	
Datos de Penetración						
56 Golpes		25 Golpes		10 Golpes		
Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.025	0.6	0.025	0.2	0.025	0.2	
0.050	1.2	0.050	0.6	0.050	0.5	
0.075	1.9	0.075	0.9	0.075	0.7	
0.100	2.9	0.100	1.5	0.100	0.9	
0.125	3.8	0.125	2.0	0.125	1.2	
0.150	4.5	0.150	2.6	0.150	1.4	
0.175	5.4	0.175	3.1	0.175	1.6	
0.200	6.1	0.200	3.7	0.200	1.7	
0.225	6.8	0.225	4.1	0.225	1.9	
0.250	7.3	0.250	4.5	0.250	2.1	
0.275		0.275		0.275		
0.300		0.300		0.300		

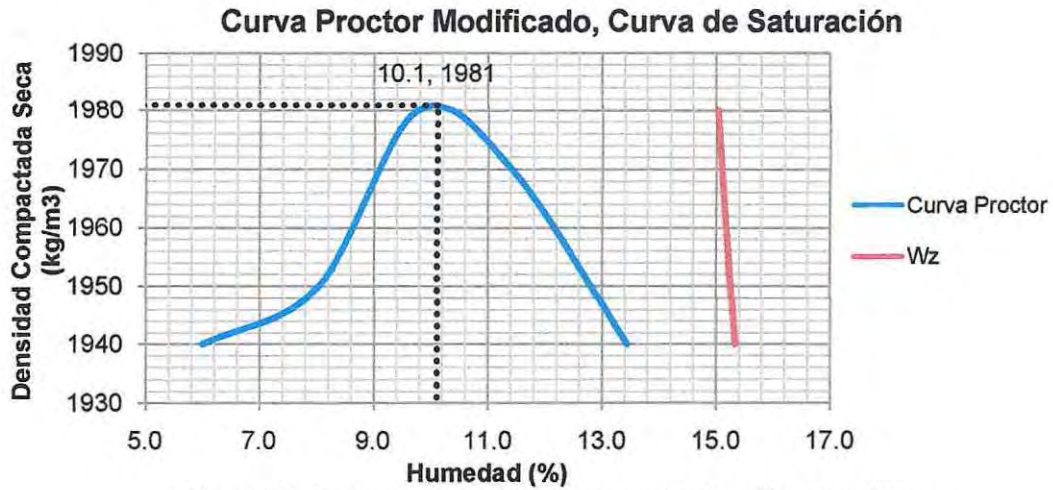


Figura A.5 - Curva proctor modificado y curva de saturación, arena-limosa

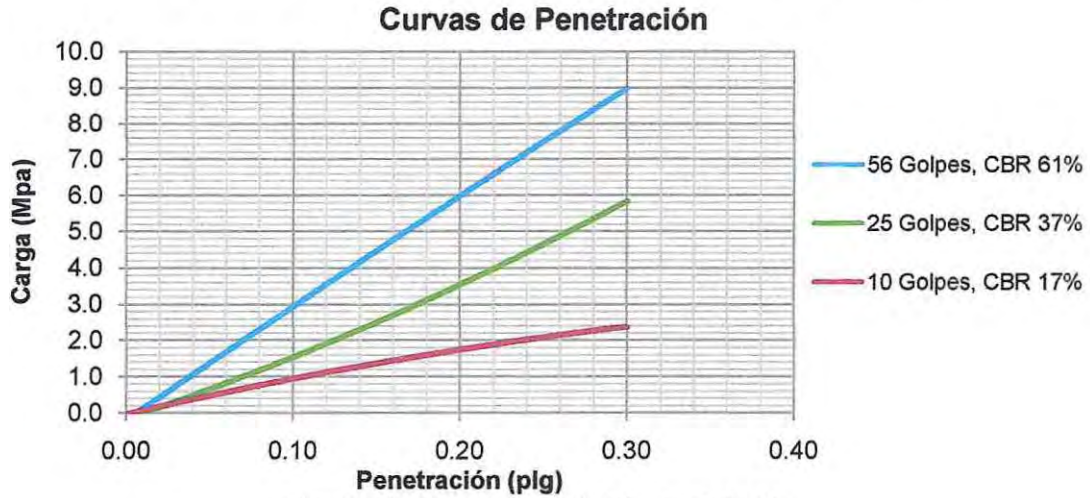


Figura A.6 - Curvas de penetración, arena-limosa

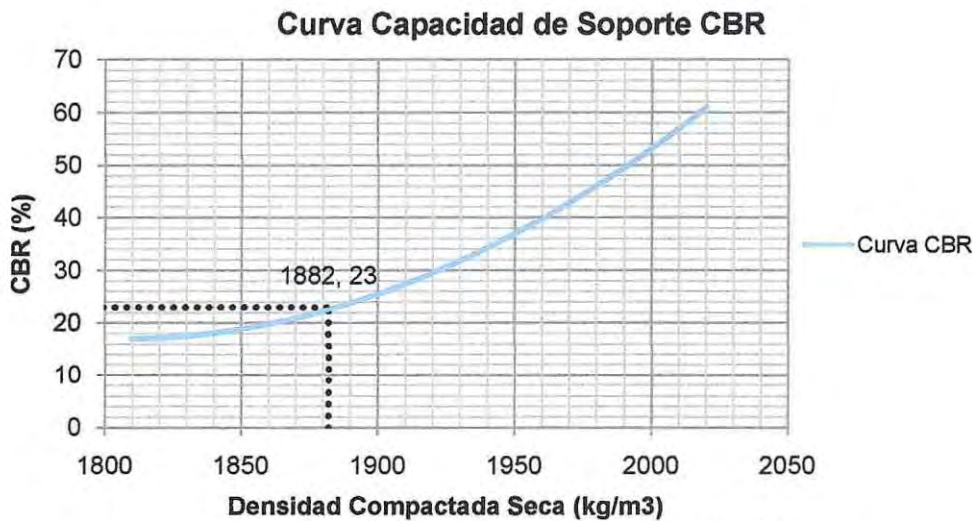


Figura A.7 - Curva capacidad de soporte CBR, arena-limosa

Base granular

Granulometría

Peso seco retenido en 5 mm: 8283 (gr)
 Peso seco lavado retenido en 5 mm: 8238 (gr)
 Peso seco inicial pasa 5 mm: 5476 (gr)
 Peso seco cuarteo pasa 5 mm: 623.0 (gr)
 Peso seco cuarteo lavado 5 mm: 585.0 (gr)

Tabla A.8 - Cálculo granulometría, base granular

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
50	2"			
40	1 1/2"	0	0	100
25	1"	626	4.5	96
20	3/4"	1926	14	82
10	3/8"	3676	26.7	55
5	N°4	1975	14.4	40
Residuo		35		
Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
2	N°10	220	14.1	26
0.5	N°49	249	15.9	10
0.08	N°200	111	7.1	3
Residuo		2.0		

Cubicidad de Partículas

Tabla A.9 - Cálculo cubicidad de partículas, base granular

Sobre 20 mm		(gr)	(%)
Peso muestra total		2323.5	100
peso material chancado		1788.1	78.7
Peso material rodado		494.3	21.3
Peso laja chancada		41.1	1.8
Peso laja rodada		0	0
Bajo 20 mm y sobre 5 mm		(gr)	(%)
Peso muestra total		501.8	100
peso material chancado		324.1	66.6
Peso material rodado		167.4	33.4
Peso laja chancada		10.3	2.1
Peso laja rodada		0	0
Cubicidad total			(%)
Porcentaje material chancado			71
Porcentaje material rodado			29
Porcentaje laja			2

$$P_{20} = 0.38$$

$$P_5 = 0.62$$

Desgaste de Los Ángeles

Tabla A.10 - Cálculo desgaste de Los Ángeles, base granular

DESGASTE MEDIANTE MAQUINA DE LOS ANGELES								
Tamiz (mm)	Granulometría		Asignación de % P.R. de la granulometría original para cada grado de ensaye					
	% que Pasa	% Parcial Ret.	1 (80-40)	2 (50-25)	3 (40-20)	4 (40-10)	5 (20-10)	6 (10-5)
80-63			0					
65-50			0					
50-40	100	0	0	0				
40-25	94	6		6	6	6		
25-20	80	14			14	14		
20-12.5	61	19				19	19	
12.5-10	54	7				26	26	
10-6.3	43	11						11
6.5-5	39	4						15
5-2.5								
Sumatoria % Parcial Ret.			0	6	20	65	45	26
Masa Final (gr)		4206						
Diferencia (gr)		796						
Desgaste L.A (%)		15.9						

El desgaste mediante máquina de Los Ángeles se realiza en la fracción gruesa del material, por lo que será casi idéntico en cada mezcla que sea realizada.

Límites de Atterberg

El Límite líquido y Límite plástico son indeterminados

Proctor Modificado

Tabla A.11 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, base granular

Datos de Compactación										
Determinación	1		2		3		4		5	
Molde	z1		z1		z1		z1		z1	
Humedad Agregada	4		6		8		10		12	
Agua Agregada	280		420		560		700		840	
Humedad Real	4.2		5.7		7.8		10.3		11.7	
Peso Molde + Material	7362		7602		7675		7487		7498	
Peso Molde Solo	2768		2768		2768		2768		2768	
Peso Material Solo	4594		4834		4907		4719		4730	
Volumen del Molde	2124		2124		2124		2124		2124	
Densidad Comp. Húmeda	2163		2276		2310		2222		2227	
Densidad Comp. Seca	2080		2150		2140		2010		1990	
Determinación de la Humedad										
Hum. Aparente	4		6		8		10		12	
Cápsula	4.0	10.3	j	113.0	f	p	o	100 d	a	uy
Peso Cáp.	78.6	97.4	93.4	96.0	90.7	88.5	95.6	97.0	91.4	77.8
Cáp+S.Húm.	752.4	923.4	661.0	890.2	835.5	755.7	1045.4	782.4	1000.5	998.3
Cáp+S.Seco	724.5	890.8	629.7	848.8	779.8	708.9	955.9	719.1	905.8	901.6
Agua	27.9	32.6	31.3	41.4	55.7	46.8	89.5	63.3	94.7	96.7
Peso S. Seco	645.9	793.4	536.3	752.8	696.1	623.4	860.3	622.1	814.4	823.8
Hum. Real	4.3	4.1	5.8	5.5	8.0	7.5	10.4	10.2	11.6	11.7
Promedio	4.2		5.7		7.8		10.3		11.7	
Densidad de Partículas Sólidas de los gruesos										
Peso sumergido	2595									(gr)
Peso seco	4072									(gr)
Densidad Gsg	2757									(kg/m ³)
Densidad de Partículas Sólidas de los finos										
Peso Matraz + Agua	665.3									(gr)
Peso Seco	85									(gr)
Peso Total Matraz	719.8									(gr)
Densidad Gsf	2787									(kg/m ³)
Densidad de Partículas										
% que pasa por tamiz 5 mm	40									(gr)
% retenido por tamiz 5 mm	60									(gr)
Densidad Gs	2769									(kg/m ³)
Densidad del agua	1000									(kg/m ³)
Índice de huecos	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	(%)			
Porosidad	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	(%)			
Humedad de Saturación	11.5	11.2	11.2	11.2	12.1	12.3	(%)			

CBR

Tabla A.12 - Cálculo capacidad de soporte CBR, base granular

Datos de Compactación						
Golpes	56	25	10			
Molde	C	D	B			N°
Humedad Agregada	6.5	6.5	6.5			(%)
Agua Agregada	455	455	455			(cm ³)
Humedad Real	6.4	6.5	6.2			(%)
Peso Molde + Material	9372	9232	8846			(gr)
Peso Molde Solo	4544	4593	4429			(gr)
Peso Material Solo	4828	4639	4417			(gr)
Volumen del Molde	2112	2122	2110			(cm ³)
Densidad Comp. Húmeda	2286	2186	2093			(kg/m ³)
Densidad Comp. Seca	2150	2050	1970			(kg/m ³)
Determinación de la Humedad						
	1		2		3	
Capsula	Ñ	W	103.0	Ñ	W	103.0
Peso Cáp.	94.4	92.1	97.4	94.4	92.1	97.4
Peso Cáp. + Suelo Húmedo	880.5	1356.7	813.1	880.5	1356.7	813.1
Peso Cáp. + Suelo Seco	832.7	1282.2	769.7	832.7	1282.2	769.7
Agua	47.8	74.5	43.4	47.8	74.5	43.4
Peso Suelo Seco	738.3	1190.1	672.3	738.3	1190.1	672.3
Humedad Real	6.5	6.3	6.5	6.5	6.3	6.5
Promedio	6.4		6.5		6.2	
Datos de Penetración						
56 Golpes		25 Golpes		10 Golpes		
Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.025	3.6	0.025	0.7	0.025	0.5	
0.050	7.7	0.050	2.2	0.050	1.2	
0.075	11.5	0.075	3.7	0.075	1.9	
0.100	15.0	0.100	5.5	0.100	2.7	
0.125		0.125	7.5	0.125	3.4	
0.150		0.150	8.9	0.150	4.2	
0.175		0.175	10.7	0.175	4.9	
0.200		0.200	11.7	0.200	5.5	
0.225		0.225	13.2	0.225	6.2	
0.250		0.250	15.1	0.250	6.6	
0.275		0.275		0.275		
0.300		0.300		0.300		

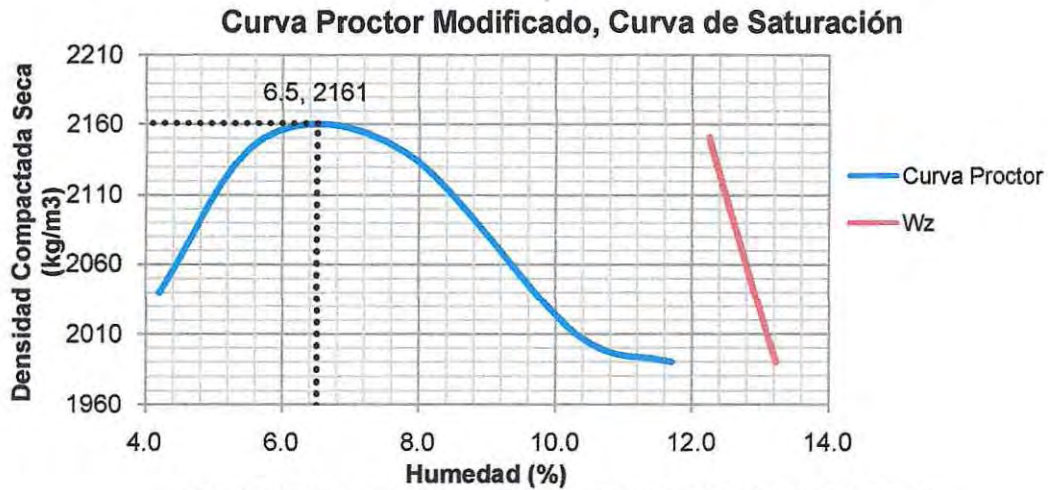


Figura A.8 - Curva proctor modificado y curva de saturación, base granular

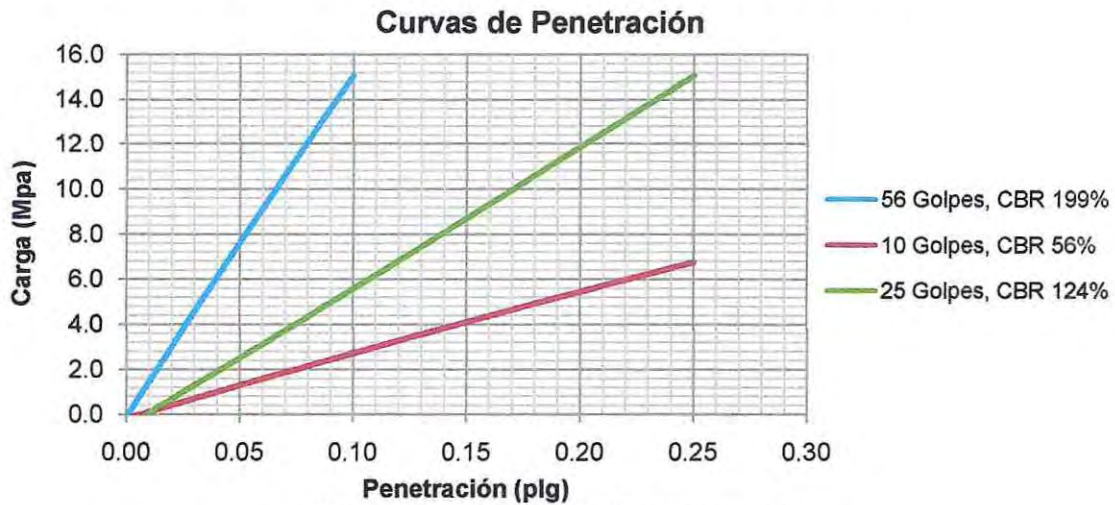


Figura A.9 - Curvas de penetración, base granular

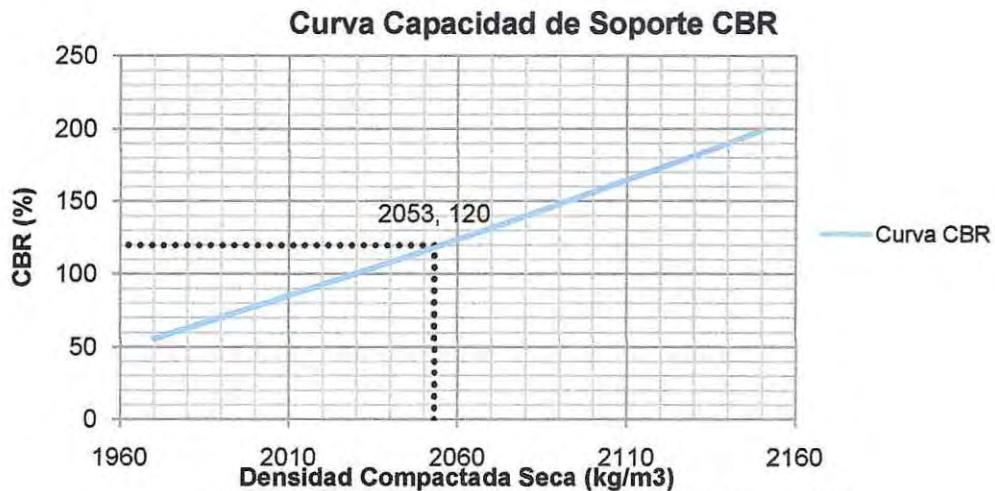


Figura A.10 - Curva capacidad de soporte CBR, base granular

Mezcla con 90% base granular y 10% arena-arcillosa

Granulometría

Peso seco retenido en 5 mm: 7854 (gr)
 Peso seco lavado retenido en 5 mm: 7808 (gr)
 Peso seco inicial pasa 5 mm: 5354 (gr)
 Peso seco cuarteo pasa 5 mm: 554.0 (gr)
 Peso seco cuarteo lavado 5 mm: 493.9 (gr)

Tabla A.13 - Cálculo granulometría, 90% - 10% (arena-arcillosa)

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
50	2"			
40	1 1/2"	0	0	100
25	1"	590	4.5	96
20	3/4"	1924	14.6	81
10	3/8"	3360	25.4	56
5	N°4	1940	14.7	41
Residuo		40		

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
2	N°10	146.3	10.7	30
0.5	N°40	215.9	15.8	14
0.08	N°200	126	9.2	5
Residuo		4.8		

Cubicidad de Partículas

Tabla A.14 - Cálculo cubicidad de partículas, 90% - 10% (arena-arcillosa)

Sobre 20 mm		(gr)	(%)
Peso muestra total		2054	100
peso material chancado		1662	80.9
Peso material rodado		393.5	19.2
Peso laja chancada		0	0
Peso laja rodada		0	0
Bajo 20 mm y sobre 5 mm		(gr)	(%)
Peso muestra total		516.6	100
peso material chancado		412.3	79.8
Peso material rodado		85.7	16.7
Peso laja chancada		18.7	3.6
Peso laja rodada		0	0
Cubicidad total		(%)	
Porcentaje material chancado		80	
Porcentaje material rodado		18	
Porcentaje laja		2	

$$P_{20} = 0.440$$

$$P_5 = 0.559$$

Límites de Atterberg

Tabla A.15 - Cálculo límites de Atterberg, 90% - 10% (arena-arcillosa)

Ensayo	Límite Plástico			Límite Líquido				
	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Cápsula	30.0	17.0	52.0	8.0	2.0	4.0	C2	11.0
N° de Golpes	-	-	-	12.0	17.0	22.0	27.0	32.0
Cáp.+Suelo Húmedo	16.3	17.3	15.3	25.1	25.6	25.1	25.6	26.1
Cáp +Suelo Seco	15.7	16.5	14.7	22.4	23.1	22.5	23.0	23.6
Peso Cáp.	10.8	11.1	10.2	10.2	11.2	9.9	9.8	10.9
Peso Agua	0.6	0.8	0.6	2.7	2.5	2.6	2.6	2.5
Peso Suelo Seco	4.9	5.4	4.5	12.2	11.9	12.6	13.2	12.7
Humedad Real	12.2	14.8	13.3	22.1	21.0	20.6	19.7	19.7
Promedio Límite Plástico	13.4							

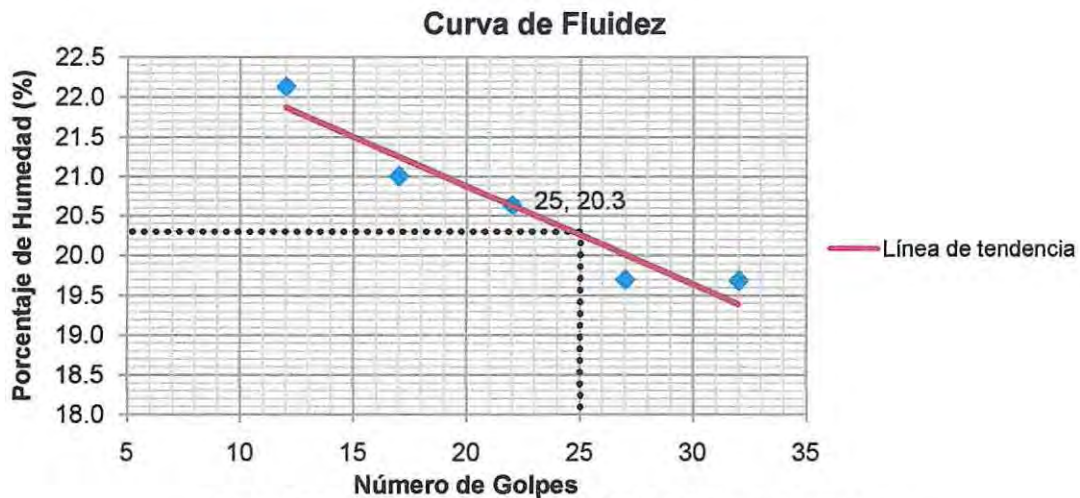


Figura A.11 - Gráfico curva de fluidez, 90% - 10% (arena-arcillosa)

IP=LL-LP

IP=20.3-13.4

IP=6.9 = 7%

Proctor Modificado

Tabla A.16 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, 90% - 10% (arena-arcillosa)

Datos de Compactación										
Determinación	1		2		3		4		5	
Molde	z1		z1		z1		z1		z1	
Humedad Agregada	4		6		8		10		12	
Agua Agregada	280		420		560		700		840	
Humedad Real	4.0		6.0		7.9		10.5		11.9	
Peso Molde + Material	7350		7570		7670		7634		7450	
Peso Molde Solo	2768		2768		2768		2768		2768	
Peso Material Solo	4582		4802		4902		4866		4682	
Volumen del Molde	2124		2124		2124		2124		2124	
Densidad Comp. Húmeda	2157		2261		2308		2291		2204	
Densidad Comp. Seca	2080		2130		2140		2070		1970	
Determinación de la Humedad										
Hum. Aparente	4		6		8		10		12	
Cápsula	S	100D	A	103.0	E	O	S	100D	a	uy
Peso Cáp.	100.6	91.0	90.6	97.4	94.1	95.7	100.6	91.0	91.4	77.8
Cáp+S.Húm.	888.3	768.4	720.4	827.2	782.0	903.0	956.0	946.5	1000.5	998.3
Cáp+S.Seco	858.1	742.6	684.6	786.1	731.5	844.3	874.4	865.7	899.2	896.2
Agua	30.2	25.8	35.8	41.1	50.5	58.7	81.6	80.8	101.3	102.1
Peso S. Seco	757.5	651.6	594.0	688.7	637.4	748.6	773.8	774.7	807.8	818.4
Hum. Real	4.0	4.0	6.0	6.0	7.9	7.8	10.5	10.4	12.5	12.5
Promedio	4.0		6.0		7.9		10.5		12.6	
Densidad de Partículas Sólidas de los gruesos										
Peso sumergido	4910									(gr)
Peso seco	7672									(gr)
Densidad Gsg	2778									(kg/m ³)
Densidad de Partículas Sólidas de los finos										
Peso Matraz + Agua	657.5									(gr)
Peso Seco	63.2									(gr)
Peso Total Matraz	697.3									(gr)
Densidad Gsf	2701									(kg/m ³)
Densidad de Partículas										
% que pasa por tamiz 5 mm	41									(gr)
% retenido por tamiz 5 mm	59									(gr)
Densidad Gs	2746									(kg/m ³)
Densidad del agua	1000									(kg/m ³)
Índice de huecos	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	(%)
Porosidad	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	(%)
Humedad de Saturación	10.3	9.9	9.9	10.3	10.4					(%)

CBR

Tabla A.17 - Cálculo capacidad de soporte CBR, 90% - 10% (arena-arcillosa)

Datos de Compactación						
Golpes	25		10		5	
Molde	I		D		B	
Humedad Agregada	7.2		7.2		7.2	
Agua Agregada	504		504		504	
Humedad Real	7.2		6.9		7.2	
Peso Molde + Material	9321		9202		8986	
Peso Molde Solo	4493		4593		4429	
Peso Material Solo	4828		4609		4557	
Volumen del Molde	2123		2122		2110	
Densidad Comp. Húmeda	2274		2172		2160	
Densidad Comp. Seca	2120		2030		2010	
Determinación de la Humedad						
	1		2		3	
Capsula	S	107.0	A	103.0	101.0	100D
Peso Cáp.	100.0	92.2	78.2	97.4	91.8	91.1
Peso Cáp. + Suelo Húmedo	731.2	722.2	662.1	748.2	798.5	732.7
Peso Cáp. + Suelo Seco	689.7	678.8	624.6	706.4	750.8	689.4
Agua	41.5	43.4	37.5	41.8	47.7	43.3
Peso Suelo Seco	589.7	586.6	546.4	609.0	659.0	598.3
Humedad Real	7.0	7.4	6.9	6.9	7.2	7.2
Promedio	7.2		6.9		7.2	
Datos de Penetración						
56 Golpes		25 Golpes		10 Golpes		
Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.025	0.5	0.025	1.3	0.025	1.1	
0.050	2.5	0.050	2.3	0.050	2.0	
0.075	5.2	0.075	3.3	0.075	2.7	
0.100	6.9	0.100	4.6	0.100	3.5	
0.125	8.7	0.125	5.7	0.125	4.2	
0.150	11.3	0.150	6.8	0.150	4.9	
0.175	12.8	0.175	7.8	0.175	5.8	
0.200	15.0	0.200	9.1	0.200	6.7	
0.225	17.7	0.225	10.2	0.225	7.3	
0.250		0.250	11.1	0.250	8.0	
0.275		0.275		0.275		
0.300		0.300		0.300		

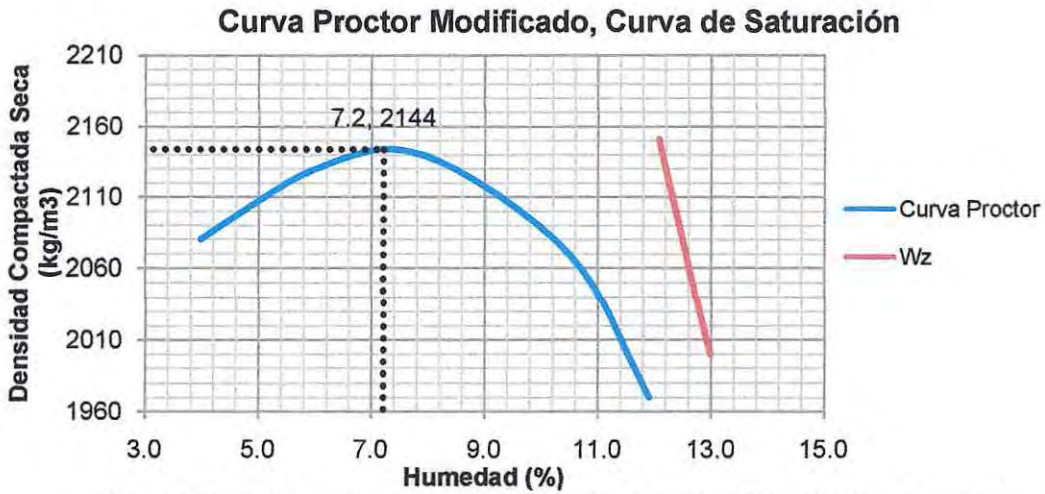


Figura A.12 - Curva proctor modificado y curva de saturación, 90% - 10% (arena-arcillosa)

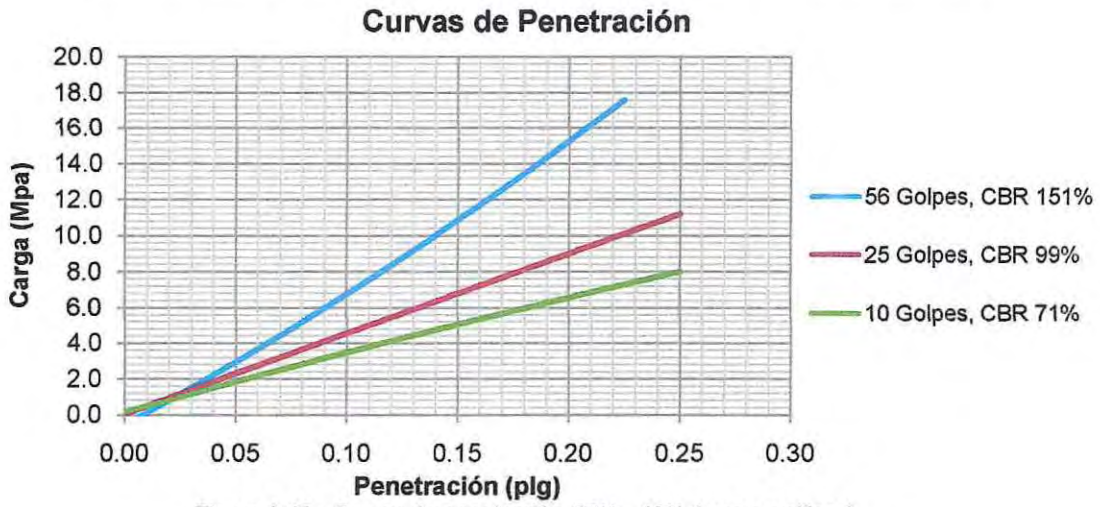


Figura A.13 - Curvas de penetración, 90% - 10% (arena-arcillosa)

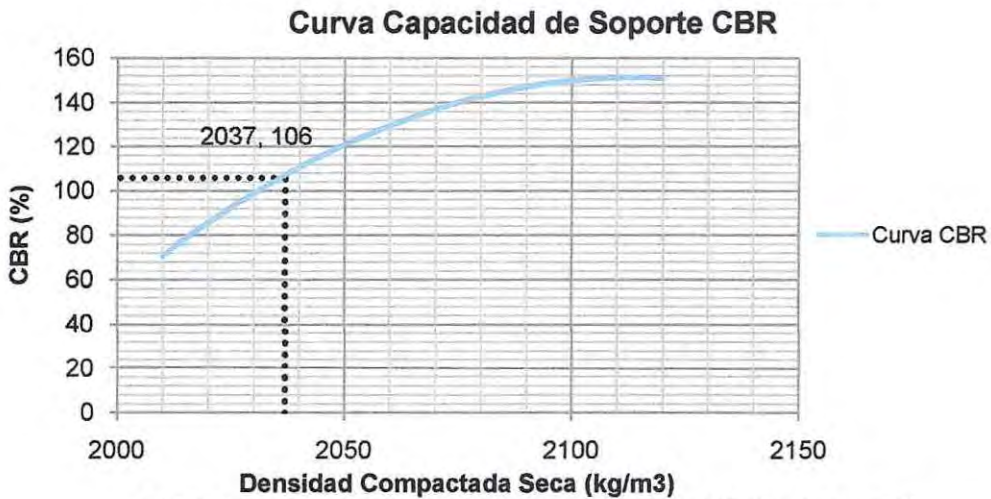


Figura A.14 - Curva capacidad de soporte CBR, 90% - 10% (arena-arcillosa)

Mezcla 90% base granular y 10% arena-limosa

Granulometría

Peso seco retenido en 5 mm: 7606 (gr)
 Peso seco lavado retenido en 5 mm: 7576 (gr)
 Peso seco inicial pasa 5 mm: 5998 (gr)
 Peso seco cuarteo pasa 5 mm: 685.0 (gr)
 Peso seco cuarteo lavado 5 mm: 630.9 (gr)

Tabla A.18 - Cálculo granulometría, 90% - 10%

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
50	2"			
40	1 1/2"	0	0	100
25	1"	739	5.4	96
20	3/4"	1865	13.7	81
10	3/8"	3176	23.3	58
5	N°4	1679	12.3	45
Residuo		111		

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
2	N°10	185.6	11.1	33
0.5	N°49	308.0	19.8	14
0.08	N°200	136.0	8.8	5
Residuo		0.6		

Cubicidad de Partículas

Tabla A.19 - Cálculo cubicidad de partículas, 90% - 10%

Sobre 20 mm		(gr)	(%)
Peso muestra total		779	100
peso material chancado		504	64.7
Peso material rodado		275	35.3
Peso laja chancada		-	-
Peso laja rodada		-	-
Bajo 20 mm y sobre 5 mm		(gr)	(%)
Peso muestra total		1234.8	100
peso material chancado		946	76.6
Peso material rodado		288.8	23.4
Peso laja chancada		36.5	3.0
Peso laja rodada		-	-
Cubicidad total			(%)
Porcentaje material chancado			72
Porcentaje material rodado			28
Porcentaje laja			2

$P_{20} = 0.345$
 $P_5 = 0.655$

Límites de Atterberg

El Límite líquido y Límite plástico son indeterminados

Proctor Modificado

Tabla A.20 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, 90% - 10%

Datos de Compactación											
Determinación	1		2		3		4		5		
Molde	z1		z1		z1		z1		z1		
Humedad Agregada	4.0		6.0		8.0		10.0		12.0		
Agua Agregada	280		420		560		700		840		
Humedad Real	4.1		5.9		8.0		9.6		11.7		
Peso Molde + Material	7421		7615		7692		7639		7652		
Peso Molde Solo	2768		2768		2768		2768		2768		
Peso Material Solo	4653		4847		4924		4871		4884		
Volumen del Molde	2124		2124		2124		2124		2124		
Densidad Comp. Húmeda	2191		2282		2318		2293		2299		
Densidad Comp. Seca	2110		2160		2150		2090		2060		
Determinación de la Humedad											
Hum. Aparente	4		6		8		10		12		
Cápsula	4.0	10.3	j	113.0	f	p	o	100 d	a	uy	
Peso Cáp.	78.6	97.4	93.4	96.0	90.7	88.5	95.6	97.0	91.4	77.8	
Cáp+S.Húm.	754.4	925.4	661.0	890.2	835.5	755.7	1045.4	785.4	1000.5	998.3	
Cáp+S.Seco	726.5	894.8	629.7	845.8	779.8	705.6	962.1	725.1	905.8	901.6	
Agua	27.9	30.6	31.3	44.4	55.7	50.1	83.3	60.3	94.7	96.7	
Peso S. Seco	647.9	797.4	536.3	749.8	696.1	623.4	866.5	628.1	814.4	823.8	
Hum. Real	4.3	3.8	5.8	5.9	8.0	8.0	9.6	9.6	11.6	11.7	
Promedio	4.1		5.9		8.0		9.6		11.7		
Densidad de Partículas Sólidas de los gruesos											
Peso sumergido										3575	(gr)
Peso seco										5592	(gr)
Densidad Gsg										2772	(kg/m ³)
Densidad de Partículas Sólidas de los finos											
Peso Matraz + Agua										664.9	(gr)
Peso Seco										83.4	(gr)
Peso Total Matraz										718.3	(gr)
Densidad Gsf										2780	(kg/m ³)
Densidad de Partículas											
% que pasa por tamiz 5 mm										45	(gr)
% retenido por tamiz 5 mm										55	(gr)
Densidad Gs										2776	(kg/m ³)
Densidad del agua										1000	(kg/m ³)
Índice de huecos	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	(%)		
Porosidad	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	(%)			
Humedad de Saturación	11.6	11.3	11.4	11.6	11.8	(%)					

CBR

Tabla A.21 - Cálculo capacidad de soporte CBR, 90% - 10%

Datos de Compactación						
Golpes	56		25		10	
Molde	l		w		L	
Humedad Agregada	6.5		6.5		6.5	
Agua Agregada	455		455		455	
Humedad Real	6.5		6.6		6.4	
Peso Molde + Material	9369		9291		9088	
Peso Molde Solo	4544		4558		4558	
Peso Material Solo	4825		4733		4530	
Volumen del Molde	2112		2119		2119	
Densidad Comp. Húmeda	2285		2234		2138	
Densidad Comp. Seca	2150		2100		2010	
Determinación de la Humedad						
	1		2		3	
Capsula	113.0	e	107.0	103.0	4.0	107.0
Peso Cáp.	96.2	77.8	92.0	97.4	78.6	92.0
Peso Cáp. + Suelo Húmedo	1017.5	855.4	778.0	923.0	940.2	982.6
Peso Cáp. + Suelo Seco	961.0	808.3	735.2	872.4	888.6	928.5
Agua	56.5	47.1	42.8	50.6	51.6	54.1
Peso Suelo Seco	864.8	730.5	643.2	775.0	810.0	836.5
Humedad Real	6.5	6.4	6.7	6.5	6.4	6.5
Promedio	6.5		6.6		6.4	
Datos de Penetración						
56 Golpes		25 Golpes		10 Golpes		
Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.025	0.5	0.025	0.7	0.025	0.2	
0.050	1.8	0.050	2.1	0.050	0.8	
0.075	3.8	0.075	3.6	0.075	1.4	
0.100	6.1	0.100	5.3	0.100	2.0	
0.125	8.3	0.125	7.4	0.125	2.7	
0.150	10.5	0.150	9.0	0.150	3.3	
0.175	12.3	0.175	10.7	0.175	4.0	
0.200	14.0	0.200	12.3	0.200	4.5	
0.225	16.0	0.225	13.9	0.225	5.2	
0.250		0.250	15.3	0.250	5.8	
0.275		0.275		0.275		
0.300		0.300		0.300		

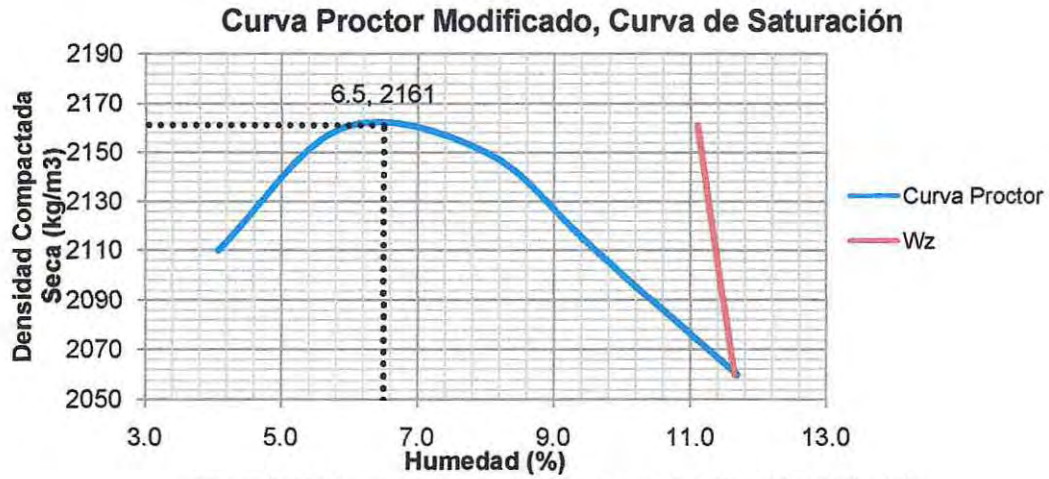


Figura A.15 - Curva proctor modificado y curva de saturación, 90% - 10%

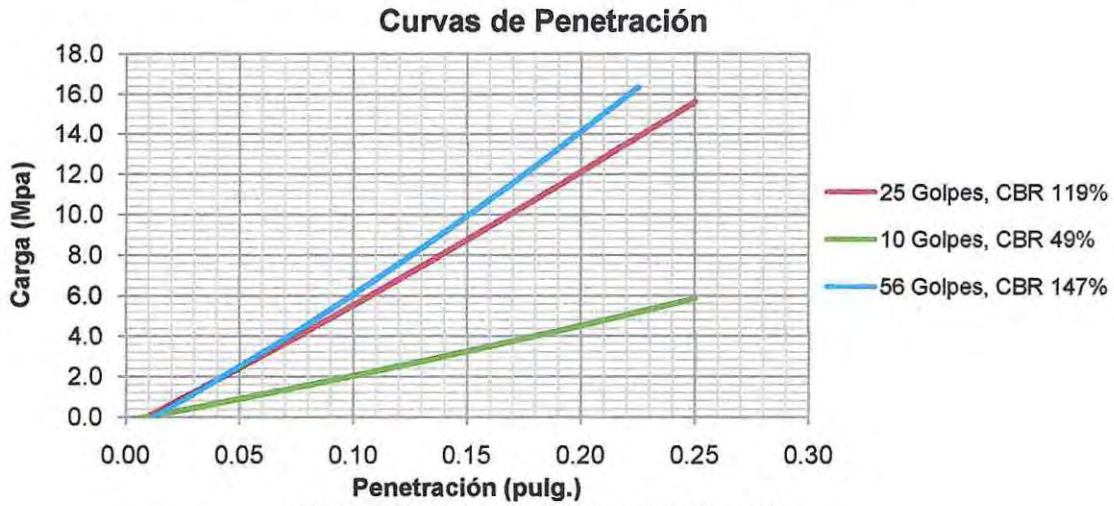


Figura A.16 - Curvas de penetración, 90% - 10%

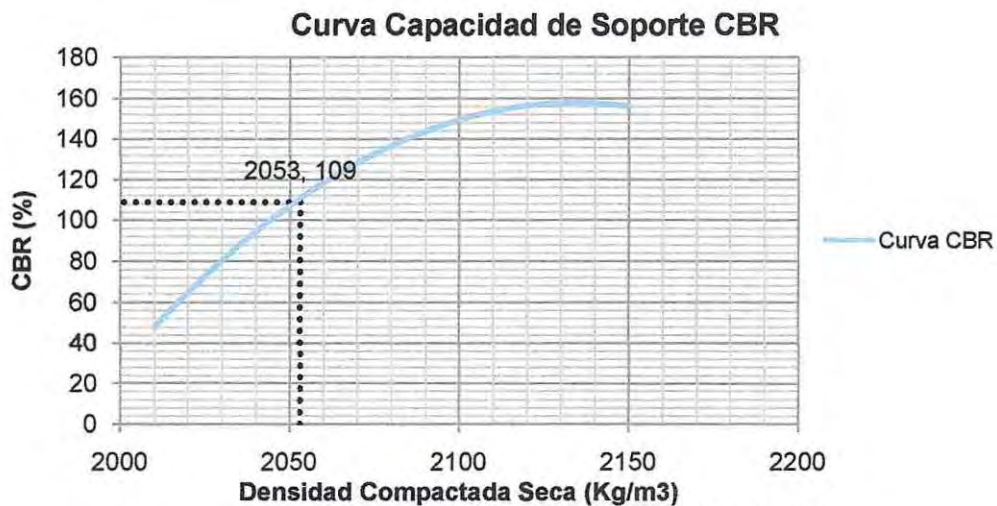


Figura A.17 - Curva capacidad de soporte CBR, 90% - 10%

Mezcla 85% base granular y 15% arena-limosa

Granulometría

Peso seco retenido en 5 mm: 6701 (gr)
 Peso seco lavado retenido en 5 mm: 6648 (gr)
 Peso seco inicial pasa 5 mm: 5949 (gr)
 Peso seco cuarteo pasa 5 mm: 635.5 (gr)
 Peso seco cuarteo lavado 5 mm: 583.1 (gr)

Tabla A.22 - Cálculo granulometría, 85% - 15%

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
50	2"			
40	1 1/2"	0	0	100
25	1"	685	5.4	95
20	3/4"	1830	14.5	80
10	3/8"	2670	21.1	59
5	N°4	1341	10.6	48
Residuo		120		

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
2	N°10	190	14.1	34
0.5	N°49	270	20.0	14
0.08	N°200	120	8.9	5
Residuo		3.1		

Cubicidad de Partículas

Tabla A.23 - Cálculo cubicidad de partículas, 85% - 15%

Sobre 20 mm		(gr)	(%)
Peso muestra total		944	100
peso material chancado		713	75.5
Peso material rodado		231	24.5
Peso laja chancada		-	-
Peso laja rodada		-	-
Bajo 20 mm y sobre 5 mm		(gr)	(%)
Peso muestra total		1271.5	100
peso material chancado		949.1	74.6
Peso material rodado		263.3	20.7
Peso laja chancada		59.1	4.6
Peso laja rodada		-	-
Cubicidad total			(%)
Porcentaje material chancado			75
Porcentaje material rodado			22
Porcentaje laja			3

$P_{20} = 0.385$
 $P_5 = 0.615$

Límites de Atterberg

El Límite líquido y Límite plástico son indeterminados

Proctor Modificado

Tabla A.24 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, 85% - 15%

Datos de Compactación										
Determinación	1	2	3	4	5					
Molde	z1	z1	z1	z1	z1	N°				
Humedad Agregada	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	(%)				
Agua Agregada	280	420	560	700	840	(cm ³)				
Humedad Real	4.2	6.0	8.1	10.3	11.9	(%)				
Peso Molde + Material	7408	7621	7704	7648	7622	(gr)				
Peso Molde Solo	2768	2768	2768	2768	2768	(gr)				
Peso Material Solo	4640	4853	4936	4880	4854	(gr)				
Volumen del Molde	2124	2124	2124	2124	2124	(cm ³)				
Densidad Comp. Húmeda	2185	2285	2324	2298	2285	(kg/m ³)				
Densidad Comp. Seca	2100	2160	2150	2080	2040	(kg/m ³)				
Determinación de la Humedad										
Hum. Aparente	4		6		8		10		12	
Cápsula	101.0	P	Q	113.0	100.0	O	P	100 d	103.0	uy
Peso Cáp.	91.7	88.5	78.3	96.0	78.3	95.6	88.5	97.0	97.4	77.8
Cáp+S.Húm.	845.7	754.8	657.2	732.9	741.9	624.8	876.1	687.5	986.4	873.2
Cáp+S.Seco	816.2	727.4	624.3	697.2	685.5	574.1	801.9	632.6	893.5	787.6
Agua	29.5	27.4	32.9	35.7	56.4	50.7	74.2	54.9	92.9	85.6
Peso S. Seco	724.5	638.9	546.0	601.2	696.1	623.4	713.4	535.6	796.1	709.8
Hum. Real	4.1	4.3	6.0	5.9	8.1	8.1	10.4	10.3	11.7	12.1
Promedio	4.2		6.0		8.1		10.3		11.9	
Densidad de Partículas Sólidas de los gruesos										
Peso sumergido						2983				(gr)
Peso seco						4665				(gr)
Densidad Gsg						2773				(kg/m ³)
Densidad de Partículas Sólidas de los finos										
Peso Matraz + Agua						568.7				(gr)
Peso Seco						85.2				(gr)
Peso Total Matraz						623.3				(gr)
Densidad Gsf						2784.3				(kg/m ³)
Densidad de Partículas										
% que pasa por tamiz 5 mm						50				(gr)
% retenido por tamiz 5 mm						50				(gr)
Densidad Gs						2779				(kg/m ³)
Densidad del agua						1000				(kg/m ³)
Índice de huecos	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	(%)				
Porosidad	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	(%)				
Humedad de Saturación	12.3	11.8	11.9	12.2	12.5	(%)				

CBR

Tabla A.25 - Cálculo capacidad de soporte CBR, 85% - 15%

Datos de Compactación						
Golpes	56		25		10	
Molde	G		D		B	
Humedad Agregada	6.5		6.5		6.5	
Agua Agregada	455		455		455	
Humedad Real	6.5		6.4		6.4	
Peso Molde + Material	9609		9325		8863	
Peso Molde Solo	4724		4593		4429	
Peso Material Solo	4885		4732		4434	
Volumen del Molde	2119		2130		2110	
Densidad Comp. Húmeda	2305		2222		2101	
Densidad Comp. Seca	2170		2090		1980	
Determinación de la Humedad						
	1		2		3	
Capsula	107.0	100.0	P	103.0	101.0	Q
Peso Cáp.	92.0	78.3	88.5	97.4	91.7	78.3
Peso Cáp. + Suelo Húmedo	710.1	781.6	820.7	801.4	891.4	968.6
Peso Cáp. + Suelo Seco	672.2	739.2	777.0	759.3	841.8	917.4
Agua	37.9	42.4	43.7	42.1	49.6	51.2
Peso Suelo Seco	580.2	660.9	688.5	661.9	750.1	839.1
Humedad Real	6.5	6.4	6.3	6.4	6.6	6.1
Promedio	6.5		6.4		6.4	
Datos de Penetración						
56 Golpes		25 Golpes		10 Golpes		
Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.025	0.5	0.025	0.2	0.025	0.1	
0.050	2.3	0.050	0.7	0.050	0.2	
0.075	4.4	0.075	1.8	0.075	0.3	
0.100	6.9	0.100	3.3	0.100	0.4	
0.125	9.1	0.125	4.9	0.125	0.8	
0.150	11.1	0.150	6.5	0.150	1.4	
0.175	12.9	0.175	7.6	0.175	2.2	
0.200	14.3	0.200	9.0	0.200	2.8	
0.225	15.9	0.225	10.6	0.225	3.5	
0.250		0.250	11.8	0.250	4.1	
0.275		0.275		0.275		
0.300		0.300		0.300		

Curva Proctor Modificado, Curva de Saturación

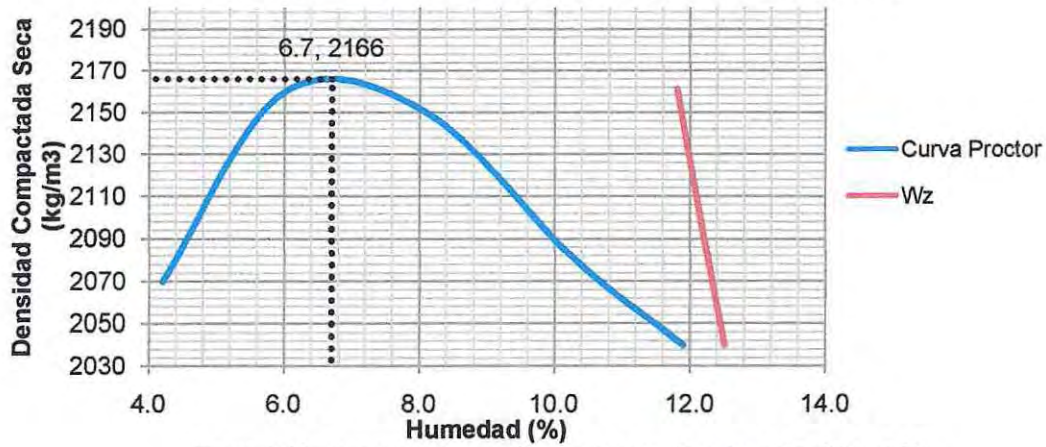


Figura A.18 - Curva proctor modificado y curva de saturación, 85% - 15%

Curvas de Penetración

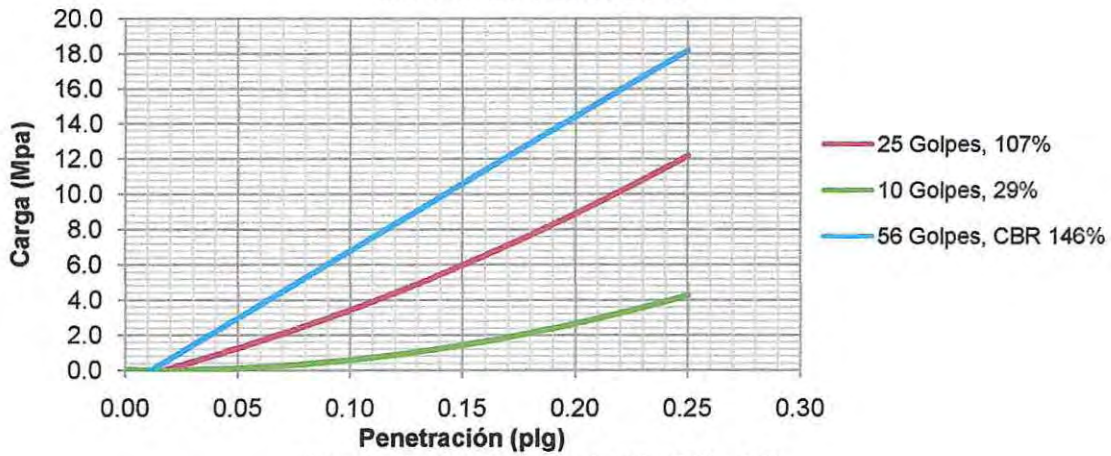


Figura A.19 - Curvas de penetración, 85% - 15%

Curva Capacidad de Soporte CBR

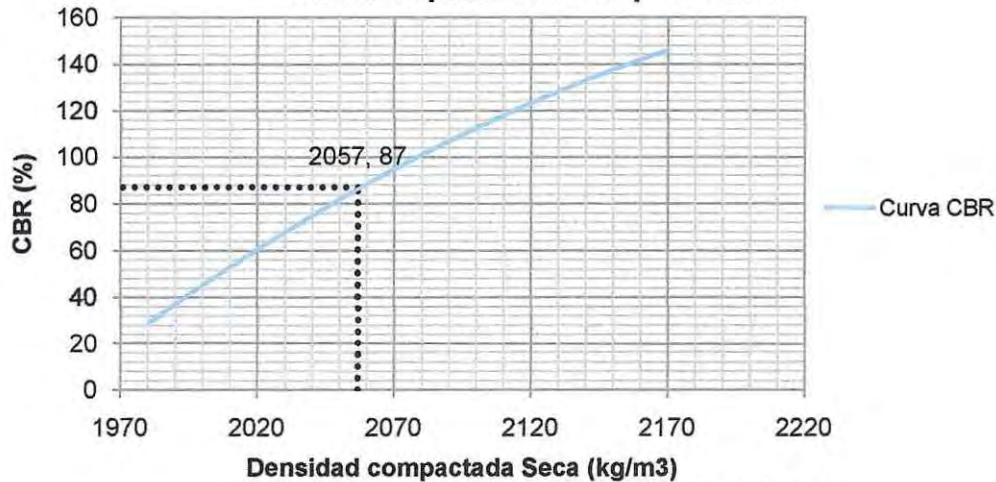


Figura A.20 - Curva capacidad de soporte CBR, 85% - 15%

Mezcla 80% base granular y 20% arena-limosa

Granulometría

Peso muestra total seca a tamizar: 16034 (gr)

Peso seco retenido en 5 mm: 7695 (gr)

Peso seco lavado retenido en 5 mm: 7647 (gr)

Peso seco inicial pasa 5 mm: 8349 (gr)

Peso seco cuarteo pasa 5 mm: 599.6 (gr)

Peso seco cuarteo lavado 5 mm: 557.3 (gr)

Tabla A.26 - Cálculo granulometría, 80% - 20%

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
50	2"			
40	1 1/2"	0	0	100
25	1"	820	5.1	95
20	3/4"	1990	12.4	82
10	3/8"	2998	18.7	64
5	N°4	1733	10.8	53
Residuo		102		

Abertura (mm)	Tamiz	Retenido		Pasa (%)
		Peso (gr)	(%)	
2	N°10	201.1	17.5	36
0.5	N°49	240	20.8	15
0.08	N°200	109	9.5	5
Residuo		7.2		

Cubicidad de Partículas

Tabla A.27 - Cubicidad de partículas, 80% - 20%

Sobre 20 mm	(gr)	(%)
Peso muestra total	860	100
peso material chancado	530	61.6
Peso material rodado	330	38.4
Peso laja chancada	-	-
Peso laja rodada	-	-
Bajo 20 mm y sobre 5 mm	(gr)	(%)
Peso muestra total	1031	100
peso material chancado	829	80.4
Peso material rodado	182	19.6
Peso laja chancada	20	1.9
Peso laja rodada	-	-
Cubicidad total		(%)
Porcentaje material chancado		74
Porcentaje material rodado		26
Porcentaje laja		1

$P_{20} = 0.36$

$P_5 = 0.64$

Límites de Atterberg

El Límite líquido y Límite plástico son indeterminados

Proctor Modificado

Tabla A.28 - Cálculo densidades-humedad y densidad de partículas sólidas, 80% - 20%

Datos de Compactación										
Determinación	1		2		3		4		5	
Molde	z1		z1		z1		z1		z1	
Humedad Agregada	4.0		6.0		8.0		10.0		12.0	
Agua Agregada	280		420		560		700		840	
Humedad Real	4.1		6.3		7.9		9.6		11.7	
Peso Molde + Material	7404		7652		7710		7641		7615	
Peso Molde Solo	2768		2768		2768		2768		2768	
Peso Material Solo	4636		4884		4942		4873		4847	
Volumen del Molde	2124		2124		2124		2124		2124	
Densidad Comp. Húmeda	2183		2299		2327		2294		2282	
Densidad Comp. Seca	2100		2160		2160		2090		2040	
Determinación de la Humedad										
Hum. Aparente	4		6		8		10		12	
Cápsula	4.0	10.3	j	113.0	f	p	o	100 d	a	uy
Peso Cáp.	78.6	97.4	93.4	96.0	90.7	88.5	95.6	97.0	91.4	77.8
Cáp+S.Húm.	754.4	925.4	661.0	890.2	835.5	755.7	1045.4	785.4	1000.5	998.3
Cáp+S.Seco	726.5	894.8	627.5	843.2	781.1	705.9	962.1	725.1	905.8	901.6
Agua	27.9	30.6	33.5	47.0	54.4	49.8	83.3	60.3	94.7	96.7
Peso S. Seco	647.9	797.4	534.1	747.2	696.1	623.4	866.5	628.1	814.4	823.8
Hum. Real	4.3	3.8	6.3	6.3	7.8	8.0	9.6	9.6	11.6	11.7
Promedio	4.1		6.3		7.9		9.6		11.7	
Densidad de Partículas Sólidas de los gruesos										
Peso sumergido	3575									(gr)
Peso seco	5582									(gr)
Densidad Gsg	2781									(kg/m ³)
Densidad de Partículas Sólidas de los finos										
Peso Matraz + Agua	665.3									(gr)
Peso Seco	85									(gr)
Peso Total Matraz	719.8									(gr)
Densidad Gsf	2787									(kg/m ³)
Densidad de Partículas										
% que pasa por tamiz 5 mm	45									(gr)
% retenido por tamiz 5 mm	55									(gr)
Densidad Gs	2784									(kg/m ³)
Densidad del agua	1000									(kg/m ³)
Índice de huecos	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	(%)	
Porosidad	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	(%)	
Humedad de Saturación	11.7	11.5	11.4	11.4	11.6	12.0	(%)			

CBR

Tabla A.29 - Cálculo capacidad de soporte CBR, 80% - 20%

Datos de Compactación						
Golpes	56		25		10	
Molde	G		D		I	
Humedad Agregada	7.0		7.0		7.0	
Agua Agregada	490		490		490	
Humedad Real	7.1		6.9		7.1	
Peso Molde + Material	9607		9659		9337	
Peso Molde Solo	4724		4938		4784	
Peso Material Solo	4883		4721		4553	
Volumen del Molde	2119		2130		2134	
Densidad Comp. Húmeda	2304		2216		2134	
Densidad Comp. Seca	2150		2070		1990	
Determinación de la Humedad						
	1		2		3	
Capsula	U	100.0	E	103.0	F	P
Peso Cáp.	90.2	78.2	94.1	97.3	90.6	88.5
Peso Cáp. + Suelo Húmedo	695.7	727.4	889.5	779.6	749.6	663.3
Peso Cáp. + Suelo Seco	654.7	685.4	840.6	733.9	706.2	625.0
Agua	41.0	42.0	48.9	45.7	43.4	38.3
Peso Suelo Seco	564.5	607.2	746.5	636.6	615.6	536.5
Humedad Real	7.3	6.9	6.6	7.2	7.1	7.1
Promedio	7.1		6.9		7.1	
Datos de Penetración						
56 Golpes		25 Golpes		10 Golpes		
Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	Penetración (plg)	Carga (MPa)	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.025	0.8	0.025	0.6	0.025	0.8	
0.050	2.3	0.050	1.6	0.050	1.3	
0.075	3.9	0.075	2.6	0.075	1.8	
0.100	5.7	0.100	3.8	0.100	2.3	
0.125	7.5	0.125	4.7	0.125	2.8	
0.150	8.8	0.150	5.9	0.150	3.4	
0.175	10.1	0.175	6.8	0.175	3.9	
0.200	11.9	0.200	7.7	0.200	4.4	
0.225	13.5	0.225	8.5	0.225	4.8	
0.250	15.3	0.250	9.6	0.250	5.1	
0.275		0.275		0.275		
0.300		0.300		0.300		

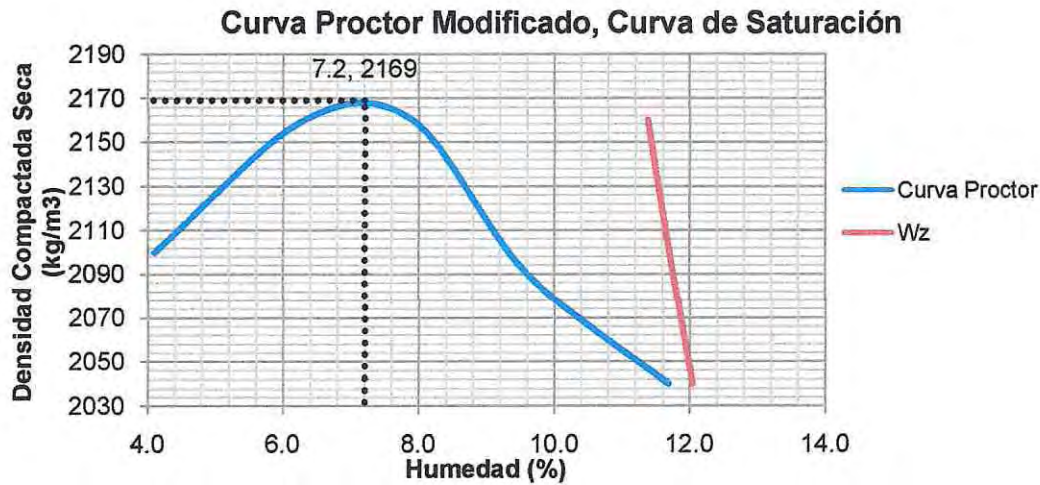


Figura A.21 - Curva proctor modificado y curva de saturación, 80% - 20%

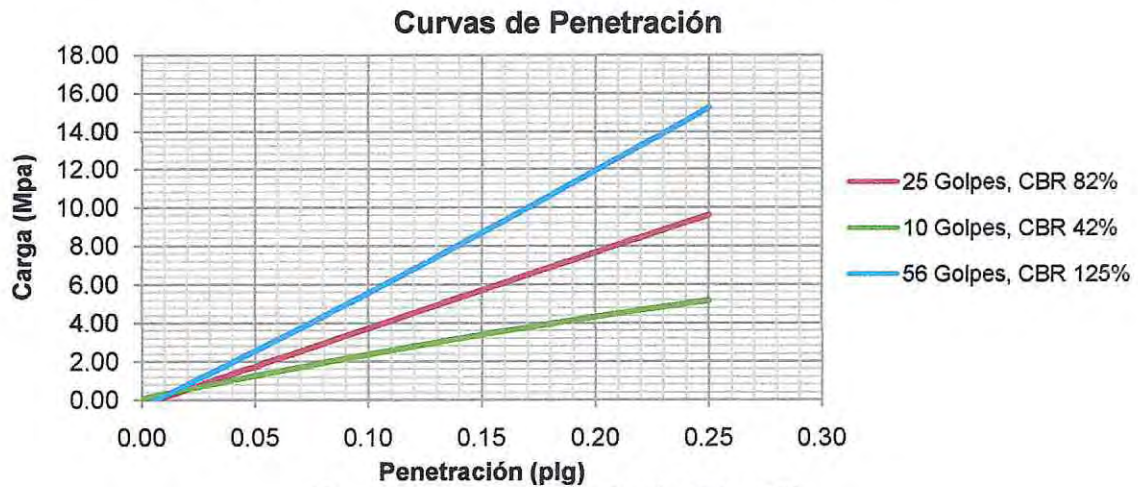


Figura A.22 - Curvas de penetración, 80% - 20%

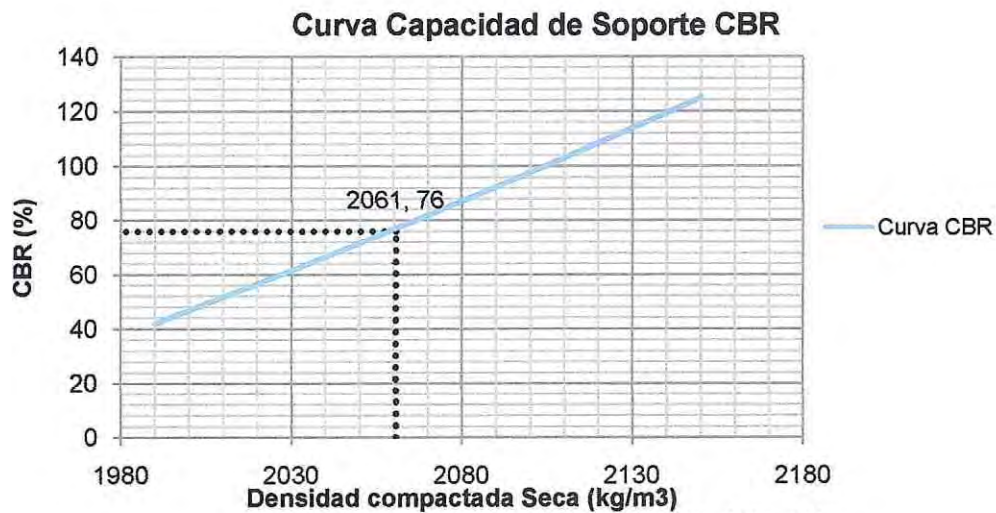


Figura A.23 - Curva capacidad de soporte CBR, 80% - 20%

ANEXO B: Coeficiente de permeabilidad y Coeficiente de Drenaje

1. Ensayo de Permeabilidad a Carga Constante

Se compactan los moldes al 95% de la Densidad Máxima Compactada Seca, valor establecido bajo el ensayo de Proctor Modificado (ver Anexo A).

Base granular

Tabla B.1 - Datos ensayo, base granular

ΔH (cm)	Vol. (cm ³)	t (s)	T(°C)
4	100.05	162.45	15.00
4	99.93	161.98	15.00
4	99.98	162.15	14.90
6	75.15	100.56	14.50
6	75.20	100.68	14.50
6	75.15	100.70	14.50
8	63.87	40.88	14.50
8	63.75	40.45	14.50
8	63.80	40.60	14.50
10	45.60	21.55	14.50
10	45.52	22.21	14.50
10	45.57	21.29	14.50
12	30.12	10.11	14.00
12	30.10	10.05	14.00
12	30.15	10.15	14.00

Tabla B.2 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, base granular

Promedios					
ΔH (cm)	Vol. (cm ³)	t (s)	T(°C)	i	v (cm/s)
4	99.99	162.19	14.97	0.342	0.008
6	75.17	100.65	14.50	0.513	0.009
8	63.81	40.64	14.50	0.684	0.020
10	42.23	21.68	14.50	0.855	0.026
12	30.12	10.10	14.00	1.026	0.037

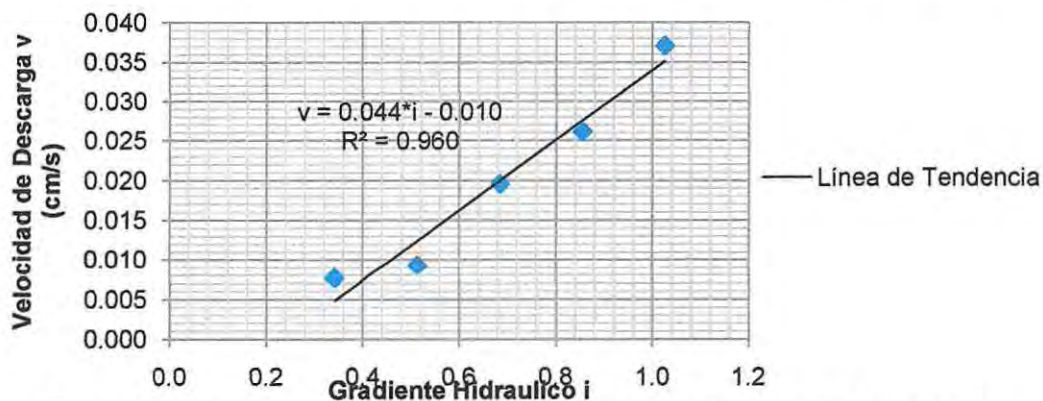


Figura B.1 - Gráfico de dispersión gradiente hidráulico y velocidad de descarga, base granular

Tabla B.3 - Corrección del coeficiente de permeabilidad, base granular

T(°C)	η (kg/m*s)	$k_{\text{corregido}}$ (cm/s)
14.50	0.0011545	0.051
20	0.0010030	

Mezcla con 90% base granular y 10% arena-limosa

Tabla B.4 - Datos ensayo, 90% - 10%

ΔH (cm)	Vol. (cm ³)	t (s)	T(°C)
4	95.00	305.05	14.30
4	95.40	305.47	14.30
4	95.15	305.15	14.30
6	80.93	123.05	15.00
6	81.02	123.58	15.00
6	80.89	123.44	14.70
8	57.12	52.02	14.50
8	57.20	52.22	14.50
8	57.08	52.30	14.50
10	37.40	22.56	14.20
10	37.20	22.18	14.20
10	37.27	22.29	14.00
12	30.22	15.33	14.50
12	30.14	15.15	14.50
12	30.14	15.17	14.50

Tabla B.5 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, 90% - 10%

Promedios					
ΔH (cm)	Vol. (cm ³)	t (s)	T(°C)	i	v (cm/s)
4	95.18	305.22	14.30	0.342	0.004
6	80.95	123.36	14.50	0.513	0.008
8	57.13	52.18	14.50	0.684	0.014
10	37.29	22.34	14.13	0.855	0.021
12	30.17	15.22	14.50	1.026	0.025

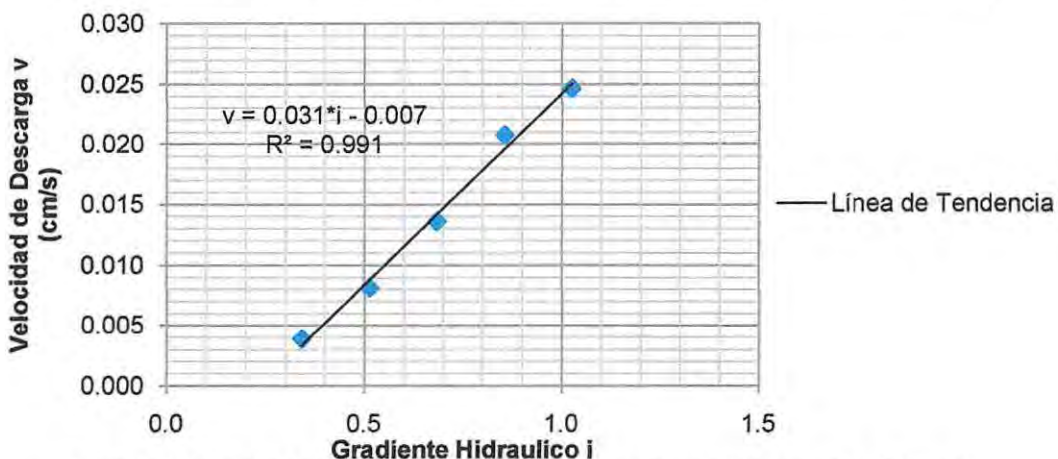


Figura B.2 - Gráfico de dispersión gradiente hidráulico y velocidad de descarga, 90% - 10%

Tabla B.6 - Corrección del coeficiente de permeabilidad, 90% - 10%

T(°C)	η (kg/m*s)	$k_{\text{corregido}}$ (cm/s)
14.39	0.0011557	0.036
20	0.0010030	

Mezcla con 85% base granular y 15% arena-limosa

Tabla B.7 - Datos ensayo, 85% - 15%

ΔH (cm)	Vol. (cm ³)	t (s)	T(°C)
4	117.97	424.18	14.30
4	118.12	424.45	14.30
4	118.05	424.35	14.30
6	102.08	177.22	14.50
6	102.16	177.47	14.50
6	102.03	177.54	14.50
8	80.50	90.05	14.50
8	81.01	90.58	14.50
8	80.76	90.15	14.50
10	38.15	37.36	14.70
10	38.10	37.28	14.70
10	38.13	37.30	14.70
12	30.26	23.15	15.00
12	30.56	23.44	15.00
12	30.41	23.40	15.00

Tabla B.8 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, 85% - 15%

Promedios					
ΔH (cm)	Vol. (cm ³)	t (s)	T(°C)	i	v (cm/s)
4	118.05	424.33	14.30	0.342	0.003
6	102.09	177.41	14.50	0.513	0.007
8	80.76	90.26	14.50	0.684	0.011
10	38.13	37.31	14.70	0.855	0.013
12	30.26	23.15	15.00	1.026	0.016

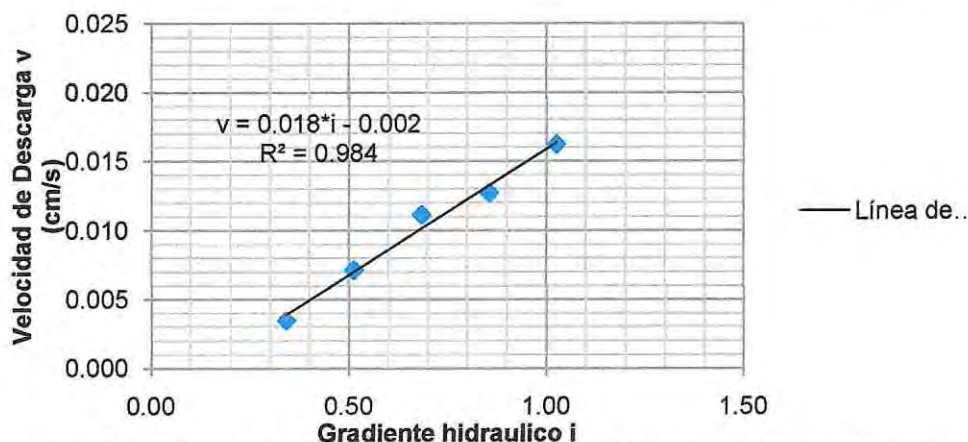


Figura B.3 - Gráfico de dispersión gradiente hidráulico y velocidad de descarga, 85% - 15%

Tabla B.9 - Corrección del coeficiente de permeabilidad, 85% -15%

T(°C)	η (kg/m*s)	$k_{\text{corregido}}$ (cm/s)
14.54	0.0011557	0.021
20.00	0.0010030	

Mezcla con 80% base granular y 20% arena-limosa

Tabla B.10 - Datos ensayo, 80% - 20%

ΔH (cm)	Vol. (cm ³)	t (s)	T(°C)
4	117.32	2400.87	15.0
4	117.26	2400.96	15.0
4	117.28	2401.02	14.9
6	82.53	480.45	15.0
6	82.56	480.37	15.0
6	82.55	480.36	14.7
8	61.05	198.22	14.5
8	61.10	198.10	14.5
8	61.07	198.13	14.5
10	42.38	80.50	14.2
10	42.42	80.56	14.2
10	42.34	80.47	14.0
12	32.50	43.65	14.0
12	32.43	43.45	14.0
12	32.00	43.58	14.0

Tabla B.11 - Gradiente hidráulico y velocidad de descarga, 80% - 20%

Promedios					
ΔH (cm)	Vol. (cm ³)	t (s)	T(°C)	i	v (cm/s)
4	117.29	2400.95	14.97	0.342	0.001
6	82.55	480.39	14.90	0.513	0.002
8	61.07	198.15	14.50	0.684	0.004
10	42.38	80.51	14.13	0.855	0.007
12	32.31	43.56	14.00	1.026	0.009

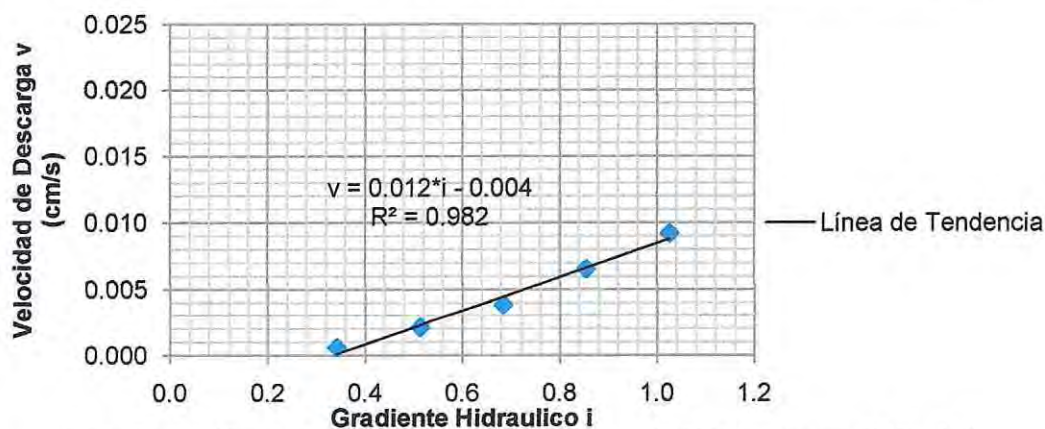


Figura B.4 - Gráfico de dispersión gradiente hidráulico y velocidad de descarga, 80% - 20%

Tabla B.12 - Corrección del coeficiente de permeabilidad, 80% - 20%

T(°C)	η (kg/m*s)	$K_{\text{corregido}}$ (cm/s)
14.50	0.0011545	0.014
20.00	0.0010030	

Tabla B.13 - Densidad y viscosidad cinética del agua con respecto a la temperatura

T °C	δ gr/cm ³	η kg/m*s
12	0.99958	0.001236
13	0.99946	0.001202
14	0.99933	0.001170
14.2	0.99930	0.0011638
14.3	0.99929	0.0011607
14.4	0.99927	0.0011576
14.5	0.99926	0.0011545
14.6	0.99925	0.0011514
14.7	0.99923	0.0011483
14.8	0.99922	0.0011452
14.9	0.99920	0.0011421
15	0.99919	0.001139
16	0.99993	0.001109
20	0.99829	0.001003

2. Determinación del Coeficiente de Drenaje.

Datos geométricos del tramo Ruta 68 - Acceso a Colliguay

- Pendiente Longitudinal: 0.02 m/m
- Pendiente Transversal: 0.025 m/m
- Ancho base granular: 6 m
- Espesor Base granular: 0.15 m

Tabla B.14 - Valores característicos de cada mezcla

	100%	90% - 10%	85% - 15%	80% - 20%
DMCS (gr/cm^3)	2.158	2.163	2.165	2.169
95%DMCS (gr/cm^3)	2.050	2.055	2.057	2.061
G_s (gr/cm^3)	2.769	2.776	2.779	2.784
W_s (gr)	2.050	2.055	2.057	2.061
V_t (cm^3)	1.000	1.000	1.000	1.000
V_s (cm^3)	0.740	0.740	0.740	0.740
$N_{e \text{ máx.}}$ (cm^3)	0.260	0.260	0.260	0.260
N_e (cm^3)	0.104	0.104	0.104	0.104
k (m/día)	44.064	31.104	18.000	12.096

Cálculo de variables

Utilizando las ecuaciones 6.1, 6.2 y 6.3 es posible obtener los siguientes valores,

- Longitud Resultante = 0.032 m.
- Pendiente Resultante = 7.684 mm/m.
- Factor de Pendiente = 1.64.

Con la obtención del factor de pendiente es posible ingresar a la figura 6.3 y obtener el factor de tiempo para un drenaje del 50%. El factor m se obtiene según la ecuación 6.8.

Tabla B.15 - Tiempo necesario para drenar el 50% de agua de cada mezcla

	100%	90% - 10%	85% - 15%	80% - 20%
T50	0.170	0.170	0.170	0.170
m	0.928	1.315	2.272	3.380
t' (horas)	3.785	5.364	9.272	13.791

Mediante la obtención de los factores m y T50 es posible obtener el tiempo de evacuación

El porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximas a la saturación se obtiene tomando en cuenta una cantidad de 18 días lluvias que pueden drenar hasta el 85% del grado de saturación en 24 horas.

Mediante la tabla 6.2 e iterando la tabla 6.3 es posible obtener los coeficientes de drenajes de cada muestra.

Tabla B.16 - Coeficiente de drenaje de cada mezcla

	100%	90% - 10%	85% - 15%	80% - 20%
Coef. de Drenaje (m_i)	1.15	1.15	1.15	1.15

ANEXO C: Ensayo Triaxial Cíclico Dinámico (TMS)

Según la granulometría obtenida para cada mezcla, todas se clasifican como material tipo 1 según el método de ensayo AASTHO T 307-99 (2007), lo que implica que los materiales se compactaron en un molde de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura.

Se compactan los moldes al 95% de la Densidad Máxima Compactada Seca, valor establecido bajo el ensayo de Proctor Modificado (ver Anexo A).

Base Granular

Tabla C.1 - Datos ensayo triaxial, base granular

σ_3 (kpa)	σ_d Nominal (kpa)	σ_d Aplicado (kpa)	$\Delta\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	θ (kpa)	θ (kpa)	M_R (kpa)	M_R (Mpa)
20.68	20.68	18.63	0.00010		80.69		186326.35	
20.68	20.68	19.35	0.00010		81.41		193528.35	
20.68	20.68	19.39	0.00010	0.00010	81.45	81.36	193920.62	193.04
20.68	20.68	19.42	0.00010		81.47		194177.55	
20.68	20.68	19.73	0.00010		81.78		197264.69	
20.68	41.37	39.23	0.00023		101.28		170550.43	
20.68	41.37	40.21	0.00023		102.26		174814.20	
20.68	41.37	39.74	0.00023	0.00023	101.80	101.77	172796.58	172.68
20.68	41.37	39.39	0.00023		101.45		171269.95	
20.68	41.37	40.01	0.00023		102.06		173955.33	
20.68	62.05	61.92	0.00041		123.98		151034.85	
20.68	62.05	61.93	0.00041		123.98		151037.72	
20.68	62.05	61.97	0.00041	0.00041	124.02	124.05	151139.61	151.20
20.68	62.05	62.24	0.00041		124.29		151799.77	
20.68	62.05	61.91	0.00041		123.96		151001.48	
34.47	34.47	35.84	0.00021		139.26		170675.16	
34.47	34.47	35.45	0.00021		138.87		168823.63	
34.47	34.47	36.14	0.00021	0.00021	139.56	139.18	172083.31	170.29
34.47	34.47	35.43	0.00021		138.85		168704.94	
34.47	34.47	35.95	0.00021		139.37		171172.74	
34.47	68.95	68.98	0.00039		172.40		176862.93	
34.47	68.95	68.96	0.00039		172.38		176827.23	
34.47	68.95	68.79	0.00039	0.00039	172.21	172.37	176388.69	176.78
34.47	68.95	69.09	0.00039		172.52		177163.42	
34.47	68.95	68.91	0.00039		172.33		176682.26	
34.47	103.42	107.12	0.00055		210.55		194771.57	
34.47	103.42	107.21	0.00055		210.63		194930.26	
34.47	103.42	107.31	0.00055	0.00055	210.73	210.78	195105.08	195.19
34.47	103.42	107.57	0.00055		210.99		195577.52	
34.47	103.42	107.55	0.00055		210.98		195552.89	
68.95	68.95	68.65	0.00025		275.49		274586.20	
68.95	68.95	70.31	0.00025		277.16		281246.88	
68.95	68.95	69.29	0.00025	0.00025	276.13	276.15	277153.41	277.22
68.95	68.95	68.97	0.00025		275.81		275867.30	
68.95	68.95	69.32	0.00025		276.16		277271.14	
68.95	137.90	148.72	0.00059		355.57		252071.86	
68.95	137.90	148.39	0.00059		355.24		251510.34	
68.95	137.90	148.54	0.00059	0.00059	355.38	355.40	251762.42	251.79
68.95	137.90	148.73	0.00059		355.57		252079.03	

68.95	137.90	148.39	0.00059		355.24		251515.64	
68.95	206.84	221.79	0.00086		428.63		257894.14	
68.95	206.84	222.27	0.00086		429.11		258449.59	
68.95	206.84	222.06	0.00086	0.00086	428.90	428.86	258205.48	258.16
68.95	206.84	221.97	0.00086		428.81		258101.77	
68.95	206.84	222.02	0.00086		428.86		258157.78	
103.42	68.95	71.24	0.00023		381.51		309740.31	
103.42	68.95	71.14	0.00023		381.41		309320.78	
103.42	68.95	71.08	0.00023	0.00023	381.35	381.35	309057.85	309.07
103.42	68.95	71.19	0.00023		381.45		309502.14	
103.42	68.95	70.77	0.00023		381.04		307708.48	
103.42	103.42	110.15	0.00040		420.41		275366.56	
103.42	103.42	110.24	0.00040		420.51		275606.34	
103.42	103.42	110.66	0.00040	0.00040	420.93	420.56	276661.98	275.74
103.42	103.42	110.17	0.00040		420.44		275431.61	
103.42	103.42	110.26	0.00040		420.53		275657.09	
103.42	206.84	219.83	0.00068		530.09		323275.93	
103.42	206.84	219.83	0.00068		530.10		323281.35	
103.42	206.84	220.15	0.00068	0.00068	530.42	530.15	323748.96	323.36
103.42	206.84	219.79	0.00068		530.06		323223.10	
103.42	206.84	219.83	0.00068		530.10		323286.05	
137.90	103.42	110.24	0.00027		523.93		408308.54	
137.90	103.42	110.02	0.00027		523.71		407472.41	
137.90	103.42	110.02	0.00027	0.00027	523.71	523.80	407472.90	407.80
137.90	103.42	110.29	0.00027		523.98		408471.67	
137.90	103.42	109.97	0.00027		523.66		407296.69	
137.90	137.90	146.24	0.00039		559.93		374982.81	
137.90	137.90	146.30	0.00039		559.99		375132.49	
137.90	137.90	146.43	0.00039	0.00039	560.12	560.10	375463.94	375.42
137.90	137.90	146.49	0.00039		560.18		375627.38	
137.90	137.90	146.59	0.00039		560.28		375880.47	
137.90	275.79	240.43	0.00060		654.12		400714.13	
137.90	275.79	240.42	0.00060		654.11		400702.72	
137.90	275.79	240.57	0.00060	0.00060	654.26	654.15	400958.12	400.77
137.90	275.79	240.43	0.00060		654.12		400713.79	
137.90	275.79	240.45	0.00060		654.13		400743.62	

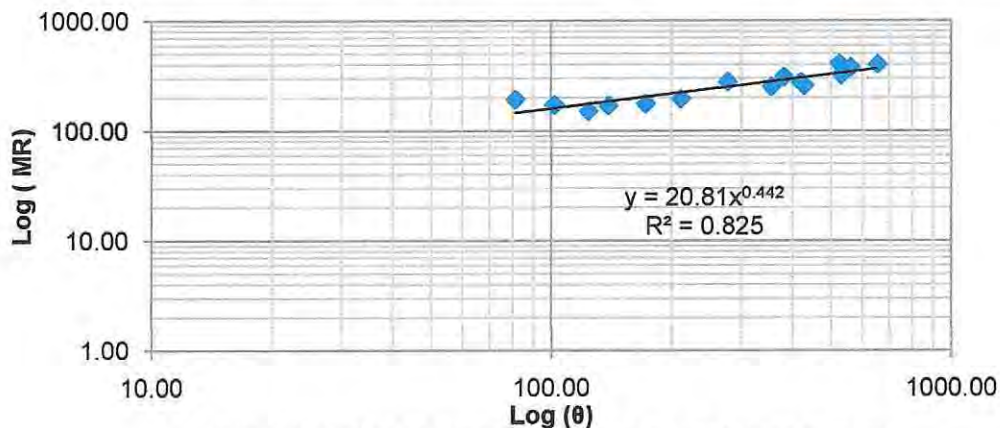


Figura C.1 - Gráfico de dispersión log (θ) vs log (MR), base granular

Mezcla con 90% Base Granular y 10% Arena-Limosa

Tabla C.2 - Datos ensayo triaxial, 90% - 10%

σ_3 (kpa)	σ_d Nominal (kpa)	σ_d Aplicado (kpa)	$\Delta\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	θ (kpa)	θ (kpa)	M_R (kpa)	M_R (Mpa)
20.68	20.68	19.10	0.00013		81.15		146898.38	
20.68	20.68	19.34	0.00013		81.40		148758.20	
20.68	20.68	19.62	0.00013	0.00013	81.67	81.38	150882.74	148.65
20.68	20.68	19.38	0.00013		81.43		149022.92	
20.68	20.68	19.20	0.00013		81.26		147694.80	
20.68	41.37	40.07	0.00028		102.12		140637.48	
20.68	41.37	40.07	0.00028		102.12		140637.48	
20.68	41.37	40.72	0.00028	0.00029	102.78	102.23	142940.96	140.07
20.68	41.37	40.07	0.00028		102.12		140637.48	
20.68	41.37	39.96	0.00029		102.02		135517.00	
20.68	62.05	61.24	0.00043		123.29		142686.99	
20.68	62.05	61.07	0.00043		123.12		142284.62	
20.68	62.05	60.10	0.00043	0.00043	122.15	123.05	140031.28	142.11
20.68	62.05	61.07	0.00043		123.12		142284.85	
20.68	62.05	61.48	0.00043		123.54		143250.43	
34.47	34.47	34.09	0.00021		137.51		165014.69	
34.47	34.47	33.71	0.00021		137.13		163175.82	
34.47	34.47	33.16	0.00021	0.00021	136.58	137.02	160500.59	162.64
34.47	34.47	33.44	0.00021		136.86		161838.21	
34.47	34.47	33.61	0.00021		137.03		162674.10	
34.47	68.95	68.29	0.00042		171.71		164429.87	
34.47	68.95	68.56	0.00042		171.99		165095.30	
34.47	68.95	68.53	0.00042	0.00042	171.95	171.92	165011.94	164.93
34.47	68.95	68.67	0.00042		172.09		165344.65	
34.47	68.95	68.43	0.00042		171.85		164762.58	
34.47	103.42	108.87	0.00065		212.30		168378.48	
34.47	103.42	108.77	0.00065		212.19		168218.02	
34.47	103.42	109.05	0.00065	0.00065	212.47	212.42	168645.87	168.57
34.47	103.42	109.15	0.00065		212.57		168806.33	
34.47	103.42	109.15	0.00065		212.57		168806.33	
68.95	68.95	68.39	0.00030		275.24		226311.65	
68.95	68.95	67.56	0.00030		274.41		223568.26	
68.95	68.95	67.84	0.00030	0.00030	274.68	274.81	224482.72	224.89
68.95	68.95	68.01	0.00030		274.86		225054.18	
68.95	68.95	68.01	0.00030		274.86		225054.18	
68.95	137.90	146.97	0.00064		353.82		229752.01	
68.95	137.90	146.90	0.00064		353.75		229643.63	
68.95	137.90	146.87	0.00064	0.00064	353.71	353.75	229590.13	229.65
68.95	137.90	146.90	0.00064		353.75		229644.55	
68.95	137.90	146.90	0.00064		353.75		229644.55	
68.95	206.84	220.37	0.00094		427.22		234737.96	
68.95	206.84	220.54	0.00094		427.39		234921.81	
68.95	206.84	220.51	0.00094	0.00094	427.35	427.43	234885.25	234.97
68.95	206.84	220.75	0.00094		427.60		235143.06	
68.95	206.84	220.75	0.00094		427.60		235143.06	
103.42	68.95	69.74	0.00027	0.00027	380.00	380.11	260704.38	261.12
103.42	68.95	69.67	0.00027		379.94		260446.29	

103.42	68.95	70.05	0.00027		380.32		261866.52	
103.42	68.95	69.91	0.00027		380.18		261349.97	
103.42	68.95	69.88	0.00027		380.14		261220.93	
103.42	103.42	110.95	0.00043		421.21		255399.80	
103.42	103.42	110.91	0.00043		421.18		255320.33	
103.42	103.42	110.81	0.00043	0.00043	421.07	420.94	255083.29	254.76
103.42	103.42	109.74	0.00043		420.00		252618.54	
103.42	103.42	110.95	0.00043		421.21		255400.02	
103.42	206.84	221.65	0.00079		531.92		279614.10	
103.42	206.84	221.65	0.00079		531.92		279613.98	
103.42	206.84	221.58	0.00079	0.00079	531.85	531.82	279526.89	279.49
103.42	206.84	221.51	0.00079		531.78		279439.55	
103.42	206.84	221.37	0.00079		531.64		279264.86	
137.90	103.42	111.26	0.00038		524.94		293707.87	
137.90	103.42	111.26	0.00038		524.94		293707.61	
137.90	103.42	111.08	0.00038	0.00038	524.77	524.84	293251.71	293.43
137.90	103.42	111.08	0.00038		524.77		293251.71	
137.90	103.42	111.08	0.00038		524.77		293251.71	
137.90	137.90	148.35	0.00047		562.04		318492.54	
137.90	137.90	148.11	0.00047		561.80		317972.94	
137.90	137.90	148.11	0.00047	0.00047	561.80	561.90	317972.94	318.18
137.90	137.90	148.22	0.00047		561.90		318195.90	
137.90	137.90	148.25	0.00047		561.94		318270.00	
137.90	275.79	241.96	0.00071		655.65		341993.16	
137.90	275.79	242.10	0.00071		655.79		342188.32	
137.90	275.79	242.06	0.00071	0.00071	655.75	655.77	342139.53	342.17
137.90	275.79	242.10	0.00071		655.79		342188.32	
137.90	275.79	242.20	0.00071		655.89		342334.84	

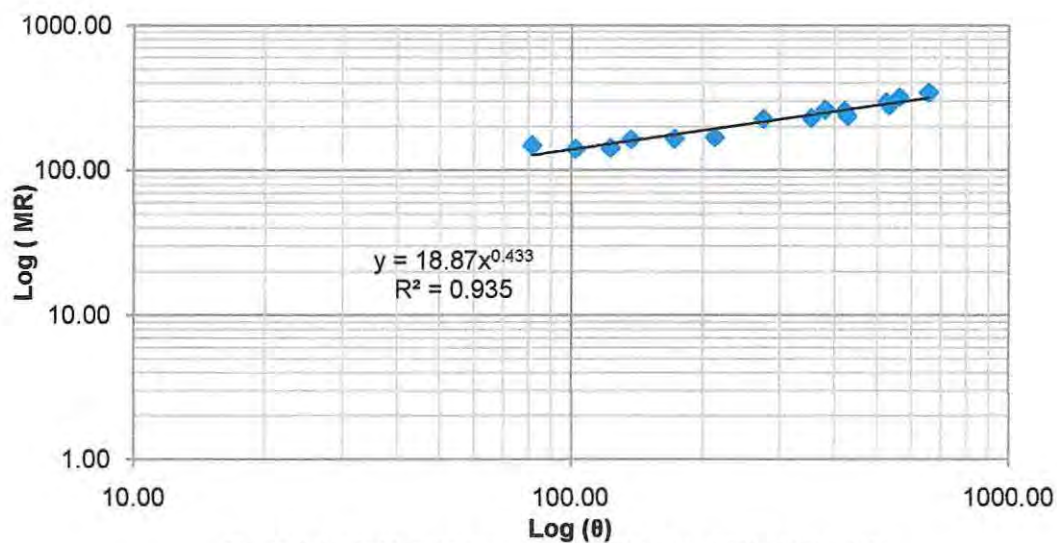


Figura C.2 - Gráfico de dispersión log (θ) vs log (MR), 90% - 10%

Mezcla con 85% base granular y 15% arena-limosa

Tabla C.3 - Datos ensayo triaxial, 85% - 15%

σ_3 (kpa)	σ_d Nominal (kpa)	σ_d Aplicado (kpa)	$\Delta\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	θ (kpa)	θ (kpa)	M_R (kpa)	M_R (Mpa)
20.68	20.68	18.63	0.00014		80.69		133090.25	
20.68	20.68	19.61	0.00014		81.67		140095.00	
20.68	20.68	19.61	0.00014	0.00014	81.67	81.47	140095.00	138.69
20.68	20.68	19.61	0.00014		81.67		140095.00	
20.68	20.68	19.61	0.00014		81.67		140095.00	
20.68	41.37	41.07	0.00028		103.12		146676.31	
20.68	41.37	41.59	0.00028		103.64		148526.62	
20.68	41.37	41.35	0.00028	0.00028	103.40	103.32	147663.28	147.39
20.68	41.37	41.17	0.00028		103.23		147046.51	
20.68	41.37	41.17	0.00028		103.23		147046.16	
20.68	62.05	63.83	0.00046		125.89		138764.95	
20.68	62.05	64.25	0.00046		126.30		139665.88	
20.68	62.05	64.28	0.00046	0.00046	126.33	126.17	139741.14	139.38
20.68	62.05	64.11	0.00046		126.16		139365.71	
20.68	62.05	64.11	0.00046		126.16		139365.71	
34.47	34.47	35.68	0.00021		139.10		169909.08	
34.47	34.47	35.09	0.00021		138.52		167112.79	
34.47	34.47	35.40	0.00021	0.00021	138.83	138.77	168593.12	168.33
34.47	34.47	35.61	0.00021		139.03		169580.33	
34.47	34.47	34.96	0.00021		138.38		166454.81	
34.47	68.95	72.23	0.00044		175.65		164148.61	
34.47	68.95	72.40	0.00044		175.82		164541.10	
34.47	68.95	72.40	0.00044	0.00044	175.82	175.63	164541.10	164.12
34.47	68.95	71.47	0.00044		174.89		162421.53	
34.47	68.95	72.57	0.00044		175.99		164933.59	
34.47	103.42	107.25	0.00063		210.67		170237.68	
34.47	103.42	107.25	0.00063		210.67		170237.84	
34.47	103.42	107.49	0.00063	0.00063	210.91	210.83	170622.17	170.49
34.47	103.42	107.53	0.00063		210.95		170676.80	
34.47	103.42	107.53	0.00063		210.95		170676.80	
68.95	68.95	73.23	0.00034		280.07		215373.65	
68.95	68.95	73.19	0.00034		280.04		215272.12	
68.95	68.95	73.23	0.00034	0.00034	280.07	280.04	215373.94	215.29
68.95	68.95	73.09	0.00034		279.93		214967.25	
68.95	68.95	73.26	0.00034		280.11		215475.46	
68.95	137.90	149.46	0.00066		356.30		226453.53	
68.95	137.90	149.80	0.00066		356.65		226976.25	
68.95	137.90	149.94	0.00066	0.00066	356.79	356.43	227185.46	226.64
68.95	137.90	149.36	0.00066		356.20		226296.77	
68.95	137.90	149.36	0.00066		356.20		226296.77	
68.95	206.84	217.19	0.00093		424.04		233542.31	
68.95	206.84	216.47	0.00093		423.31		232762.00	
68.95	206.84	216.64	0.00093	0.00093	423.49	423.61	232947.48	233.1
68.95	206.84	216.64	0.00093		423.49		232947.90	
68.95	206.84	216.88	0.00093		423.73		233208.04	
103.42	6.95	73.19	0.00032		383.46		228726.63	
103.42	68.95	73.23	0.00032	0.00032	383.49	383.40	228834.81	228.53
103.42	68.95	72.78	0.00032		383.04		227431.54	
103.42	68.95	73.23	0.00032		383.49		228834.50	

103.42	68.95	73.23	0.00032		383.49		228834.50	
103.42	103.42	109.46	0.00047		419.73		232896.04	
103.42	103.42	109.15	0.00047		419.42		232233.99	
103.42	103.42	109.29	0.00047	0.00047	419.55	419.60	232526.73	232.63
103.42	103.42	109.39	0.00047		419.66		232747.28	
103.42	103.42	109.39	0.00047		419.66		232747.28	
103.42	206.84	215.54	0.00087		525.80		247743.03	
103.42	206.84	215.78	0.00087		526.04		248021.34	
103.42	206.84	216.09	0.00087	0.00087	526.36	526.14	248378.66	248.13
103.42	206.84	215.99	0.00087		526.25		248259.40	
103.42	206.84	215.99	0.00087		526.25		248259.40	
137.90	103.42	108.77	0.00042		522.46		258975.88	
137.90	103.42	109.32	0.00042		523.01		260290.67	
137.90	103.42	109.53	0.00042	0.00042	523.22	523.09	260784.51	260.47
137.90	103.42	109.67	0.00042		523.36		261113.50	
137.90	103.42	109.70	0.00042		523.39		261196.85	
137.90	137.90	143.97	0.00052		557.66		276860.78	
137.90	137.90	143.28	0.00052		556.96		275531.98	
137.90	137.90	144.11	0.00052	0.00052	557.79	557.30	277126.31	276.18
137.90	137.90	143.45	0.00052		557.14		275863.70	
137.90	137.90	143.28	0.00052		556.96		275531.60	
137.90	275.79	238.78	0.00084		652.47		284264.43	
137.90	275.79	239.06	0.00084		652.75		284593.77	
137.90	275.79	238.75	0.00084	0.00084	652.44	652.81	284223.57	284.67
137.90	275.79	239.61	0.00084		653.30		285251.40	
137.90	275.79	239.40	0.00084		653.09		285004.48	

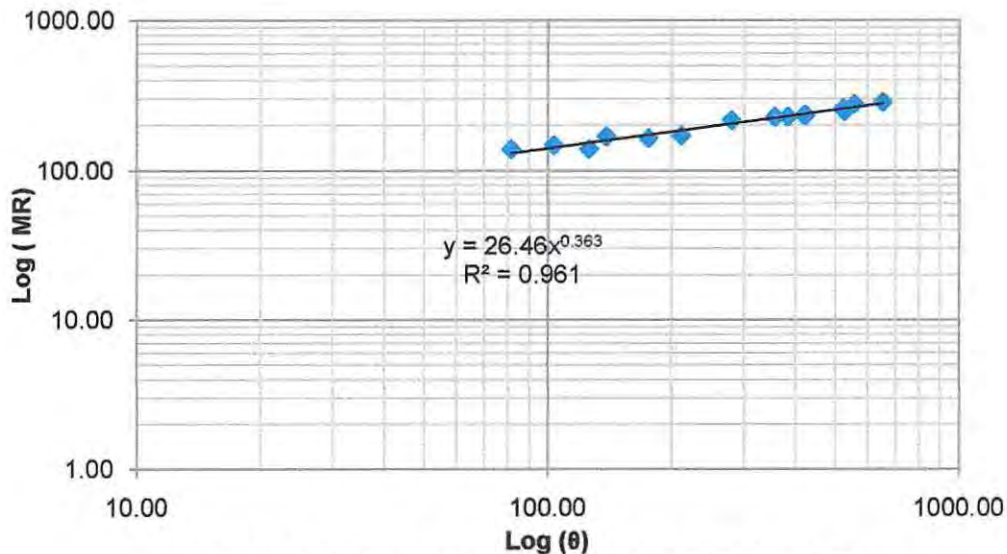


Figura C.3 - Gráfico de dispersión log (θ) vs log (MR), 85% - 15%

Mezcla con 80% base granular y 20% arena-limosa

Tabla C.4 - Datos ensayo triaxial, 80% - 20%

σ_3 (kpa)	σ_d Nominal (kpa)	σ_d Aplicado (kpa)	$\Delta\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	θ (kpa)	θ (kpa)	M_R (kpa)	M_R (Mpa)
20.68	20.68	19.65	0.00017		81.71		115611.17	
20.68	20.68	19.34	0.00017		81.40		113782.52	
20.68	20.68	19.34	0.00017	0.00017	81.40	81.53	113782.52	114.55
20.68	20.68	19.38	0.00017		81.43		113985.58	
20.68	20.68	19.65	0.00017		81.71		115611.17	
20.68	41.37	42.52	0.00025		104.57		170080.26	
20.68	41.37	41.45	0.00025		103.50		165797.11	
20.68	41.37	42.28	0.00025	0.00025	104.33	104.17	169113.33	168.48
20.68	41.37	42.17	0.00025		104.23		168698.70	
20.68	41.37	42.17	0.00025		104.23		168698.70	
20.68	62.05	63.69	0.00050		125.75		127387.60	
20.68	62.05	63.56	0.00050		125.61		127111.25	
20.68	62.05	63.73	0.00050	0.00050	125.78	125.75	127456.64	127.40
20.68	62.05	63.73	0.00050		125.78		127456.64	
20.68	62.05	63.80	0.00050		125.85		127594.72	
34.47	34.47	35.40	0.00024		138.83		147518.98	
34.47	34.47	35.54	0.00024		138.96		148094.72	
34.47	34.47	35.61	0.00024	0.00024	139.03	139.02	148382.79	148.33
34.47	34.47	35.68	0.00024		139.10		148670.45	
34.47	34.47	35.75	0.00024		139.17		148958.52	
34.47	68.95	72.12	0.00047		175.54		153450.49	
34.47	68.95	72.16	0.00047		175.58		153524.15	
34.47	68.95	72.02	0.00047	0.00047	175.44	175.56	153230.16	153.48
34.47	68.95	72.12	0.00047		175.54		153450.49	
34.47	68.95	72.26	0.00047		175.68		153744.49	
34.47	103.42	107.25	0.00067		210.67		160075.41	
34.47	103.42	107.35	0.00067		210.78		160229.10	
34.47	103.42	107.63	0.00067	0.00067	211.05	210.84	160641.86	160.32
34.47	103.42	107.35	0.00067		210.78		160229.10	
34.47	103.42	107.49	0.00067		210.91		160435.48	
68.95	68.95	72.95	0.00037		279.79		197164.02	
68.95	68.95	73.12	0.00037		279.97		197631.03	
68.95	68.95	72.95	0.00037	0.00037	279.79	279.86	197164.02	197.35
68.95	68.95	72.99	0.00037		279.83		197257.58	
68.95	68.95	73.09	0.00037		279.93		197537.74	
68.95	137.90	143.28	0.00067		350.12		213846.15	
68.95	137.90	143.55	0.00067		350.40		214258.47	
68.95	137.90	143.41	0.00067	0.00067	350.26	350.27	214052.09	214.07
68.95	137.90	143.45	0.00067		350.29		214103.76	
68.95	137.90	143.45	0.00067		350.29		214103.91	
68.95	206.84	223.83	0.00101		430.67		221610.39	
68.95	206.84	223.45	0.00101		430.29		221233.56	
68.95	206.84	223.58	0.00101	0.00101	430.43	430.38	221370.46	221.32
68.95	206.84	223.41	0.00101		430.26		221199.38	
68.95	206.84	223.41	0.00101		430.26		221199.38	
103.42	68.95	73.37	0.00033		383.63		222318.84	
103.42	68.95	73.23	0.00033		383.49		221900.12	
103.42	68.95	73.23	0.00033	0.00033	383.49	383.42	221900.12	221.69
103.42	68.95	72.99	0.00033		383.25		221167.30	

103.42	68.95	72.99	0.00033		383.25		221167.30	
103.42	103.42	108.63	0.00050		418.90		217263.98	
103.42	103.42	108.56	0.00050		418.83		217125.90	
103.42	103.42	108.46	0.00050	0.00050	418.73	418.72	216918.19	216.92
103.42	103.42	107.91	0.00050		418.17		215811.81	
103.42	103.42	108.73	0.00050		419.00		217469.92	
103.42	206.84	225.07	0.00096		535.34		234447.68	
103.42	206.84	224.83	0.00096		535.09		234195.67	
103.42	206.84	224.79	0.00096	0.00096	535.06	535.20	234159.61	234.30
103.42	206.84	225.21	0.00096		535.47		234591.72	
103.42	206.84	224.76	0.00096		535.02		234123.86	
137.90	103.42	109.05	0.00049		522.73		222542.31	
137.90	103.42	109.18	0.00049		522.87		222824.50	
137.90	103.42	109.05	0.00049	0.00049	522.73	522.87	222542.31	222.82
137.90	103.42	109.46	0.00049		523.15		223388.68	
137.90	103.42	109.18	0.00049		522.87		222824.50	
137.90	137.90	144.28	0.00062		557.97		232706.90	
137.90	137.90	143.83	0.00062		557.52		231982.00	
137.90	137.90	143.52	0.00062	0.00062	557.21	557.39	231480.60	231.78
137.90	137.90	143.45	0.00062		557.14		231368.93	
137.90	137.90	143.45	0.00062		557.14		231368.93	

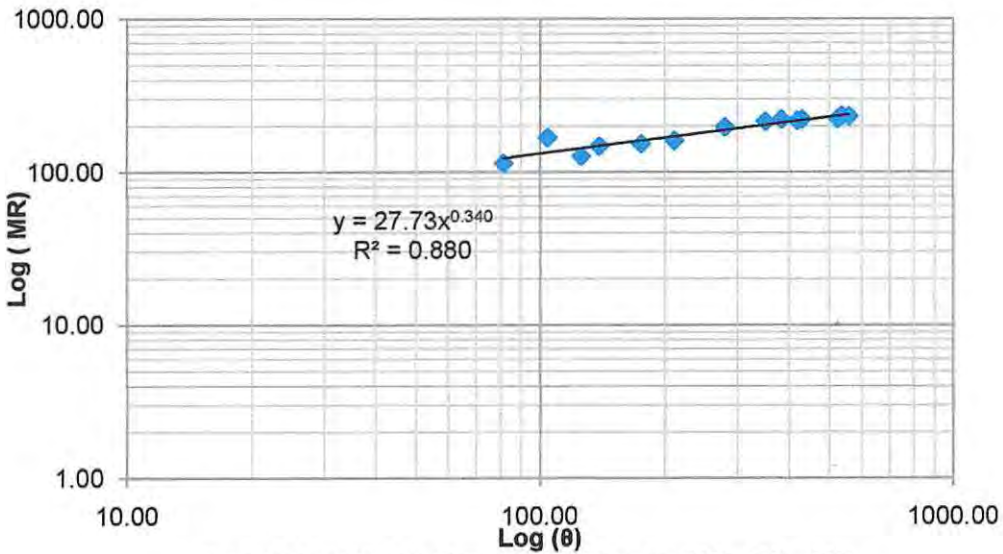


Figura C.4 - Gráfico de dispersión log (θ) vs log (MR), 80% - 20%

- El Módulo de Resiliencia Efectivo será el promedio de todos los Módulos obtenidos en cada ensayo.

ANEXO D: Diseño Estructural

Caso N° 1, Diseño Estructural con Mezcla Máxima a través del Módulo de Resiliencia Teórico

Para la nueva base granular se considera una capacidad de soporte CBR compactado al 95% de la Densidad Máxima Compactada Seca y con un 0.2" de Penetración. El material presenta un Coeficiente de Drenaje de 1.15.

Tabla D.1 - Características base granular con 15% de arena-limosa

Material	CBR (%)	a2	log(Mr)	Mr _T (psi)	Mr _T (MPa)
85%– 15%	87	0.134	4.46	28855	198.86

$$\frac{M_R \text{ Base Granular}}{M_R \text{ Sub-base Granular}} = \frac{198.96}{112} = 1.8 < 4, \text{ se acepta la utilización de materiales empleados.}$$

$$\frac{M_R \text{ Sub-base Granular}}{M_R \text{ Subrasante}} = \frac{112}{76.83} = 1.5 < 4, \text{ se acepta la utilización de materiales empleados.}$$

Iterando la ecuación 7.1 se obtienen los siguientes Números Estructurales,

NE₁: 62.49 (mm), calculado a partir del Módulo Resiliente de la Base Granular

NE₂: 76.76 (mm), calculado a partir del Módulo Resiliente de la Sub-base Granular.

NE₃: 87.52 (mm), calculado a partir del Módulo Resiliente de la Subrasante.

Determinación de espesores

1. Espesores Capa Asfáltica

Tabla D.2 - Determinación espesores capas asfálticas, caso N°1

Capas	Coef. Estructural	Espesor (mm)	Número Estructural Parcial (mm)
C. Asfáltico de Superficie	0.43	50	21.50
C. Asfáltico, Capa Interm.	0.41	55	22.55
Base Asfáltica Grad. Gruesa	0.33	60	19.80
Total		165	63.85

El Número Estructural total es de 63.85 (mm) siendo mayor al Número Estructural 1 que tiene 62.49 (mm), por lo que se aceptan los espesores de las Capas Asfálticas

2. Espesor Base Granular

Tabla D.3 - Determinación espesores capa base granular, caso N°1

Capa	Coef. Estructural	Espesor (mm)	Número Estructural Parcial (mm)
Base Granular	0.134	83.78	12.91
Base Granular	0.134	150	23.12

El espesor estimado en primer lugar es muy bajo por lo que se adopta el mínimo de 150 (mm). La suma de los Números Estructurales Parciales de las Capas Asfálticas y de la Base Granular es de 86.97 (mm) siendo mayor al Número Estructural 2 igual a 76.76 (mm), por lo que se acepta el espesor de la Base Granular.

3. Espesor Sub-base Granular

Tabla D.4 - Determinación espesor capa sub-base granular, caso N°1

Capa	Coef. Estructural	Espesor (mm)	Número Estructural Parcial (mm)
Sub-base Granular	0.12	4.02	0.56
Sub-base Granular	0.12	150	20.70

El espesor estimado en primer lugar es muy bajo por lo que se adopta el mínimo de 150 (mm). La suma de los Números Estructurales Parciales de las Capas Asfálticas, Base Granular y Sub-base Granular es de 107.67 (mm) siendo mayor al Número Estructural Total que tiene 87.52 (mm), por lo que se acepta el espesor de la Sub-base Granular.

Verificación Potencial de Rigidez de las capas no ligadas (método Shell)

Utilizando las ecuaciones 7.18, 7.19, 7.120 y 7.21 se obtienen los siguientes valores,

$$1. \quad K_1 \cdot M_{R\text{Subrasante}} \geq M_{R\text{subbase}}$$

$$146.49 > 112, \text{ Cumple.}$$

$$2. \quad K_2 \cdot K_1 \cdot M_{R\text{Subrasante}} \geq M_{R\text{subbase}}$$

$$279.30 > 198.96, \text{ Cumple.}$$

Caso N° 2, Diseño Estructural con Mezcla Máxima a través del Módulo de Resiliencia Real

Para la nueva base granular se considera un Módulo de Resiliencia de **208.94** MPa el cual a través de la ecuación 7.7 presenta un coeficiente estructural de 0.139 El material presenta un Coeficiente de Drenaje de 1.15.

$$\frac{M_R \text{ Base Granular}}{M_R \text{ Sub-base Granular}} = \frac{208.94}{112} = 1.9 < 4, \text{ se acepta la utilización de materiales empleados.}$$

$$\frac{M_R \text{ Sub-base Granular}}{M_R \text{ Subrasante}} = \frac{112}{76.83} = 1.5 < 4, \text{ se acepta la utilización de materiales empleados.}$$

Iterando la ecuación 7.1 se obtienen los siguientes Números Estructurales,

NE₁: 61.38 (mm), calculado a partir del Módulo Resiliente de la Base Granular

NE₂: 76.76 (mm), calculado a partir del Módulo Resiliente de la Sub-base Granular.

NE₃: 87.52 (mm), calculado a partir del Módulo Resiliente de la Subrasante.

Determinación de espesores

1. Espesores Capa Asfáltica

Tabla D.5 - Determinación espesores capas asfálticas, caso N°2

Capas	Coef. Estructural	Espesor (mm)	Número Estructural Parcial (mm)
C. Asfáltico de Superficie	0.43	50	21.50
C. Asfáltico, Capa Interm.	0.41	55	22.55
Base Asfáltica Grad. Gruesa	0.33	55	18.15
	Total	165	62.20

El Número Estructural total es de 62.20 (mm) siendo mayor al Número Estructural 1 que tiene 61.38 (mm), por lo que se aceptan los espesores de las Capas Asfálticas

2. Espesor Base Granular

Tabla D.6 - Determinación espesor capa base granular, caso N°2

Capa	Coef. Estructural	Espesor (mm)	Número Estructural Parcial (mm)
Base Granular	0.139	91.09	14.56
Base Granular	0.139	150	23.98

El espesor estimado en primer lugar es muy bajo por lo que se adopta el mínimo de 150 (mm). La suma de los Números Estructurales Parciales de las Capas Asfálticas y de la Base Granular es de 86.18 (mm) siendo mayor al Número Estructural 2 igual a 76.76 (mm), por lo que se acepta el espesor de la Base Granular.

3. Espesor Sub-base Granular

Tabla D.7 - Determinación espesor capa sub-base granular, caso N°2

Capa	Coef. Estructural	Espesor (mm)	Número Estructural Parcial (mm)
Sub-base Granular	0.12	9.73	1.34
Sub-base Granular	0.12	150	20.70

El espesor estimado en primer lugar es muy bajo por lo que se adopta el mínimo de 150 (mm). La suma de los Números Estructurales Parciales de las Capas Asfálticas, Base Granular y Sub-base Granular es de 106.88 (mm) siendo mayor al Número Estructural Total que tiene 87.52 (mm), por lo que se acepta el espesor de la Sub-base Granular.

Verificación Potencial de Rigidez de las capas no ligadas (método Shell)

Utilizando las ecuaciones 7.18, 7.19, 7.120 y 7.21 se obtienen los siguientes valores,

$$1. \quad K_1 \cdot M_{R\text{Subrasante}} \geq M_{R\text{subbase}}$$

$$146.49 > 112, \text{ Cumple.}$$

$$2. \quad K_2 \cdot K_1 \cdot M_{R\text{Subrasante}} \geq M_{R\text{subbase}}$$

$$279.30 > 208.94, \text{ Cumple.}$$

Caso N° 4, Diseño Estructural con Base Granular Limpia a través del Módulo de Resiliencia Real

Para la nueva Base Granular se considera un Modulo de Resiliencia de **262.57** MPa el cual a través de la ecuación 7.7 presenta un coeficiente estructural de **0.164** El material presenta un Coeficiente de Drenaje de 1.15.

$$\frac{M_R \text{ Base Granular}}{M_R \text{ Sub-base Granular}} = \frac{262.57}{112} = 2.3 < 4, \text{ se acepta la utilización de materiales empleados.}$$

$$\frac{M_R \text{ Sub-base Granular}}{M_R \text{ Subrasante}} = \frac{112}{76.83} = 1.5 < 4, \text{ se acepta la utilización de materiales empleados.}$$

Iterando la ecuación 7.1 se obtienen los siguientes Números Estructurales,

NE₁: 56.42 (mm), calculado a partir del Módulo Resiliente de la Base Granular

NE₂: 76.76 (mm), calculado a partir del Módulo Resiliente de la Sub-base Granular.

NE₃: 87.52 (mm), calculado a partir del Módulo Resiliente de la Subrasante.

Determinación de espesores

1. Espesores Capa Asfáltica

Tabla D.8 - Determinación espesores capas asfálticas, caso N°3

Capas	Coef. Estructural	Espesor (mm)	Número Estructural Parcial (mm)
C. Asfáltico de Superficie	0.43	50	21.50
C. Asfáltico, Capa Interm.	0.41	50	20.50
Base Asfáltica Grad. Gruesa	0.33	50	16.50
Total		150	58.50

El Número Estructural total es de 58.50 (mm) siendo mayor al Número Estructural 1 que tiene 56.42 (mm), por lo que se aceptan los espesores de las Capas Asfálticas

2. Espesor Base Granular

Tabla D.9 - Determinación espesor capa base granular, caso N°3

Capa	Coef. Estructural	Espesor (mm)	Número Estructural Parcial (mm)
Base Granular	0.164	96.82	18.26
Base Granular	0.164	150	28.29

El espesor estimado en primer lugar es muy bajo por lo que se adopta el mínimo de 150 (mm). La suma de los Números Estructurales Parciales de las Capas Asfálticas y de la Base Granular es de 86.79 (mm) siendo mayor al Número Estructural 2 igual a 76.76 (mm), por lo que se acepta el espesor de la Base Granular.

3. Espesor Sub-base Granular

Tabla D.10 - Determinación espesor capa sub-base granular, caso N°3

Capa	Coef. Estructural	Espesor (mm)	Número Estructural Parcial (mm)
Sub-base Granular	0.12	5.29	0.73
Sub-base Granular	0.12	150	20.70

El espesor estimado en primer lugar es muy bajo por lo que se adopta el mínimo de 150 (mm). La suma de los Números Estructurales Parciales de las Capas Asfálticas, Base Granular y Sub-base Granular es de 107.49 (mm) siendo mayor al Número Estructural Total que tiene 87.52 (mm), por lo que se acepta el espesor de la Sub-base Granular.

Verificación Potencial de Rigidez de las capas no ligadas (método Shell)

Utilizando las ecuaciones 7.18, 7.19, 7.120 y 7.21 se obtienen los siguientes valores,

$$1. K_1 \cdot M_{R\text{Subrasante}} \geq M_{R\text{subbase}}$$

$$146.49 > 112, \text{ Cumple.}$$

$$2. K_2 \cdot K_1 \cdot M_{R\text{Subrasante}} \geq M_{R\text{subbase}}$$

$$279.30 > 262.57, \text{ Cumple.}$$

ANEXO E: Analisis de Costos

- Producción Base Granular con Maicillo

Considerando los siguientes parámetros,

- Largo de camino = 1,000 metros
- Espesor mínimo Capa Base Granular = 15 cm
- Ancho de Calzada = 3.5 metros por lado
- Ancho de Berma = 2.0 metros por lado
- S.A.P = 0.5 metro por lado

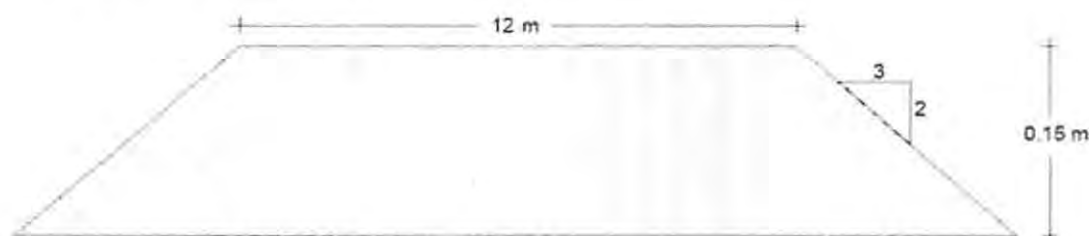


Figura E.1 - Medidas de base granular para 15 cm de espesor

Características de Bases Granulares,

Tabla E.1 - Características de cada base granular

Características	Unidad	Valores		
		100	95	90
Porcentaje Base Granular	%	100	95	90
Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS)	kg/m ³	2,158	2,160	2,163
95% DMCS	kg/m ³	2,050	2,052	2,055
Densidad Aparente (Da)	kg/m ³	1,750	1,755	1,762
Esponjamiento	-	1.17	1.17	1.15

- La humedad natural de la Base Granular es de un 3% y del maicillo un 5%.
- El esponjamiento del maicillo es de 1.12
- El o los camiones transportadores de material pueden transportar 8.16 m³ de maicillo.

Ítems considerados con sus respectivos precios,

Tabla E.2 - Descripción de precios a considerar

Descripción	Unidad	P.U (\$)
Costo de Base Granular	m ³	5,800
Maicillo		
Arriendo retroexcavadora con operador incluido	hora	16,000
Excavación de corte en terreno de cualquier naturaleza	m ³	2,524
Arriendo camión para transporte de material	día	50,000
Mano de Obra (3)	hora	2,500

En base a lo anterior, se obtienen los costos Asociados a 100%, 95% y 90% de Base Granular,

Tabla E.3 - Cálculo de costos asociados a base granular para 1,000 (m) de largo

Características	Unidad	Largo de camino: 1,000 (m)		
		100%	95%	90%
Porcentaje Base Granular	%	100%	95%	90%
Volumen Compactado	m ³	1,834	1,742	1,650
Volumen Suelto	m ³	2,148	2,041	1,933
Volumen Suelto con humedad natural	m ³	2,213	2,102	1,991
Costo Base Granular	\$	12,833,418	12,191,747	11,550,076

Ahorro utilización Base Granular 95%

$$\$12,833,418 - \$12,191,747 = \$641,671$$

Ahorro utilización Base Granular 90%

$$\$12,833,418 - \$11,550,076 = \$1,283,342$$

Para la utilización de Maicillo, teniendo en cuenta una jornada laboral de 8 horas y realizando la excavación de maicillo en ese periodo de tiempo para los dos casos, se consideran los siguientes costos,

Tabla E.4 - Cálculo de costos asociados a maicillo para 1,000 (m) de largo

Características	Unidad	Largo de camino: 1,000 (m)	
		5%	10%
Porcentaje maicillo	%	5%	10%
Volumen Compactado	m ³	91,69	183,38
Volumen Suelto	m ³	105,59	211,17
Volumen Suelto con humedad natural	m ³	110,87	221,73
Arriendo retroexcavadora con operador incluido	\$	128,000	128,000
Excavación de corte en terreno	\$	279,826	559,653
Arriendo camión para transporte de material	\$	50,000	50,000
Mano de Obra (3)	\$	60,000	60,000
Costo Total	\$	517,826	797,653

Ahorro Final 95% Base Granular con 5%Maicillo

$$\$641,671 - \$517,826 = \$123,844.$$

Ahorro Final 90% Base Granular con 10%Maicillo

$$\$1,283,342 - \$797,653 = \$485,689.$$

- Producción de Nueva Base Granular en Tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay

Considerando los siguientes parámetros,

- Largo de camino = 16,343.6 metros
- Espesor Capa Base Granular = 15 cm
- Ancho de Calzada = 3.5 metros por lado
- Ancho de Berma = 2.0 metros por lado
- S.A.P = 0.5 metro por lado

Características de Bases Granulares y mezcla con 15% de Arena-Limosa,

Tabla E.5 - Características de base granular y mezcla con 15% de arena-limosa

Características	Unidad	Valores	
Porcentaje Base Granular	%	100	85
Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS)	kg/m ³	2,158	2,165
95% DMCS	kg/m ³	2,050	2,057
Densidad Aparente (Da)	kg/m ³	1,750	1,786
Esponjamiento	-	1.17	1.15

- La humedad natural de la Base Granular es de un 3% y del maicillo un 5%.
- El esponjamiento del maicillo es de 1.12
- El o los camiones transportadores de material pueden transportar 8.16 m³ de maicillo.

Considerando los siguientes los ítems de la Tabla E.2 se obtienen los costos Asociados a 100%, 95% y 90% de Base Granular,

Tabla E.6 - Cálculo de costos asociados a base granular para 16,343.6 (m) de largo

Características	Unidad	Largo de camino: 16,343.6 (m)	
Porcentaje Base Granular	%	100%	85%
Volumen Compactado	m ³	29,970	25,475
Volumen Suelto	m ³	35,110	29,336
Volumen Suelto con humedad natural	m ³	36,162	30,216
Costo Base Granular	\$	209,744,251	175,255,658

Ahorro utilización Base Granular 85%

$$\$209,744,251 - \$175,255,658 = \$34,488,594$$

Para la utilización de Maicillo, teniendo en cuenta una jornada laboral de 8 horas y realizando la excavación de maicillo en un periodo de tiempo de 4 jornadas laborales y utilizando 7 camiones transportadores de material, se consideran los siguientes costos,

Tabla E.7 - Cálculo de costos asociados a maicillo para 16,343.6 (m) de largo

Características	Unidad	Largo de camino: 16,343.6 (m)
Porcentaje maicillo	%	15%
Volumen Compactado	m ³	4,495.51
Volumen Suelto	m ³	5,034.97
Volumen Suelto con humedad natural	m ³	5,286.72
Arriendo retroexcavadora con operador incluido	\$	512,000
Excavación de corte en terreno	\$	13,343,685
Arriendo camión para transporte de material	\$	1,400,000
Mano de Obra (3)	\$	240,000
Costo Total	\$	15,495,685

Ahorro Final 85% Base Granular con 15%Maicillo

$\$34,488,594 - \$15,495,685 = \$18,992,909.$

- Costos Diseño Estructural

Considerando los siguientes valores,

- Ancho de Calzada = 3.5 metros por lado
- Ancho de Berma = 2.0 metros por lado
- S.A.P = 0.5 metro por lado

1. Caso N° 1, Diseño Estructural con Mezcla Máxima a través del Módulo de Resiliencia Teórico

Tabla E.8 - Cálculo de costos asociados al diseño estructural, caso N°1

Capas	Espesor (cm)	Volumen (m ³)	P. Unitario (\$)	Valor (\$)
C.A. de Rodadura	5	5,720	117,376	671,421,238
C.A. Capa Intermedia	5.5	6,292	105,476	663,685,158
B.A en Cal de Grad. Gruesa	6	6,864	99,526	683,177,516
Base Granular	15	29,970	11,488	344,296,239
Sub-base Granular	15	31,073	6,658	206,885,828
Capas	Superficie (m ²)		P. Unitario (\$)	Valor (\$)
Riego de Liga	343,216		280	96,100,368.00
			Total (\$)	2,665,566,347

2. Caso N° 2, Diseño Estructural con Mezcla Máxima a través del Módulo de Resiliencia Real

Tabla E.9 - Cálculo de costos asociados al diseño estructural, caso N°2

Capas	Espesor (cm)	Volumen (m ³)	P. Unitario (\$)	Valor (\$)
C.A. de Rodadura	5	5,720	117,376	671,421,238
C.A. Capa Intermedia	5.5	6,292	105,476	663,685,158
B.A en Cal de Grad. Gruesa	5.5	6,292	99,526	626,246,056
Base Granular	15	29,970	11,488	344,296,239
Sub-base Granular	15	31,073	6,658	206,885,828
Capas	Superficie (m ²)		P. Unitario (\$)	Valor (\$)
Riego de Liga	343,216		280	96,100,368
			Total (\$)	2,608,634,887

3. Caso N°3 y N°4, Diseño Estructural con programa PAVIVAL y Diseño Estructural con Base Granular Limpia a través del Módulo de Resiliencia Real

Tabla E.10 - Cálculo de costos asociados al diseño estructural, caso N°3 y N°4

Capas	Espesor (cm)	Volumen (m ³)	P. Unitario (\$)	Valor (\$)
C.A. de Rodadura	5	5,720	117,376	671,421,238
C.A. Capa Intermedia	5	5,720	105,476	603,350,144
B.A en Cal de Grad. Gruesa	5	5,720	99,526	569,314,597
Base Granular	15	29,970	11,488	344,296,239
Sub-base Granular	15	31,073	6,658	206,885,828
Capas	Espesor (cm)	Volumen (m ³)	P. Unitario (\$)	
Riego de Liga	343,216	280	96,100,368	
			Total (\$)	2,491,368,413

ANEXO F: Láminas para Determinar el NE_A para Diseño Estructural PAVIVIAL

MANUAL DE CARRETERAS VOL. N° 3 DISEÑO		TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES (TMMA) Y TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES PONDERADAS (TMPA)												3 604.108 A Junio 2002
ESTACION	TMMA (° c)												TMPA	
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
Arica - Chacalluta	22,0	22,3	21,4	19,5	17,6	16,4	15,6	15,7	16,3	17,5	19,1	20,6	19,0	
Iquique - Diego Aracena	21,1	21,1	20,1	18,3	16,9	15,9	15,2	15,3	15,9	16,9	18,4	20,0	18,2	
Calama - El Loa	15,1	14,9	13,9	12,1	10,3	8,70	8,60	9,40	11,2	12,7	14,1	14,8	12,5	
Antofagasta - Cerro Moreno	20,0	19,9	18,7	16,8	15,2	14,0	13,4	13,7	14,3	15,5	16,9	18,7	16,8	
Isla de Pascua - Mataveri	23,3	23,6	23,1	21,8	20,2	18,8	18,2	18,0	18,3	19,1	20,4	21,8	20,8	
Copiapó - Chamonste	19,6	19,4	17,9	15,4	13,2	11,4	11,3	12,0	13,2	14,8	16,4	18,3	15,8	
Vallenar - Aeródromo	18,6	18,6	17,1	14,9	13,1	11,7	11,4	12,2	13,0	14,5	15,6	17,5	15,3	
La Serena - La Florida	17,1	16,9	15,6	13,7	12,3	10,9	10,7	10,9	11,6	12,9	14,3	16,1	13,9	
Quintero	16,0	15,6	14,3	12,7	11,6	10,3	10,0	10,4	11,0	12,3	13,8	15,1	13,5	
Valparaíso - Punta Angeles	17,0	16,8	15,6	14,2	13,3	12,0	11,4	11,7	12,1	13,2	14,7	16,2	14,3	
Santiago - Pudahuel	20,2	19,1	16,7	13,1	10,0	7,70	7,30	8,60	10,6	13,6	16,6	19,2	14,9	
Santiago - Quinta Normal	20,9	19,9	17,6	14,2	11,1	8,50	8,10	8,50	11,5	14,5	17,3	19,9	15,7	
Santiago - Los Cerrillos	20,5	19,6	17,4	14,2	11,1	8,50	8,20	9,40	11,3	14,1	17,0	19,4	15,4	
Isla Juan Fernández	18,5	18,7	17,9	16,6	15,3	13,7	12,7	12,3	12,4	13,4	14,9	17,0	15,6	
Sewell	15,6	15,6	14,3	11,9	8,30	5,70	4,80	5,50	7,10	9,40	12,1	14,5	11,4	
Parrón	18,9	18,1	15,9	12,4	10,0	7,50	7,30	7,80	9,30	12,2	15,1	17,6	13,8	
Curico - General Freire	19,9	18,9	15,9	12,1	9,50	7,40	7,20	8,20	10,1	13,0	15,9	18,7	14,4	
Chillán - General B. O'Higgins	19,1	18,3	15,8	12,3	9,60	7,70	7,30	8,20	9,70	11,9	14,9	17,7	13,8	
Concepción - Carriel Sur	16,3	15,7	13,9	1,00	10,8	9,20	8,80	9,10	9,70	11,5	13,5	15,5	12,6	
Temuco - Maquehue	15,8	15,4	13,5	11,0	9,40	7,50	7,20	7,70	8,80	10,6	12,7	14,7	11,8	
Valdivia - Pichoy	15,8	15,2	13,2	10,5	9,30	7,40	7,00	7,40	8,60	10,4	12,7	14,9	11,7	
Osorno - Cañal Bajo	15,2	14,5	12,6	10,2	6,70	6,70	6,50	7,10	8,20	10,1	12,3	14,3	11,1	
Puerto Montt - El Tepual	14,3	13,6	12,1	10,1	8,80	6,70	6,80	6,80	7,80	9,80	11,6	13,4	10,6	
Puerto Aysén - Aeródromo	13,6	13,2	11,5	9,20	6,70	4,30	3,90	5,10	6,90	9,10	11,4	12,9	9,70	
Coyhaique - Teniente Vidal	13,6	13,2	11,2	8,20	5,20	2,60	2,00	3,80	5,90	8,40	11,0	12,6	9,10	
Balmaceda - Aeropuerto	11,9	11,4	9,30	6,50	3,40	0,80	0,20	1,90	4,10	6,70	9,20	10,9	7,40	
Chile Chico - Aeródromo	15,4	15,0	12,3	8,80	5,50	3,00	2,30	3,70	6,40	9,30	12,5	14,4	10,4	
Cochrane - Aeródromo	13,6	13,2	10,5	7,40	4,00	1,10	0,80	3,00	6,80	8,50	11,1	12,7	8,90	
Punta Arenas - Carlos Ibáñez	10,5	10,1	8,20	6,00	3,40	1,50	1,10	2,00	4,00	6,40	8,20	9,70	6,60	
Isla Diego Ramírez	7,20	7,50	6,80	5,60	4,50	3,70	3,20	3,20	3,60	4,70	5,50	6,50	5,30	

MOF - OJEP - DIRECCION DE MAQUINARIA - CHILE

Figura F.1 - TMMA y TMPA para diseño de pavimentos flexibles, según MC-V3

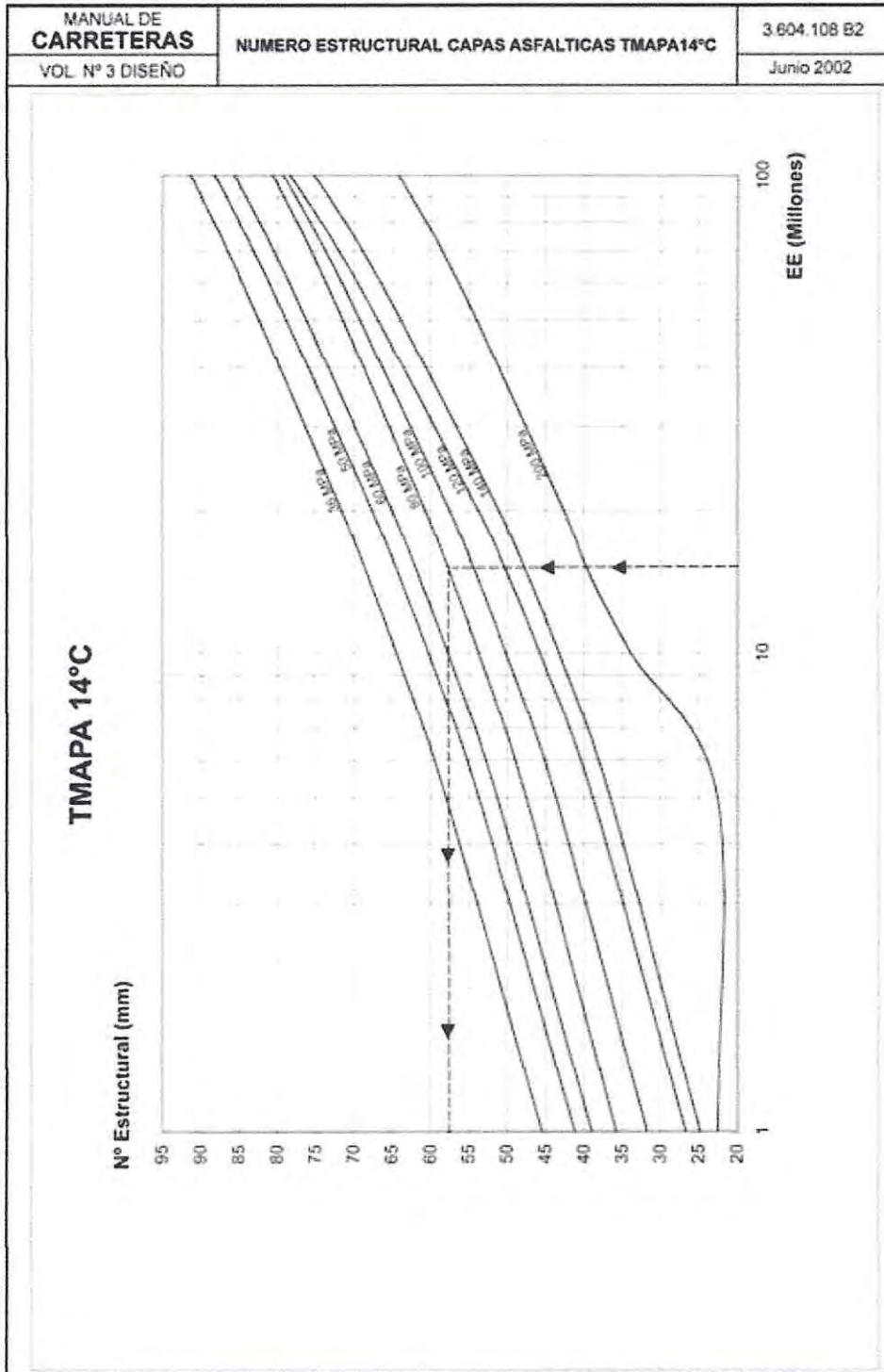


Figura F.2 - Número estructural de capas asfálticas para TMDAP 14 °C, según el MC-V3

ANEXO G: Clasificación del material

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)

Los suelos granulares se designan con los siguientes símbolos:

Prefijos	Sufijos
G: Grava	W: Bien Graduado
S: Arenas	M: Limos
	C: Arcilloso

Los suelos finos se designan con los siguientes símbolos:

Prefijos	Sufijos
M: Limo	L: Baja plasticidad
C: Arcilla	H: Alta plasticidad
O: Orgánico	

Tabla G.1 - Sistema de clasificación USCS para materiales gruesos

SISTEMA CLASIFICACION USCS						
Gruesos (< 50% Pasa en 0.08 mm)						
Tipos de Suelos	Símbolo	%Ret 5 mm	% Pasa 0.08 mm	C_u	C_c	*IP
Gravas	GW	$\geq 50\%$ de lo Ret en 0.08 mm	>5	>4	1 a 3	$< 0.73(wL-20)$ ó <4
	GP			≥ 6	< 1 o >3	
	GM	>12				$>0.73(wL-20)$ ó >7
	GC					
Arena	SW	< 50% de lo Ret en 0.08 mm	<5	> 6	1 a 3	$< 0.73(wL-20)$ ó <4
	SP			≤ 6	< 1 o >3	
	SM	>12				$< 0.73(wL-20)$ ó <4
	SC					$>0.73(wL-20)$ ó >7
Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC.						
*Si $IP \approx 0.73(wL-20)$ o si IP entre 4 y 7 e $IP > 0.73(wL-20)$, usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.						
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej.: GW-GM en vez GW-GC.						
$C_u = \Phi_{60} / \Phi_{10}$				$C_c = \Phi_{30}^2 / (\Phi_{60} * \Phi_{10})$		

Donde,

C_u : Coeficiente de Uniformidad

C_c : Coeficiente de Curvatura

Φ_{60} , Φ_{10} , Φ_{30} : Aberturas de tamices por donde pasan el 60%, 10% y 30% respectivamente

Tabla G.2- Sistema de clasificación USCS para materiales finos

SISTEMA CLASIFICACION USCS			
Finos ($\geq 50\%$ pasa 0.08 mm)			
Tipos de Suelos	Símbolo	Lim. Liq. Wl	*IP
Limos Inorgánicos	ML	<50	< 0.73(wL-20) o <4
	MH	>50	< 0.73(wL-20)
Arcillas Inorgánicas	CL	<50	>0.73(wl-20) y >7
	CH	>50	>0.73(wl-20)
Limos o Arcillas Orgánicas	OL	<50	** wl seco al horno
	OH	>50	75% del wl seco al aire
Altamente Orgánicos	P1	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente	
*SI IP $\approx 0.73(wl-20)$ o si IP entre 4 y 7 e IP > 0.73(wl-20), usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH			
**Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente wl seco al horno			
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej.: CH-MH en vez CL-ML			
SI wl=50; CL-CH o ML-MH			

- Sistema de Clasificación AASTHO

Tabla G.3- Sistema de clasificación AASTHO para materiales finos

SISTEMA CLASIFICACION AASTHO					
Clasificación General	Materiales Limo-Arcilloso > 35% que pasa por tamiz N° 200				
Grupos	A-4	A-5	A-6	A-7	
Sub-Grupos				A-7-5	A-7-6
% pasa por N° 10					
% pasa por N° 40					
% que pasa por N° 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Límite Líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.*	41 máx.**
Índice de Plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	20 máx.
Tipo de Material	Suelos Limosos			Suelos Arcillosos	

* con IP < (wl-30) // ** con IP > (wl-30)

Tabla G.4- Sistema de clasificación AASTHO para materiales gruesos

SISTEMA CLASIFICACION AASTHO							
Clasificación General	Materiales Granulares $\leq 35\%$ que pasa por tamiz N° 200						
Grupos	A-1		A-3	A-2			
Sub-Grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
% pasa por N° 10	50 máx.						
% pasa por N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.				
% pasa por N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Límite Líquido			No	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidad	6 máx.	6 máx.	Plástico	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.
Tipo de Material	piedra grava y arena		Arena fina	Grava arenas limosas y arcillosas			