

no marca
66608

T
P127d
2013



UNIVERSIDAD DE VALPARAISO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



“DETERMINACIÓN DE VARIABLES INFLUYENTES EN ESTABILIDAD DE PAVIMENTOS DE MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE MEDIANTE MÉTODO MARSHALL”

Por

Denisse Aurora Páez Gómez

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

Profesor Guía: Guillermo Brante Lara

Julio, 2013

- Pavimento
- ASFALTO

R. 16863

*Dedicado a
Mi abuelita "Mamá Clara"*

ÍNDICE

Glosario.....	7
Lista de abreviaturas o siglas	8
Lista de Tablas	9
Lista de Figuras	11
Resumen Memoria	14

CAPITULO 1 ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Introducción	15
1.2 Planteamiento del Problema	16
1.3 Objetivos	18
1.3.1 General	18
1.3.2 Específicos	18
1.4 Alcances y Limitaciones	18
1.5 Metodología de la Investigación	19
1.6 Diagrama de la metodología de la investigación.....	20

CAPITULO 2 MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes generales.....	21
2.1.1 Pavimentos flexibles	21
2.1.2 Mezclas asfálticas en caliente (HMA).....	21
2.1.2.1 Propiedades de la mezclas.....	22
2.1.2.2 Objetivo del diseño de mezclas	23
2.2 Métodos Volumétricos de diseño de mezclas	24
2.2.1 Método Marshall	24
2.3 Mezclas asfálticas de graduación Semi-Densa.....	26
2.4 Calidad de puesta en obra de las HMA.....	27
2.5 Control de Calidad de la HMA.....	29
2.5.1 Controles en planta.....	29

2.5.2 Controles In situ	30
2.6 Descripción ensayo Tracción Indirecta	31
2.7 Variación entre diseño, construcción y control de calidad	34
2.8 Influencia de las variables de diseño y constructivas en las Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente.....	37

CAPITULO 3 DISEÑO DEL CASO DE ESTUDIO

3.1 Trabajos experimentales preliminares	38
3.1.1 Agregados pétreos.....	38
3.1.2 Granulometría de los áridos	39
3.1.3 Densidad real, neta y absorción	40
3.1.4 Cubicidad de partículas	41
3.1.5 Índice de plasticidad	41
3.1.6 Resistencia al desgaste.....	42
3.1.7 Mezcla de áridos.....	42
3.1.8 Módulo de finura	44
3.1.9 Características del ligante asfáltico	47
3.1.10 Nomograma de Heukelom.....	49
3.2 Diseño Marshall.....	51
3.2.1 Mezcla a estudiar.....	51
3.2.2 Preparación de las muestras	51
3.2.3 Compactación de probetas.....	52
3.3 Desarrollo experimental.....	54
3.4 Resultado del método de diseño Marshall	56

CAPITULO 4 PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Presentación de resultados.....	64
4.1.1 Antecedentes generales	64
4.1.2 Ensayo Marshall	64
4.1.3 Ensayo Tracción Indirecta	66

4.2 Análisis estadístico de resultados	68
4.2.1 Estabilidad Marshall.....	69
4.2.1.1 Verificación del modelo correlacional establecido	75
4.2.2 Tracción Indirecta	76
4.2.2.1 Verificación del modelo correlacional establecido	83

CAPITULO 5 METODOLOGIA PARA EL CONTROL DEL TERRENO DE HMA DE GRADUACION SEMI-DENSA A TRAVES DE ESTABILIDAD MARSHALL

5.1 Uso del modelo correlacional	85
5.2 Evaluación de capacidad de estructural de mezclas asfálticas de graduación semi-densa	85
5.3 Construcción de ábacos para el control en terreno.....	89
5.4 Ejemplos de aplicación.....	96
5.4.1 Análisis de casos tipo	96

CAPITULO 6 METODOLOGIA PARA EL CONTROL EN TERRENO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRADUACION SEMI-DENSA A TRAVES DE MÓDULO RESILIENTE (MR)

6.1 Generalidades	99
6.2 Uso del modelo correlacional	99
6.3 Evaluación de la capacidad estructural de las mezclas asfálticas semi-densas	100
6.4 Construcción de ábacos para el control en terreno.....	104
6.5 Ejemplos de aplicación.....	112
6.5.1 Análisis de casos tipo	112

CAPITULO 7 CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones	115
------------------------	-----

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	117
---	------------

ANEXOS	119
Anexo A: Calculo módulo de finura	120
Anexo B: Valores de densidades, alturas y absorción probetas.....	121
Anexo C: Valores de Estabilidad Marshall	125
Anexo D: Valores de Tracción Indirecta.....	128
Anexo E: Variables de respuesta para los tratamientos en estabilidad Marshall	131
Anexo F: Variables de respuesta para los tratamientos en ensayo Tracción Indirecta	133
Anexo G: Ejes equivalentes admisibles modelo correlación estabilidad Marshall.....	135
Anexo H: Ejes equivalentes admisibles con modelo correlación Módulo Resiliente	139
Anexo I: Ábacos y ejes equivalentes admisibles con Estabilidad Marshall para otros casos de espesores.....	142
Anexo J: Ábacos y ejes equivalentes admisibles con Módulo Resiliente para otros casos de espesores.....	148

Glosario

Ahuellamiento: Surcos o huellas que se presentan en la superficie de rodadura de una carretera pavimentada o no pavimentada.

Exudaciones: Parte del asfalto contenido en la mezcla aflora a la superficie creando una película de material bituminoso puro, de aspecto brillante y, a veces, pegajosa.

Ondulaciones: Producen por un exceso de asfalto, en especial en aquellas mezclas con elevado porcentaje de agregados, esto puede originar la formación de ondulaciones en la superficie de rodadura.

Filler: se define la fracción mineral que pasa por el tamiz 0,08mm (n° 200), este material se utiliza como un medio de modificar sus propiedades mecánicas y consistencia. Usualmente se utilizan sustancias minerales: cal, cemento, polvo de tiza, ceniza de combustible pulverizada, talco, sílice, etc.

Módulo de finura: Valor numérico que representa el tipo de granulometría de una mezcla de áridos.

Módulo resiliente: Propiedad con la que se caracterizan los materiales que conforman un pavimento y se describe como el valor que luego de la acumulación de deformaciones en un pavimento le da un comportamiento elástico.

Lista de abreviaturas o siglas

MOP	Ministerio de Obras Públicas
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
MHA	Mezclas asfálticas en caliente (Mix Hot Asphalt)
ITS	Ensayo tracción indirecta (Indirect Tensile Strength)
CA	Cemento asfáltico
VAM	Vacios llenos de agregado mineral
VFA	Vacios llenos de asfalto
DR	Densidad real
P.S.S.S	Peso saturado superficialmente seco
P.Sat.	Peso saturado
EM	Estabilidad Marshall
MR	Módulo resiliente
EE	Ejes equivalentes
CBR	Capacidad de soporte (California Bearing Ratio)
NE	Numero estructural de las capas que compondrán la estructura (mm).

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Criterios de diseño de mezclas de graduación semi-densa.....	27
Tabla 2.2: Graduación semi-densa	27
Tabla 3.1: Granulometría agregados pétreos.....	39
Tabla 3.2: Densidades y absorción del agregado pétreo.....	40
Tabla 3.3: Cubicidad de partículas agregado pétreo grueso	41
Tabla 3.4: Índice de plasticidad agregado pétreo	41
Tabla 3.5: Resistencia al desgaste de agregado pétreo grueso	42
Tabla 3.6: Densidades y absorción de la mezcla de agregados.....	42
Tabla 3.7: Granulometría semi-densa según manual de carreteras vol. 5 y mezcla óptima de trabajo.....	43
Tabla 3.8: Porcentaje que pasa según curvas granulométricas	44
Tabla 3.9: Módulo de finura curva límite inferior, módulo grueso	45
Tabla 3.10: Módulo de finura curva límite superior, módulo fino.....	46
Tabla 3.11: Módulo de finura curva óptima	47
Tabla 3.12: Resumen ensayos realizados al asfalto.....	48
Tabla 3.13: Variables estudiadas	54
Tabla 3.14: Diseño factorial 2^4	55
Tabla 3.15: Resumen resultados Marshall para módulo fino.....	56
Tabla 3.16: Resumen resultados Marshall para módulo grueso.....	60
Tabla 4.1: Densidades promedio Estabilidad Marshall	64
Tabla 4.2: Valores estabilidad y fluencia promedio Estabilidad Marshall	66
Tabla 4.3: Densidades promedio Tracción Indirecta.....	66
Tabla 4.4: Valores promedio Tracción Indirecta.....	68
Tabla 4.5: Valores de variables de probetas verificación modelo Estabilidad Marshall	75
Tabla 4.6: Resultados obtenidos con modelo correlacional Estabilidad Marshall	76
Tabla 4.7: Valores de variables de probetas verificación modelo Tracción Indirecta	84
Tabla 4.8: Resultados obtenidos con modelo correlacional Tracción Indirecta	84
Tabla 5.1: Valores de variables para construcción de ábacos.....	87

Tabla 5.2: Valores de estabilidad y coeficiente estructural	87
Tabla 5.3: Análisis de casos tipos	96
Tabla 5.4: Resultados de Estabilidad Marshall obtenidos por modelo correlacional.....	96
Tabla 5.5: Estimación de ejes equivalentes	97
Tabla 6.1: Valores de módulo de Poisson.....	106
Tabla 6.2: Análisis de casos tipos	113
Tabla 6.3: Resultados de módulo resiliente obtenidos por modelo correlacional.....	113
Tabla 6.5: Estimación de ejes equivalentes	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de metodología de trabajo	20
Figura 2.1: Martillo Marshall	25
Figura 2.2: Esquema de compresión prensa Marshall.....	26
Figura 2.3: Estado de tensiones en un pavimento bajo una carga simple.....	32
Figura 2.4: Configuración de carga y falla del ensayo Tracción Indirecta	33
Figura 2.5 Grafico de deformación por carga móvil y valor de módulo resiliente	35
Figura 2.6: Discordancia entre diseño estructural, diseño de mezclas y control de calidad.....	36
Figura 3.1: Grafico de curva distribución granulométrica agregados pétreos.....	40
Figura 3.2: Grafico curva distribución granulométrica mezcla IV-A-12	43
Figura 3.3: Grafico curva granulométrica límite inferior banda, módulo grueso	45
Figura 3.4: Grafico curva granulométrica límite superior banda, módulo fino.....	46
Figura 3.5: Nomograma de Heukelom	50
Figura 3.6: Probetas con diferentes condiciones de diseño.....	52
Figura 3.7: Probetas en inmersión bajo agua.....	53
Figura 3.8: Compresión en prensa Marshall	53
Figura 3.9: Gráfico Densidad v/s % de asfalto módulo fino	57
Figura 3.10: Gráfico Estabilidad v/s % de asfalto módulo fino	57
Figura 3.11: Gráfico Vacios en la mezcla v/s % de asfalto módulo fino	58
Figura 3.12: Gráfico fluidez v/s % de asfalto módulo fino	58
Figura 3.13: Gráfico VAM v/s % de asfalto módulo fino.....	59
Figura 3.14: Gráfico VFA v/s % de asfalto módulo fino.....	59
Figura 3.15: Gráfico Densidad v/s % de asfalto módulo grueso	60
Figura 3.16: Gráfico Estabilidad v/s % de asfalto módulo grueso.....	61
Figura 3.17: Gráfico Vacios en la mezcla v/s % de asfalto módulo grueso	61
Figura 3.18: Gráfico fluidez v/s % de asfalto módulo grueso.....	62
Figura 3.19: Gráfico VAM v/s % de asfalto módulo grueso.....	62

RESUMEN

Las mezclas bituminosas utilizadas en la ejecución de un pavimento deben conseguir determinadas características estructurales y funcionales requeridas en un pavimento flexible para garantizar su resistencia y durabilidad durante el período de diseño.

Actualmente los controles de calidad sobre la mezcla en planta suele realizarse mediante el ensayo Marshall, extrayendo una muestra de la planta asfáltica y determinando su resistencia a las deformaciones plásticas. Sin embargo, la calidad final del producto, es decir, de la mezcla extendida y compactada sólo se controla mediante la extracción de testigos para la determinación de su densidad y compactación con la densidad Marshall patrón, o en casos de mayor exigencia se emplean equipos de retroanálisis realizando evaluaciones del pavimento ya existente.

La temperatura de las mezclas asfálticas varía significativamente desde su producción en planta hasta la conformación de la estructura de pavimento, especialmente en el proceso de compactación. Estas diferencias de temperatura de la mezcla de un punto a otro generan segregación, microfisuras, superficies onduladas, desgarramientos y especialmente cambios en las propiedades mecánicas y estructurales de la mezcla. De la misma forma, variables de diseño como el porcentaje de asfalto y el módulo de finura pueden tener la misma incidencia en la capacidad estructural del pavimento.

En este estudio de laboratorio se determinó y cuantificó la influencia que las variables de diseño de mezclas y del proceso constructivo de un pavimento asfáltico tienen en la capacidad estructural de carpetas asfálticas de graduación semi-densa. Los resultados indican que las principales variables que influyen en la estabilidad de un pavimento son el porcentaje de asfalto, temperatura de compactación y módulo de finura. Para el análisis de tracción indirecta (ITS) se determinó que las variables influyentes son las mismas que para la estabilidad Marshall. De acuerdo a modelación desarrollada en base a los resultados obtenidos en laboratorio, como también al uso del método de diseño AASTHO y el software de diseño estructural del método empírico mecanicista BISAR 3.0 creado por Shell bitumen, se desarrollaron dos metodologías de control de calidad aplicable en terreno en base a las variables mencionadas anteriormente.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

En muchos países incluyendo a Chile, la mayor cantidad de caminos está constituida por asfalto. Y a su vez, está comprobado que los concretos asfálticos usados en los pavimentos nacionales, se desarrollan a partir de mezcla asfáltica en caliente, que luego de su colocación es compactada para finalmente obtener una masa dura y densa.

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo. Es capaz de resistir considerables esfuerzos instantáneos, aunque fluye siempre bajo la acción de cargas permanentes. Éste, en conjunto con los agregados pétreos, debe proveer al pavimento características importantes para la vida útil de éste como durabilidad, estabilidad, antideslizamiento. Las condiciones anteriormente mencionadas dependerán directamente de los factores directos de diseño como lo son: granulometría de áridos, contenido de asfalto de la mezcla, consistencia y calidad del asfalto utilizado.

En la construcción de una carretera, las mezclas asfálticas en caliente constituyen las capas con mayores exigencias dentro de la estructura del pavimento. Hay muchas fases involucradas y actividades diferentes que entran en el proceso de construcción de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Su elaboración, colocación y terminación son procesos complicados, donde intervienen muchos factores que definirán la calidad final de la capa. Cuando el resultado sea imposible de aceptar en una capa asfáltica porque no cumple con las especificaciones del proyecto, la empresa constructora sufrirá penalizaciones o deberá rehacer las tareas, aumentando de este modo los costos del producto.

Las mezclas bituminosas que forman estas capas se elaboran con áridos y ligante asfáltico, que respetan prescripciones y dosificaciones determinadas con objeto de conseguir características estructurales y funcionales requeridas en un pavimento flexible para garantizar su durabilidad durante el período de diseño, y a la vez, ofrecer seguridad y comodidad al usuario del camino. Estas exigencias se consiguen a través de determinadas propiedades, como estabilidad, resistencia a las deformaciones plásticas, resistencia a la fatiga, impermeabilidad, que dependen de la dosificación y de las características de los materiales empleados.

La construcción de pavimentos asfálticos se realiza principalmente con cemento asfáltico, los cuales se designan por las letras CA y son de asfalto refinado o una combinación de asfalto refinado y aceite fluidificante, de consistencia apta para los trabajos de pavimentación.

1.1 Planteamiento del Problema

Los caminos, a nivel mundial, son de gran importancia y utilidad para el ser humano en la actualidad, ya que estos cumplen la función significativa de conectividad entre puntos distanciados, lo que favorece el crecimiento o desarrollo de una ciudad. Por esta razón se ha perseguido a lo largo de la historia pavimentos que obedezcan a estándares de calidad en su construcción, y además se ha buscado la manera de conocer el comportamiento estructural en el largo plazo del pavimento. Actualmente las mezclas asfálticas en caliente de graduación semi-densa (HMA), son un tipo de mezclas ampliamente utilizadas en la construcción de caminos y carreteras en todo el mundo. Es considerado como el principal producto de pavimentación y la mayor parte de los caminos en la zona central de Chile se encuentran pavimentados con este producto [5].

Las mezclas asfálticas en caliente consisten en una combinación de agregados pétreos y recubiertos con asfalto, los cuales mezclados uniformemente en proporciones especificadas por los diseños otorgan propiedades físicas y mecánicas a la mezcla [17]. La mezcla asfáltica debe ser durable, es decir, debe tener cierta resistencia al desligamiento de la película de asfalto del agregado pétreo, por causa de agentes atmosféricos, y a la abrasión del tránsito vehicular. También debe ser trabajable para facilitar la colocación y compactación en terreno [15].

El agregado y el asfalto se combinan en una planta de producción de mezcla asfáltica en caliente, donde es producida, calentada y mezclada [17]. Este es el primer lugar donde se debe realizar un control estricto de los insumos y de la ejecución de todos los procesos para obtener un producto final de buena calidad, que se ajuste a las especificaciones y cumpla con todas las expectativas para la cual fue diseñada, como es su adecuada manipulación y almacenamiento de todos los componentes en la planta de mezclado, exacta dosificación y alimentación del agregado frío que se transporta hacia el secador, calentamiento y secado efectivos del agregado a la temperatura apropiada, eficaz control y recolección de polvo desde el secador, apropiada dosificación, alimentación y mezclado del asfalto con los agregados calientes, para obtener un producto con temperatura de mezcla apropiadas y trabajabilidad deseada [5].

En la actualidad, es bien sabido que a la hora de llevar a cabo estudios de ciertas propiedades del tipo mecánicas, que aseguren estándares de calidad de los pavimentos construidos con asfalto, nos encontraremos frente a un tema que presenta poca precisión y genera gran incertidumbre, ya que la mayoría de los ensayos realizados para el control de materiales representan el comportamiento del material en laboratorio y no necesariamente representa su comportamiento in situ [3].

De acuerdo a la normativa chilena el control de calidad de las mezclas asfálticas en Chile, una vez construidas, sólo se realiza por extracción de testigos, a los cuales se les determina: densidad, espesor y contenido de asfalto (extracción asfáltica).

En laboratorio, generalmente, con el objetivo de conocer indicadores estructurales en mezclas asfálticas, se realiza un diseño volumétrico cuyos parámetros estructurales considerados, son la estabilidad Marshall y la fluencia. Estos parámetros, sin embargo no representan una propiedad mecánica intrínseca del material y su correlación con parámetros que permitan estimar la capacidad estructural del pavimento es difícil y poco precisa, para pavimentos ya construidos.

Se puede inferir que existe una gran diferencia entre lo que se diseña estructuralmente, lo que se diseña en laboratorio y lo que se controla en terreno. Al estar frente a condiciones desiguales, existen factores de diseño de la mezcla y otros asociados a los procesos constructivos de las mezclas asfálticas en caliente (HMA) que generan una variabilidad en las características mecánicas de la mezcla y como consecuencia, en la capacidad estructural de las carpetas asfálticas. Así, los actuales controles de calidad in situ y en laboratorio no permiten detectar ni cuantificar esta influencia dentro de las tolerancias permitidas en la normativa actual. Pudiera incluso llegarse a pensar que una carpeta asfáltica que cumpla con los controles establecidos no posea la capacidad estructural requerida para el diseño.

Las características del pavimento se pueden verificar con el diseño a través de un conjunto de controles, cada uno de ellos determinará los valores de construcción que deben ser similares a los de diseño. Se realiza control de compactación a través del densímetro nuclear, extracción de testigos para verificación de granulometría y espesores.

Para el caso de proyectos de gran importancia como carreteras, se pueden realizar mediciones con el deflectómetro de impacto (FWD), el cual es un método que permite estimar el valor del módulo resiliente. Este es un equipo de costo elevado por lo que no se aplica a todos los proyectos y debe realizarse al menos con una diferencia de seis meses posterior a la construcción de éste. Actualmente no existe un método para la verificación de las características del pavimento en comparación con el diseño en el período de puesta en marcha que entregue datos certeros.

El problema actual es que los pavimentos existentes no cumplen con las condiciones de diseño en lo que se refiere a la vida útil de este, ya que al poco tiempo de puesta en marcha se ven afectados por problemas que son directamente relacionados con los procesos productivos como lo son ondulaciones en la superficie (exceso de asfalto), desprendimiento de material (por poco contenido de asfalto o baja temperatura de compactación), agrietamientos (por granulometría discontinua), etc. Es de gran importancia entonces encontrar una forma de relacionar las etapas de diseño, diseño en laboratorio y control de calidad de las mezclas asfálticas en caliente, para relacionarlas y disminuir así las fallas a las cuales actualmente se ven afectados los pavimentos flexibles, debido al proceso productivo.

La presente investigación permitirá cuantificar la influencia de las tres etapas de conformación de una carpeta asfáltica de graduación semi-densa, tienen en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente (HMA), considerando como variables de diseño de la mezcla el porcentaje asfáltico y el módulo de finura, y como variables del proceso constructivo la temperatura de mezclado y la temperatura de compactación. Esta influencia será representada mediante un modelo de regresión lineal y servirá de base para el desarrollo de una metodología de control de calidad en terreno de la capacidad estructural de carpetas asfálticas de graduación semidensa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Desarrollar una metodología que permita determinar la influencia de las variables de diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA) y las variables del proceso productivo, tienen en la estabilidad y la tracción indirecta de concretos asfálticos, para establecer el control de calidad del comportamiento estructural de carpetas asfálticas.

1.3.2 Específicos

- Determinar experimentalmente mediante un diseño factorial la importancia relativa de una serie de variables del proceso.
- Determinar la sensibilidad de cada variable influyente que afectan al fenómeno de estabilidad y tracción indirecta.
- Desarrollar un modelo de regresión lineal que permita sensibilizar el comportamiento estructural de carpetas asfálticas basado en las variables de mayor influencia en el comportamiento mecánico de las HMA.

1.4 Alcances y Limitaciones

- El estudio se realizó con un solo tipo de mezcla asfáltica, ésta es una mezcla de graduación semidensa, por lo cual los resultados finales que se obtuvieron son aplicables a este tipo de mezcla.
- Las probetas analizadas se confeccionaron según lo normado por manual de carreteras 8.302.40 y se analizaron según la normativa vigente cada una de ellas para obtener lo esperado.
- Las características de los áridos que se utilizaron en este estudio son conformes a la granulometría de la mezclas asfáltica de graduación semi-densa. Según tabla 5.408.201.F de 5.408 del Manual de Carretera volumen 5 versión 2011.

- El asfalto utilizado fue proporcionado por Bitumix S.A. y es del tipo CA-24, el cual es un asfalto que posee alta viscosidad (2400 Poise).

1.5 Metodología

La metodología del trabajo será la siguiente:

- Se inicia el trabajo a partir de un planteamiento del problema, determinando los objetivos y alcances, seguido de un estudio bibliográfico relacionado con el tema planteado.
- Al tener identificados los factores de interés, se continuará con un trabajo en laboratorio en el cual se definirán los materiales a utilizar. Se fabricarán las mezclas necesarias a estudiar.
- Se realiza el diseño Marshall con los materiales seleccionados con el fin de obtener los niveles de las variables de diseño y del proceso constructivo de la mezcla. Una vez establecidos los niveles de cada variable, se utilizará el diseño factorial 2^k el cual determinará el número de probetas a confeccionar en laboratorio.
- Se procede al análisis de estabilidad Marshall de una serie de las probetas fabricadas, ensayo del cual se obtendrán valores de estabilidad y fluencia.
- Se realiza otra serie de probetas el ensayo de tracción indirecta (ITS), del cual se obtiene el valor de resistencia a tracción de la mezcla.
- Posteriormente se interpretan los resultados, formulando una metodología para determinar de la capacidad estructural de mezclas asfálticas de graduación semi-densa.
- Se desarrolla un modelo de regresión lineal a través del programa Design Expert, el cual permita estimar la estabilidad de las mezclas asfálticas, en función de las variables influyentes.
- Se determina la sensibilidad de cada variable influyente que afectan al fenómeno de la estabilidad y tracción indirecta.
- Se construyen ábacos para el control de calidad en terreno.
- Finalmente se realizan comentarios, se enuncian conclusiones y recomendaciones, sobre el tema planteado.

1.6 Diagrama de metodología

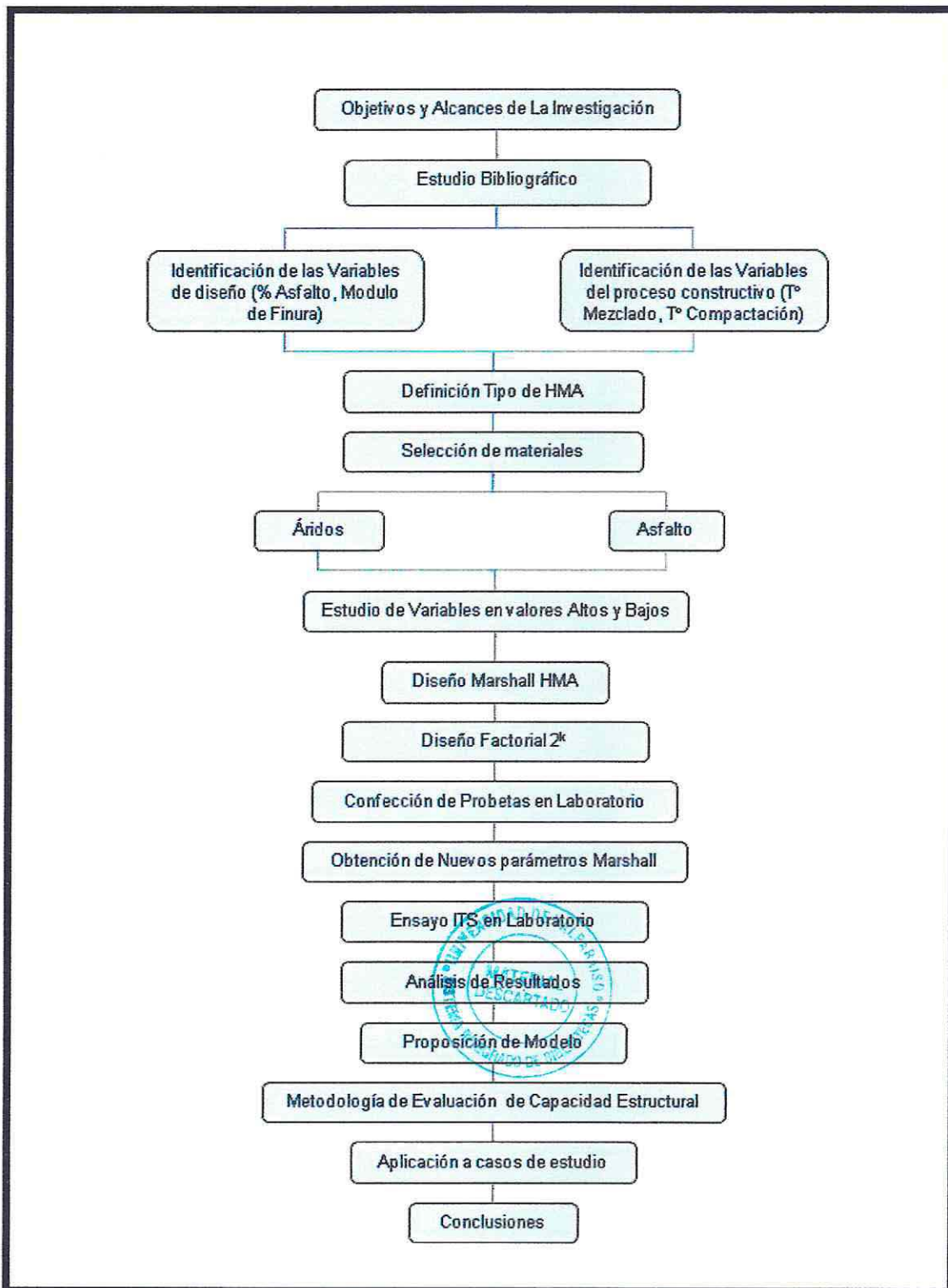


Figura 1.1: Diagrama de metodología de trabajo (Elaboración personal)

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes Generales

2.1.1 Pavimentos Flexibles

Los pavimentos flexibles son usualmente conocidos como pavimentos asfálticos, estos se construyen generalmente de mezclas asfálticas en caliente. Los pavimentos dentro de su composición se puede observar que estos se encuentran conformados por varias capas que a su vez están constituidas por materiales que tienen una resistencia a la deformación decreciente con la profundidad. Se componen de capas con diferente estructuración y cada una de ellas debe aportar al complemento:

- Ser capaz de resistir y distribuir adecuadamente las sollicitaciones producidas por el paso de los vehículos.
- Proporcionar una superficie de rodadura segura y cómoda para los vehículos.
- Ser resistente a los agentes atmosféricos, como climas extremos y precipitaciones.
- Generar una superficie que tenga la impermeabilidad necesaria para que el agua no pueda infiltrarse y de manera que no generar arrastre y socavación de los materiales granulares.
- Ser flexible para adaptarse a ciertas fallas de la base o sub-base.
- Resistir la acción erosiva de los vehículos, ya que su continuo paso produce desprendimiento de partículas, que a lo largo del tiempo lleva a una disminución de las propiedades funcionales.

2.1.2 Mezclas asfálticas en caliente (HMA)

Se entiende por mezcla bituminosa a la mezcla de áridos y un ligante hidrocarbonado, de tal manera que las partículas queden cubiertas por una película continua de este último. La mezcla se fabrica de forma mecánica en centrales fijas o móviles, luego se transporta a obra, donde se extiende y se compacta. Estas mezclas se fabrican con cemento asfáltico y agregados pétreos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 135° C a 165° C, según la viscosidad del asfalto. Para dichas mezclas se calientan también los agregados de tal modo que estos queden completamente secos, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy

superiores a la ambiente, para que en el proceso de mezclado se obtenga un cubrimiento perfecto, para poder compactarla y formar una masa densa y uniforme, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente [4].

Las mezclas asfálticas en caliente (HMA) se encuentran constituidas por un material pétreo convenientemente recubierto con una película de asfalto y luego sometido a un procesos de compactación, que hace que esta mezcla tenga propiedades resistentes al desgaste producido por los vehículos y a su vez pueda traspasar la sollicitación del peso de ellos hacia abajo, absorbiendo una cantidad apreciable de esta sollicitación.

Las mezclas asfálticas en caliente se usan en carreteras de primera categoría, con alta densidad de tránsito, dependiendo de la viscosidad y conformación pueden llegar a ser las de mejor calidad y estabilidad, en la categoría de pavimentos flexibles [5].

2.1.2.1 Propiedades de las mezclas

El diseño de una mezcla asfáltica consiste, de un modo muy general, en seleccionar el tipo y la granulometría de los áridos a utilizar, más el tipo y el contenido de ligante, de manera tal que se cumplan los requerimientos específicos del proyecto para obtener las propiedades pretendidas en una mezcla.

La selección apropiada de los componentes de la mezcla y sus proporciones requiere un conocimiento de las propiedades más significativas y las características del comportamiento de las mezclas bituminosas, así como el efecto que puedan causarle sus componentes.

Las propiedades fundamentales que deben tener las mezclas asfálticas son las siguientes:

- **Durabilidad:** Propiedad de la mezcla que hace que el pavimento sea capaz de resistir la desintegración debido al tránsito y al clima. Éste último, afecta principalmente al asfalto de la capa superficial por estar en contacto con el sol, el aire y el agua, pues produce que este material, pierda las propiedades aglutinantes, se oxide, se endurece y envejece, afectando la vida útil del pavimento.
- **Estabilidad:** Se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones. Esta propiedad depende de la cohesión de la mezcla y de la fricción interna.

La fricción interna es aportada por el material pétreo y depende del tamaño del árido y de la rugosidad de sus caras. Las mezclas con materiales más gruesos y de caras angulosas tendrán mayor estabilidad que mezclas con materiales finos.

La cohesión es la fuerza aglutinante de la mezcla que depende fundamentalmente de la capacidad que tenga el asfalto de mantener unidas las partículas del agregado. Esta propiedad varía inversamente con la temperatura y aumenta con el contenido de asfalto hasta llegar a un óptimo, luego hace un efecto lubricador.

La pérdida de estabilidad en un pavimento se traduce en ahuellamientos y ondulaciones.

- Flexibilidad: Capacidad de la mezcla de adaptarse a las deformaciones por asentamientos de la base y subrasante sin agrietarse.
- Resistencia a la fatiga: Capacidad del pavimento asfáltico de soportar esfuerzos provocados por el tránsito en repetidas pasadas.
- Impermeabilidad: Las mezclas deben ser en lo posible totalmente impermeables, de manera que el agua superficial no pueda atravesar hacia las capas inferiores, evitando con ello que éstas puedan perder capacidad de soporte.
- Resistencia al deslizamiento: Capacidad del pavimento asfáltico de ofrecer resistencia al resbalamiento o deslizamiento, especialmente cuando está húmedo.
- Trabajabilidad: Se refiere a la capacidad que tenga la mezcla de colocarse y compactarse con facilidad.

2.1.2.2 Objetivo del diseño de mezclas

El parámetro principal en el diseño de mezclas asfálticas es encontrar la combinación más económica de agregados y asfalto, que le dé a la mezcla las propiedades antes vistas.

En resumen, podría decirse que lo que se busca con el diseño de las mezclas es cumplir con lo siguiente:

1. Asfalto suficiente para asegurar un pavimento durable a través del total recubrimiento de los agregados y trabazón de las partículas, bajo una adecuada compactación.
2. Estabilidad suficiente de la mezcla para satisfacer los requerimientos de servicio y las demandas del tráfico sin deformación o desplazamiento.
3. Porcentaje de huecos en la mezcla total compactada suficiente para absorber la consolidación producto del amasado del tránsito.
4. Adecuada trabajabilidad para permitir una operación de construcción eficiente en la colocación de la mezcla para pavimentación.

2.2 Métodos volumétricos de diseños de mezclas

Hoy en día existen diversos métodos volumétricos de diseño de mezclas, por lo que no existe uno universalmente aceptado. Dentro de estos, se pueden mencionar, el método Hveem, el método Thomas, el método Superpave y el método Marshall.

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en seleccionar una granulometría y un porcentaje de asfalto de modo que, una vez fabricada y puesta en terreno, cumpla las propiedades para la cual fue diseñada. Los métodos de dosificación tienen como fin determinar el porcentaje de asfalto óptimo para una combinación determinada de agregados de acuerdo a las propiedades seleccionadas.

Previo al diseño de la mezcla, es necesario que todos los materiales constituyentes, agregados y asfaltos, sean analizados para decidir si son aptos o no para formar parte del pavimento a construir.

El método de diseño más utilizado en Chile para las mezclas en caliente, es el Método Marshall, el cual está basado en el empleo de ensayos mecánicos.

A continuación se describirá el método de diseño Marshall, el cual fue utilizado en la etapa experimental de este trabajo, con el fin de elaborar las probetas de las muestras y casos a analizar. Cabe destacar, también, que en base a las condiciones encontradas en los registros estudiados en se establecieron los niveles mínimos y máximos.

2.2.1 Método Marshall

Este método fue desarrollado por Bruce Marshall con el departamento de carreteras del estado de Mississippi, en 1939. En 1943 fue modificado por el cuerpo de ingenieros del ejército de USA para diseñar mezclas de pavimentos para pistas de aterrizaje.

Este método sólo es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan agregados con tamaño máximo igual o inferior a 25 mm [5].

El propósito del Método de dosificación Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de áridos, y se basa en un ensayo mecánico que consiste en romper probetas cilíndricas de 4 " (101,6 mm) de diámetro por 2 ½" (63,5 mm) de altura, las cuales difieren en el porcentaje de asfalto. Suelen utilizarse al menos cinco contenidos de cemento asfáltico, variando entre uno y otro en 0.5%, tratando de estar por encima y por debajo del óptimo esperado. Para cada contenido de asfalto, se fabrican al menos tres probetas.

Las probetas se preparan de acuerdo a un procedimiento específico de calentamiento, mezclado y compactación. Las temperaturas de mezclado y de compactación dependen del cemento asfáltico que se utilice para fabricar las probetas.

La compactación del material dentro de los moldes se realiza a través del martillo Marshall, que es un dispositivo de acero, formado por una base plana y circular de 3 7/8" (98,4 mm) de diámetro, equipado con un peso de 10 [lb] (4.54 [kg]) y construido de modo de obtener una altura de caída de 18" (457,2 mm). Las probetas se compactan con 75 golpes por cara, o como se especifique según el tránsito de diseño.



Figura 2.1: Martillo Marshall

Las dos características principales de este método de diseño son el análisis Densidad-Huecos y el ensayo de Fluidez y Estabilidad de las probetas.

La estabilidad de la probeta es el valor de la carga máxima en Newton que alcanzará al ensayarla a compresión lateral en la máquina de ensaye Marshall, la cual está diseñada para aplicar carga a las probetas a través de unas mordazas semicirculares a una velocidad de deformación de 50,8 mm por minuto, las probetas deben encontrarse precalentadas a 60° Celsius por un tiempo entre 30 y 40 min.

La fluidez es la deformación, en cuartos de milímetros, que ocurre desde el instante en que se aplica la carga hasta lograr la carga máxima.

Con los valores obtenidos, y en base a los criterios definidos en el Manual de Carreteras en función del tipo de tránsito y el empleo de la mezcla, ya sea como carpeta de rodado, carpeta intermedia o capa base, se obtiene el porcentaje óptimo de asfalto y la mezcla de agregados pétreos que garantizan una buena estructura, los cuales deben cumplir con los requerimientos considerados por el diseño.

La importancia de este método radica en el compactador utilizado, asumiendo que simula la densidad que tiene la mezcla en terreno, siendo el principal objetivo de este método de diseño el determinar una mezcla económica de agregados y asfalto que cumpla con los requerimientos considerados para el correcto desempeño.

En resumen, este método, se basa en ciertos parámetros de diseño, como la estabilidad, la densidad y el porcentaje de vacíos de la mezcla, con los cuales se busca establecer un porcentaje óptimo de asfalto para confeccionar una mezcla. Posteriormente se debe constatar si para dicho porcentaje óptimo de asfalto, se cumplen o no los criterios de diseño, representados por la fluidez, los vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con asfalto, cuyos rangos permitidos, están dados por el Manual de Carreteras.

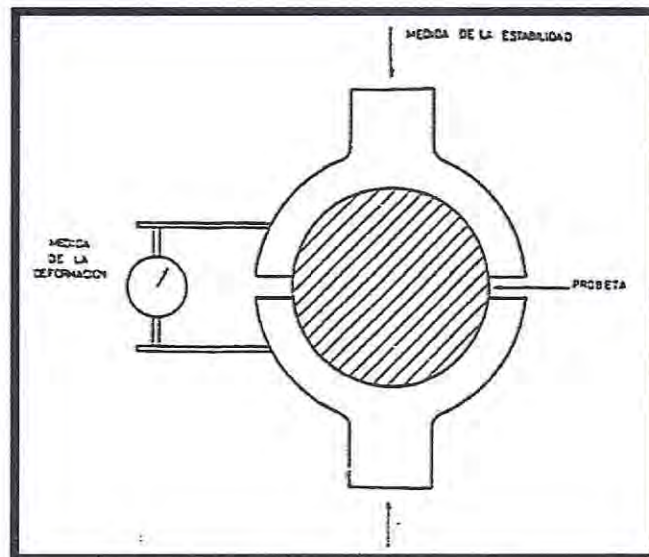


Figura 2.2: Esquema de compresión en prensa Marshall [10]

2.3 Mezclas asfálticas de graduación semi-densa

Las mezclas de graduación semi-densa o media (Gap Graded) es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con materiales pétreos bien graduados y que contienen cierta cantidad de finos que satisfagan los requisitos de calidad establecidos, como lo son granulometría, resistencia al desgaste, solidez, limpieza, pureza y propiedades superficiales. Este tipo de mezcla ya no actúa principalmente como capa drenante, sino como una mejora de fricción y acabado de la superficie de rodado. Se utiliza normalmente en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos con alta resistencia estructural y con capacidad drenante, sin tener un alto riesgo de oxidación. [13].

El criterio de diseño de las mezclas asfálticas de graduación semi-densa como el contenido de asfalto, el porcentaje de huecos y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, está dado por la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Criterios de diseño de mezclas de graduación semi-densa

CARACTERÍSTICAS	VALOR
% Asfalto	4,5 – 6,5
% Huecos en la mezcla	4 - 6
% Vacíos agregado mineral según (TMN)	Min. 14

Fuente: Curso laboratorista vial [15]

Donde:

TMN= Tamaño máximo nominal del árido de la mezcla.

Tabla 2.2: Granulometría semi-densa

DENOMINACIÓN		IV – A - 12	IV – A - 20
TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA EN PESO, %	
(mm)	(ASTM)		
25	(1")		100
20	(3/4")	100	80 - 95
12,5	(1/2")	80 - 95	65 - 80
10	(3/8")	70 - 85	57 - 73
5	(N°4)	43 - 58	40 - 55
2,5	(N°8)	28 - 42	28 - 42
0,63	(N°30)	13 - 24	13 - 24
0,315	(N°50)	8 - 17	8 - 17
0,16	(N°100)	6 - 12	6 - 12
0,08	(N°200)	4 - 8	8 - 4

Fuente: Manual de Carreteras volumen 5.408 [8]

2.4 Calidad de puesta en obra de las HMA

La puesta en obra de las mezclas asfálticas es una de las etapas más importantes en la elaboración de estas, debido a que es en este proceso donde la mezcla asfáltica se puede ver afectada por condiciones externas, cambiando así las condiciones del proceso productivo y afectando finalmente la capacidad de la estructura de la carpeta asfáltica.

Las etapas incluidas en la puesta en obra de la mezcla bituminosa son el transporte de la misma, su extensión sobre la superficie preparada y su compactación. Estas etapas dependerán de cada diseño

de mezcla asfáltica, por lo que no pueden ser representadas con una exigencia única ya que cada diseño tendrá rangos de construcción diferentes.

La preparación de la superficie existente exige que se comprueben la regularidad superficial. Si la superficie está constituida por una mezcla asfáltica, se debe ejecutar un riego de adherencia, si es granular o tratado con conglomerantes hidráulicos, se ejecuta un riego de imprimación.

Se toman las medidas de control correspondientes al riego aplicado: verificar el tiempo de quiebre o de curado del mismo, que no queden restos de fluidificante o de agua en la superficie y que mantenga su capacidad de adherencia si ha transcurrido mucho tiempo desde su aplicación.

- Transporte:

Es la etapa en que la mezcla se traslada del lugar de fabricación a la extendedora por medio de camiones. En este proceso es inevitable el enfriamiento de la mezcla por efecto de la temperatura ambiente y del viento. De todos modos, se puede atenuar este suceso estando la mezcla protegida con una lona sobre el material dentro del camión, logrando así que sólo se enfríe en la zona superficial, aunque se deben evaluar las condiciones climáticas de cada caso para determinar las distancias máximas posibles.

Debe verificarse que la temperatura de la mezcla en el momento de la descarga no sea inferior a la especificada en la fórmula de trabajo, de suceder esto la mezcla se debe descartar.

También es importante evitar la segregación de la mezcla durante la carga y la descarga de los camiones, y para ello se debe mantener una altura mínima de descarga y evitar la formación de pilas cónicas de material, haciendo que el camión se mueva lentamente o esparciendo la mezcla lateralmente en la caja.

- Extensión:

Normalmente el camión descarga la mezcla sobre la tolva de una extendedora y ésta se distribuye sobre la superficie a través de cintas compuertas que regulan la salida del material.

La extensión normalmente se realiza en franjas longitudinales, calculando el ancho de las franjas de modo tal que se realice el menor número de juntas posibles.

La extendedora se regula para que la capa extendida resulte lisa y uniforme, sin segregaciones ni arrastres y con un espesor tal que, una vez compactada, se ajuste a la rasante y a la sección transversal indicada en los planos con las tolerancias admitidas.

- Compactación:

Una vez extendida la mezcla, pasan los compactadores, que pueden ser neumáticos, lisos, con o sin vibración, y se eligen en función del tipo y espesor de mezcla.

Se propone un plan de compactación que debe ser aprobado por el director de la obra de acuerdo a los resultados de un tramo de prueba. En esta oportunidad el director puede ordenar modificar la fórmula de trabajo, cambiar la forma de empleo de algún equipamiento o su reemplazo.

Durante el proceso de compactación se espera que la mezcla sea compactada a la temperatura establecida en el diseño y trabajo realizado anteriormente en laboratorio, para lograr que una vez colocada posea las propiedades mecánicas esperadas en el diseño.

Para poder conseguir la densidad necesaria, que suele expresarse como un porcentaje de la densidad Marshall de referencia, es de suma importancia que la temperatura de la mezcla se mantenga elevada, para que sea posible su densificación.

La compactación debe realizarse de manera continua y sistemática, si la mezcla ha sido extendida en franjas y es de gran importancia que los elementos de compactación se mantengan limpios y en lo posible húmedos.

Los cambios de dirección de los compactadores deben hacerse sobre la superficie ya compactada y los cambios de sentido se hacen con mucha suavidad.

2.5 Control de calidad de las mezclas asfálticas en caliente (HMA)

Los controles efectuados a las mezclas asfálticas en calientes, pueden separarse en dos debido a su confección, ya que unos serán en planta y otros in situ.

2.5.1 Controles en planta

a) Almacenamiento y alimentación en frío del agregado: control de la proporción de entrada de materiales de modo de minimizar la segregación y degradación del agregado, se debe mantener además un flujo constante y uniforme, para obtener cantidades suficientes.

b) Humedad de los áridos a la salida del secador, la que no debe ser superior al 0,5% en peso.

c) Temperatura de los agregados a la salida del secador, debe estar entre 150 y 175 grados Celsius.

d) Granulometría de los agregados, los cuales se encuentran clasificados en buzones de almacenamiento.

- e) Proporción de salida de agregados de buzones de almacenamiento
- f) Temperatura del cemento asfáltico, debe estar de acuerdo con la viscosidad requerida. Para este caso
- g) Cantidad de asfalto y proporción de agregado, que está siendo incorporada.
- h) Homogeneidad en la preparación de la mezcla asfalto-áridos, logrando un cubrimiento adecuado de las partículas.
- i) Temperatura de la mezcla inmediatamente salida del mezclador, la cual debe estar entre 145 y 170 grados Celsius.
- j) Contenido de asfalto y granulometría de los agregados de la mezcla preparada, a través de extracción, para verificación de la dosificación.

2.5.2 Controles In situ

- a) Condiciones climáticas: la mezcla asfáltica deben colocarse a temperaturas atmosféricas superiores a 5°C y el tiempo no sea lluvioso o brumoso.
- b) Superficie: la superficie deberá estar limpia, seca y libre de cualquier material extraño, previo a la colocación de una capa asfáltica deberá haberse aceptado la capa inferior (base granular, imprimación, riego).
- f) Temperatura de la mezcla: inmediatamente después de ser colocada sobre la superficie y antes de ser compactada se debe controlar la temperatura de la mezcla, en ningún caso inferior a 110° C, si no está dentro de las tolerancias, la mezcla debe ser desechada.
- g) Control de compactación: se debe controlar la compactación, la densidad de esta debe cumplir con las especificaciones de la obra.

La compactación será controlada mediante un densímetro nuclear. Este es un equipo de medición capaz de determinar rápidamente y con precisión el porcentaje de humedad y la densidad de suelos, agregados y asfalto directamente en el sitio, entregando resultados satisfactorios en espesores aproximados de 50 a 300 mm.

- h) Testigos: Estos deben ser al menos 25 o debe realizarse una extracción cada 1750 m², a cada uno de estos debe obtenerse las densidades y espesores para verificación del diseño utilizado. Se debe considerar que el resultado individual debe ser de al menos 95% de la densidad de diseño y para el espesor debe cumplir con al menos el 92% del espesor de diseño [5]. Si no ocurre lo anteriormente mencionado la carpeta asfáltica no cumple las condiciones establecidas por el diseño de la mezcla realizada en laboratorio y por tanto se aplican sanciones e incluso una reconstrucción completa del pavimento.

2.6 Descripción de ensayo Tracción Indirecta (ITS)

La estructura de un pavimento se deteriora debido al paso de cargas y a los cambios climáticos. Por ello es necesario conocer los parámetros que caracterizan a las mezclas asfálticas y definir sus límites de falla, tanto por fatiga, como por fisuración térmica o deformación plástica. Por tanto es importante saber que ensayo debe utilizarse para caracterizar a la mezcla y que análisis se debe realizar a partir de los datos obtenidos.

Generalmente, estos parámetros son los datos básicos utilizados en los modelos teóricos que intentan reproducir el comportamiento estructural de un pavimento. De acuerdo al grado de sofisticación del modelo, variará el tipo de información necesaria a obtener mediante los diferentes ensayos. La elección del tipo de ensayo para determinar las características de una mezcla resultará de un balance entre la precisión obtenida con el mismo y la factibilidad de su empleo, con el fin de obtener un modelo tan representativo como sea posible, pero a la vez de fácil aplicación considerando la disponibilidad de tiempo, de recursos económicos y de equipamiento [10].

Algunos investigadores, como Von Quintus, Scherocman y Hughes coinciden según sus experiencias, en que los valores típicos de diseño de una mezcla, tales como los obtenidos con los ensayos Marshall o Hveem, tienen una pobre correlación con las propiedades comúnmente requeridas para evaluar el fallo y el comportamiento de una mezcla asfáltica, que suelen ser fluencia, resistencia a tracción indirecta, fatiga y deformación permanente [12].

Sería ideal contar con un ensayo capaz de inducir un estado de tensiones a las probetas, similar al que se produce en la capa real. Roque y Buttlar esquematizan en la figura 2.3, el estado de tensiones provocado por una carga simple en la estructura de un pavimento, donde se distinguen cuatro casos:

- Compresión triaxial en la superficie inmediata bajo la rueda
- Tracción longitudinal y transversal combinada con compresión vertical en la parte inferior de la capa asfáltica bajo la rueda.
- Tracción longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.
- Compresión longitudinal o transversal en el fondo de la capa asfáltica a una cierta distancia de la carga.

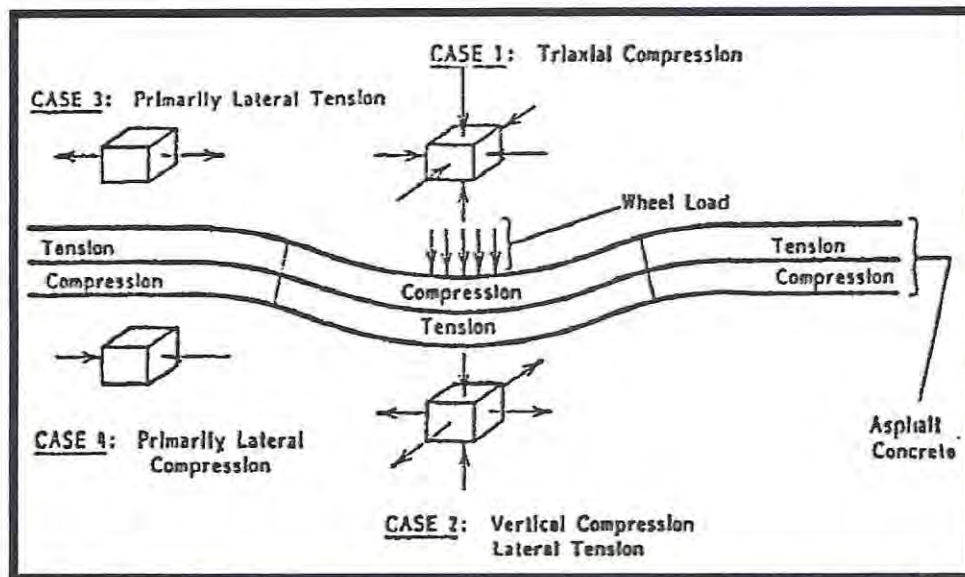


Figura 2.3: Estado de tensiones en un pavimento bajo una carga simple [10]

Si bien es cierto los cuatro estados tensionales son de importancia, pero sólo hay uno que tiene tensiones críticas y éste se produce en la fibra interior de la capa asfáltica bajo la carga aplicada. El ensayo de tracción indirecta por compresión diametral reproduce el estado de tensión crítica para la mezcla asfáltica bajo las condiciones de carga de servicio [6].

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, el ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Si la temperatura del ensayo fuera mayor a la indicada, el material se comportaría de manera no-lineal, ya que comenzará a ablandarse lo que generará mediciones desiguales por los factores analizados en este estudio.

El ensayo de tracción indirecta reproduce el estado de tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. Es un método práctico y simple para caracterizar las propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar las fallas causadas por tensiones de tracción.

El ensayo de tracción indirecta o ITS (Indirect Tensile Strength) consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de altura, igual a la definida en el ensayo Marshall o testigos obtenidos en terreno. Se aplica una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura. De esta manera se desarrollan tensiones de tracción uniformes a lo largo del plano determinado por las generatrices opuestas de aplicación de la carga, esto permite obtener la resistencia a la tracción, deformaciones y el módulo resiliente de la mezcla estudiada, los cuales están relacionados con la cohesión de la mezcla.

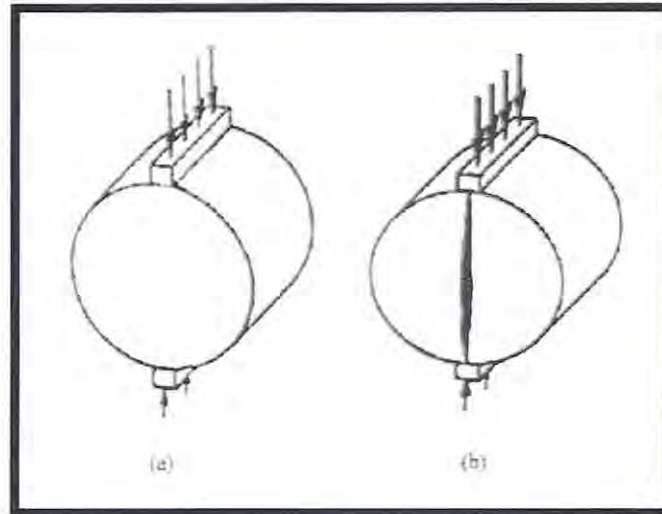


Figura 2.4: Configuración de carga (a) y Falla del ensayo Tracción Indirecta (b) [6]

El valor de la resistencia a la tracción indirecta de una probeta se obtiene mediante una prensa Marshall la cual se equipa con un cabezal Lottman (conocido también como prensa Lottman) que permite disponer la probeta de manera horizontal y hacer efectiva la carga aplicada, a una velocidad de desplazamiento uniforme e igual a 50,8 mm/min.

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura. El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. Se trabaja con una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio y sugiere que no se utilicen temperaturas superiores al punto de reblandecimiento del ligante por ser predominante el carácter viscoso de las mezclas. Es por esto que el ensayo se considera accesible, de obtención sencilla, de bajo coste y adecuado para el comportamiento en servicio de las mezclas asfálticas construidas.

Se puede relacionar el concepto de resistencia a la tracción indirecta con el módulo resiliente de las mezclas asfálticas. Concretamente Miro R.; Pérez F.; Martínez A. asocian el concepto de tracción indirecta a la cohesión de la mezcla una vez extendida y compactada e incluso se ha desarrollado experimentalmente una ecuación que relaciona la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de la mezcla, obtenida por los autores mencionados anteriormente:

$$M = 1411,9 * R_{TI} + 23069^{(1)} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

M= Módulo resiliente (kg/cm^2)

⁽¹⁾ Referencia Bibliográfica [10]

R_{TI} = Resultado de ensayo Tracción Indirecta (kg/cm^2)

El módulo resiliente es un concepto propio de materiales con comportamiento elástico. Sin embargo, las mezclas bituminosas tienen un comportamiento visco-elástico-plástico. Esto es, que la recuperación de la forma primitiva presenta un retraso respecto a la aplicación de la carga. Cuando se trabaja a bajas temperaturas el componente elástico del módulo es preponderante y suele asimilarse la mezcla asfáltica a un cuerpo elástico, en el caso de que el módulo de resiliencia sea bajo o esté sometido a altas temperaturas y/o largos periodos de aplicación de carga este módulo no sólo dependerá de los parámetros indicados sino también de la naturaleza y granulometría de los áridos. Estos mismos factores condicionan la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica.

El módulo resiliente que se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables [21]. Este módulo mide la deformación elástica dinámica de las capas granulares bajo cargas cíclicas producidas por el tránsito vehicular.

2.7 Variación entre diseño, construcción y control de calidad

El diseño estructural de un pavimento asfáltico está dado por las necesidades estructurales de éste y los diferentes materiales que lo constituyen. Actualmente los métodos utilizados más comúnmente para el diseño de pavimentos, son el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el método desarrollado por el programa de la corporación nacional de carreteras de los Estados Unidos MEDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide) [21], los cuales consideran que la propiedad fundamental para caracterizar los materiales que constituyen la sección de un pavimento de una carretera es el parámetro denominado Módulo de Resiliencia.

El módulo de resiliencia viene dado cuando los materiales que conforman la sección estructural de un pavimento se ven sometidos a una 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 [24]. 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.

Debido al paso de los vehículos por la superficie de rodamiento de un pavimento, ésta empieza a distribuir los esfuerzos hacia las capas inferiores, las cuales, por esta razón se ven sujetas a esfuerzos cíclicos de compresión y luego de tensión los cuales van provocando deformaciones en toda la estructura del pavimento.

Después de descargar gradualmente el pavimento casi toda la deformación a que se vió sometida este se recupera, sin embargo existe una pequeña deformación permanente (deformación plástica), la cual al someter la muestra a un numero N de ciclos de carga y descarga se va acumulando, aunque dicha deformación permanente en cada ciclo consecutivo cada vez va siendo menor hasta llegar al ciclo N donde prácticamente se recupera toda la deformación. Esto se debe a que el pavimento pasa de tener un comportamiento elástico.

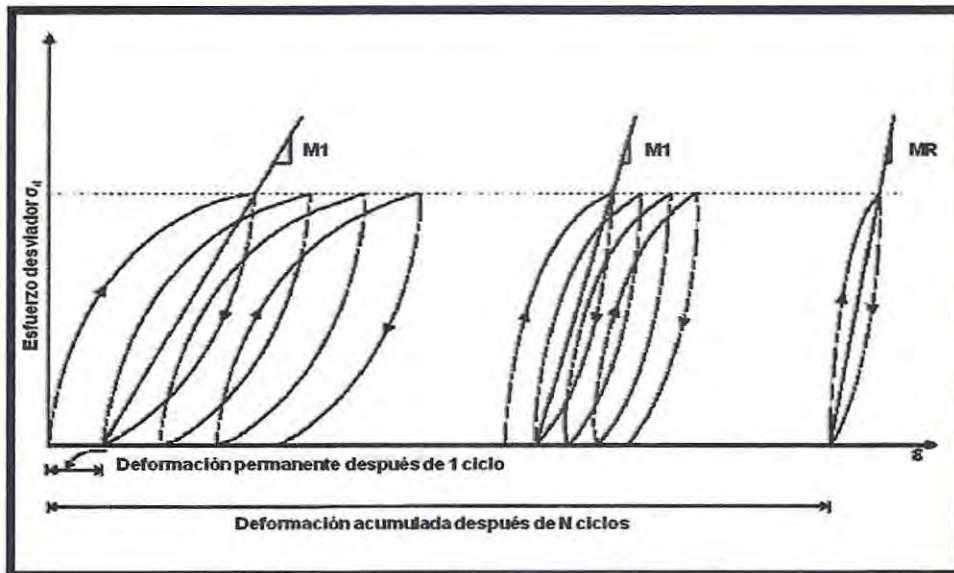


Figura 2.5: Gráfico de deformación por carga móvil y valor de Módulo resiliente [6].

Aun así, debido a que el material describe prácticamente la misma curva y que la deformación permanente es muy pequeña, se considera para fines de análisis que el comportamiento de los materiales es fundamentalmente elástico durante cada ciclo de carga y por lo tanto se puede caracterizar con el denominado módulo de resiliencia.

Por otra parte el diseño de la mezcla de un pavimento asfáltico no está relacionado con el módulo resiliente, ya que este viene dado por el diseño Marshall o más bien conocido como estabilidad Marshall.

El método puede usarse tanto para el diseño en laboratorio como en el control de terreno.

Hay que tener en cuenta que previo a la ejecución del método se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Los materiales a usar deben cumplir con las especificaciones de proyecto.
- La mezcla de agregados debe cumplir con las especificaciones granulométricas del proyecto.

- Se deben determinar las densidades reales secas de todos los agregados y las del asfalto para ser usados en el análisis de huecos de la mezcla.

Las dos características principales del método de diseño son el análisis densidad-huecos y el ensayo de fluencia y estabilidad de las probetas [15].

La estabilidad de la probeta de ensaye es la carga máxima en Newton que esta alcanza a 60°C y la fluencia será la deformación, en decimas de milímetros, que ocurre desde el instante que se aplica la carga hasta lograr la carga máxima [9].

El control sobre la calidad de la mezcla suele realizarse sobre el material fabricado en planta, no sobre el producto una vez extendido y compactado en el suelo.

Durante el proceso de transporte, extendido y compactación las condiciones externas pueden generar alteraciones e influir en la calidad el producto final y debido a que en estos procesos no son consideradas ni detectadas las variaciones que pueden existir.

Por consiguiente las verificaciones de calidad aplicados en Chile a los pavimentos asfálticos, están dados por la extracción de testigos, a los cuales se les mide su densidad, el espesor, porcentaje de asfalto y granulometría.

Con todos estos antecedente ya estipulados se puede llegar a la siguiente discrepancia, en donde el mecanismo para diseñar un pavimento asfáltico es diferente al mecanismo que se usa para diseñar dicha mezcla y estos a su vez son diferentes a lo que se controla en terreno, es decir, existe una discordancia entre los tres procesos para conformar un correcto pavimento asfáltico.



Figura 2.6: Discordancia entre diseño estructural, diseño de mezclas y control de calidad
Fuente: Elaboración propia

2.8 Influencia de las variables de diseño y constructivas en las propiedades mecánicas de las HMA

La temperatura de compactación de una mezcla asfáltica afecta sus propiedades dinámicas y mecánicas, llegando a obtenerse descensos hasta del 40% del módulo resiliente, lo que repercute en el tiempo de vida útil de la estructura [2].

Otro factor de importancia y que se ha estudiado a lo largo del tiempo es la temperatura de mezclado. Bajas temperaturas de mezclado se traducen en un aumento en la viscosidad del asfalto, disminuyendo la trabajabilidad lo que lleva finalmente a obtener una mezcla no homogénea, áridos no recubiertos por el bitumen, además, de una mayor cantidad de vacíos de aire y una reducción de vacíos llenos de agregado mineral, lo que afecta finalmente en las capacidades mecánicas de la estructura [7].

Una disminución en la temperatura de mezclado y compactación produce una disminución en la fluencia de la mezcla. Además también se producen un aumento en los vacíos de aire, lo que puede causar un aumento de grietas y ondulaciones en la superficie [17].

La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto, a esto se debe agregar que la estabilidad dependerá de la fricción y cohesión interna. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas [1]. La forma del agregado en la mezcla proporciona mayor estabilidad si estos son triturados ya que se genera trabazón y cohesión entre las partículas.

En lo que se refiere al asfalto, estudios previos han demostrado que la cantidad de asfalto de la mezcla afecta directamente a la cohesión de ésta. Bajos contenidos de asfalto en la mezcla, producen efectos adversos en la durabilidad, permeabilidad y valores más altos de fatiga. Estos se representan a través de desintegraciones por pérdida de agregado, envejecimientos prematuros en la mezcla, etc. En el caso contrario cuando se sobrepasa el contenido óptimo de asfalto, se genera inestabilidad en el pavimento, perdiéndose fricción entre las partículas, exudación de asfalto, ondulaciones y ahuellamientos en éste [14].

CAPITULO 3

DISEÑO DEL CASO DE ESTUDIO

3.1 Trabajos experimentales preliminares

En este capítulo, se describe la metodología seguida, los procedimientos desarrollados en los cuales se especifican los ensayos realizados, las características de los materiales utilizados y las características de la mezcla asfáltica.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

3.1.1 Agregados pétreos

Se denomina agregado grueso a la porción del agregado retenida en el tamiz 2.5 mm (N° 8) y agregado fino a la porción que pasa el mismo tamiz. Si se requiere, puede adicionarse filler de aportación, el cual está constituido por polvo mineral fino, tal como cemento hidráulico, cal u otro material inerte, libre de materia orgánica y partículas de arcilla.

Para este caso no se utilizarán materiales finos adicionales como filler, cemento hidráulico, etc.

Los agregados utilizados provienen de cantera de la Planta Con-Con de la Empresa Bitumix S.A. Se ocupan tres materiales: Gravilla 3/4", Gravilla 3/8" y Polvo Roca.

A estos materiales se les realizaron los siguientes ensayos de caracterización, de acuerdo al Vol.8 del Manual de Carreteras.

- Determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos (granulometría).
- Determinación de la densidad real seca, densidad neta y absorción de los agregados
- Cubicidad de partículas.
- Índice de Plasticidad.
- Determinación de la resistencia al desgaste de los agregados, por medio de la máquina de los Ángeles

3.1.2 Granulometría de los áridos

La granulometría está definida como la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen el agregado pétreo. Se determina mediante el análisis granulométrico, el cual consiste en separar una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La granulometría se expresa en función de los porcentajes parciales retenidos en cada tamiz. A continuación, se presenta el resultado del análisis granulométrico y la respectiva curva granulométrica.

Tabla 3.1: Granulometría agregados pétreos.

Tamices		Porcentaje que pasa, %		
mm	ASTM	Gravilla 13/17	Gravilla 6/13	Polvo Roca 0/4
20	(3/4")	100		
12,5	(1/2")	36	100	
10	(3/8")	2	75	100
5	(N°4)	1	7	94
2,5	(N°8)		4	60
1,25	(N°16)		3	40
0,63	(N°30)		3	28
0,315	(N°50)			20
0,16	(N°100)			14
0,08	(N°200)			10

Fuente: Dosificación Bitumix.

Este ensayo se realizó de acuerdo a lo descrito en la sección 8.202.3 del volumen 8 del manual de carreteras [9]. Los tamices utilizados para la obtención de la granulometría según ASTM 3/4"; 1/2"; 3/8"; malla #4; malla #8; malla #30; malla #50; malla #100; malla #200.

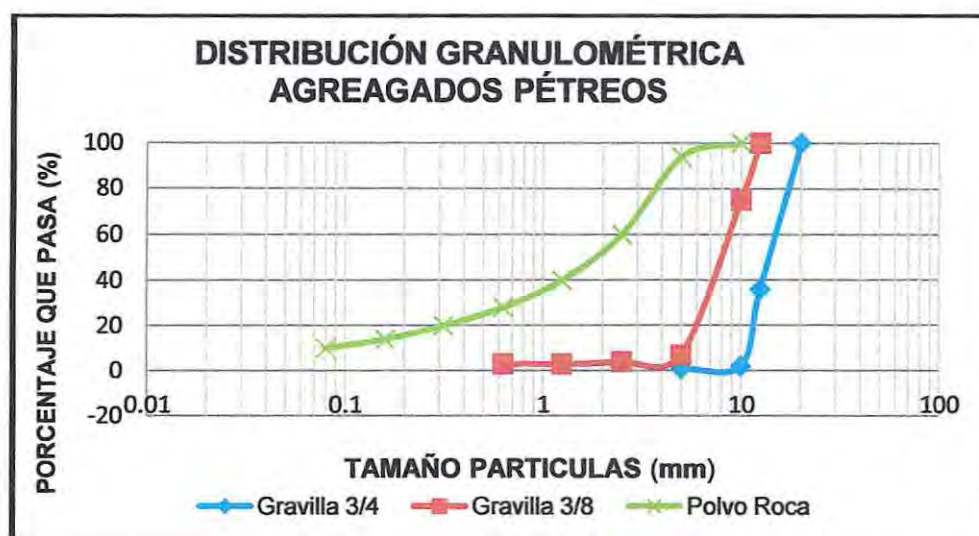


Figura 3.1: Grafico de curva distribución granulométrica agregados pétreos.
Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Densidad real, neta y absorción

Este ensayo sirve para conocer las características propias del material en relación a la humedad y la variación de pesos que pueden tener para el uso posterior que se dé a los áridos. La densidad es una propiedad física de los agregados y está definida por la relación entre la masa y el volumen de una cantidad determinada de árido, lo que significa que depende directamente de las características del grano de agregado. Como generalmente las partículas de agregado tienen poros tanto saturables como no saturables, dependiendo de su permeabilidad interna pueden estar vacíos, parcialmente saturados o totalmente llenos de agua. Esto genera una humedad, lo que trae como consecuencia es que si el material posee mucha humedad, se producen hinchamientos que pueden modificar las condiciones de diseño estipuladas. La densidad real se relaciona la densidad de la mezcla final, ya que esta es la relación entre la cantidad de masa contenida en determinado volumen.

El material a utilizar en la construcción de pavimentos no deben poseer grandes absorciones. El método para la determinación de este índice está descrito en la sección 8.202.20 del volumen 8 del Manual de Carreteras [9].

Tabla 3.2: Densidades y absorción del agregado pétreo.

Ensayes	Gravilla 13/17	Gravilla 6/13	Polvo Roca 0/4
Densidad Neta (kg/m^3)	2737	2739	2700
Densidad Real Seca (kg/m^3)	2672	2644	2609
Absorción	0.89	1.33	1.29

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Cubicidad de partículas

A través del ensayo de cubicidad de partículas, se determina el contenido porcentual de partículas chancadas, rodadas y lajeadas de la fracción de un pétreo retenida en el tamiz N° 4 (5 mm). Es necesario que para una mayor resistencia del pavimento a construir, que los áridos sean chancados, ya que estas otorgan trabazón a la estructura. Los áridos rodados no generan trabazón y las partículas lajeadas por su forma se transforman en un material poco resistente en grandes cantidades. El procedimiento se describe en la sección 8.202.6 del volumen 8 del Manual de Carreteras [9].

Tabla 3.3: Cubicidad de partículas agregado pétreo grueso.

Ensayes	Gravilla 13/17	Gravilla 6/13	Exigencia	Método
Partículas Chancadas (%)	97	98	mín. 90	8.202.6 (MC 2012)
Partículas lajeadas (%)	5	6	máx. 10	8.202.6 (MC 2012)

Fuente: Elaboración propia

3.1.5 Índice de plasticidad

El ensayo de índice de plasticidad (IP) es realizado para obtener el rango de humedades en las que el suelo tiene un comportamiento plástico. El índice de plasticidad se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. El ensayo de límite líquido (LL) determina la humedad a partir de la cual un suelo deja de tener un comportamiento plástico y pasa a tener un comportamiento viscoso y el límite plástico (LP) corresponde a la humedad en la que el suelo pasa de tener un comportamiento frágil a uno sólido, es decir, es la humedad límite entre el estado frágil y sólido.

El material estudiado no permite la realización correcta del límite plástico (LP), por lo que el material se determina como no plástico (NP).

El método para la determinación de este índice está descrito en la sección 8.102.4 del volumen 8 del Manual de Carreteras [9].

Tabla 3.4: Índice de plasticidad agregado pétreo.

Ensayes	Gravilla 13/17	Gravilla 6/13	Polvo Roca 0/4	Método
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	8.102.4 (MC 2012)

Fuente: Elaboración propia

3.1.6 Resistencia al desgaste

Este ensaye se basa en conocer la resistencia a la abrasión y el desgaste de los agregados que conformaran la estructura, es decir, busca medir la dureza. Se realiza en pétreos mayores a 2.5mm, mediante la máquina de Los Angeles. Éstos deben ser capaces de ser durables y poder resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

El procedimiento de este ensaye se encuentra en la sección 8.202.11 del volumen 8 del Manual de Carreteras [9].

Tabla 3.5: Resistencia al desgaste de agregado pétreo grueso.

Ensaye	Gravilla 13/17	Gravilla 6/13	Exigencia	Método
Desgaste de los Ángeles (%)	10	13	máx. 25	8.202.11 (MC 2012)

Fuente: Elaboración propia

3.1.7 Mezcla de áridos

La mezcla de los áridos cumple con los requisitos de una mezcla asfáltica en caliente, establecidos en la sección 5.408 del volumen 5 del Manual de Carreteras [8]. Los resultados de los ensayos de densidad y absorción de la mezcla de agregados, se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 3.6: Densidades y absorción de la mezcla de agregados.

Ensayes	Mezcla agregados
Densidad Neta (kg/m ³)	2660
Densidad Real Seca (kg/m ³)	2646
Absorción	0,21

Fuente: Elaboración propia

La granulometría de la mezcla de agregados es de tipo semi-densa, la cual comúnmente se usa para carpeta de rodadura. La granulometría utilizada y la banda IV-A-12 descrita en Manual de Carretera volumen 5.048, se presentan en la siguiente tabla 3.7.

Tabla 3.7: Granulometría semi-densa según manual de carreteras vol. 5 y mezcla óptima de trabajo.

Tamices		Porcentaje que pasa, %	
mm	ASTM	IV- A -12	Mezcla Óptima
20	(3/4")	100	100
12,5	(1/2")	80 - 95	87
10	(3/8")	70 - 85	75
5	(N°4)	43 - 58	55
2,5	(N°8)	28 - 42	35
1,25	(N°16)	-	23
0,63	(N°30)	13 - 24	17
0,315	(N°50)	8 - 17	11
0,16	(N°100)	6 - 12	8
0,08	(N°200)	4 - 8	6

Fuente: Elaboración propia

La mezcla de áridos se debe trabajar idealmente con valores que se encuentren en el centro de la banda IV-A-12 hasta la malla N°8. Para los siguientes tamaños, se adopta los valores mínimos del intervalo, esto para disminuir la cantidad de finos en la mezcla.

La figura corresponde a la distribución granulométrica de la banda IV-A-12 y la mezcla óptima de áridos dada por la empresa de mezclas bituminosas Bitumix

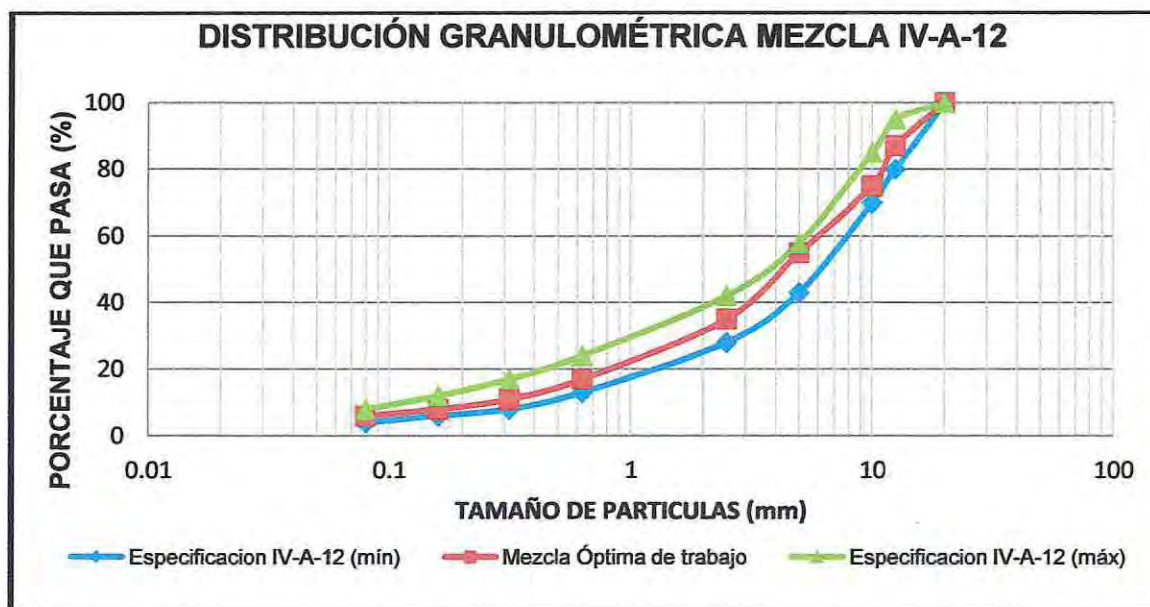


Figura 3.2: Gráfico curva distribución granulométrica mezcla IV-A-12

Fuente: Elaboración propia

3.1.8 Módulo de finura

El módulo de finura, es la representación de una granulometría a través de un valor numérico, este se obtiene tomando el porcentaje retenido acumulado de una serie de tamices. En el anexo A se muestra la metodología para la obtención de este valor

Para el caso de este estudio el valor de módulo de finura se evalúa a partir de los parámetros entregados por la banda IV-A-12 que actualmente se utiliza en concretos asfálticos.

Tabla 3.8: Porcentaje que pasa según curvas granulométricas.

Tamices		% pasa	% pasa Curva Superior	% pasa Curca Optima	% pasa Curva Inferior
(mm)	ASTM				
20	(3/4")	100	100	100	100
12,5	(1/2")	80 - 95	95	87	80
10	(3/8")	70 - 85	85	75	70
5	(N°4)	43 - 58	58	55	43
2,5	(N°8)	28 - 42	42	35	28
1,25	(N°16)	-	-	23	-
0,63	(N°30)	13 - 24	24	17	13
0,315	(N°50)	8 - 17	17	11	8
0,16	(N°100)	6 - 12	12	8	6
0,08	(N°200)	4 - 8	8	6	4

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo para obtener el valor de módulo de finura se encuentra en el anexo A. En la tabla 3.9 se muestra la distribución de la curva granulométrica inferior que corresponde a una cantidad mayor de áridos gruesos y menor cantidad de áridos finos dentro de la mezcla de áridos final, esto se encuentra graficado en la figura 3.3 donde se puede ver que el modulo se ajusta al valor límite inferior de la banda de trabajo IV-A-12.

Tabla 3.9: Módulo de finura curva límite inferior, módulo grueso.

Tamices		Curva Inferior		
(mm)	ASTM	% pasa	% Acumulado	retenido
20	(3/4")	100	0	
12,5	(1/2")	80	20	
10	(3/8")	70	30	
5	(N°4)	43	57	
2,5	(N°8)	28	72	
1,25	(N°16)	-	-	
0,63	(N°30)	13	87	
0,315	(N°50)	8	92	
0,16	(N°100)	6	94	
0,08	(N°200)	4	96	
Módulo de finura			4.32	

Fuente: Elaboración propia.

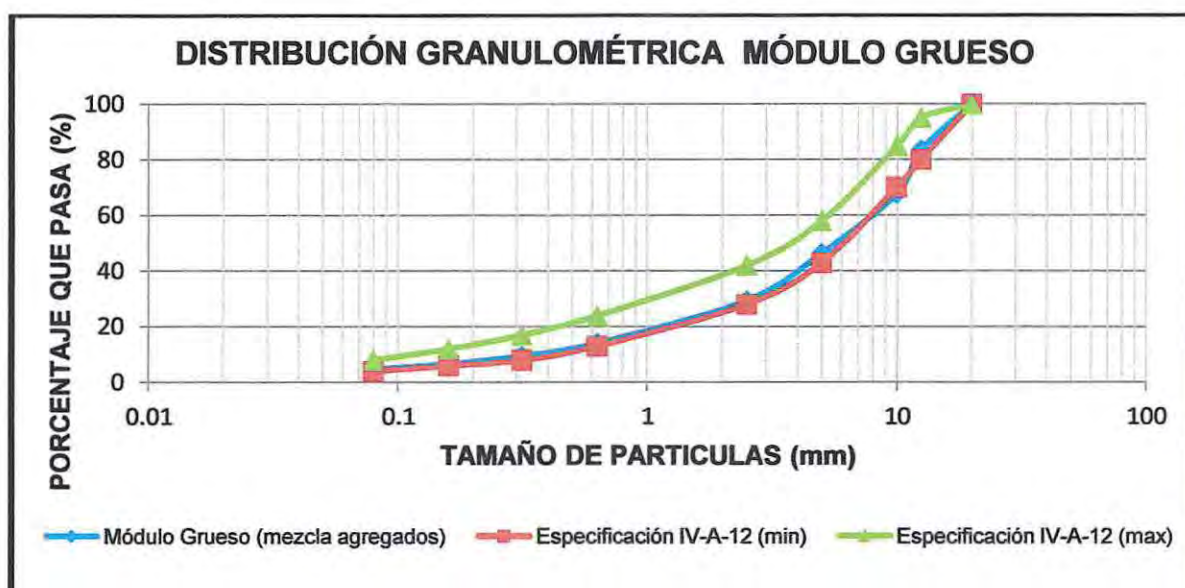


Figura 3.3: Grafico curva granulométrica límite inferior banda, modulo grueso.

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la tabla 3.10 ésta muestra la distribución de la curva granulométrica superior que corresponde a una cantidad mayor de áridos finos y una cantidad menor de áridos gruesos dentro de la mezcla de áridos final, esto se encuentra graficado en la figura 3.4 donde se puede ver que el módulo se ajusta al valor límite superior de la banda de trabajo IV-A-12.

Tabla 3.10: Módulo de finura curva límite Superior.

Tamices		Curva Superior		
(mm)	ASTM	% pasa	% Acumulado	retenido
20	(3/4")	100	0	
12,5	(1/2")	95	5	
10	(3/8")	85	15	
5	(N°4)	58	42	
2,5	(N°8)	42	58	
1,25	(N°16)	-	-	
0,63	(N°30)	24	76	
0,315	(N°50)	17	83	
0,16	(N°100)	12	88	
0,08	(N°200)	8	92	
Módulo de finura			3.62	

Fuente: Elaboración propia.

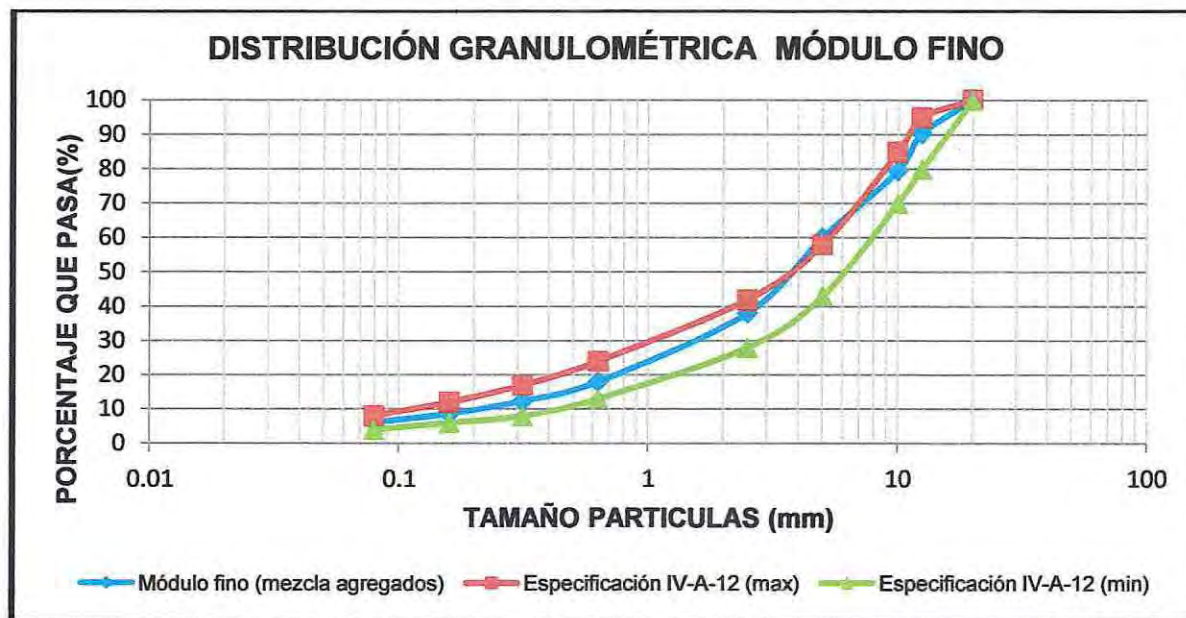


Figura 3.4: Grafico curva granulométrica límite superior banda, módulo fino.

Fuente: Elaboración propia

La mezcla óptima de trabajo debe ajustarse a un valor tal que la curva granulométrica de esta mezcla pase por el centro de la banda de trabajo IV-A-12. En la figura 3.4 se muestra la distribución de la mezcla de trabajo óptima de Bitumix S.A y en la tabla 3.11 se especifica esta distribución granulométrica.

Tabla 3.11: Módulo de finura curva óptima.

Tamices		Curva Óptima		
(mm)	ASTM	% pasa	% Acumulado	retenido
20	(3/4")	100	0	
12,5	(1/2")	87	3	
10	(3/8")	75	25	
5	(N°4)	55	45	
2,5	(N°8)	35	65	
1,25	(N°16)	23	77	
0,63	(N°30)	17	83	
0,315	(N°50)	11	89	
0,16	(N°100)	8	92	
0,08	(N°200)	6	94	
Módulo Finura			3.99	

Fuente: Elaboración propia.

3.1.9 Características del ligante asfáltico

Los ligantes son constituidos por la fracción más pesada de la destilación del petróleo. La mayor o menor dureza del asfalto depende de las condiciones de destilación, tales como presión, temperatura y tiempo.

El uso principal del cemento asfáltico es en mezclas en caliente para la construcción y conservación de vías. Actualmente, los cementos asfálticos se clasifican según el grado de viscosidad absoluta medida a 60° C, siendo los más usados los asfaltos CA 14 (viscosidad entre 1400 y 2400 poise) y CA 24 (viscosidad mayor a 2400 poise).

Anteriormente, la clasificación era según el Grado de Penetración en base a la dureza o consistencia que es medida mediante el ensayo de penetración. Este ensayo mide las décimas de milímetros que una aguja penetra dentro de la masa de asfalto a 25° C, con un peso de 100 gr en 5 segundos. En este caso, los cementos asfálticos más utilizados eran los CA 60-80 y CA 80-100, donde las cifras indican los límites máximos y mínimos de la penetración.

El material que se utilizará para la realización de esta investigación, proviene de Probisa, proporcionado al alumno por Bitumix Con-Con, a través del Laboratorio Regional de Vialidad. Se trabajará solo con un tipo de asfalto ya que éste es el tipo de ligante asfáltico mayormente utilizado en la región. Este es un asfalto del tipo CA - 24, que actualmente es el más utilizado para la construcción de pavimentos asfálticos en caliente.

El cemento asfáltico fue caracterizado según los siguientes ensayos:

- Viscosidad Brookfield a 60° y a 135° C.

- Ductilidad.
- Penetración.
- Punto de ablandamiento.
- Densidad.

Además, este cemento fue sometido al proceso de envejecimiento en el horno de película delgada rotatoria (RTFO), realizándose los ensayos de:

- Pérdida por Calentamiento.
- Viscosidad Absoluta a 60° C.
- Ductilidad.
- Índice de Durabilidad.

Respecto a las características de este, se resumen en la tabla (3.12) de acuerdo a los ensayos que se le realizaron:

Tabla 3.12: Resumen ensayos realizados al asfalto.

ENSAYES	RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN
Viscosidad Absoluta 60°C (P)	3960	Mayor o igual a 2400
Ductilidad a 25°C (cm)	105	Min 100
Ensayo de la Mancha (% Xilol)	-25	Max 25%
Punto de Inflamación (°C)	240	Min 232
Punto de Ablandamiento (°C)	51	-
Índice de Penetración (IP)	-0,2	-1,5 a +1,0
Ensayo de Película delgada Rotatoria		
Perdida por Calentamiento (%)	0,26	Max 0,8
Viscosidad Absoluta 60°C (P)	12672	-
Ductilidad 25°C (cm)	105	Min 100
Índice de Durabilidad (ID)	3,2	Max 3,5
Temperatura de Mezclado	157	-
Temperatura de Compactación	146	-
Penetración 25°C (0,1 mm)	66	-

Fuente: Certificado de Probisa otorgado por Bitumix

3.1.10 Nomograma de Heukelom

El nomograma de Heukelom permite la caracterización de los ligantes asfálticos, desde el punto de vista reológico y permite obtener información sobre el origen y los tratamientos de estos.

La reología es una de las propiedades más importantes de los productos asfálticos. Se refiere a la variación de las propiedades del flujo a través del tiempo de aplicación de una carga e incluye una propiedad muy importante: la viscosidad.

La viscosidad de asfalto varía con la temperatura en mayor o menor grado (susceptibilidad térmica) y su estudio es muy importante y de interés práctico, porque en todas las aplicaciones del asfalto se debe modificar su viscosidad mediante el calentamiento.

A partir de los valores obtenidos de los ensayos químicos realizados a un ligante asfáltico, específicamente ensayos de Penetración, Punto de Ablandamiento, Punto de Fragilidad Frass, Viscosidad Cinemática y Viscosidad absoluta, se traza la mejor recta, la cual se traslada en forma paralela hasta el punto ubicado en la parte superior del diagrama [9]. La intersección de esta última recta con la escala de Índice de Penetración entrega el valor de IP (Índice de Penetración) para el ligante analizado, este índice proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica de los ligantes asfálticos a los cambios de temperatura.

A partir de la mejor recta trazada, se obtienen las temperaturas de mezclado y compactación para el ligante analizado, estas se obtienen de la intersección en 2 Poisse y 3 Poisse respectivamente de la recta trazada y la temperatura se obtiene a través de una línea vertical a esta intersección.

En la página siguiente se muestra la figura 3.5 la cual presenta el nomograma de Heukelom, con el cual se evaluaron los parámetros del ligante asfáltico utilizado.

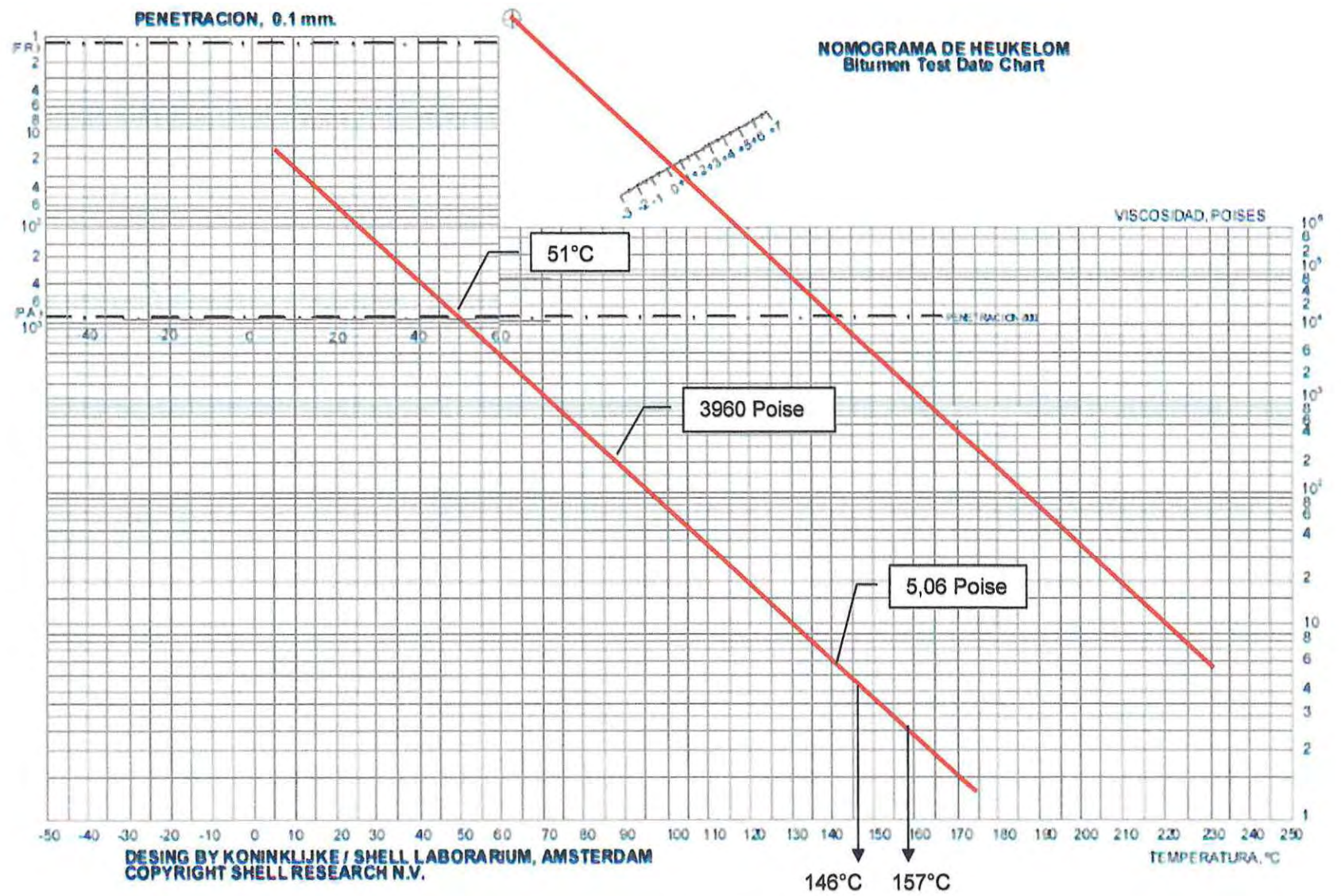


Figura 3.5: Nomograma de Heukelom [9]

3.2 Diseño Marshall

3.2.1 Mezcla a estudiar

La cantidad de cemento asfáltico requerida se determina con el procedimiento Marshall, mediante la elaboración de probetas con distintos contenidos de ligante, con el cual se obtienen los parámetros Marshall que permiten determinar el porcentaje óptimo de ligante en la mezcla.

El Método de Diseño Marshall como se explico en el capítulo 2.2.1, permite obtener un contenido óptimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas en caliente. Este método se encuentra descrito en 8.302.47 del volumen 8 del Manual de Carreteras.

Para el caso de este estudio, el método de diseño Marshall no se utilizará para obtener los valores óptimos de una mezcla específica, si no que ayudara a la fabricación de probetas con condiciones de diseño que fueron obtenidas a partir de las variables de diseño y proceso productivo del registro de Bitumix S.A, de estas se seleccionaron las variables con el valor más alto y más bajo dentro del registro, se busca a través de esto de estas generar las condiciones más desfavorables para la construcción de mezclas asfálticas en caliente.

3.2.2 Preparación de muestras

Se prepara el material de acuerdo a la granulometría de diseño, se pesará de forma separada para cada probeta de ensaye, la cantidad necesaria de cada fracción para producir una muestra que de cómo resultado una probeta compactada de una altura aproximada de 63,5 mm, se requieren 1.100 grs [15]. El material preparado conocido como reconstitución de la mezcla se coloca en bandejas, la cuales se deben llevar a horno y se deben mantener a una temperatura aproximada de 30°C sobre la temperatura de mezclado especificada. Se coloca el agregado caliente en una fuente de mezclado y revuelve logrando uniformidad de partículas.

En el agregado caliente se debe formar un cráter y pesar la cantidad necesaria de cemento asfáltico, según los porcentajes de diseño asignados, incorporar a la fuente de mezclado. En ese instante las temperaturas del agregado y la del asfalto debieran estar dentro del límite establecido como temperatura de mezclado.

El asfalto no debe mantenerse a la temperatura de mezclado por más de 1 hora antes de usarlo.

Mezclar el agregado y asfalto tan rápido como sea posible hasta que la mezcla quede totalmente cubierta y uniforme.

3.2.3 Compactación de probetas

A continuación se describe el proceso de compactación de las muestras confeccionadas, esta metodología se encuentra estipulada por el Manual de Carreteras volumen 8.

La compactación se debe comenzar preparando el molde y el martillo, limpiando completamente el conjunto del molde y cara del martillo de compactación y se calienta durante 15 min en el horno a una temperatura próxima a la de compactación. Colocar un disco de papel filtro, cortado a medida, en la parte inferior del molde antes de colocar la mezcla. Suavizar la parte interior del molde y la cara del martillo con aceite grueso. Colocar el conjunto collar, molde y base en el pedestal compactador.

Colocar la mezcla en el molde con una espátula, esto. De a la muestra un acomodamiento 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro. La temperatura antes de compactar debe estar en los límites establecidos, si no es así, descártela; en ningún caso la mezcla debe recalentarse [5].

Con el martillo de compactación aplique 75 golpes en un tiempo no superior a 90 s. saque la base y el collar, invierta y reensamble el molde. Aplicar en la otra cara el mismo número de golpes en un tiempo no mayor al indicado. Después de compactar, sacar la base y dejar enfriar la probeta al aire. Si se desea un enfriamiento más rápido puede usarse ventiladores. Normalmente la probeta se deja enfriar toda una noche.

Para determinar la estabilidad a través de los parámetros Marshall se utilizaron 48 probetas, con dos diferentes contenidos de asfalto, los cuales son 4.98 y 5.71%, valores extremos de porcentajes de asfalto, temperaturas de mezclado y compactación registrados en un periodo de seis meses en la planta Bitumix S.A Con-Con.

Todas estas etapas deben realizarse de la forma planteada ya que la alteración de estas generará condiciones alteradas en las propiedades finales de las probetas.



Figura 3.6: Probetas con diferentes condiciones de diseño.

Estas probetas fueron calentadas en un baño en agua a 60° C por un tiempo de 30 a 45 minutos para poder ensayarlas (fig. 3.7).

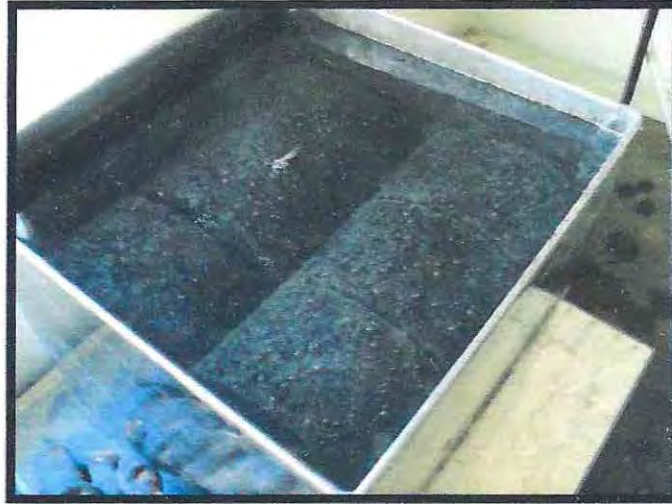


Figura 3.7: Probetas en inmersión bajo agua

Luego de calentarlas estas se ensayan con la prensa Marshall, en la cual se determina la estabilidad y la fluidez a las probetas (Figura 3.8)

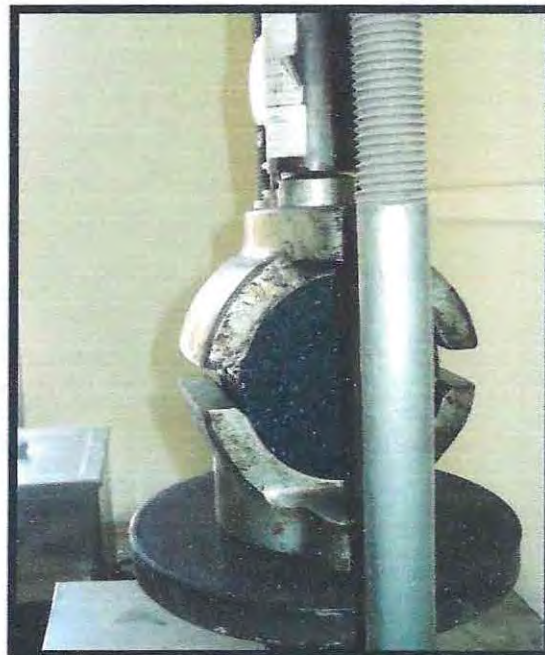


Figura 3.8: Compresión en prensa Marshall

3.3 Desarrollo experimental

A pesar que desde el punto de vista de los materiales de ingeniería, la densidad de las mezclas asfálticas, representa un factor altamente correlacionado con las propiedades mecánicas, ya que éste es un parámetro de comparación del diseño en laboratorio con lo construido en terreno. Por tanto no será un factor variable dentro del diseño de las probetas, para la fabricación de estas sólo se utilizará una energía de compactación alta que corresponde a 75 golpes por cara en cada una de las probetas.

Las variables seleccionadas y consideradas para el estudio se exponen en la tabla 3.13. Todas las variables tienen una relación con la importancia y la intervención dentro de la confección, estado y composición de las mezclas asfálticas de graduación semi-densa.

Cada una de ellas, está representada por un rango o clasificación, el cual puede ser cualitativo (variables categóricas) o cuantitativo (variables numéricas), que en definitiva depende de la propia variable en cuestión.

El contenido de vacíos mínimo requerido en las especificaciones tanto chilenas como internacionales, es de un 4%, sin embargo este factor depende fuertemente del nivel de densidad alcanzado, al tener solo un grado de compactación en este estudio, el contenido de vacíos no tendrá mayor variabilidad, por lo que no representa un factor puro que pueda ser considerado en el desarrollo de un factorial de investigación.

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) y los vacíos llenos de asfalto (VFA), dependen fuertemente del contenido de vacíos de la mezcla y como consecuencia de la densidad alcanzada, por lo que también no representan factores puros que puedan ser considerados en el diseño factorial.

La fluencia será considerada solamente para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica para evaluar el comportamiento mecánico de este tipo de mezclas.

La estabilidad Marshall es un parámetro importante dentro de este estudio, por lo que se utilizará en el diseño preliminar y posteriormente en el desarrollo de la metodología planteada.

En la aplicación del trabajo experimental se consideró la aplicación de un diseño factorial del orden 2^4 , en el cual las variables estudiadas fueron las siguientes:

Tabla 3.13: Variables Estudiadas.

Variabes	Tipo de variable	Unidad	Nivel Bajo	Nivel Alto
A: Temperatura de compactación	Numérica	° C	137°	152°
B: Temperatura de mezclado	Numérica	° C	150°	169°
C: Granulométrica	Numérica	M. finura	3.62	4.32
D: Porcentaje de asfalto	Numérica	%	4.98	5.71

Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que los valores obtenidos de las variables temperatura de mezclado, porcentaje de asfalto y temperatura de compactación, fueron obtenidos a través del registro de elaboración de partidas de mezcla asfáltica y de obras realizadas en el transcurso de un mes por la empresa Bitumix.

En lo que se refiere a la granulometría o Módulo de finura de la mezcla de áridos, se realiza a través de una aproximación a los extremos de la banda aceptada por el manual de carreteras, para el diseño de mezclas asfálticas semi-densa, logrando una granulometría en el límite grueso, que corresponde al nivel alto y una granulometría en el límite fino, que corresponde al nivel bajo, ambos casos para la mezcla asfáltica dada por la banda A-IV-12.

Los diseños factoriales se utilizan como herramienta para poder determinar todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores que se establecen en una investigación. Matemáticamente un diseño factorial se define como 2^k , en donde el 2 indica la cantidad de niveles y el K el número de factores de estudio, en este caso como corresponde a 4 variables estudiadas el diseño factorial será del tipo 2^4 , por lo que hay 16 combinaciones posibles en el diseño:

Tabla 3.14: Diseño factorial 2^4

Tratamientos	% Asfalto	Módulo de finura	Temperatura de mezclado(°C)	Temperatura de Compactación(°C)
1	5.71	4.32	150	152
2	4.98	3.62	169	137
3	5.71	4.32	169	137
4	4.98	4.32	169	152
5	5.71	3.62	150	152
6	5.71	3.62	169	137
7	5.71	4.32	169	152
8	4.98	4.32	150	137
9	5.71	3.62	169	152
10	4.98	3.62	150	152
11	5.71	3.62	150	137
12	4.98	4.32	150	152
13	5.71	4.32	150	137
14	4.98	4.32	169	137
15	4.98	3.62	169	152
16	4.98	3.62	150	137

Fuente: Elaboración propia

Todas las probetas confeccionadas en laboratorio serán realizadas con la prensa Humboldt, proporcionada por el Laboratorio Regional de Vialidad y estas se encuentran de acuerdo a los niveles de cada tratamiento establecido por el diseño factorial del orden 2^4 y considerando seis repeticiones de cada una.

3.4 Resultado del método de diseño Marshall

El diseño Marshall busca conocer los parámetros óptimos de diseño para una mezcla asfáltica determinada. Para este caso este método de diseño buscará conocer el comportamiento de las mezclas asfálticas en las condiciones extremas de fabricación dentro de los parámetros aceptados en el diseño original. Dentro de un diseño de mezclas asfálticas en caliente los valores de los porcentajes de asfalto van desde 4,5% a 6,5% los cuales se varían en 0,5%, según lo normado en el volumen 8 del Manual de Carreteras, ya que en este rango de porcentaje de asfalto se encuentra el valor óptimo a utilizar.

En el estudio desarrollado se utilizan dos valores de porcentaje de asfalto y como este material no tiene un comportamiento lineal ya que llega a un valor óptimo a partir del cual comienza a disminuir, por lo tanto no se puede generar un gráfico sólo con los dos valores de trabajo ya que estos no representarían de manera correcta el comportamiento del contenido de ligante. Los gráficos de las propiedades de las mezclas asfálticas se construirán con los valores planteados en el párrafo anterior y se incluirán los valores de porcentaje de asfalto a utilizar en el estudio.

A continuación se muestra en la tabla 3.15 un resumen de los resultados de los grupos de probetas en base al porcentaje de asfalto estudiado y para cada módulo de finura utilizado.

Tabla 3.15: Resumen resultados Marshall para módulo fino

% Asfalto	Densidad Finos	Estabilidad Finos (KN)	Fluidez Finos (0.01")	Vacios Finos (%)	VAM Finos (%)	VFA Finos (%)
4.5	2300	11.2	15.6	5.12	14.9	64.6
4.98	2342	11.4	15.92	4.81	14.6	67.0
5.71	2367	11.7	16.67	3.88	15.2	74.5
6.5	2346	11.3	17.15	3.81	15.8	72.3

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 se muestran los gráficos de densidad, estabilidad, vacíos, vacíos de agregado mineral (VAM), fluidez y vacíos llenos de asfalto (VFA) del módulo fino versus el porcentaje de asfalto respectivamente.

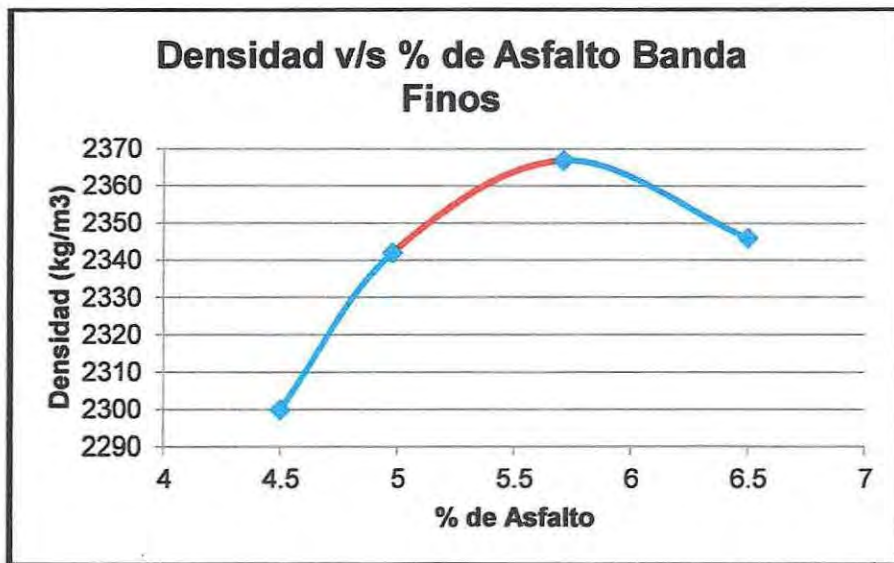


Figura 3.9: Gráfico Densidad v/s % de asfalto módulo fino
Fuente: Elaboración propia

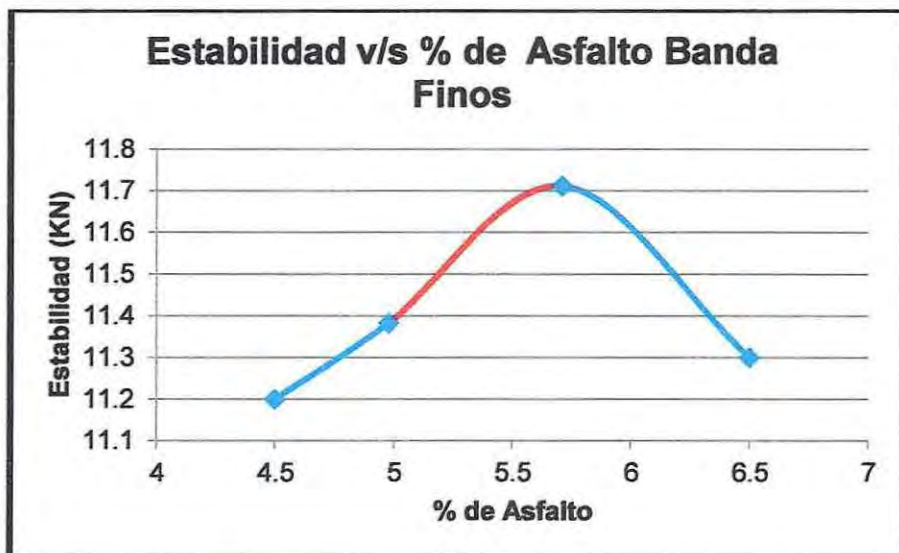


Figura 3.10: Gráfico estabilidad v/s % de asfalto módulo fino
Fuente: Elaboración propia

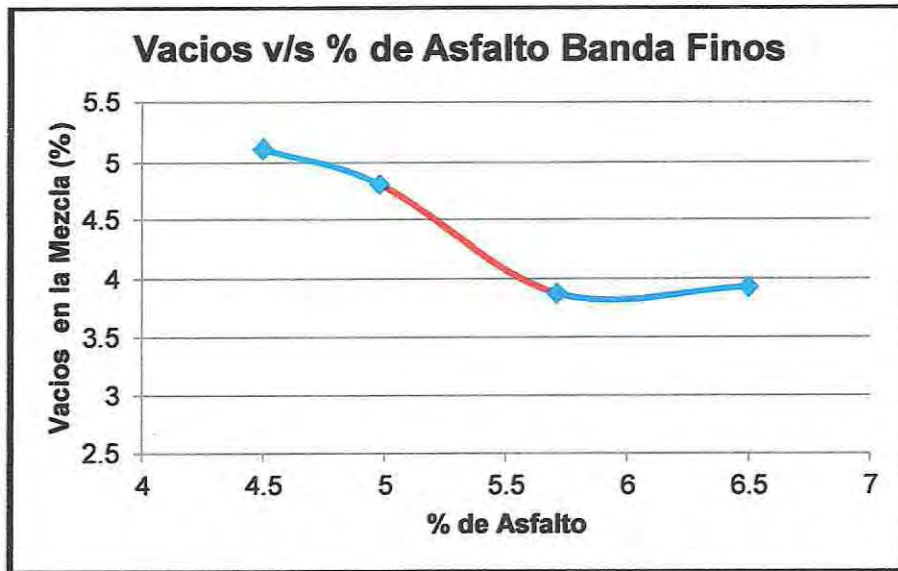


Figura 3.11: Gráfico vacíos en la mezcla v/s % de asfalto módulo fino
Fuente: Elaboración propia

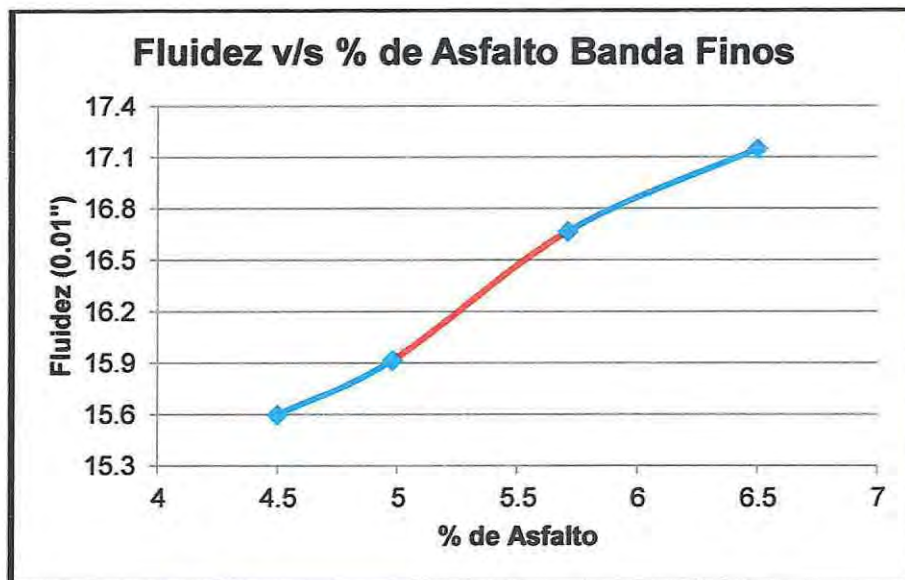


Figura 3.12: Gráfico fluidez v/s % de asfalto módulo fino
Fuente: Elaboración propia

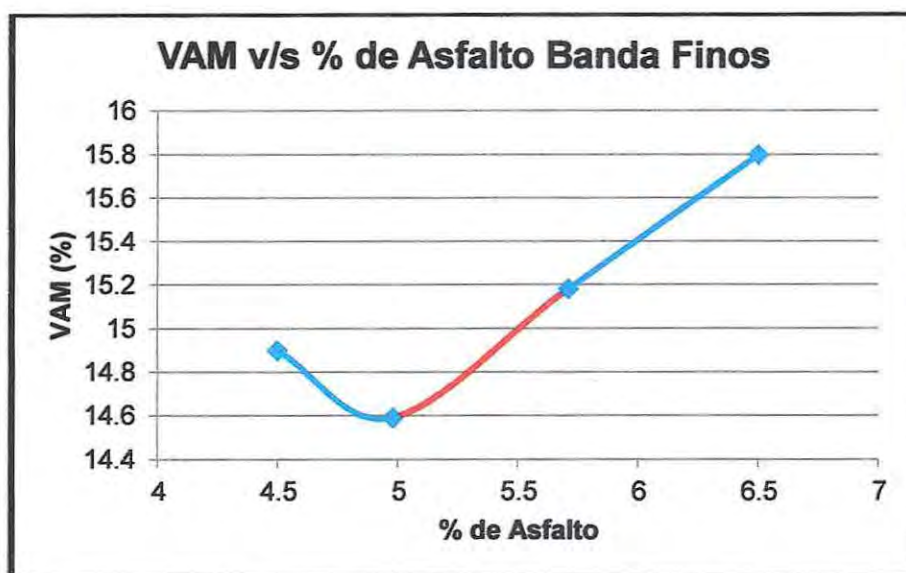


Figura 3.13: gráfico VAM v/s % de asfalto módulo fino
Fuente: Elaboración propia

Donde:

VAM = Vacios en el agregado mineral

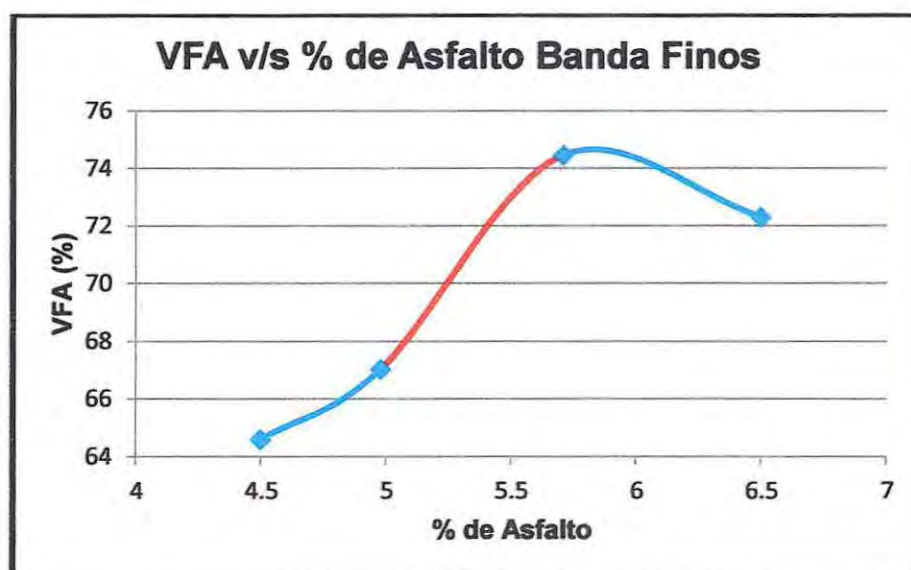


Figura 3.14: Gráfico VFA v/s % de asfalto módulo fino
Fuente: Elaboración propia

Donde:

VFA = Vacios llenos de asfalto

Para los gráficos presentados anteriormente, el rango en cual de es sólo el que se encuentra destacado en el color rojo, ya que los otros valores sólo se utilizaron para mostrar la tendencia a seguir de la mezcla analizada.

Tabla 3.16: Resumen resultados Marshall para módulo grueso

% Asfalto	Densidad Gruesos	Estabilidad Gruesos (KN)	Fluidez Gruesos (0.01")	Vacios Gruesos (%)	VAM Gruesos (%)	VFA Gruesos (%)
4.5	2300	9.56	15.63	5.73	15.83	63.2
4.98	2330	9.70	15.92	5.38	15.4	65.0
5.71	2345	9.99	16.75	4.45	16.0	72.1
6.5	2338	9.74	17.32	4.32	16.3	68.0

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20 se muestran los gráficos de densidad, estabilidad, vacios, vacios de agregado mineral (VAM), Fluidez y vacios llenos de asfalto (VFA) del módulo grueso versus el porcentaje de asfalto respectivamente.

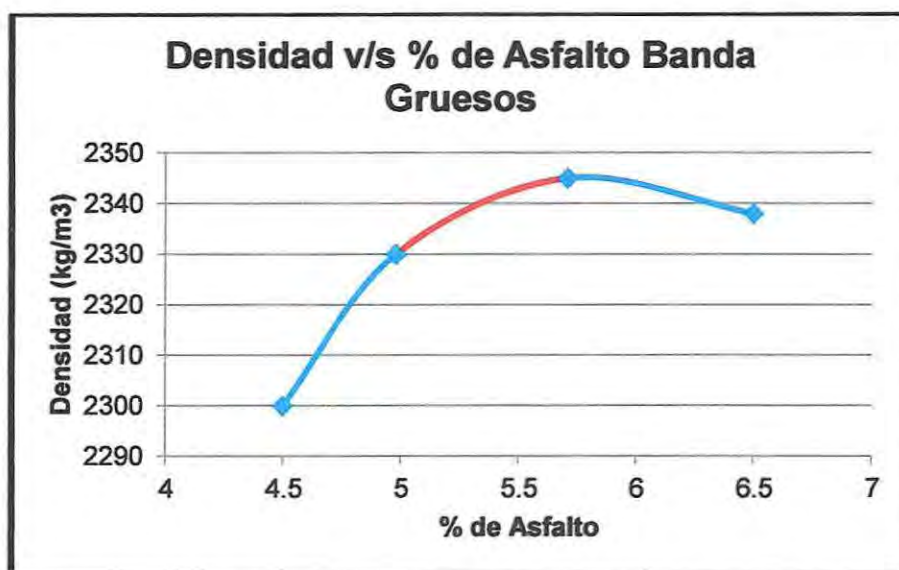


Figura 3.15: Gráfico Densidad v/s % de asfalto módulo grueso

Fuente: Elaboración propia

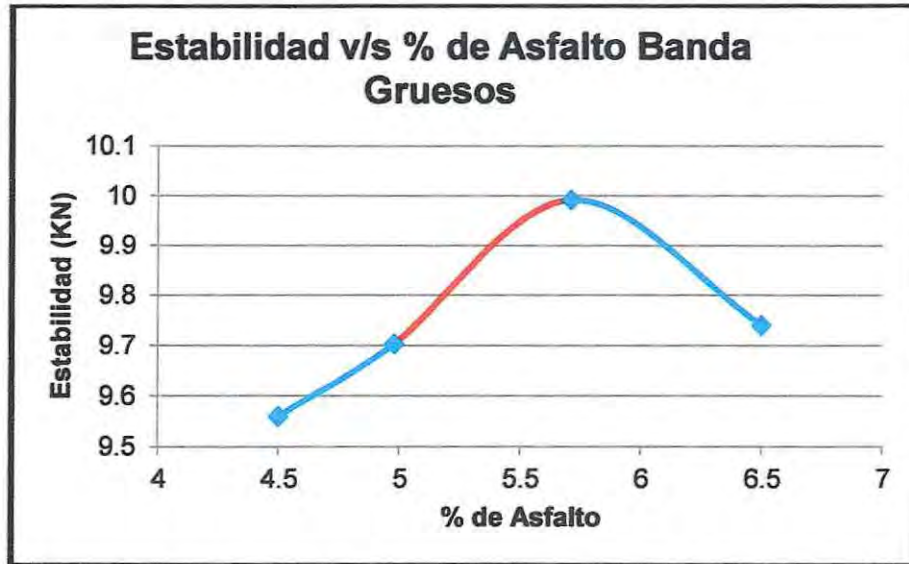


Figura 3.16: Gráfico Estabilidad v/s % de asfalto módulo grueso
Fuente: Elaboración propia

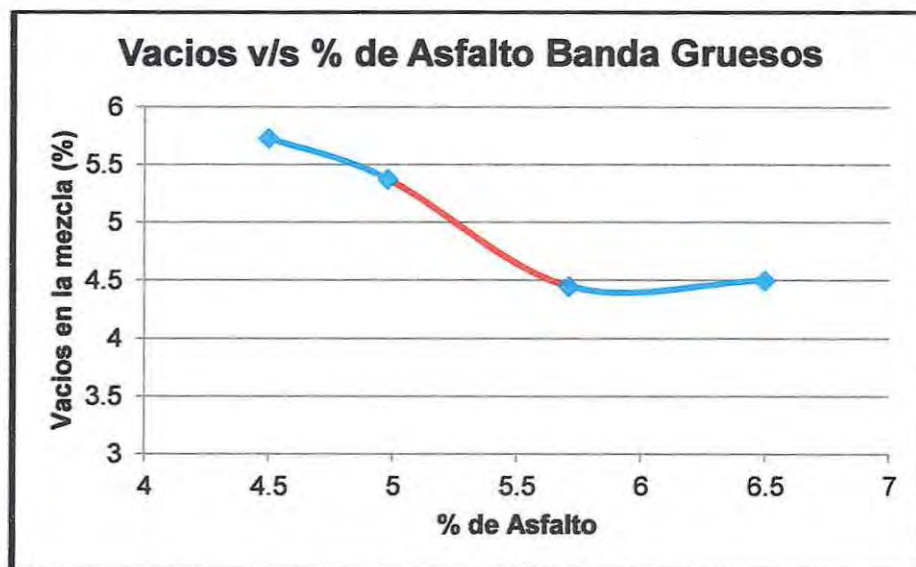


Figura 3.17: Gráfico vacíos en la mezcla v/s % de asfalto módulo grueso
Fuente: Elaboración propia

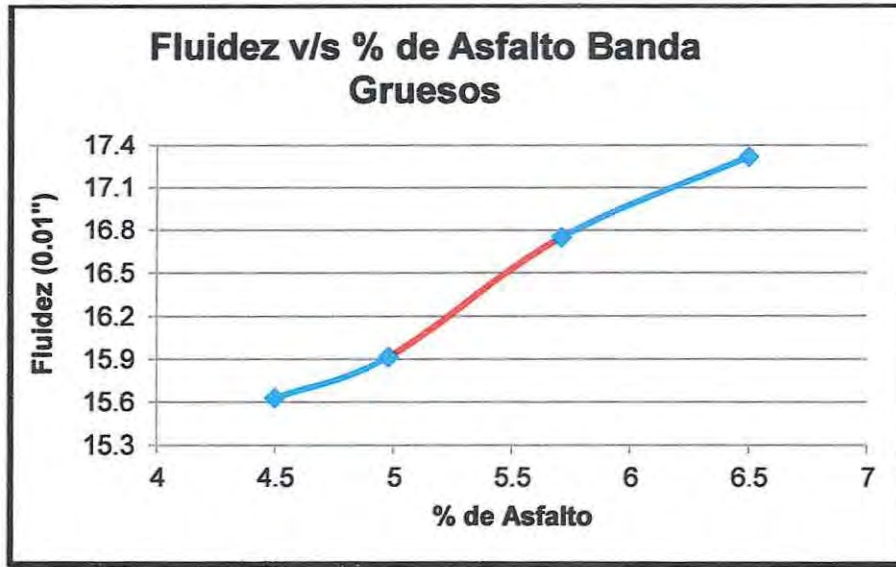


Figura 3.18: Gráfico fluidez v/s % de asfalto módulo grueso
Fuente: Elaboración propia

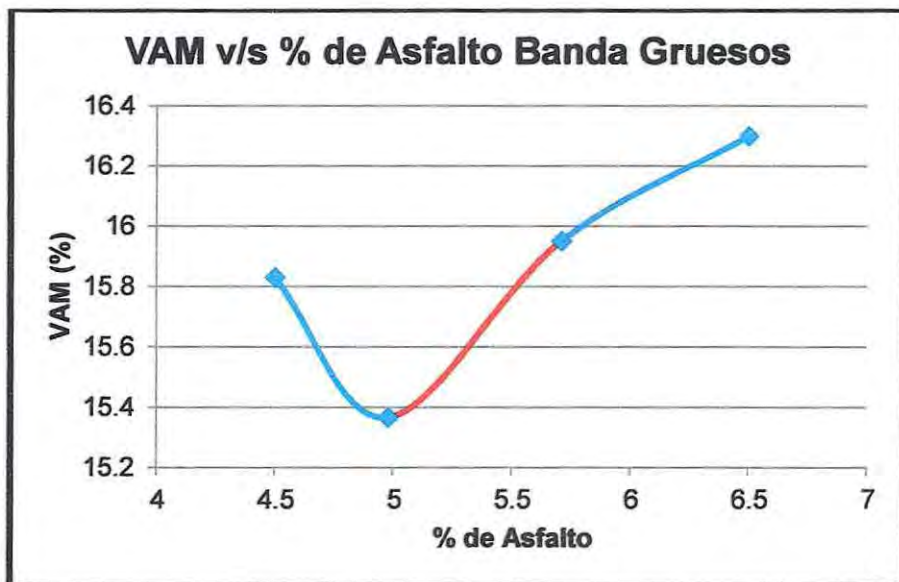


Figura 3.19: Gráfico VAM v/s % de asfalto módulo grueso
Fuente: Elaboración propia

Donde:

VAM = Vacios en el agregado mineral

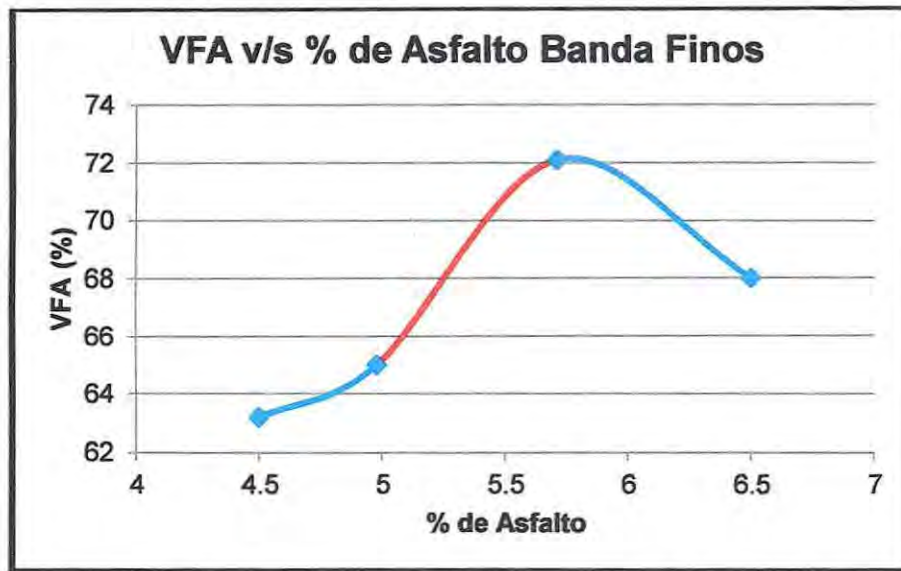


Figura 3.20: Gráfico VFA v/s % de asfalto módulo grueso
Fuente: Elaboración propia

Donde:

VFA = Vacíos llenos de asfalto

Para los gráficos presentados anteriormente, el rango en cual de es sólo el que se encuentra destacado en el color rojo, ya que los otros valores sólo se utilizaron para mostrar la tendencia a seguir de la mezcla analizada.

Según los gráficos, se puede decir que estos siguen los patrones de las mezclas de graduación semi-densa, teniendo tendencias generales para ambos casos de granulometrías diferentes, como lo son:

- La estabilidad crece con el contenido de asfalto hasta un valor máximo, después el cual decrece.
- La fluencia aumenta al aumentar el contenido de asfalto.
- El porcentaje de huecos de aire decrece al aumentar el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral decrece hasta un valor mínimo y luego crece.
- Los huecos llenos con asfalto crecen al aumentar el contenido de éste.

CAPITULO 4

PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Presentación de resultados

4.1.1 Antecedentes generales

La construcción de un pavimento se lleva a cabo a partir de un diseño, que en su estudio previo, se estimaron las condiciones óptimas para otorgar el correcto funcionamiento y una estimada vida útil.

En la puesta en obra del diseño planteado, se consideran los factores de calidad en cuanto a temperaturas, porcentaje de asfalto y granulometrías, determinadas en el proyecto, pero las condiciones externas como el clima o una variación en la distribución granulométrica, pueden afectar en el resultado final del pavimento [13]. Estas pequeñas variaciones pueden cambiar aspectos tan importantes como una disminución en la capacidad estructural planteada en el diseño, lo que conlleva a una disminución de la vida útil de servicio del proyecto y la utilización de medidas de reparación que no cumplen todas las condiciones iniciales, debido al daño producido por las cargas aplicadas.

4.1.2 Ensayo Marshall

En el desarrollo experimental se utiliza la prensa Marshall, el ensayo se realiza según lo descrito en el capítulo 3.2.3. En la tabla 4.1 se presentan los resultados de la serie de probetas analizadas por el método Marshall como son el espesor, volumen y densidad.

Tabla 4.1: Densidades promedio Estabilidad Marshall (EM)

T	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Volumen (cm ³)	Peso seco (gr)	Peso saturado (gr)	Peso saturado superficialmente seco (gr)	Densidad real (Kg/cm ³)
T1	6.17	10	484.85	1140.8	658.3	1142.4	2356
T2	6.21	10	487.73	1139.2	656.0	1142.8	2340
T3	6.16	10	483.54	1131.6	650.1	1133.4	2342
T4	6.20	10	486.95	1129.6	648.9	1132.2	2337
T5	6.04	10	474.64	1136.0	659.9	1137.0	2381
T6	6.10	10	478.83	1142.2	657.8	1143.7	2351
T7	6.11	10	479.88	1130.5	654.4	1131.8	2368

T	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Volumen (cm ³)	Peso seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Peso saturado superficialmente seco (gr)	Densidad Real (Kg/cm ³)
T8	6.29	10	494.28	1140.5	653.8	1142.1	2331
T9	6.07	10	476.47	1140.5	660.6	1141.6	2371
T10	6.17	10	484.59	1132.5	649.0	1135.4	2329
T11	6.06	10	475.95	1141.1	659.9	1142.5	2364
T12	6.20	10	486.95	1129.3	647.7	1134.1	2322
T13	6.25	10	490.87	1136.1	647.6	1139.4	2310
T14	6.24	10	490.35	1137.9	654.1	1143.1	2327
T15	6.13	10	481.71	1137.2	653.5	1140.1	2337
T16	6.15	10	483.02	1140.7	657.8	1143.1	2351

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.1: Ensayo Estabilidad Marshall

El desarrollo experimental consistió en la implementación en laboratorio del factorial presentado en la tabla 3.14, los resultados promedio de las densidades y el valor de la estabilidad Marshall se presentan en la tabla 4.1 y 4.2. Los resultados de cada probeta se encuentran en el anexo C.

Tabla 4.2: Valores estabilidad y fluencia promedio Estabilidad Marshall (EM)

T	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Estabilidad (N)	Fluencia (0.01")
T1	6.17	10	9386	20.0
T2	6.21	10	10742	16.7
T3	6.12	10	9681	15.7
T4	6.21	10	9778	17.3
T5	5.99	10	12609	17.3
T6	6.00	10	12569	16.7
T7	6.12	10	10485	16.7
T8	6.29	10	9899	17.3
T9	6.07	10	10800	16.3
T10	6.16	10	11459	16.0
T11	6.10	10	10868	16.3
T12	6.23	10	10044	14.7
T13	6.25	10	9611	14.7
T14	6.26	10	9662	14.3
T15	6.1	10	12367	16.3
T16	6.13	10	10964	14.7

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Ensayo Tracción Indirecta

En el desarrollo experimental se utiliza la prensa Marshall a igual que en el ensayo de estabilidad, pero en este caso se cambia la mordaza de la probeta, en el ensayo de tracción indirecta se utiliza el cabezal Lottman, el ensayo se realiza según lo descrito en el capítulo 2.6. En la tabla 4.3 se presentan los resultados de la serie de probetas analizadas como son el espesor, volumen y densidad.

Tabla 4.3: Densidades promedio ITS

T	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Volumen (cm ³)	Peso seco (gr)	Peso saturado (gr)	Peso saturado superficialmente seco (gr)	Densidad real (Kg/cm ³)
T1	6.17	10	482.76	1144.2	659.6	1146.0	2352
T2	6.21	10	480.14	1139.1	656.8	1140.4	2355
T3	6.16	10	483.81	1139.0	655.3	1141.5	2342
T4	6.20	10	490.35	1140.2	656.5	1144.3	2338
T5	6.04	10	479.09	1141.8	661.2	1143.0	2370

T	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Volumen (cm ³)	Peso seco (gr)	Peso saturado (gr)	Peso saturado superficialmente seco (gr)	Densidad real (Kg/cm ³)
T6	6.10	10	477.78	1140.5	656.5	1142.3	2348
T7	6.11	10	482.76	1139.9	659.9	1141.1	2369
T8	6.29	10	491.40	1139.4	653.5	1140.7	2336
T9	6.07	10	475.17	1139.4	659.7	1140.8	2368
T10	6.17	10	481.97	1130.9	650.0	1133.8	2338
T11	6.06	10	473.33	1142.3	662.4	1143.1	2376
T12	6.20	10	489.83	1130.0	646.5	1134.9	2314
T13	6.25	10	484.33	1130.7	645.6	1133.4	2318
T14	6.24	10	493.49	1139.0	654.7	1142.7	2334
T15	6.13	10	481.45	1135.8	652.5	1138.9	2335
T16	6.15	10	479.88	1138.8	656.4	1140.6	2352

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.2: Ensayo Tracción Indirecta

El desarrollo experimental consistió en la implementación en laboratorio del factorial presentado en la tabla 3.14, los resultados promedio de las densidades y el valor de la tracción indirecta (ITS) se presentan en la tabla 4.3 y 4.4. Los resultados de cada probeta se encuentran en el anexo D.

Tabla 4.4: Valores promedio Tracción Indirecta (ITS)

T	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Carga (KN)	Tracción Indirecta (Kpa)
T1	215.50	10	9.55	985.3
T2	267.50	10	12	1227.6
T3	209.50	10	9	944.3
T4	238.00	10	11	1091.0
T5	239.50	10	11	1132.8
T6	259.00	10	11	1186.9
T7	215.33	10	10	1001.4
T8	267.67	10	12	1209.1
T9	250.00	10	11	1171.8
T10	244.67	10	11	1128.9
T11	284.00	10	13	1323.7
T12	248.33	10	11	1134.4
T13	221.00	10	10	1006.3
T14	256.33	10	11	1164.3
T15	262.0	10	12	1214.1
T16	274.33	10	12	1272.2

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis estadístico de resultados

Los resultados obtenidos en este trabajo serán analizados por el programa computacional Design Expert 6.0 desarrollado por Stat-Ease Inc., el cual realiza un diseño de experimentos probabilístico e iterativo acerca de los datos obtenidos, generando una regresión lineal de un conjunto de factores sobre la respuesta. El diseño de experimentos se puede definir como una serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados a las variables de entrada de un proceso (factores controlables) para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de un fenómeno.

El análisis de un diseño de experimentos está basado en el supuesto que la respuesta tiene la misma varianza. Donde la varianza es una medida de variabilidad que da cuenta del grado de homogeneidad de un grupo de observaciones [24].

A través del diseño de experimentos mediante los cambios realizados a la variable de entrada de un fenómeno se estimar lo siguiente:

1. Determinar cuáles son las variables que tienen mayor influencia sobre la respuesta de un fenómeno.

2. Determinar cuál es el ajuste de las variables que tiene mayor influencia para que la respuesta del fenómeno esté cerca del valor deseado.
3. Determinar cuál es el ajuste de las variables que tiene mayor influencia para que la variabilidad del fenómeno sea reducida.

El detalle de las variables de respuestas para todos los tratamientos se presenta en el anexo E y F.

4.2.1 Estabilidad Marshall

Tº COMP.
 POR. FINURA
 % ASFALTO

VER PG. 54

En la figura 4.3 se muestran los efectos del comportamiento del fenómeno analizado con el programa Design Expert 6.0, donde se examina el gráfico de probabilidad normal, donde cada punto del gráfico representa las variables estudiadas y su interacción entre ellas [11]. La línea recta corresponde a la distribución normal del fenómeno estudiado y los puntos muestran la tendencia de las interacciones entre las variables y sus niveles de estudio (alto y bajo). Los puntos que se escapan de la línea de distribución representan los efectos significativos dentro del fenómeno.

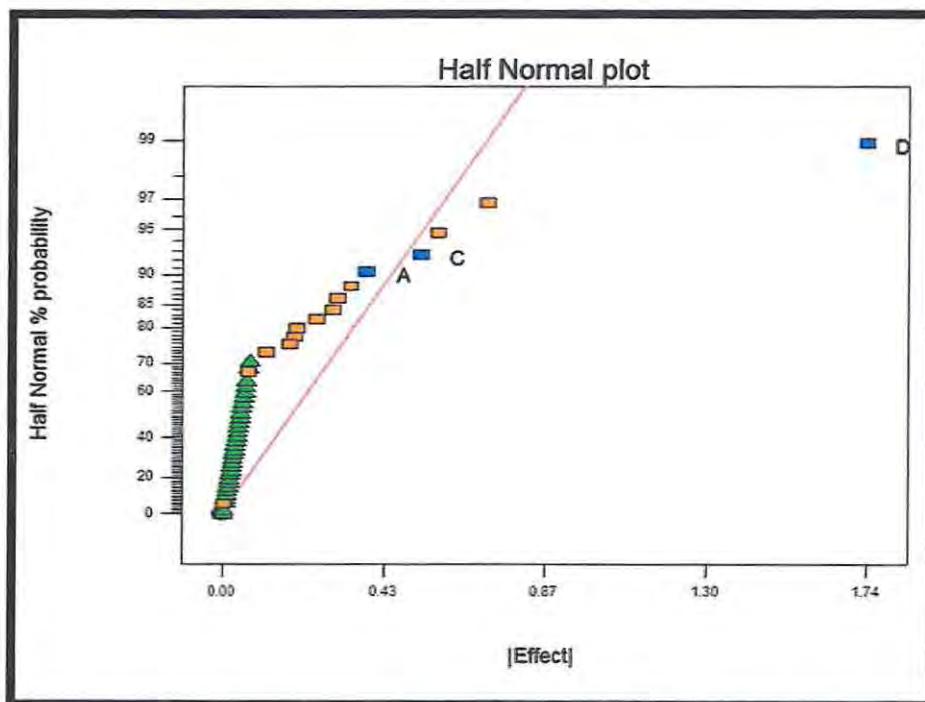


Figura 4.3: Gráfico probabilidad normal de los efectos Estabilidad Marshall (EM)
 Fuente: Programa Design Expert 6.0

El gráfico anterior (fig. 4.3) De manera complementaria se analizó la lista de efectos (Fig. 4.4), la cual indica el porcentaje de contribución de cada factor sobre la variable de respuesta, en ella se pudo apreciar que el porcentaje de asfalto (A), la temperatura de compactación (C) y el módulo de finura (D), tienen los porcentajes más elevados y en conjunto explican el 69,72%, de la variabilidad total, por

lo tanto estas tres variables son significativas para la Estabilidad Marshall. Para el caso de la variable de temperatura de mezclado (B) se puede observar en la figura 4.4 que esta contribuye sólo con un 0.1% a la variable estudiada, por lo que este factor no será un valor representativo y se elimina del modelo planteado para el control de calidad del comportamiento estructural.

Term	Stdized Effects	Sum of Squares	% Contribution
Intercept			
A	0.39	1.81	3.04
B	-0.070	0.059	0.100
C	0.54	3.44	5.79
D	-1.74	36.17	60.89
AB	-0.19	0.45	0.76
AC	-0.34	1.43	2.40
AD	-0.18	0.39	0.66
BC	-0.30	1.06	1.78
BD	-4.250E-003	2.167E-004	3.649E-004
CD	0.12	0.17	0.28
ABC	-0.31	1.15	1.94
ABD	0.25	0.77	1.30
ACD	0.58	4.04	6.80
BCD	0.20	0.48	0.81
ABCD	0.71	6.12	10.30
Lack Of Fit		0.000	0.000
Pure Error		1.87	3.14
Lenth's ME	0.33		
Lenth's SME	0.52		

Figura 4.4: Porcentaje de contribución de variables Estabilidad Marshall (EM)
Fuente: Programa Design Expert 6.0

Posteriormente mediante el análisis de varianza (ANOVA Analysis of variance), se logra verificar estadísticamente la significancia de los efectos el estadístico. Es un método estadístico preciso y formal, que consiste en asignar la varianza total a los factores para así poder realizar pruebas estadísticas (pruebas de distribución, pruebas de hipótesis, etc.) para saber, con un determinado nivel de confianza, los efectos que influyen significativamente en la respuesta [11].

En la figura 4.5 se muestra el análisis de varianza realizado por el programa para el caso estudiado, a través de las réplicas o la suposición de las interacciones de las variables del fenómeno es lo que permite calcular el error. Para este caso se puede observar que el modelo planteado es significate y que tiene una probabilidad menor al 0,01% de ser afectado por factores externos adicionales a los analizados. Para el caso de las variables de estudio, valores de probabilidad menores de 0,05, indican cuál de ellas son significativas para el modelo, esto es debido a que un valor menor a ese significa que se rechaza la hipótesis nula del modelo estadístico. Para la respuesta estudiada los factores de de importancia dentro de esta son: el porcentaje de asfalto (A), la temperatura de compactación (C) y el módulo de finura (C) (Fig. 4.5).

Response: Estabilidad Marshall

ANOVA for Selected Factorial Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	41.42	3	13.81	33.77	< 0.0001	significant
A	1.81	1	1.81	4.42	0.0412	
C	3.44	1	3.44	8.41	0.0058	
D	36.17	1	36.17	88.48	< 0.0001	
Residual	17.99	44	0.41			
Lack of Fit	16.12	12	1.34	23.02	< 0.0001	significant
Pure Error	1.87	32	0.058			
Cor Total	59.40	47				

Figura 4.5: Análisis de varianza con modelo de Estabilidad Marshall (EM)
Fuente: Design Expert 6.0

El análisis de varianza del modelo lineal planteado determina que el coeficiente de determinación (R^2) predicho es de 0.6972 Y el coeficiente de correlación (R) ajustado es de 0.6766 Esto indica que el modelo permite predecir con buena fidelidad el valor de ESTABILIDAD MARSHALL en función de los parámetros de control de calidad (% de Asfalto, T° Mezclado, T° Compactación y Módulo de finura).

A continuación se muestra la ecuación obtenida a través del programa Design Expert 6.0 y el análisis probabilístico realizado:

$$\text{Estabilidad Marshall (KN)} = 12,507 + 0.532 * A + 0.036 * C - 2,480 * D \quad (4.1)$$

Ec. 4.1 Estabilidad Marshall en función de las variables A, B y C.

Fuente: Design Expert 6.0

Donde: A = Porcentaje de Asfalto (%)

C = T° Compactación (C°)

D = Módulo de finura (Sin Unidad)

La utilización del ANOVA, implica que se cumplan las hipótesis del comportamiento en un fenómeno y los residuos (errores) de este, los cuales fueron satisfactorios para este análisis. Donde los valores de las variables que afectan al comportamiento de este fenómeno deben encontrarse dentro del rango

planteado por el promedio de las variables y la diferenciación de 3 veces la desviación estándar del fenómeno [11], los valores de las puntos que se encuentran fuera de este rango no representan el modelo debido a que se consideran muestras con fallas. En la figura 4.6 se puede observar el comportamiento de las variables dentro del fenómeno de Estabilidad Marshall.

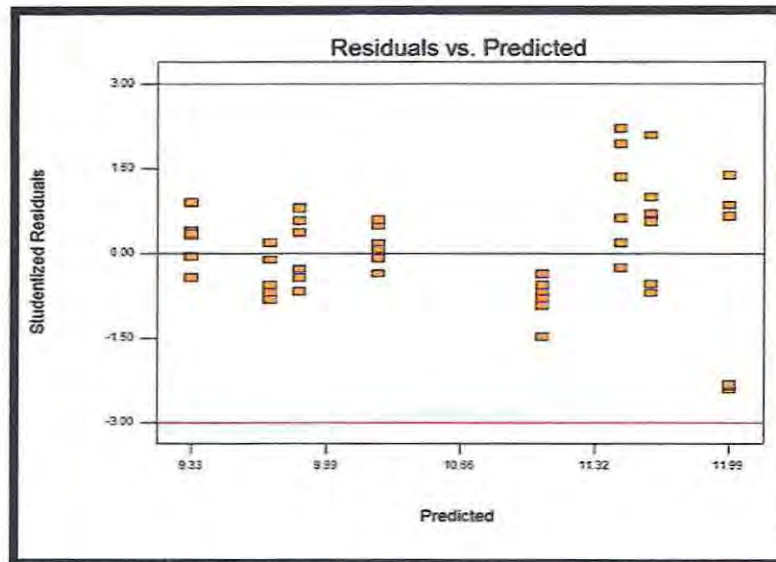


Figura 4.6: Análisis de residuales Estabilidad Marshall (EM)
Fuente: Design Expert 6.0

Al analizar el comportamiento del modelo definido para la estabilidad Marshall en forma independiente para cada factor:

- Porcentaje de asfalto:

La Estabilidad Marshall aumenta, al aumentar el contenido de asfalto. El comportamiento reflejado en la figura 4.7 es coherente con el comportamiento de las mezclas asfálticas, las cuales proporcionan mayor resistencia a la estabilidad.

La Estabilidad Marshall alcanza su máximo valor en esta gráfica cuando:

- La variable C se encuentra en su nivel alto (temperatura de compactación 150° C).
- La variable D se encuentra en su nivel bajo (módulo de finura 3.62).

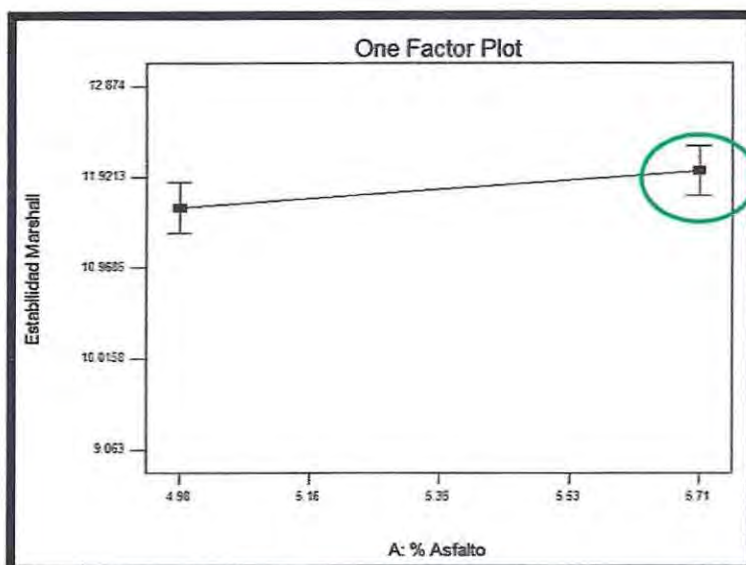


Figura 4.7: Comportamiento de porcentaje de asfalto en Estabilidad Marshall (EM)
Fuente: Design Expert 6.0

- Temperatura de mezclado: (Rango 150-139 °C) 09.02

Según los análisis obtenidos del programa, es posible inferir que para este parámetro, la temperatura de mezclado no es influyente dentro de los parámetros estudiados (Figura 4.8), siempre que se trabaje a temperaturas extremas, vale decir, a temperaturas muy altas o muy bajas la temperatura de mezclado no es relevante para la estabilidad. La incidencia es mínima en comparación con los otros tres factores, es por esto que la variable temperatura de mezclado no se considero en la ecuación 4.1.

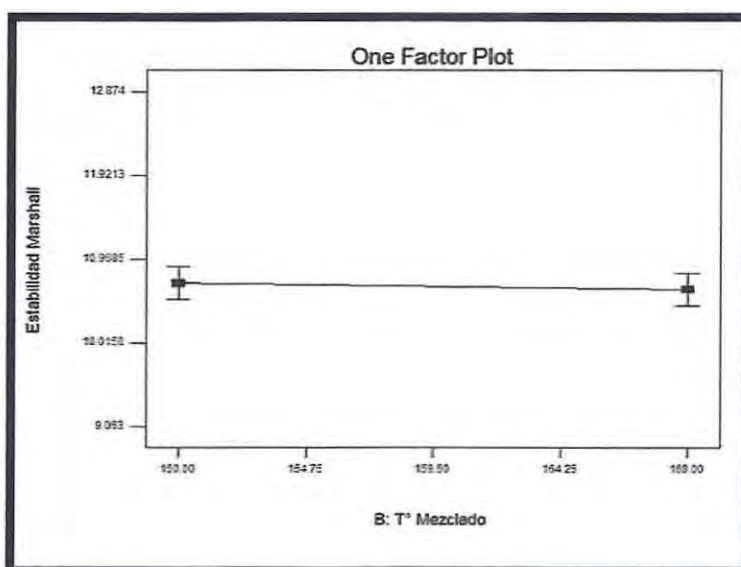


Figura 4.8: Comportamiento de temperatura de Mezclado en Estabilidad Marshall (EM)
Fuente: Design Expert 6.0

- Temperatura de compactación:

La Estabilidad Marshall aumenta, al aumentar la temperatura de compactación. El comportamiento reflejado en la figura 4.9 es coherente con el comportamiento de las mezclas asfálticas, la cual proporcionan mayores valores de densidad y menores segregaciones en las mezclas asfálticas, lo que mejora la resistencia a la estabilidad.

La Estabilidad Marshall alcanza su máximo valor en esta gráfica cuando:

- La variable A se encuentra en su nivel alto (porcentaje de asfalto 5.71).
- La variable D se encuentra en su nivel bajo (módulo de finura 3.62)

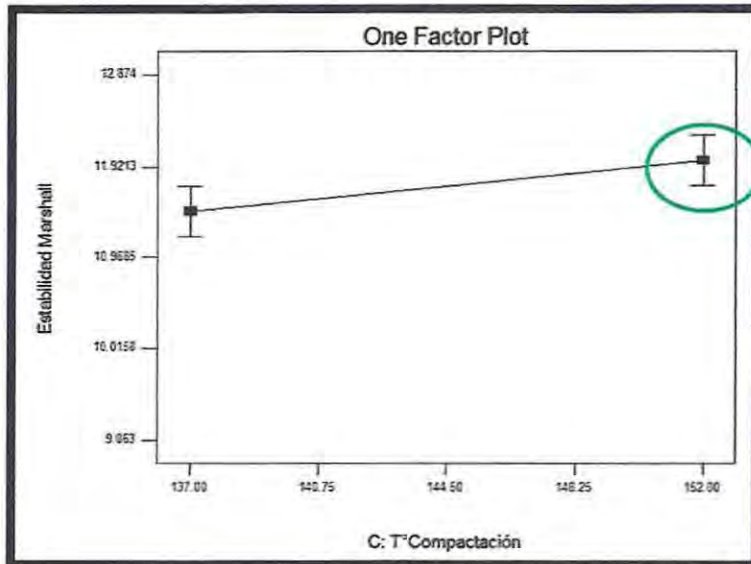


Figura 4.9: Comportamiento de temperatura de compactación en Estabilidad Marshall (EM)
Fuente: Design Expert 6.0

- Módulo de finura:

La Estabilidad Marshall disminuye, al aumentar el valor de módulo de finura. El comportamiento reflejado en la figura 4.10 es coherente con el comportamiento de las mezclas asfálticas, ya que al tener un valor más alto de módulo de finura obtienen mezclas de granulometría más gruesa y abiertas se aumenta las segregación de esta, los cuales proporcionan menor resistencia a la estabilidad.

La Estabilidad Marshall alcanza su máximo valor en esta gráfica cuando:

- Las variables A y C se encuentra en su nivel alto (porcentaje de asfalto 5.71 y temperatura de compactación 150° C).

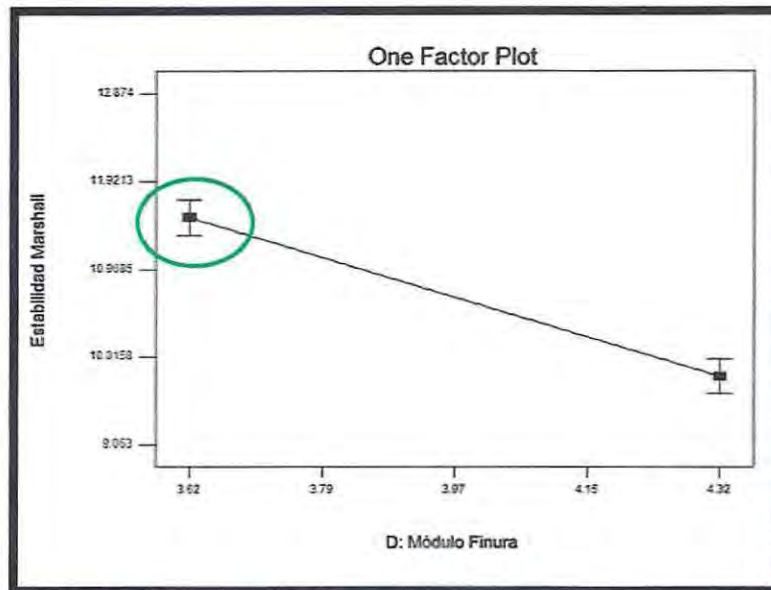


Figura 4.10: Comportamiento módulo de finura en Estabilidad Marshall (EM)
Fuente: Design Expert 6.0

4.2.1.1 Verificación del modelo correlacional establecido

Se debe realizar una verificación al modelo correlacional, para otorgar credibilidad al modelo planteado, entonces a través del modelo se debe obtener un valor muy cercano al resultado obtenido en el ensayo de laboratorio. Para esto se utilizarán los valores de diseño de un par de probetas creadas adicionalmente en laboratorio. Las muestras creadas poseen las mismas características que la serie realizada para el análisis en cuanto a los valores estudiados, se generan pequeñas variaciones en temperaturas y módulos de finura, todo esto se encuentra especificado en la tabla 4.5, junto con los valores de estabilidad medidos en laboratorio.

Tabla 4.5: Valores de variables de probetas verificación modelo Estabilidad Marshall

% Asfalto	T° Compactación	Módulo de Finura	Resultado Estabilidad Marshall (EM) a través de ensayo (N)
4.98	152	3.62	11460
4.98	137	4.32	9497

Fuente: Elaboración propia

Con los valores dados en la tabla 4.5, se obtendrán valores de estabilidad Marshall a través del modelo propuesto por la fórmula 4.1. Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 4.6 y se puede cerciorar que el modelo entrega valores cercanos al valor obtenido durante la aplicación del ensayo. Por lo que se puede confirmar que el estudio entrega datos de utilidad.

Tabla 4.6: Resultados obtenidos con el modelo correlacional Estabilidad Marshall

% Asfalto	T° Compactación	Módulo de Finura	Resultado Estabilidad Marshall (EM) a través de Modelo Correlacional (N)
4.98	152	3.62	11651
4.98	137	4.32	9375

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Tracción Indirecta (ITS)

Para estimar los efectos de los factores de Tracción Indirecta (ITS), se examina los resultados otorgados por el estudio de la mitad de todas las probetas fabricadas. Con los datos estudiados se realizara en el programa Design Expert 6.0 el diseño de experimentos y se obtendrá el gráfico de probabilidad normal de los efectos, donde aquellos fenómenos que son insignificantes siguen una distribución normal y tienden a localizarse en una línea recta, tanto los efectos significativos del modelo se ubicaran lejos de la línea [11].

El análisis de la gráfica normal de los efectos dada por el programa Design Expert, indican que los factores Porcentaje de Asfalto (A), Temperatura de Compactación (C) y Módulo de finura (D) son significativos para esta variable de respuesta (Figura 4.11)

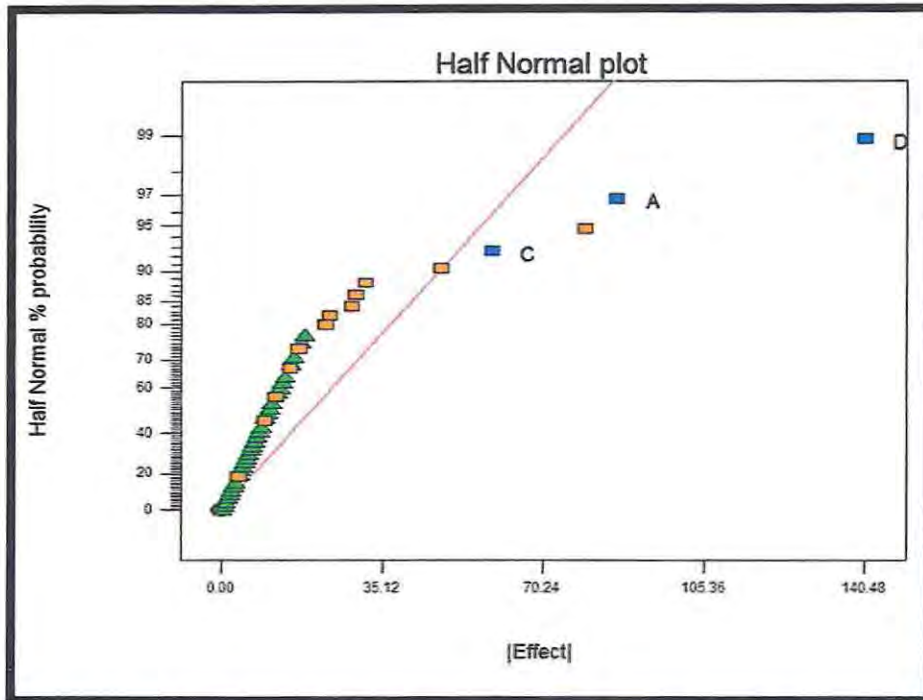


Figura 4.11: Gráfico de probabilidad normal de los efectos Tracción Indirecta (ITS)
Fuente: Design Expert 6.0

El gráfico anterior (fig. 4.11) muestra el comportamiento del fenómeno analizado con el programa Design Expert 6.0, cada punto del gráfico representa las variables estudiadas y su interacción entre ellas.

Se analizó la lista de efectos (Fig. 4.12), la cual indica el porcentaje de contribución de cada factor sobre la variable de respuesta, en ella se pudo apreciar que el porcentaje de asfalto (A), la temperatura de compactación (C) y el módulo de finura (D), tienen los porcentajes más elevados y en conjunto explican el 60,28%, de la variabilidad total, por lo tanto estas tres variables son significativas en la Tracción Indirecta. Para el caso de la variable de temperatura de mezclado (B) se puede observar en la figura 4.4 que esta contribuye sólo con un 1,1% a la variable estudiada, por lo que este factor no será un valor representativo y se elimina del modelo planteado para el control de calidad del comportamiento estructural.

Term	Stdized Effects	Sum of Squares	% Contribution
Intercept			
A	-86.36	89501.78	14.65
B	-23.72	6752.14	1.11
C	-59.12	41943.28	6.87
D	-140.48	2.368E+005	38.76
AB	-11.88	1693.38	0.28
AC	16.97	3456.11	0.57
AD	-79.39	75628.50	12.38
BC	48.01	27662.40	4.53
BD	-9.50	1082.05	0.18
CD	31.49	11897.55	1.95
ABC	15.14	2749.73	0.45
ABD	22.76	6217.58	1.02
ACD	29.40	10369.38	1.70
BCD	-28.41	9687.24	1.59
ABCD	3.73	166.88	0.027
Lack Of Fit		0.000	0.000
Pure Error		85335.66	13.97
Lenth's ME	40.46		
Lenth's SME	62.49		

Figura 4.12: Tabla de porcentaje de contribución de variables Tracción Indirecta (ITS)

Fuente: Design Expert 6.0

Mediante el análisis de varianza (ANOVA Analisis of variance), se logra verificar estadísticamente la significancia de los efectos el estadístico. En la figura 4.5 se muestra el análisis de varianza realizado por el programa para el caso estudiado. Para este caso se puede observar que el modelo planteado es significate y que tiene una probabilidad menor al 0,01% de ser afectado por factores externos adicionales a los analizados

En este caso estos factores que afectan al fenómeno estudiado son el porcentaje de asfalto (A), la temperatura de compactación (C) y el módulo de finura (C) (Fig. 4.13).

Response: ITS

ANOVA for Selected Factorial Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	3.683E+005	3	1.228E+005	22.25	< 0.0001	significant
A	89501.78	1	89501.78	16.23	0.0002	
C	41943.28	1	41943.28	7.60	0.0084	
D	2.368E+005	1	2.368E+005	42.93	< 0.0001	
Residual	2.427E+005	44	5515.88			
Lack of Fit	1.574E+005	12	13113.58	4.92	0.0002	significant
Pure Error	85335.66	32	2666.74			
Cor Total	6.110E+005	47				

Figura 4.13: Análisis de varianza con modelo Tracción Indirecta (ITS)
Fuente: Design Expert 6.0

El modelo de regresión lineal planteado determina que el coeficiente de determinación (R^2) predicho es de 0.6028, y el coeficiente de determinación (R) es de 0.5757. Esto indica que el modelo permite predecir de buena forma el valor de ITS en función del % de asfalto, la temperatura de compactación y el módulo de finura.

A continuación se muestra la ecuación obtenida a través del programa Design Expert 6.0 y el análisis probabilístico realizado:

$$ITS (KPa) = 3135.635 - 118.305 * A - 3.941 * C - 200.685 * D \quad (4.2)$$

Ec. 4.2 Tracción Indirecta en función de las variables A, B y C.
Fuente: Design Expert 6.0

Donde: A = Porcentaje de Asfalto (%).

C = T° Compactación (C°).

D = Módulo de finura (Sin Unidad).

A través de la utilización del ANOVA, se verá el comportamiento de las variables y sus combinaciones posibles tienen en el fenómeno analizado, tanto los residuales (error) y la predicción de este. El comportamiento de las variable en la Tracción Indirecta se puede observar el la figura 4.14

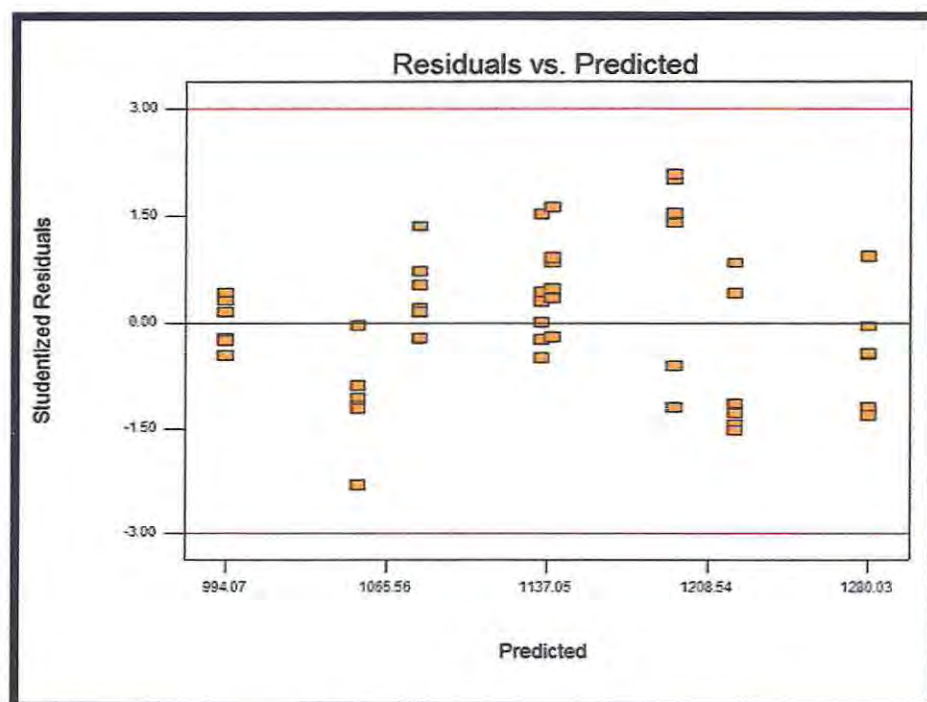


Figura 4.14: Análisis de residuales Tracción Indirecta (ITS)
Fuente: Design Expert 6.0

Al realizar el análisis del comportamiento del modelo definido para Tracción Indirecta (ITS) en forma independiente para cada factor:

- Porcentaje de asfalto:

La Tracción Indirecta disminuye, al aumentar el contenido de asfalto (fig. 4.15). El comportamiento de la mezcla asfáltica se ve afectado por el aumento de contenido de asfalto, se produce una disminución del valor de resistencia a la tracción.

La Tracción Indirecta alcanza su máximo valor en esta gráfica cuando:

- La variable C y D se encuentra en su nivel bajo (Temperatura de compactación 150°C y módulo de finura 3,62).

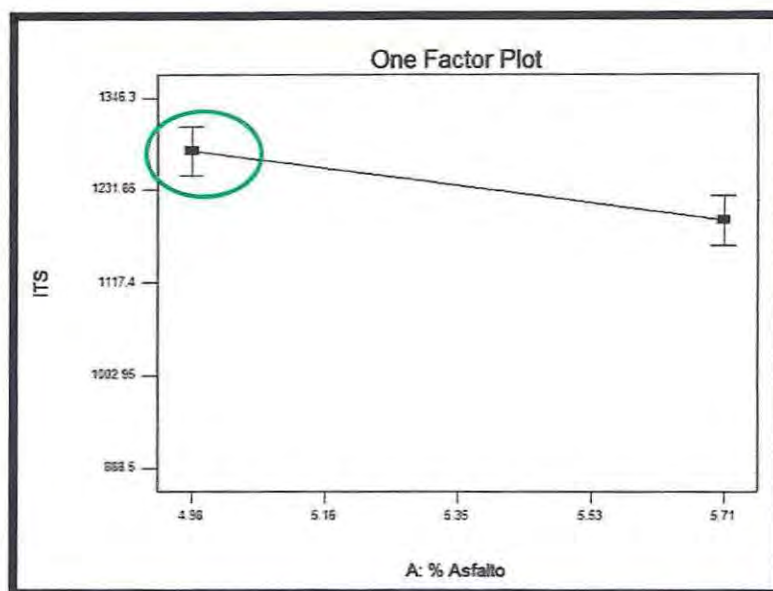


Figura 4.15: Comportamiento de porcentaje de asfalto en Tracción Indirecta (ITS)
Fuente: Design Expert 6.0

- Temperatura de mezclado:

En el análisis de los resultados obtenidos del software, es posible inferir que para la Tracción Indirecta (ITS), la temperatura de mezclado no es influyente dentro de los parámetros estudiados (Figura 4.16). La incidencia es mínima en comparación con los otros tres factores, es por esto que la variable temperatura de mezclado no se considero en la ecuación 4.2.

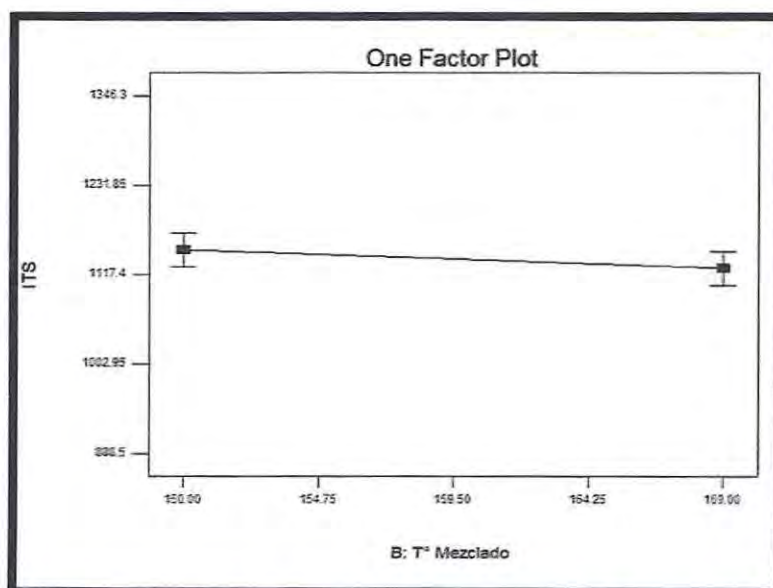


Figura 4.16: Comportamiento de temperatura de mezclado en Tracción Indirecta (ITS)
Fuente: Design Expert 6.0

- Temperatura de compactación:

La Tracción Indirecta disminuye, al aumentar la temperatura de compactación (fig. 4.17). El comportamiento de la mezcla asfáltica se ve afectado por el aumento de esta temperatura, produciéndose una disminución del valor de resistencia a la tracción.

La Tracción Indirecta alcanza su máximo valor en esta gráfica cuando:

- La variable A y D se encuentra en su nivel bajo (porcentaje de asfalto 4,98 y módulo de finura 3.62).

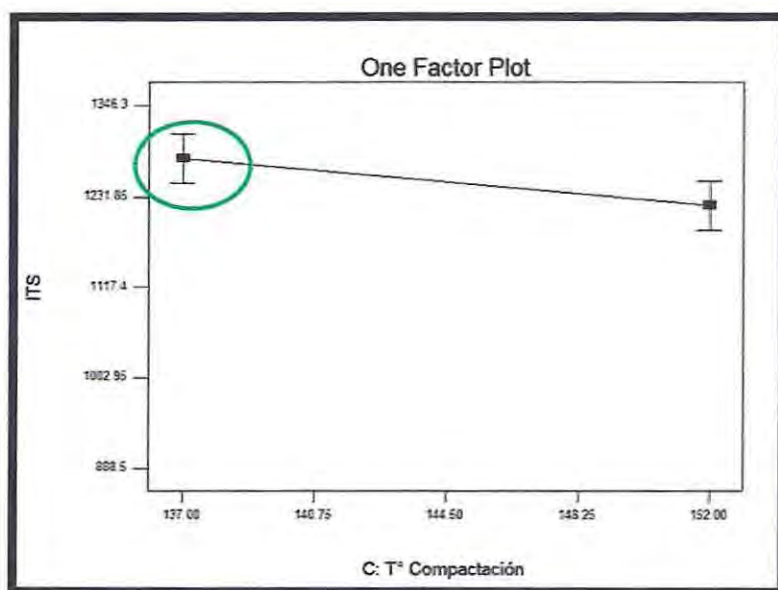


Figura 4.17: Comportamiento de temperatura de compactación en Tracción Indirecta (ITS)
Fuente: Design Expert 6.0

- Módulo de finura:

La Tracción Indirecta disminuye, al aumentar el valor de módulo de finura (fig. 4.18). El comportamiento de la mezcla asfáltica se ve afectado por el aumento del modulo, produciéndose una disminución del valor de resistencia a la tracción.

La Tracción Indirecta alcanza su máximo valor en esta gráfica cuando:

- La variable A y C se encuentra en su nivel bajo (porcentaje de asfalto 4,98 y temperatura de compactación 137° C).

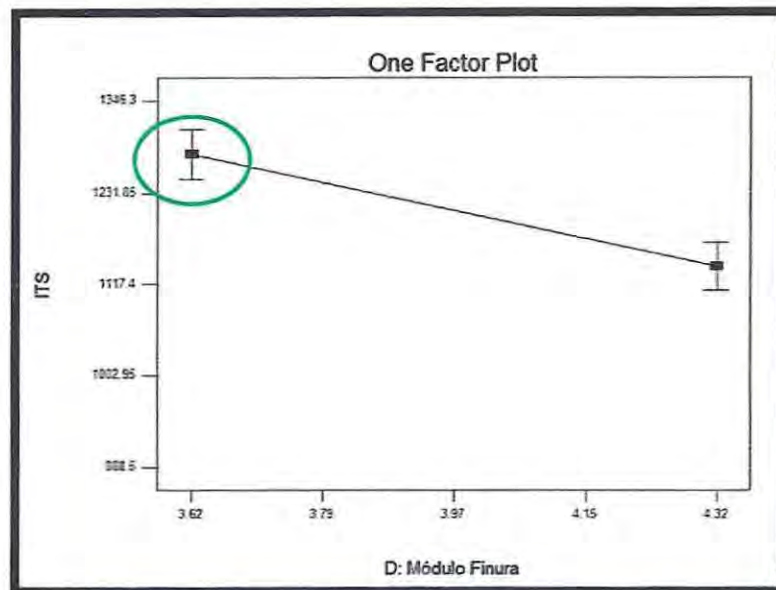


Figura 4.18: Comportamiento de módulo de finura en Tracción Indirecta (ITS)
Fuente: Design Expert 6.0

De acuerdo a los modelos planteados se puede inferir que tanto en los valores de Estabilidad Marshall (EM) y la propiedad mecánica (ITS), los factores que tienen mayor influencia son los mismos (porcentaje de asfalto, temperatura de compactación y módulo de finura), lo que indica que ambas variables de respuesta se encuentran relacionadas.

4.2.2.1 Verificación del modelo correlacional establecido

La verificación del modelo correlacional, debe realizarse para otorgar credibilidad al modelo planteado, entonces a través del modelo se debe obtener un valor muy cercano al resultado obtenido en el ensayo de laboratorio. Se utilizarán probetas creadas adicionalmente en laboratorio. Las muestras creadas poseen las mismas características que la serie realizada para el análisis en cuanto a los valores estudiados, se generan pequeñas variaciones en temperaturas y módulos de finura, todo esto se encuentra especificado en la tabla 4.5, junto con los valores de estabilidad medidos en laboratorio.

Tabla 4.7: Valores de variables probetas de verificación de modelo Tracción Indirecta

% Asfalto	T° Compactación	Módulo de Finura	Resultado de Tracción Indirecta (ITS) través de ensayo (KPa)
5.71	137	3.62	1255
4.98	152	4.32	1113

Fuente: Elaboración propia

Con los valores dados en la tabla 4.9, se obtendrán valores de estabilidad Marshall a través del modelo propuesto por la fórmula 4.1. Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 4.10 y se puede cerciorar que el modelo entrega valores cercanos al valor obtenido durante la aplicación del ensayo. Por lo que se puede confirmar que el estudio entrega datos de utilidad.

Tabla 4.8: Resultados obtenidos con el modelo correlacional Tracción Indirecta

% Asfalto	T° Compactación	Módulo de Finura	Resultado de Tracción Indirecta (ITS) través de Modelo Correlacional (KPa)
5.71	137	3.62	1194
4.98	152	4.32	1081

Fuente: Elaboración propia

Entonces se puede inferir que por los resultados obtenidos el modelo planteado entrega valores que pueden ser de utilidad para una verificación de control de calidad.

CAPITULO 5

METODOLOGÍA PARA EL CONTROL EN TERRENO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (HMA) DE GRADUACIÓN SEMI-DENSA A TRAVÉS DE ESTABILIDAD MARSHALL

5.1 Uso del modelo correlacional

Cuando se construye un pavimento, se deben cumplir con los parámetros de calidad exigidos por el diseño. Puede suceder bajo el efecto de condiciones externas al control de calidad de los materiales, que produzca algún cambio en las condiciones óptimas de éstos y una vez construido el pavimento, los factores externos puedan afectar la duración y calidad del producto final.

Por lo tanto para el uso del modelo correlacional, será necesario considerar los factores estudiados en este trabajo, los cuales se obtienen del control de calidad en terreno de la construcción del proyecto:

- a) Porcentaje de asfalto (%): el cual puede ser obtenido desde un ensayo de extracción asfáltica que permite determinar el contenido de asfalto de una mezcla.
- b) Temperatura de compactación (°C): este valor se debe encontrar registrado en la colocación de la partida de la mezcla y debe ser registrado justo en el momento que se ejecuta esta labor.
- c) Módulo de finura (Granulometría): este valor se puede obtener a través del ensayo de extracción asfáltica en un horno de ignición, donde el cual la mezcla de áridos quedara libre de asfalto y se podrá realizar una granulometría a esta.

5.2 Evaluación de la capacidad estructural de las mezclas asfálticas semi-densas

La capacidad estructural de una mezcla asfáltica, se puede determinar a través del método de diseño de pavimentos flexibles nuevos presentado en el Manual de Carreteras, Volumen 3.

El método consiste principalmente en encontrar el numero estructural "NE" para que el pavimento flexible pueda soportar el nivel de carga solicitante. La fórmula general de diseño relaciona los ejes

equivalentes (EE) solicitantes con el número estructural y el nivel de confianza, de manera que la estructura experimente una pérdida de serviciabilidad determinada [8].

A través del modelo correlacional se obtendrán valores de estabilidad Marshall, a partir de condiciones estudiadas y obtenidas del control de calidad de obras de pavimentación. Estos valores de estabilidad permitirán estimar valores de coeficiente estructural, para pavimentos flexibles, los cuales permitirán determinar el valor de (EE) admisibles y por tanto capacidad estructural correspondiente a cada caso estudiado.

De acuerdo a lo anterior para iniciar la determinación de la capacidad estructural del pavimento flexible es necesario conocer las condiciones de construcción de este.

La determinación de la capacidad estructural comenzará con la obtención del valor de Estabilidad Marshall a través del método planteado para este caso, el cual se presentó en el capítulo 4.2.1, por medio de la ecuación 4.1.

$$\text{Estabilidad Marshall (KN)} = 12,507 + 0,532 * A + 0,036 * C - 2,480 * D \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

A = Porcentaje de asfalto (%)

C = Temperatura de compactación (°C)

D = Módulo de finura (Sin Unidad)

A continuación, el valor de coeficiente estructural el cual se utilizará para conocer el diseño de la capacidad estructural de los casos estudiados, se conocerá a través de la ecuación (5.1), esta se encuentra planteada en el volumen 3.604 del Manual de Carreteras:

$$a_1 = 0,0078 * EM^{0.441} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

a_1 = Coeficiente estructural de concretos asfálticos en función de Estabilidad Marshall (Sin Unidad)

EM = Estabilidad Marshall (N)

Con los datos otorgados a través del control de calidad en terreno de cuatro faenas de construcción de pavimentos de la empresa Bitumix correspondientes al mes de octubre del 2012, se realiza la combinación de todos los casos posibles entre estos datos y se construye la tabla 5.1, con los cuales se obtiene la Estabilidad Marshall y posteriormente el coeficiente estructural, los cuales se mencionan en la tabla 5.2.

Tabla 5.1: Valores de variables para construcción de ábacos

% Asfalto	T° Compactación	Modulo de Finura
4.98	137	3.62
5.15	141	3.83
5.58	150	4.05
5.71	152	4.32

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2: Valores de estabilidad y coeficiente estructural

% Asfalto	T° Compactación	Módulo de finura	EM (KN)	EM (N)	a1
4.98	137	3.62	11.07	11065.02	0.474
4.98	137	3.83	10.54	10544.17	0.464
4.98	137	4.05	10.00	9998.51	0.453
4.98	137	4.32	9.33	9328.85	0.439
4.98	141	3.62	11.21	11207.75	0.476
4.98	141	3.83	10.69	10686.90	0.466
4.98	141	4.05	10.14	10141.25	0.456
4.98	141	4.32	9.47	9471.58	0.442
4.98	150	3.62	11.53	11528.90	0.482
4.98	150	3.83	11.01	11008.05	0.473
4.98	150	4.05	10.46	10462.39	0.462
4.98	150	4.32	9.79	9792.73	0.449
4.98	152	3.62	11.60	11600.26	0.484
4.98	152	3.83	11.08	11079.41	0.474
4.98	152	4.05	10.53	10533.76	0.464
4.98	152	4.32	9.86	9864.09	0.450
5.15	137	3.62	11.16	11155.41	0.475
5.15	137	3.83	10.63	10634.56	0.465
5.15	137	4.05	10.09	10088.91	0.455
5.15	137	4.32	9.42	9419.25	0.441
5.15	141	3.62	11.30	11298.15	0.478
5.15	141	3.83	10.78	10777.29	0.468
5.15	141	4.05	10.23	10231.64	0.458
5.15	141	4.32	9.56	9561.98	0.444
5.15	150	3.62	11.62	11619.29	0.484
5.15	150	3.83	11.10	11098.44	0.474

% Asfalto	T° Compactación	Módulo de finura	EM (KN)	EM (N)	a1
5.15	150	4.05	10.55	10552.79	0.464
5.15	150	4.32	9.88	9883.12	0.451
5.15	152	3.62	11.69	11690.66	0.485
5.15	152	3.83	11.17	11169.81	0.476
5.15	152	4.05	10.62	10624.16	0.465
5.15	152	4.32	9.95	9954.49	0.452
5.58	137	3.62	11.38	11384.06	0.480
5.58	137	3.83	10.86	10863.21	0.470
5.58	137	4.05	10.32	10317.56	0.459
5.58	137	4.32	9.65	9647.89	0.446
5.58	141	3.62	11.53	11526.79	0.482
5.58	141	3.83	11.01	11005.94	0.473
5.58	141	4.05	10.46	10460.29	0.462
5.58	141	4.32	9.79	9790.63	0.449
5.58	150	3.62	11.85	11847.94	0.488
5.58	150	3.83	11.33	11327.09	0.479
5.58	150	4.05	10.78	10781.44	0.468
5.58	150	4.32	10.11	10111.77	0.455
5.58	152	3.62	11.92	11919.31	0.489
5.58	152	3.83	11.40	11398.46	0.480
5.58	152	4.05	10.85	10852.80	0.470
5.58	152	4.32	10.18	10183.14	0.457
5.71	137	3.62	11.45	11453.19	0.481
5.71	137	3.83	10.93	10932.34	0.471
5.71	137	4.05	10.39	10386.68	0.461
5.71	137	4.32	9.72	9717.02	0.447
5.71	141	3.62	11.60	11595.92	0.484
5.71	141	3.83	11.08	11075.07	0.474
5.71	141	4.05	10.53	10529.42	0.463
5.71	141	4.32	9.86	9859.75	0.450
5.71	150	3.62	11.92	11917.07	0.489
5.71	150	3.83	11.40	11396.22	0.480
5.71	150	4.05	10.85	10850.56	0.470
5.71	150	4.32	10.18	10180.90	0.457
5.71	152	3.62	11.99	11988.43	0.491
5.71	152	3.83	11.47	11467.58	0.481
5.71	152	4.05	10.92	10921.93	0.471
5.71	152	4.32	10.25	10252.26	0.458

Fuente: Elaboración propia

Dentro de un diseño de pavimentos flexibles mediante el método planteado por el Manual de Carreteras el valor aceptado de coeficiente estructural mínimo en un proyecto es de 0.46 [8], ya que este método está basado en la seguridad del proyecto, donde se buscan grandes valores estructurales para evitar la falla temprana de los pavimentos construidos. A través del modelo correlacional planteado y realizando variaciones a las condiciones de puesta en obra, se puede observar que el coeficiente varía e incluso en algunos casos es menor a lo establecido, lo que finalmente se puede estimar como pérdida de las capacidades estructurales finales de un pavimento.

5.3 Construcción de ábacos para el control en terreno

Mediante el uso de la ecuación (5.6) del Manual de Carreteras y adaptación de modelo AASTHO de 1998, se utiliza el modelo matemático planteado al cual se dan valores mínimos de diseño para un proyecto, este se estudiará en diversos casos de CBR de subrasante y espesores de la carpeta asfáltica, con lo cual se logrará conocer el valor de la cantidad admisible de ejes equivalentes, que corresponderán a la capacidad estructural real que puede resistir el pavimento bajo las condiciones propuestas. Para este procedimiento se utilizará el programa PAVIVIAL (Dirección Nacional de Vialidad) de diseño de pavimentos y se utilizarán las fórmulas de diseño otorgadas por el Manual de Carreteras.

El método consiste principalmente en encontrar el número estructural "NE" para que el pavimento flexible pueda soportar el nivel de carga solicitante. La fórmula general de diseño relaciona los ejes equivalentes (EE) solicitantes con el número estructural y el nivel de confianza, de manera que la estructura experimente una pérdida de serviciabilidad determinada.

Para la construcción de los ábacos se obtienen diferentes valores de (EE) admisibles, variando el espesor de carpeta de 5 a 15 (cm), aumentándose cada 1 (cm). A su vez se realizaron cuatro gráficos correspondientes a cuatro valores de CBR para subrasante (CBR 20%, CBR 15%, CBR 10% y CBR 5%). Donde el CBR (California Bearing Ratio) tiene como finalidad determinar la capacidad de soporte de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. Es un método desarrollado por la división de carreteras del Estado de California (EE.UU.) y sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para sub-rasante, sub-base y base de pavimentos.

Los ábacos se construirán en base a los valores de control de calidad en terreno estudiados y el coeficiente estructural obtenido que se muestra en tabla 5.2. Se utilizarán las otras condiciones de diseño de pavimentos flexibles dadas por el Manual de Carreteras como son:

- Estimación de otros valores de coeficiente estructurales (a) de bases y subbases granulares no tratadas en función del valor de CBR:

Coeficiente estructural de bases granulares (a_2):

$$a_2 = 0,032 * (CBR)^{0,32} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Donde:

CBR = Capacidad de soporte de la base granular no tratada (%).

Coefficiente estructural de subbases granulares (a_3):

$$a_3 = 0,058 * (CBR)^{0,19} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Donde:

CBR = Capacidad de soporte de la base granular no tratada (%)

- Determinación de número estructural

$$NE = a_1 * h_1 + a_2 * h_2 * m_2 + a_3 * h_3 * m_3 \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Donde:

NE = Número estructural (mm).

a_1, a_2, a_3 = Coeficientes estructurales de la carpeta asfáltica, base estructural y Subbase estructural respectivamente.

h_1, h_2, h_3 = Espesores de cada una de las capas carpeta asfáltica, base u Subbase (mm).

m_2, m_3 = Coeficiente de drenaje de las capas no tratadas (base y subbase granulares), estos valores se encuentran en la tabla 3.604.106B del volumen 3 del Manual de Carreteras

- Estimación de EE admisibles, por condiciones de diseño dadas

$$\beta = 0,40 + \left[\frac{97,81}{NE+25,4} \right]^{5,19} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

$$EE = (NE + 25,4)^{9,36} * 10^{(-16,40+ZR * S_0)} * MR^{2,32} * \left[\frac{p_i - p_f}{p_i - 1,5} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Donde:

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

NE: Numero estructural (mm).

ZR: Coeficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte.

S0: Desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo.

MR: Modulo Resiliente del suelo de la sub-rasante (MPa).

pi: Índice de serviciabilidad inicial.

pf: Índice de serviciabilidad final.

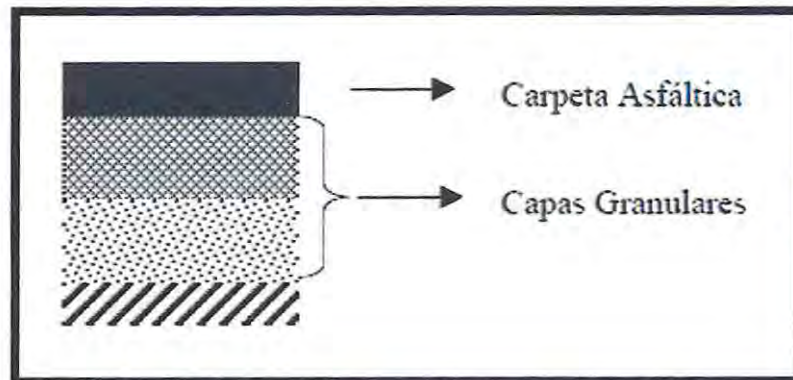


Figura 5.1: Corte tipo de estructura pavimento [18]

Para la construcción de los ábacos, se consideraron además las siguientes condiciones:

- Base granular: se consideró como base granular de CBR = 80%, el cual corresponde a un valor de módulo resiliente (MR) = 246 (Mpa) y un espesor estándar de 20 (cm).
- Sub-base granular: se consideró una sub-base granular de CBR = 40%, que corresponde a un valor de módulo resiliente (MR) = 168 (Mpa) y un espesor estándar de 20 (cm).
- Capa asfáltica: se consideró un espesor variable de 5, 7, 9, 11, 13 y 15 (cm).
- Sub-Rasante: se consideraron cuatro tipos de Sub-Rasante con CBR=5%, CBR=10%, CBR=15% y CBR=20%.

Finalmente con los valores de Estabilidad Marshall (EM) estimados y los Ejes Equivalentes (EE) admisibles obtenidos, se proponen los siguientes ábacos, para estimar la real capacidad estructural de distintos pavimentos, con diferentes espesores (e):

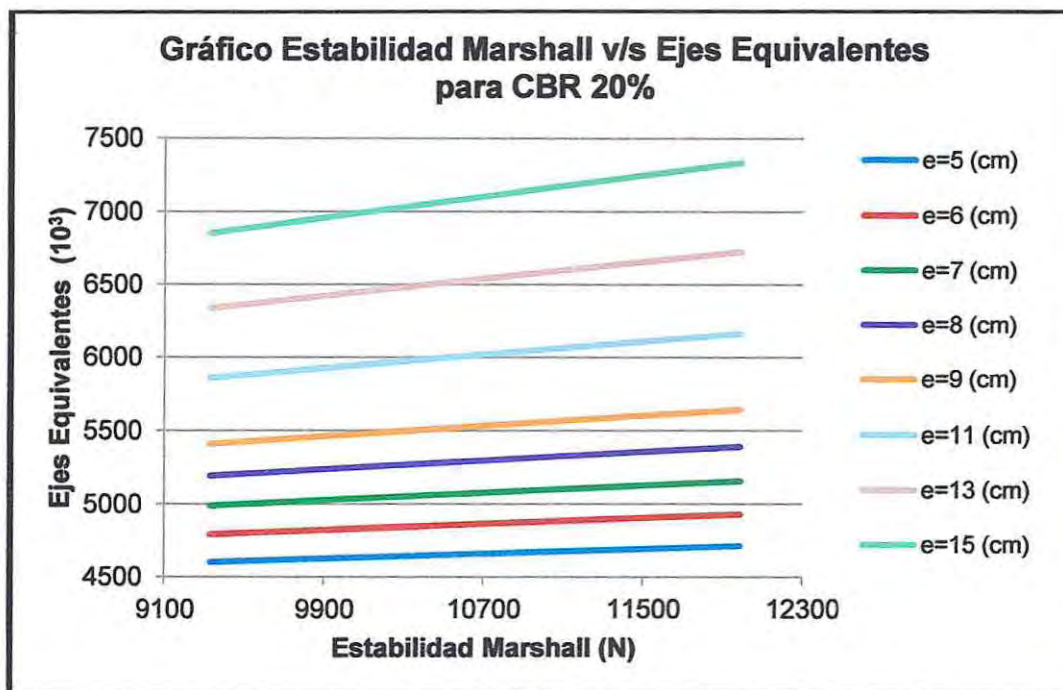


Figura 5.2: Abaco para medición de control de calidad en terreno con CBR 20%
Fuente: Elaboración Propia

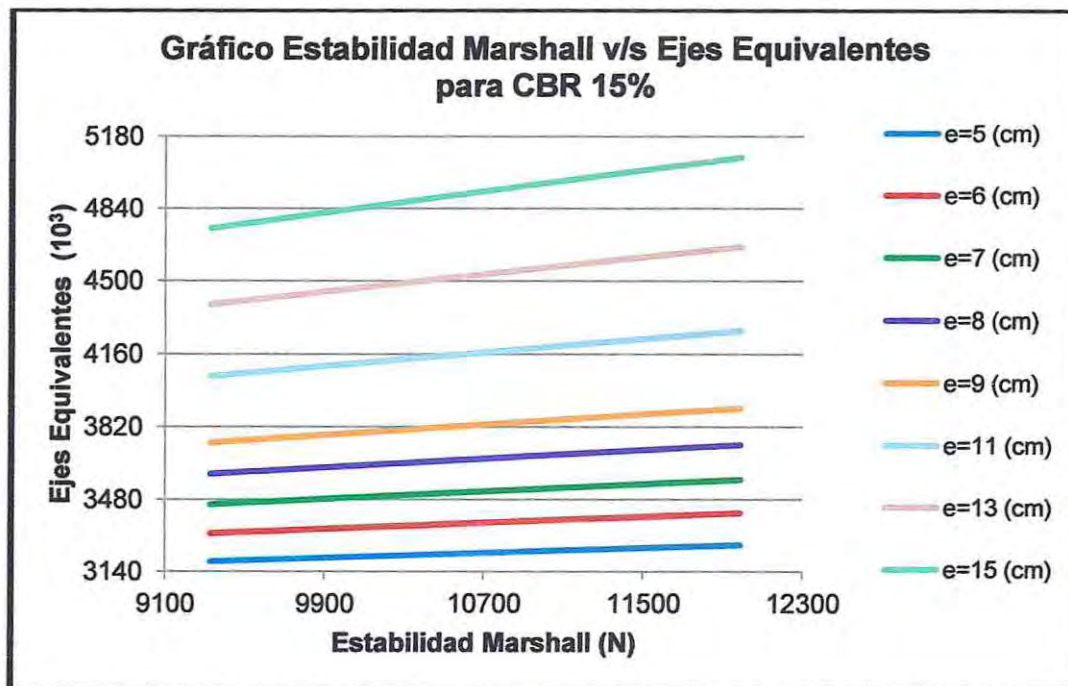


Figura 5.3: Abaco para medición de control de calidad en terreno con CBR 15%
Fuente: Elaboración Propia

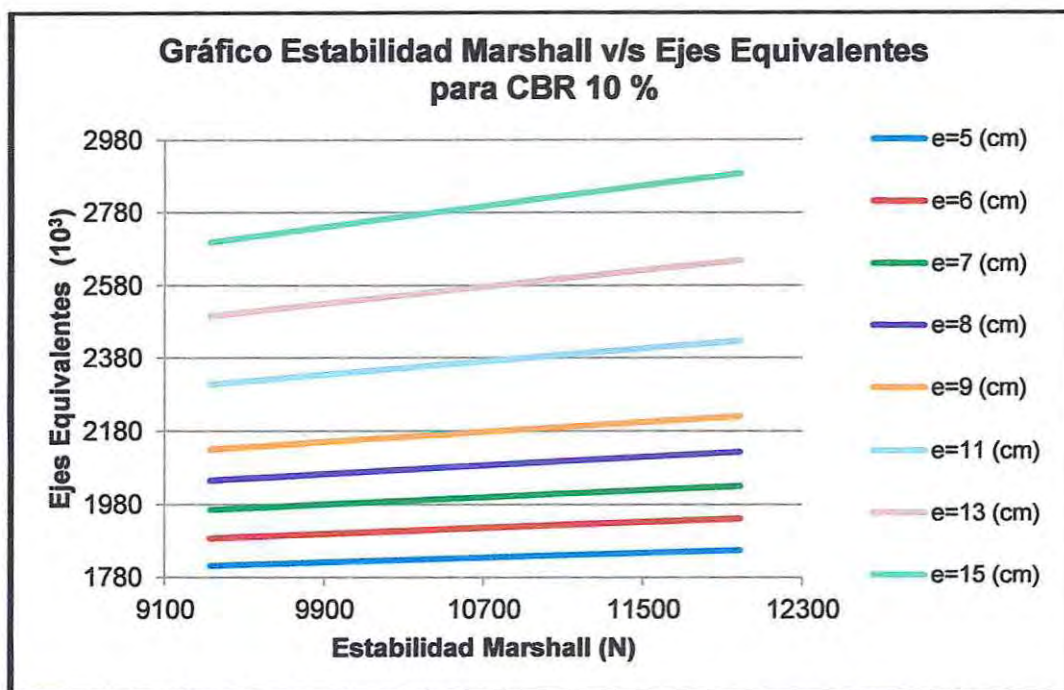


Figura 5.4: Abaco para medición de control de calidad en terreno con CBR 10%
Fuente: Elaboración Propia

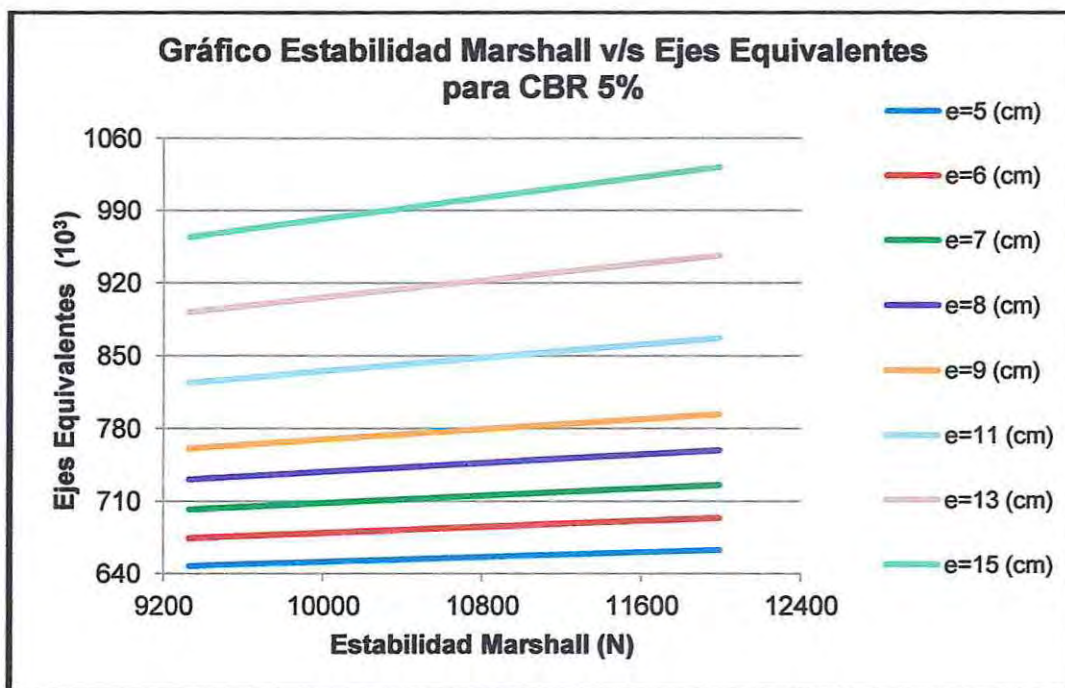


Figura 5.5: Abaco medición de control de calidad en terreno para CBR 5%
Fuente: Elaboración Propia

En el anexo G, se presentan las tablas elaboradas que presentan los valores de ejes equivalentes admisibles, con los cuales se elaboraron los ábacos presentados.

En resumen, la metodología propuesta para estimar la capacidad estructural de carpetas asfálticas de graduación semi-densa puede realizarse mediante los siguientes pasos, durante el proceso de construcción:

1. Recopilar la información necesaria durante el proceso de compactación de la capa asfáltica (Temperatura de compactación, porcentaje de asfalto y módulo de finura (granulometría)).
2. Calcular la estabilidad Marshall con la ecuación 4.1 a través de la información recopilada.
3. Finalmente, analizar mediante la gráfica EM v/s EE el valor obtenido de estabilidad Marshall, para así obtener el número de ejes equivalentes admisibles, y de esta forma chequear el valor real de la capacidad estructural del pavimento.

En la figura 5.6 se muestra un diagrama explicativo de la determinación de la capacidad estructural de la carpeta asfáltica en el momento de la construcción.

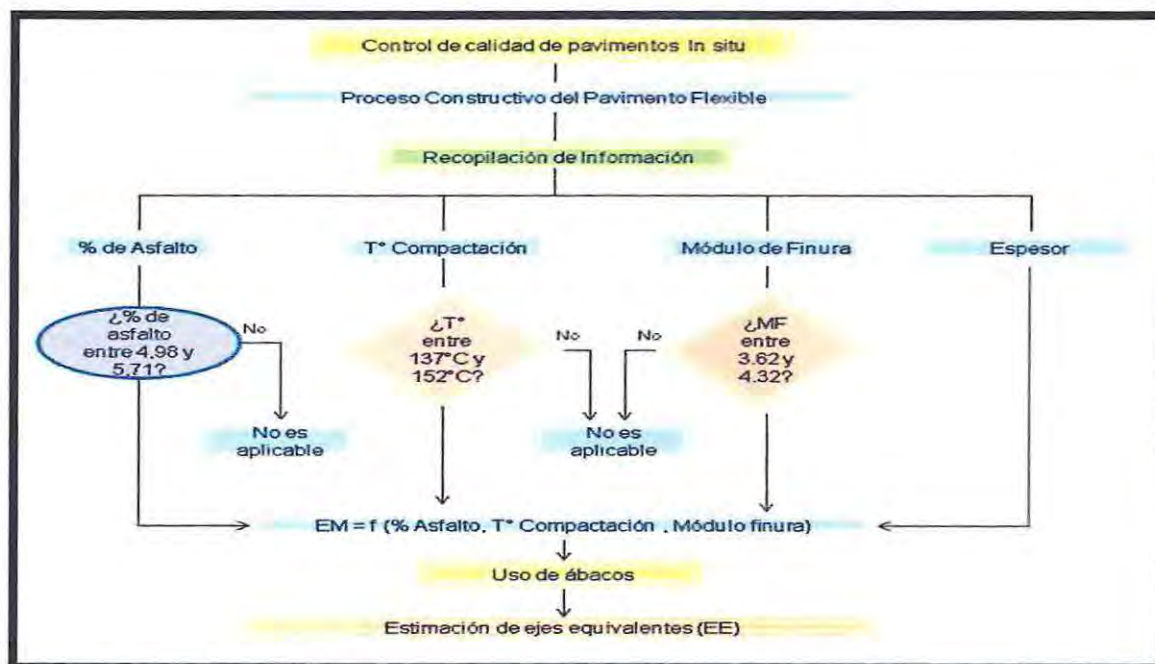


Figura 5.6: Diagrama explicativo de metodología propuesta para el control de calidad en el proceso de construcción de las mezclas asfálticas mediante Estabilidad Marshall (EM).

Fuente: Elaboración propia

Si se realiza un análisis posterior a la construcción variará el proceso de recopilación de información:

1. Conocer el valor de temperatura de compactación con la cual se construyó el pavimento
2. Tomar muestras de testigos asfálticos del pavimento a analizar.
3. Realizar una extracción asfáltica para conocer el contenido de asfalto del pavimento.

4. Determinar la granulometría y obtener el modulo de finura de la mezcla de áridos, con el material de la extracción.
5. Calcular la estabilidad Marshall con la ecuación 4.1 a través de la información recopilada.
6. Finalmente, analizar mediante la gráfica EM v/s EE el valor obtenido de estabilidad Marshall, para así obtener el número de ejes equivalentes admisibles, y de esta forma el valor real de la capacidad estructural del pavimento.

En la figura 5.7 se muestra un diagrama que permite la estimación de la capacidad estructural de una mezcla asfáltica en caliente a través de un control de calidad posterior a la construcción de esta.

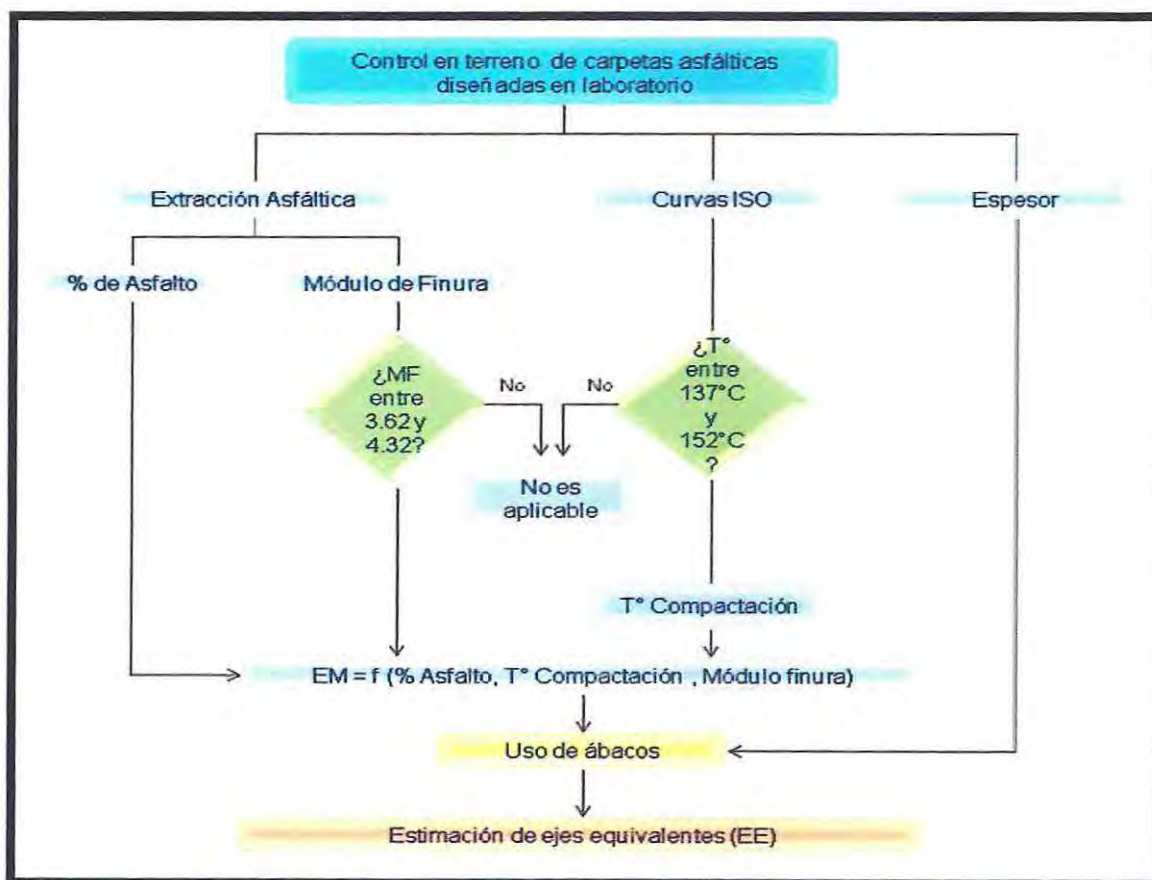


Figura 5.7: Diagrama explicativo de metodología propuesta para el control de calidad de mezclas asfálticas mediante Estabilidad Marshall (EM).

Fuente: Elaboración propia

5.4 Ejemplos de aplicación

5.4.1 Análisis de casos tipo

En esta sección y a modo de ejemplo se presenta la verificación estructural de algunas capas asfálticas durante el proceso de compactación. Esta verificación se realiza mediante la metodología de evaluación propuesta. La tabla 5.3 presenta algunos casos tipos correspondientes a diferentes capas asfálticas. El porcentaje de asfalto, la temperatura de compactación y el módulo de finura presentados en la tabla fueron obtenidos de la información recopilada durante el proceso de compactación, como se indica en el uso del modelo correlacional. Cabe señalar, que el dato espesor de la carpeta asfáltica se utiliza como valor complementario para trabajar mediante los ábacos confeccionados. Para el uso de los ábacos, es necesario establecer el porcentaje de CBR para la subrasante, para efectos de este ejemplo se considera CBR 20%.

Tabla 5.3: Análisis de casos tipos

Caso Tipo	A	C	D	Espesor (cm)
	Porcentaje de Asfalto (%)	T° de Compactación	Módulo de Finura	
1	5.44	142	3.62	6
2	5.15	150	4.05	6
3	5.58	144	3.83	9
4	5.10	139	3.76	9

Fuente: Elaboración propia

Mediante esta información y aplicando la ecuación 4.1 puede ser obtenida la estabilidad Marshall en cada uno de los puntos de extracción. La tabla 5.4 Presenta los resultados retro calculados de la estabilidad Marshall.

Tabla 5.4: Resultados Estabilidad Marshall obtenido por modelo correlacional

Caso Tipo	Porcentaje de Asfalto (%)	T° de Compactación	Módulo de Finura	Espesor (cm)	Estabilidad Marshall (N)
1	5.44	142	4.32	6	11535,5
2	5.15	150	3.62	6	10552,8
3	5.17	148	3.67	9	11113,0
4	5.01	139	4.27	9	10899,4

Fuente: Elaboración propia

Utilizando los ábacos confeccionados es posible estimar el valor de ejes equivalentes admisibles en cada punto, como se muestra en la tabla 5.5

En la figura 5.8, se muestra la utilización del ábaco y la obtención de la cantidad de ejes equivalentes para los datos de entrada dados en la tabla 5.4.

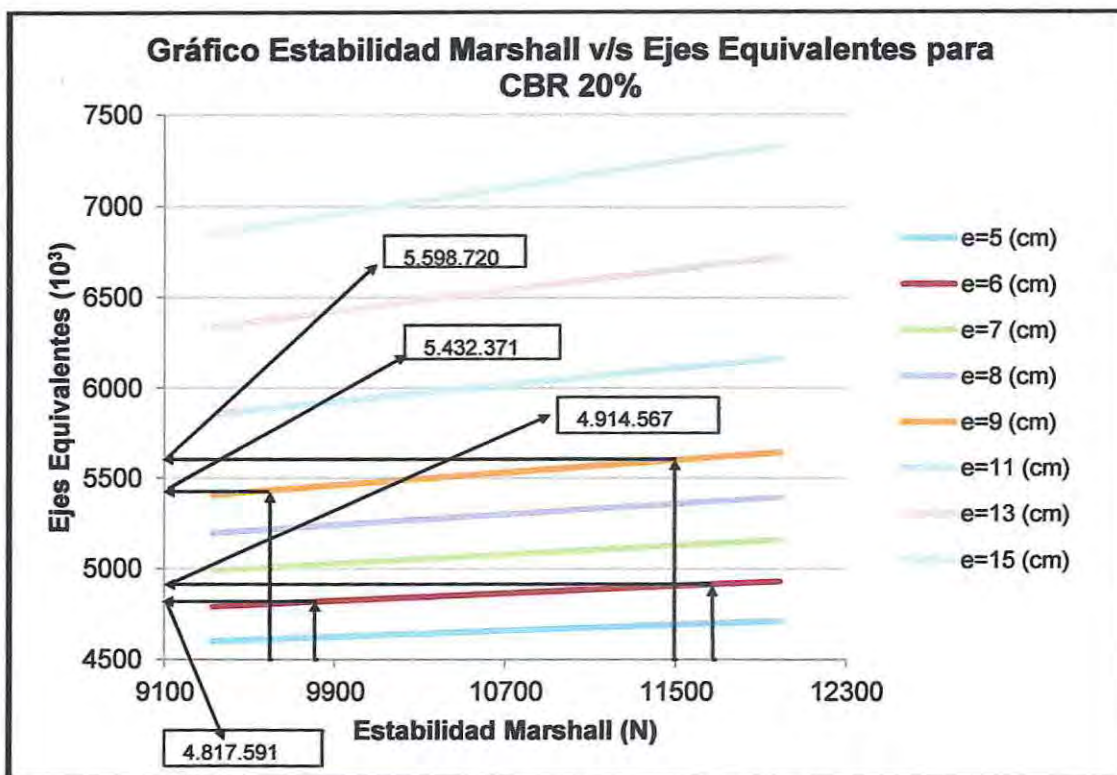


Figura 5.8: Uso de ábaco para obtención ejes equivalentes
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.5: Estimación de ejes equivalentes

Caso Tipo	Ejes Equivalentes	Ejes Equivalentes en valor cerrado
1	4.981.759,4	4.981.000
2	4.914.567,8	4.914.000
3	5.598.720,1	5.598.000
4	5.432.371,6	5.532.000

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en los resultados de la tabla 5.4, que a través de las variaciones en los valores de porcentaje de asfalto, temperatura de compactación y módulo de finura, se obtienen diferencias

variadas en la cantidad de ejes equivalentes admisibles en el pavimento, lo cual dice relación con la capacidad estructural que presenta.

Se puede inferir, debido a la distribución del ábaco como también a la variación en la estimación de ejes equivalentes que para el fenómeno estudiado las variables afectan considerablemente en comportamiento de éste, generando cambios en las capacidades estructurales finales de la carpeta asfáltica.

A partir de lo anterior, se puede relacionar por ejemplo que la vida útil del pavimento en el caso tipo 2 es más baja en comparación al pavimento analizado en el caso tipo 1. Esto se debe a la variación de los valores mencionados en la tabla 5.3 y a los espesores variables. Bajo este mismo criterio, es posible apreciar que la vida útil de los pavimentos de los casos 3 y 4. Se puede entonces inferir que las variaciones en el proceso constructivo, afectan en el resultado final del pavimento.

Como dato adicional en el anexo I, se entregan valores de ejes equivalentes admisibles para un espesor de base y sub-base de 30 cm, con valores de carpeta asfáltica variable en los mismos espesores utilizados en el caso anteriormente presentado.

CAPITULO 6

METODOLOGIA PARA EL CONTROL EN TERRENO DE LAS HMA DE GRADUACION SEMI-DENSA A TRAVES DE MÓDULO RESILIENTE (MR)

6.1 Generalidades

El área de proyectos viales ha sido el sector que más ha demorado en asimilar el de la calidad y en aceptar su protagonismo en la competencia de la empresa mediante la aplicación de un sistema de aseguramiento de la calidad. Existe cierto convencimiento general al pensar que el control de calidad en la construcción resulta muchas veces insatisfactorio, pero también es importante reconocer que la construcción tiene características propias que dificultan la puesta en práctica de teorías modernas de control de calidad y es por ello que requiere una adaptación específica de las mismas [5].

Esto se debe principalmente a que las tecnologías utilizadas, especialmente aquellas destinadas a la evaluación estructural de pavimentos se encuentran disponibles pero su elevado costo dificulta su implementación en el control de calidad de pavimentos asfálticos. Frecuentemente en Chile la evaluación de la capacidad estructural de los pavimentos se realiza una vez terminada su construcción, después de un prolongado periodo de tiempo.

Basado en lo señalado anteriormente, se detecta una necesidad de establecer controles complementarios a los que ya existen. Para ello se empleará el modelo correlacional desarrollando, técnicas de medición en terreno y el diseño estructural mecanicista de pavimentos.

6.2 Uso del modelo correlacional

Para el uso del modelo correlacional, será necesario considerar los factores estudiados en este trabajo, los cuales son los mismos que para el caso anterior y se obtienen del control de calidad en terreno de la construcción del proyecto:

- a) Porcentaje de asfalto (%): el cual puede ser obtenido desde un ensayo de extracción asfáltica que permite determinar el contenido de asfalto de una mezcla.
- b) Temperatura de compactación (°C): este valor se debe encontrar registrado en la colocación de la partida de la mezcla y debe ser registrado justo en el momento que se ejecuta esta labor.

- c) Módulo de finura (Granulometría): este valor se puede obtener a través del ensayo de extracción asfáltica en un horno de ignición, en el cual la mezcla de áridos quedara libre de asfalto y se podrá realizar una granulometría a esta.

6.3 Evaluación de la capacidad estructural de las mezclas asfálticas semi-densas

La capacidad estructural de pavimentos puede ser determinada mediante un método analítico (o mecanicista) de análisis multicapa. Para esto se propone el uso de programas computacionales tales como el SHELL o BISAR. Todos estos métodos utilizan los mismos principios para determinar el estado de tensiones de la estructura, diferenciándose en las ecuaciones y criterios utilizados para determinar la resistencia a la fatiga de los materiales [16].

Los métodos mecanicistas de diseño, establecen hipótesis de la caracterización de las capas que conforman el pavimento

1. Los materiales de cada capa son: homogéneos, linear elástico, isotrópicos
2. Se suponen capas infinitas horizontalmente y finitas verticalmente, excepto la subrasante la que se asume infinita verticalmente.
3. Cada capa es uniforme en su espesor
4. Existe continuidad entre las capas
5. No existen otras fuerzas en la superficie fuera de aquellas provenientes de la carga de una rueda
6. Las fuerzas de inercia se desprecian
7. Las deformaciones del sistema son pequeñas

Para efectos de este trabajo se utilizará el programa BISAR 3.0. Este método utiliza para el diseño estructural, las tensiones y deformaciones que se originan en posiciones críticas dentro del conjunto estructural, producto de las solicitaciones de tránsito existentes durante el periodo de diseño.

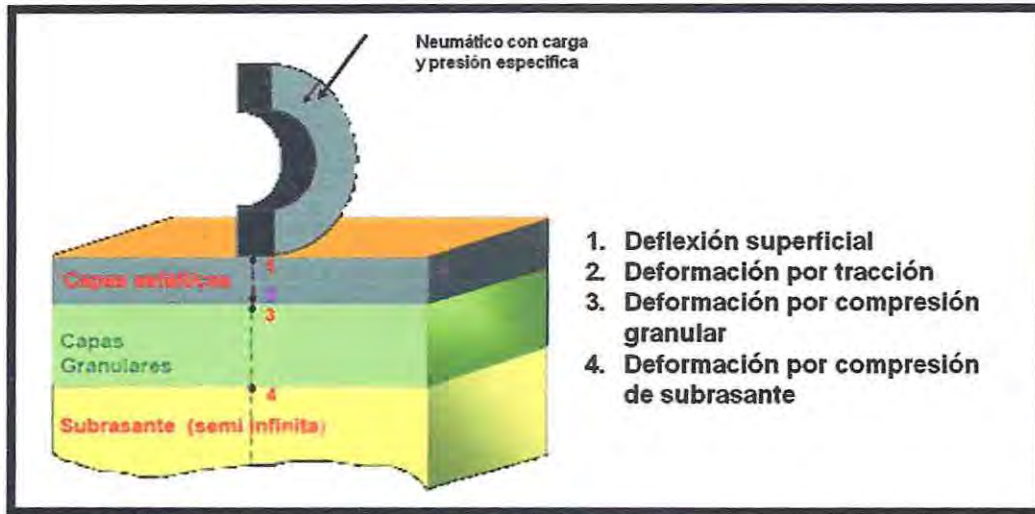


Figura 6.1: Puntos de tensiones y deformaciones en la estructura del pavimento [22]

En la figura 6.1 se muestra los puntos donde programa obtiene las tensiones y deformaciones a la cual se ve afectado el pavimento a analizar. Los puntos que se muestran en la sección del pavimento de esta figura corresponden el efecto que tiene este inmediatamente bajo la carga de la rueda y como responde el conjunto frente a esta sollicitación.

1. Deformación vertical en la superficie (deflexión).
2. Deformación horizontal en la fibra inferior de la capa asfáltica. Tracción que origina la aparición de grietas por fatiga en la capa asfáltica.
3. Deformación vertical en la subrasante. Es importante debido al efecto que puede generar en el suelo.
4. En el diseño se debe verificar además que la razón entre el esfuerzo vertical y el esfuerzo horizontal sea mayor a 1. en caso contrario se produce descompactación de las capas granulares.

Debe tenerse en cuenta que si bien el pavimento se ve afectado por este conjunto de tensiones y deformaciones, pero como el estudio realizado se basa en el comportamiento que presentan las mezclas asfálticas en caliente en la carpeta de rodadura, se realizara el análisis solo con el valor que representa el estado de deformación y tensión el cual es la deformación horizontal de la capa asfáltica en la interface con la base granular.

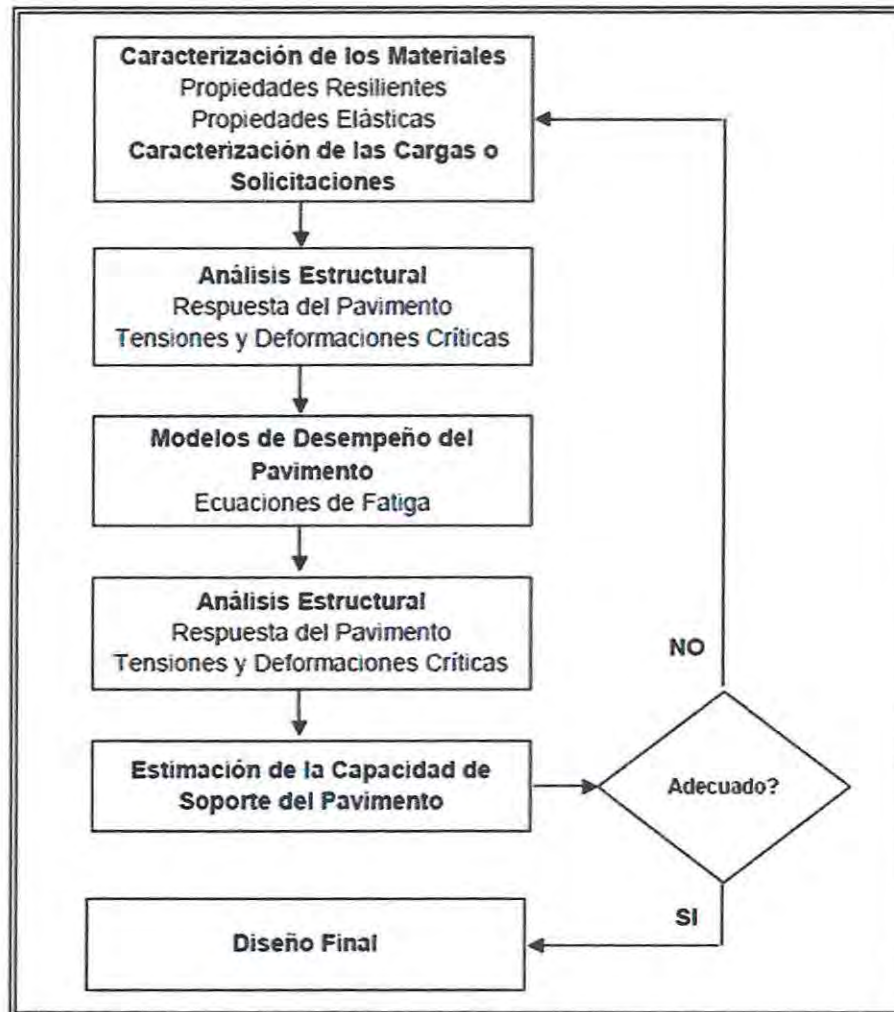


Figura 6.2: Diagrama de proceso de diseño [18]

De acuerdo al diagrama mostrado en la figura 6.2 para iniciar la determinación de la capacidad estructural del pavimento flexible es necesario determinar las propiedades resilientes (módulo de resiliencia) de las capas asfálticas. Para la mayoría de los pavimentos las propiedades elásticas de sus materiales presentan poca variabilidad, sin embargo son las capas asfálticas las que presentan una mayor variabilidad y además ellas son las responsables de las fallas de los pavimentos [3], ya que el modo de falla de éstas estructuras corresponde a la aparición de grietas en la parte inferior de las capas asfáltica, estas se generan debido a que en la parte inferior de la capa se generan esfuerzos de tracción, produciendo separación de esta y generando finalmente micro-grietas que con la continua carga aparecen en la superficie del pavimento.

Las propiedades resiliente corresponden a las características que generan un comportamiento elástico del material ya sea que el material sea elástico o se comporte elástico luego de un ciclo repetido de carga que generan fatiga y posteriormente un comportamiento elástico por acumulación de deformación. Estas propiedades son el módulo resiliente y el módulo de Poisson.

Dentro del segundo análisis realizado en este estudio se determino el valor de Tracción Indirecta de una serie de probetas, es por esta razón que se debe realizar una correlación entre el valor de Tracción Indirecta (ITS) y el módulo resiliente, esta se explica en el capítulo 2.6 y se presenta en la ecuación siguiente (Ec. 2.1). Esto es necesario para caracterizar estas capas y comenzar el desarrollo de la evaluación de la capacidad estructural del pavimento.

$$M \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 1411,9 * R_{TI} + 23069 \quad \text{(Ec. 2.1)}$$

Donde:

M= Módulo resiliente.

R_{TI}= Resultado de ensayo Tracción Indirecta (kg/cm²).

Utilizando las ecuaciones 2.1 y la ecuación 4.2 se obtiene la ecuación 6.1 que permite estimar en forma directa el módulo resiliente en función de los parámetros de control de calidad, los cuales son porcentaje de asfalto, temperatura de compactación y modulo de finura (granulometría).

$$MR \text{ (MPa)} = 2696,456 - 16,380*A - 0,546*C - 27,787*D \quad \text{(Ec. 6.1)}$$

Donde:

MR = Módulo resiliente.

A = Porcentaje de asfalto (%).

C = Temperatura de compactación (°C).

D = Módulo de finura (Sin Unidad).

El modelo de falla está dado por la aparición de una fisura en la base de la capa. El criterio de falla que considera el modelo está dado por la aparición de fisuras en la superficie de la capa, lo cual se relaciona por medio de un coeficiente denominado "Shift Factor", el cual depende del espesor de la capa. La cantidad de fisuras existentes en la superficie está asociada a la confiabilidad que se le asigna a la estructura (calzada), por lo que existen distintos modelos para cada una de las confiabilidades asignadas [18]. Las ecuaciones de transferencia (ecuaciones de fatiga) utilizadas para la capa flexible:

$$EE = 9,269 * 10^{15} * \varepsilon^{-4.116} \quad \text{(Ec. 6.2)}$$

Ec. 6.2: Cantidad de ejes equivalente admisibles a partir de las deformaciones de un pavimento

Fuente: Diseño estructural de Pavimentos a través de métodos empíricos [18]

Donde:

EE = Ejes equivalentes

ε = Deformación, en μm .

Esta ecuación, mediante la deformación producida en la base de la capa asfáltica, definida mediante el análisis multicapa, permite determinar el número de ejes equivalentes que la capa asfáltica es capaz de soportar, lo que representa la capacidad estructural del pavimento.


6.4 Construcción de ábacos para el control en terreno

Para estimar las tensiones y deformaciones producida en el pavimento de estudio se utilizará el programa BISAR 3.0, creado por Shell para realizar un análisis multicapa el cual utiliza para el diseño estructural, las tensiones y deformaciones que se originan en posiciones críticas dentro del paquete estructural, producto de las solicitaciones de tránsito existentes durante el período de diseño.

Para el análisis a la fatiga de los materiales, las solicitaciones de tránsito se caracterizan a través de un eje estándar. En la presente guía se utilizó específicamente la configuración de eje que muestra la Figura 6.2, la cual corresponde a un eje simple rueda doble (ESRD) de 80 KN (8,16 Ton), con una presión de contacto de 600 KPa y una separación entre ruedas de 35 cm [22].

El programa utiliza los siguientes datos de entrada:

Características del tránsito:

- Carga de la rueda
 - Presión de contacto
 - Posición de la carga
- 
- Consideraciones establecidas en el programa de acuerdo a configuración eje estándar.

Propiedades elásticas:

- Base Granular
- Sub-base Granular:

Propiedades resilientes:

- Modulo Resiliente: Diseño/Control de calidad post construcción.
 - Espesores de las capas: Diseño/Control de calidad
 - Módulo de Poisson: diseño
-

De acuerdo a esta investigación se plantea que el módulo resiliente sea retrocalculado mediante la el modelo matemático de probabilidad definido a través de la relación entre Tracción Indirecta y Módulo resiliente planteada en este trabajo.

La modelación desarrollada en el programa BISAR 3.0 para un pavimento de características habituales, se presenta en la figuras 6.4, 6.6 y 6.6.

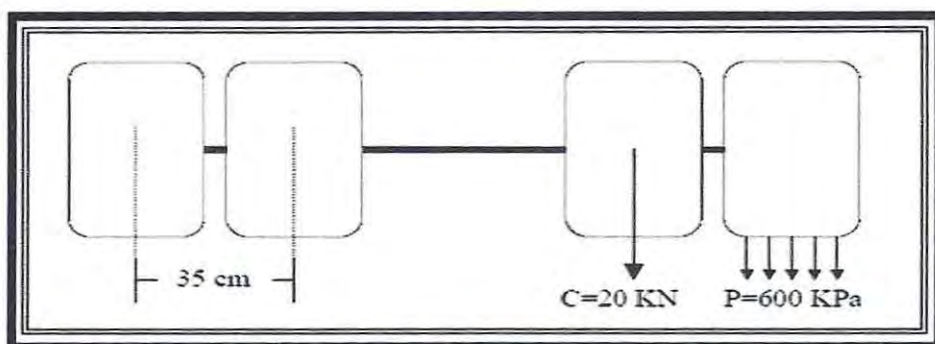


Figura 6.3: Distribución de cargas y presiones de rueda doble simple [18]

En la figura siguiente (6.4) se muestra la aplicación de cargas, el radio de impacto de esta y las coordenadas de la distribución de esta carga dentro del pavimento flexible, debe considerarse que estos datos corresponden a la carga producida por la configuración de eje simple rueda doble de propuesto por el programa.

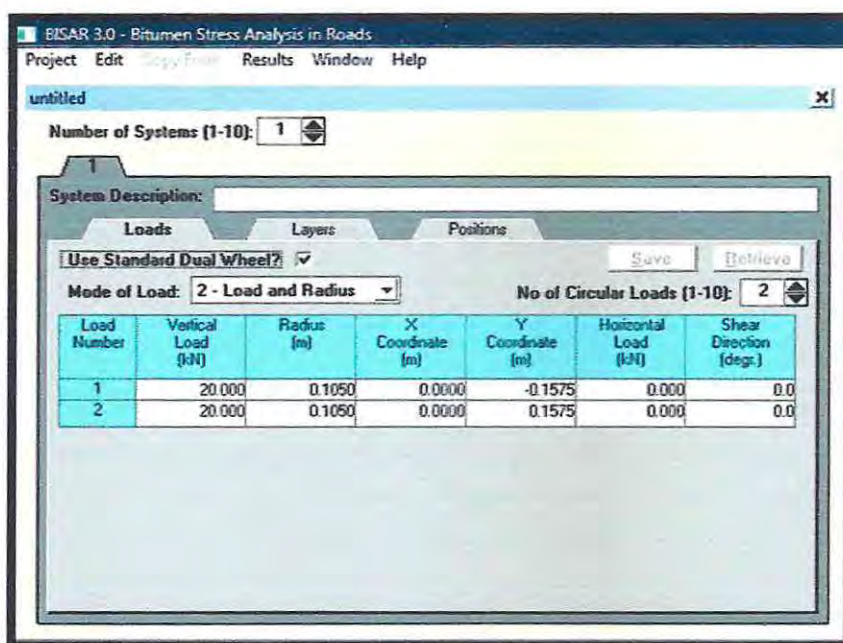


Figura 6.4: Condiciones estándar de rueda doble simple
Fuente: Programa BISAR 3.0

Para el caso de la figura (6.5) esta muestra los espesores correspondientes a cada capa a analizar en este caso son carpeta asfáltica, base y subbase, además se muestran los valores correspondientes al módulo resiliente de cada capa analizada y finalmente el módulo de Poisson, el cual se obtiene del comportamiento elástico del material, estos se pueden obtener de la tabla 6.1, pero también se encuentran en el programa.

Tabla 6.1: Valores de Módulo de Poisson.

Módulo de Poisson		
Material	Rango	Valor usual
Asfalto	0,30 – 0,40	0,40
Hormigon	0,15 – 0,20	0,15
Granulares no tratados	0,30 – 0,40	0,35
Granulares tratados con cemento	0,10 – 0,20	0,15
Suelos finos tratados con cemento	0,15 – 0,35	0,25
Arena densa	0,30 – 0,45	0,35
Suelos finos	0,30 – 0,50	0,40
Arcillas saturadas	0,40 – 0,50	0,45

Fuente: Guía de diseño estructural de pavimentos [18]

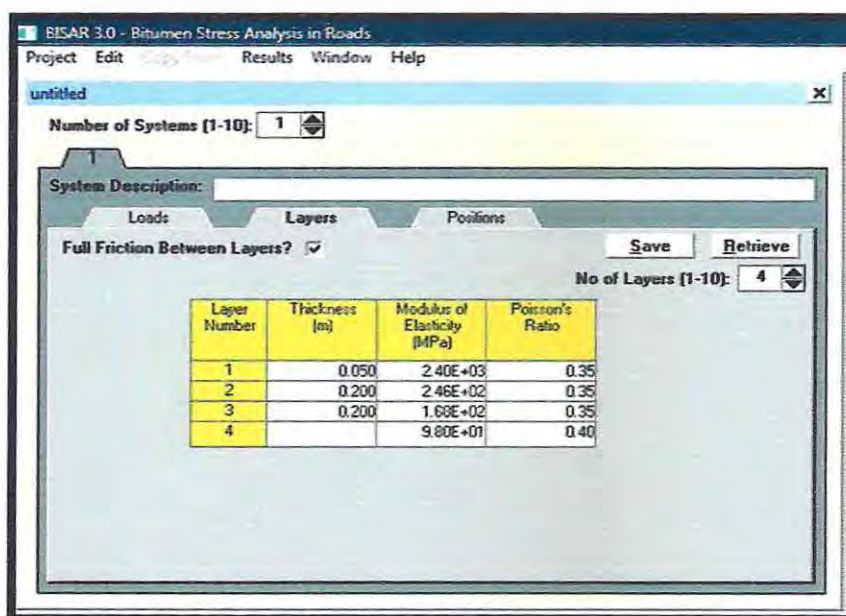


Figura 6.5: Propiedades y espesores de capas

Fuente: Programa BISAR 3.0

La figura 6.6 muestra la coordenada de aplicación de la carga con respecto al eje simple rueda doble y la profundidad de los puntos críticos respecto a la carga que existen en el pavimento.

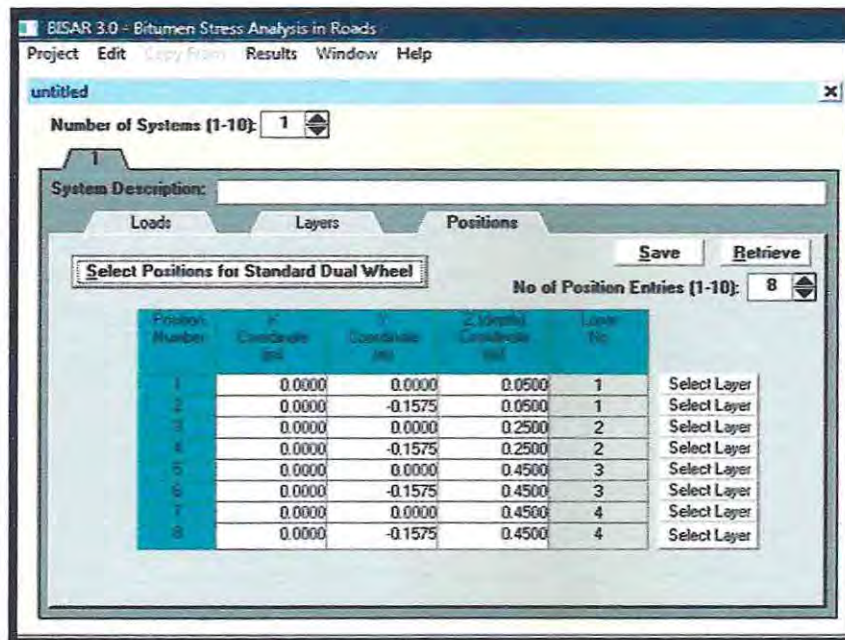


Figura 6.6: Puntos de evaluación de las capas
Fuente: Programa BISAR 3.0

Mediante la utilización de software BISAR 3.0, se obtuvieron diferentes valores de deformaciones unitarias, variando el espesor de la carpeta asfáltica desde 5(cm) a 15(cm), aumentándose cada 2 (cm). A su vez también se realizaron cuatro gráficos correspondientes a cuatro valores de CBR para sub-rasante (CBR 20%, CBR 15%, CBR 10% y CBR 5%). En cuanto a los valores de módulo resiliente, este fue variando cada 50 (MPa) en un rango desde 2400 (MPa) hasta 3600 (MPa). Los valores mínimos y máximos evaluados de módulo resiliente se justifican de acuerdo a los valores mínimos y máximos que entrega el modelo correlacional propuesto, en base a los factores porcentaje de asfalto, temperatura de compactación y módulo de finura.

Para la construcción de los ábacos, se consideraron las siguientes condiciones:

- a) Carga de la rueda: 20 (KN).
- b) Posición de la carga: Según lo especificado en la figura
- c) Base granular: se considero como base granular de CBR = 80%, el cual corresponde a un MR = 246 (Mpa), un módulo de Poisson de 0,35 y un espesor estándar de 20 (cm).
- d) Sub-base granular: se considero una sub-base granular de CBR = 40%, que corresponde a un MR = 168 (Mpa), un módulo de Poisson de 0,35 y un espesor estándar de 20 (cm).
- e) Capa asfáltica: se considero un espesor variable de 5, 7, 9, 11, 13 y 15 (cm).
- f) Sub-Rasante: se consideraron tres tipos de Sub-Rasante con CBR = 5%, CBR=10%, CBR =15% y CBR = 20% y cada una de ellas con un módulo de Poisson de 0,4.

Posteriormente, en función de las deformaciones unitarias, y a través de la ecuación 6.2 de transferencia, utilizada para capas flexibles fue posible determinar el número de ejes equivalentes admisibles para las diferentes carpetas asfálticas analizadas.

Luego de obtener las deformaciones unitarias a través del software, fue posible determinar el valor de ejes equivalentes admisibles para las respectivas capas asfálticas analizadas, a través de la ecuación de transferencia 6.2, para capas flexibles.

Finalmente, a partir de los valores de módulo resiliente y número de ejes equivalentes se proponen los siguientes ábacos para estimar el valor real de la capacidad estructural de distintos tipos de pavimentos (Figuras 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10):

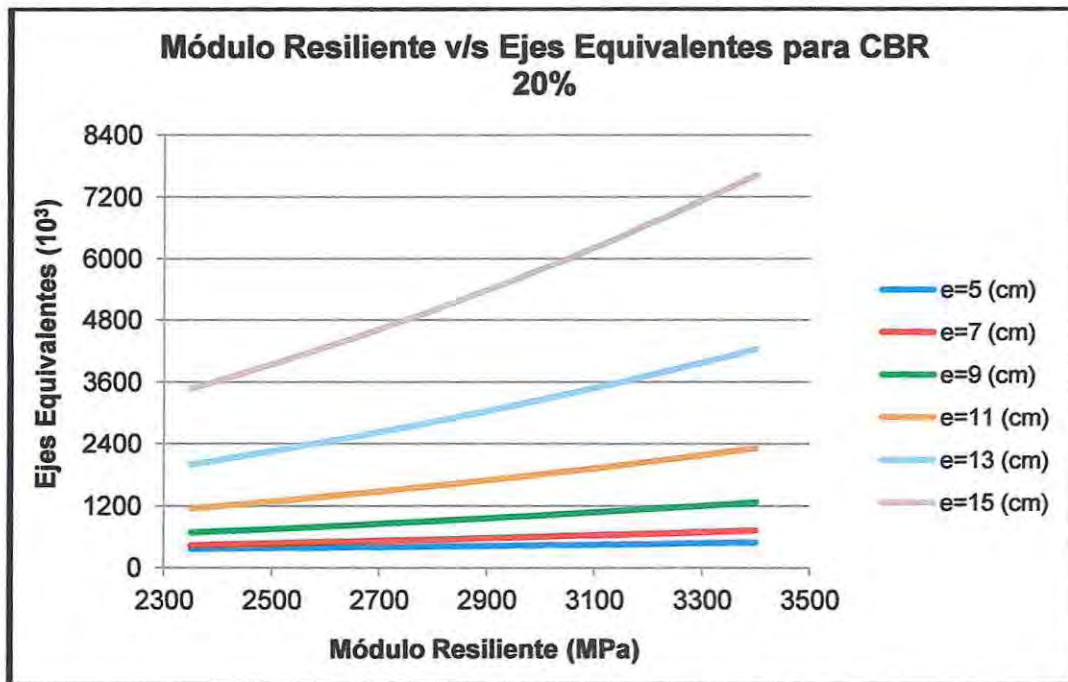


Figura 6.7: Ábaco para el control en terreno con CBR 20%
Fuente: Elaboración propia

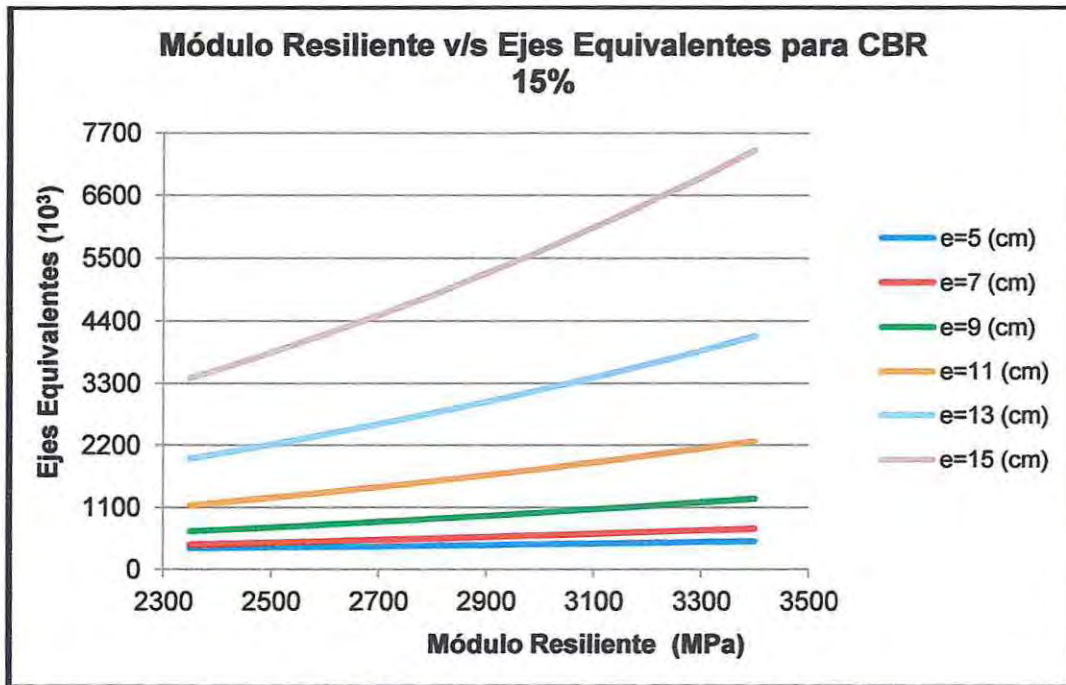


Figura 6.8: Ábaco para el control en terreno con CBR 15%
Fuente: Elaboración propia

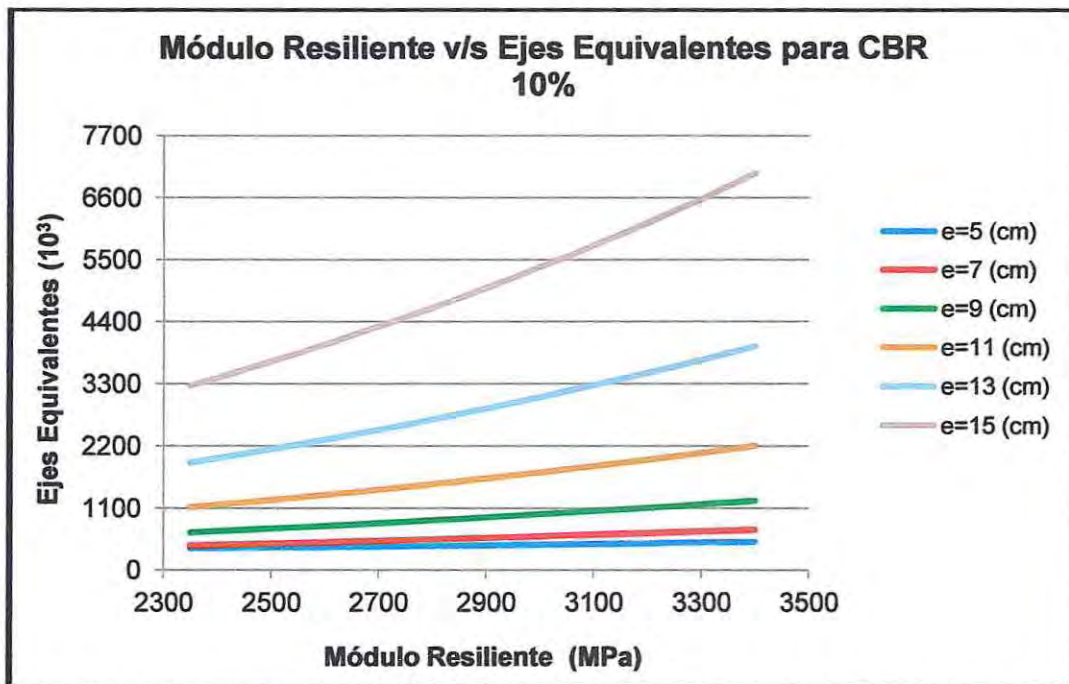


Figura 6.9: Ábaco para el control en terreno con 10%
Fuente: Elaboración propia

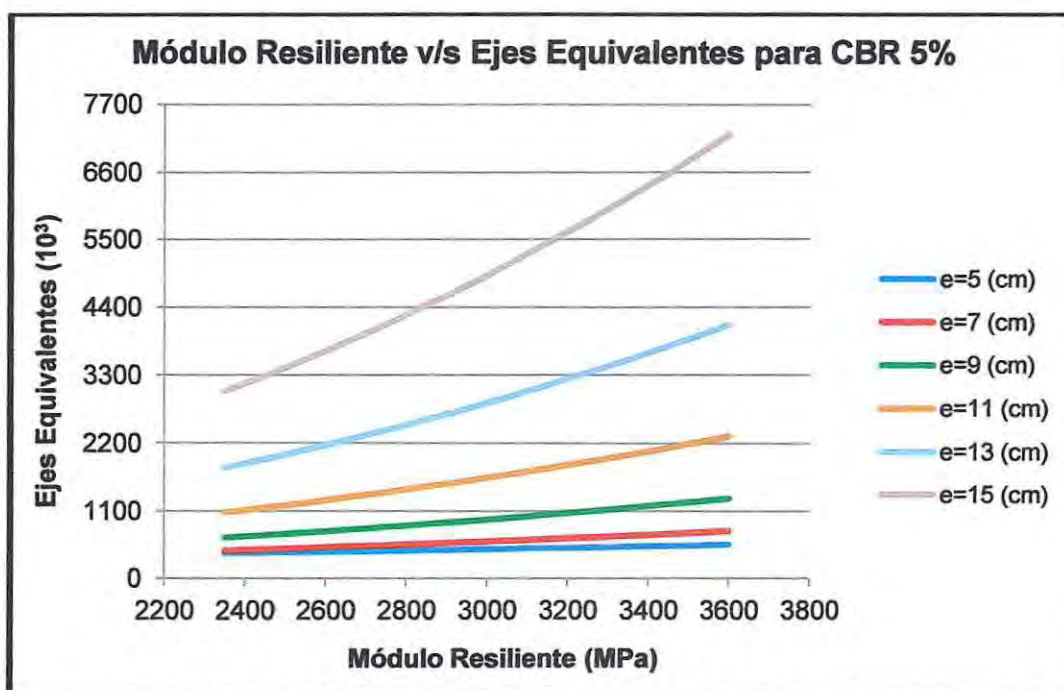


Figura 6.10: Ábaco para el control en terreno con CBR 5%
Fuente: Elaboración propia

En el anexo H se muestran las tablas de los valores de ejes equivalentes admisibles, con los cuales se elaboraron los ábacos presentados anteriormente.

En resumen, la metodología propuesta para estimar la capacidad estructural de carpetas asfálticas de graduación semi-densa puede realizarse mediante los siguientes pasos, durante el proceso de construcción:

1. Recopilar la información necesaria durante el proceso de compactación de la capa asfáltica (Temperatura de compactación, porcentaje de asfalto y modulo de finura (granulometría)).
2. Calcular el módulo resiliente con la ecuación 6.1 a través de la información recopilada.
3. Finalmente, analizar mediante la gráfica MR v/s EE el valor obtenido de módulo resiliente, para así obtener el número de ejes equivalentes admisibles, y de esta forma el valor real de la capacidad estructural del pavimento.

En la figura 6.11 se muestra un diagrama explicativo de la determinación de la capacidad estructural de la carpeta asfáltica en el momento de la construcción.

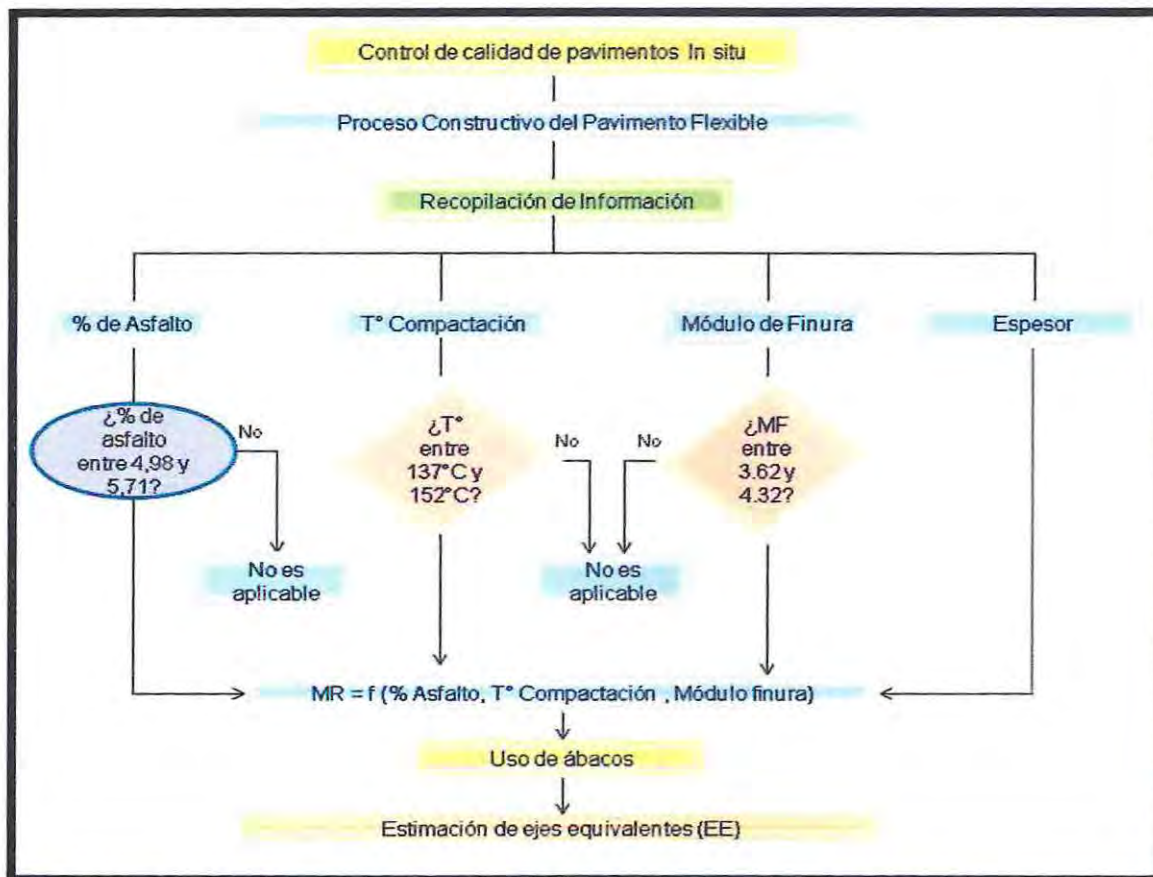


Figura 6.11: Diagrama explicativo de metodología propuesta para el control de calidad en el proceso de construcción de las mezclas asfálticas mediante Módulo Resiliente (MR)

Fuente: Elaboración propia

Si se realiza un análisis posterior a la construcción variara el proceso de recopilación de información:

7. Conocer el valor de temperatura de compactación con la cual se construyó el pavimento
8. Tomar muestras de testigos asfálticos del pavimento a analizar.
9. Realizar una extracción asfáltica para conocer el contenido de asfalto del pavimento.
10. Determinar la granulometría y obtener el módulo de finura de la mezcla de áridos, con el material de la extracción.
11. Calcular el módulo resiliente con la ecuación 6.1 a través de la información recopilada.
12. Finalmente, analizar mediante la gráfica MR v/s EE el valor obtenido de módulo resiliente, para así obtener el número de ejes equivalentes admisibles, y de esta forma el valor real de la capacidad estructural del pavimento.

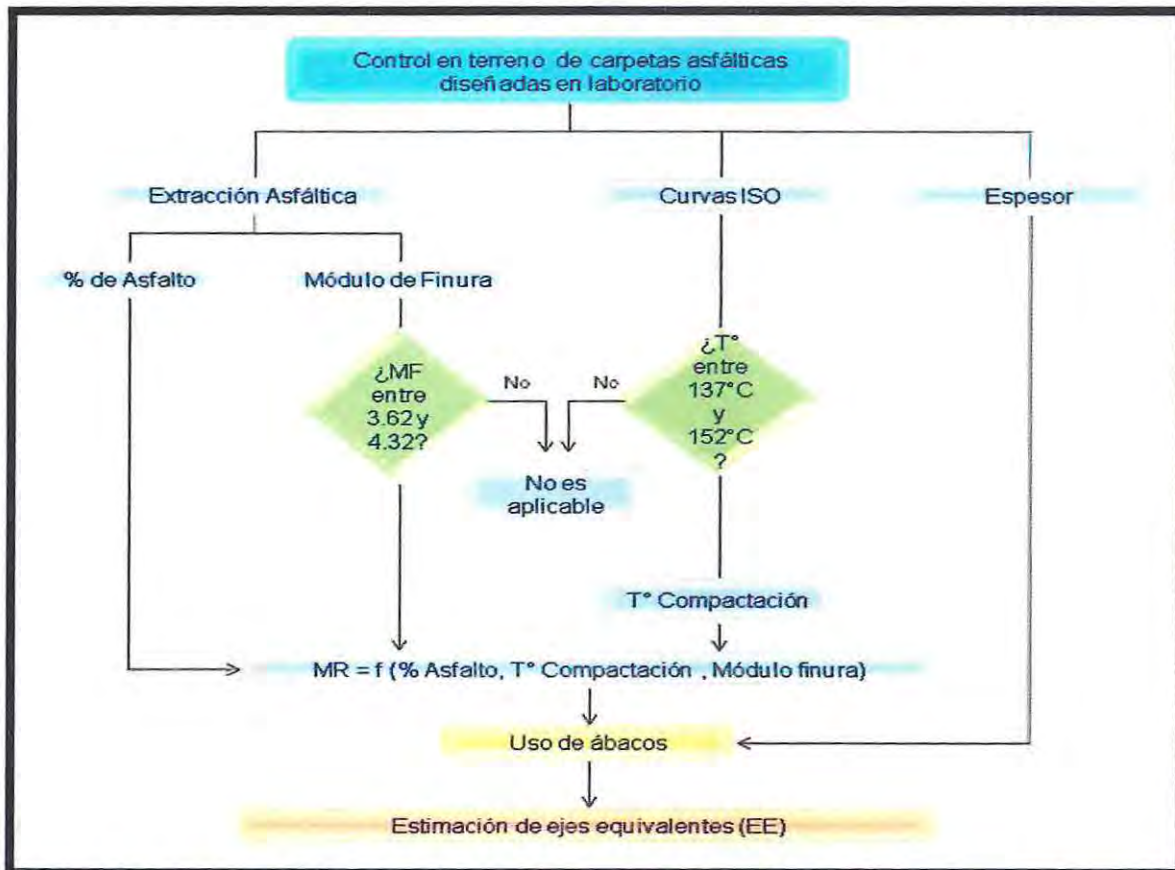


Figura 6.12: Diagrama explicativo de metodología propuesta para el control de calidad de mezclas asfálticas mediante Módulo Resiliente (MR).

Fuente: Elaboración propia

6.5 Ejemplos de aplicación

6.5.1 Análisis de casos tipo

A modo de ejemplo al igual que para el modelo establecido de estabilidad, se realizará una verificación estructural de unos prototipos de capas asfálticas elaboradas en laboratorio. La verificación se realiza mediante la metodología propuesta para la obtención del módulo resiliente. En la tabla 6.2 se presentan algunos casos tipos, los valores de variables (porcentaje de asfalto, temperatura de compactación, módulo de finura) fueron obtenidos de la información recopilada y otorgada por la empresa Bitumix S.A y fueron recompilados durante el proceso de compactación. El dato de espesor de carpeta asfáltica es un dato complementario, para aplicar el uso de los ábacos construidos. Para efectos de este ejemplo se utilizará un CBR 15%.

Tabla 6.2: Análisis casos tipo

Caso Tipo	Porcentaje de Asfalto (%)	T° de Compactación	Módulo de Finura	Espesor (cm)
1	5.03	140	4.01	11
2	5.10	150	4.3	15

Fuente: Elaboración propia

Mediante esta información y aplicando la ecuación 6.1, puede ser obtenido el módulo resiliente, en cada uno de los puntos de extracción. En la tabla 6.3 se presentan los valores retro calculados de módulo resiliente para los diferentes casos.

Tabla 6.3: Resultados módulo resiliente obtenidos por modelo correlacional

Caso Tipo	Porcentaje de Asfalto (%)	T° de Compactación	Módulo de Finura	Espesor (cm)	Módulo resiliente (MPa)
1	5.03	140	3.74	11	2433.7
2	5.71	152	4.32	11	2399.9
3	4.98	137	3.62	15	2439.5
4	5.68	150	3.98	15	2410.9

Fuente: Elaboración propia

Utilizando los ábacos confeccionados es posible estimar el valor de ejes equivalentes admisibles en cada punto, como se muestra en la tabla 6.4:

Tabla 6.4: Estimación de ejes equivalentes

Caso Tipo	Ejes Equivalentes (EE)	Ejes Equivalentes en valor cerrado
1	1.210.231,0	1210000
2	1.182.945,9	1180000
3	3.659.212,4	3690000
4	3.574.434,7	3570000

Fuente: Elaboración propia

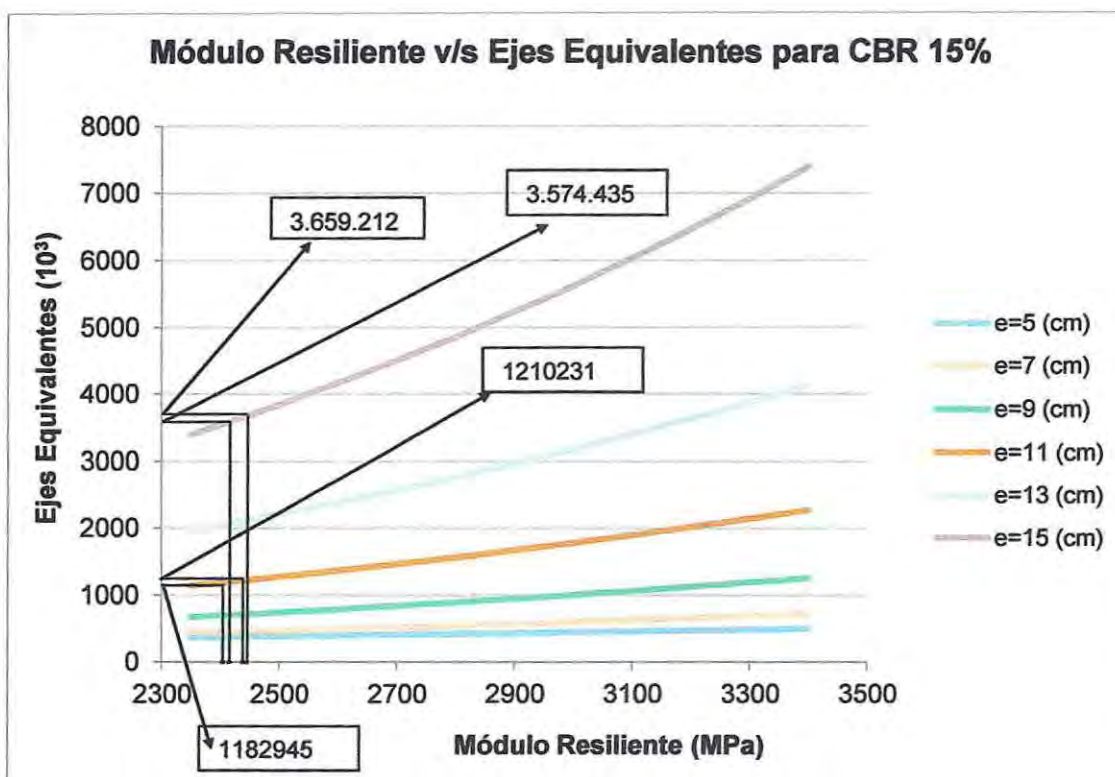


Figura 6.13: Uso de ábaco para obtención de ejes equivalentes
Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 6.3 el fenómeno del módulo resiliente no tiene grandes variaciones debido al cambio de condiciones de diseño dentro del rango establecido, lo que si se ve afectado es la cantidad de ejes equivalentes admisibles de los casos de pavimentos estudiados, pero esto es debido a la conformación misma de estos ya que los espesores de carpeta asfáltica no son los mismos para ambos casos. Se realizaron todas las combinaciones posibles dentro del rango analizado de las propiedades de control de calidad (porcentaje de asfalto, temperatura de compactación y módulo de finura), con las cuales se obtuvieron los valores de módulo resiliente los cuales no poseen una variación importante entre ellos, la diferencia entre el mayor y menor dato calculado para módulo resiliente es de sólo 39 (MPa). De lo anterior entonces se puede inferir entonces que el modelo planteado para el módulo resiliente, no se ve afectado por el cambio de las variables en el proceso constructivo del pavimento, manteniendo casi por completo las características del diseño planteado.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

A través del análisis de toda esta información se ha propuesto un criterio de aceptación de la mezcla bituminosa puesta en obra, que asegura el nivel de calidad para el que ha sido diseñada y resuelve los conflictos que suelen presentarse durante su control con las técnicas actuales.

Los resultados de los trabajos realizados han demostrado la posibilidad de desarrollar una metodología que permita determinar la influencia de las variables de diseño de las mezclas asfálticas en caliente (HMA) de graduación semi-densa y las variables del proceso productivo tiene en la estabilidad y tracción indirecta, estableciendo un control de calidad del comportamiento estructural de las carpetas asfálticas.

Además se pudo determinar la importancia relativa de una serie de variables, como también la sensibilidad de estas variables en el fenómeno estudiado.

Para la metodología de control de calidad del comportamiento estructural se encuentran dos ecuaciones probabilísticas una para estabilidad Marshall y otra para tracción indirecta, que permiten el conocer las condiciones de puesta en terreno de los proyectos y su comprobación con el diseño estructural, antes de la aplicación de equipos de retroanálisis. El método presentado no es un método de reemplazo de los métodos de comprobación actuales, si no una forma de complementar el estudio en el proceso de construcción. Se trata además de un ensayo sencillo y rápido que puede aplicarse sin mayores inconvenientes al pie de obra para la obtención de un parámetro de control de calidad de la técnica empleada.

De los resultados obtenidos, se infiere que el comportamiento de la estabilidad Marshall depende del porcentaje de asfalto, la temperatura de compactación y de la granulometría de la mezcla. A su vez se pudo estimar que el valor de tracción indirecta y la relación de este con el módulo resiliente se ven afectados por las mismas variables de control de calidad que la estabilidad (porcentaje de asfalto, temperatura de compactación y módulo de finura). De lo anterior se puede deducir que existe una clara relación entre la estabilidad y la tracción indirecta, debido a que los factores que las afectan son los mismos.

La estabilidad de la mezcla juega un rol fundamental en la capacidad estructural, ya que las variaciones en el diseño hacen que la carpeta de rodado pierda estabilidad, disminuyendo su módulo resiliente y por consiguiente su capacidad estructural.

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, es posible inferir que a mayor temperatura de compactación, los valores de estabilidad e ITS aumentan, ya que esta variable genera un pavimento con mayor densidad y con menos segregación. El módulo de finura es la variable de mayor importancia para ambos casos, siendo el principal factor que asegura la capacidad estructural de la carpeta asfáltica.

Para desarrollar esta técnica se utilizó el método de diseño ASSHTO 98 y el método empírico mecanicista a través del programa BISAR 3.0 con los cuales se desarrolló una metodología de control de calidad en terreno, donde ambos métodos no se sobreponen uno de otro, sino que se

complementan para obtener una precisión mayor de la estimación de la capacidad estructural del pavimento afectado por variaciones del diseño en el proceso constructivo.

Se puede apreciar que al término de este análisis las variaciones en los valores de las variables dentro del fenómeno de la estabilidad afectan de gran manera a la capacidad estructural deseada, por tanto es de gran importancia el control de los valores dados en el diseño, para que el resultado final cumpla con las condiciones deseadas y esperadas.

Para el método de diseño empírico mecanicista, al final de este trabajo se pudo verificar que, el valor de módulo resiliente para el rango trabajado, no tiene grandes variaciones en el resultado. Esto permite predecir que este factor no se ve afectado por las condiciones de cambio durante la construcción, por lo que finalmente estas variaciones no afectaran a las capacidades estructurales requeridas del diseño planteado.

El modelo de estabilidad ayudará de manera inicial conocer si las condiciones que tuvieron variación de factores del diseño, tendrán las capacidades estructurales estipuladas. Cabe mencionar que esta disminución de la capacidad estructural de la carpeta asfáltica, trae una disminución de la cantidad de ejes equivalentes admisibles, es decir resistirá una menor cantidad de carga, así como también una reducción en la vida útil total de proyecto.

Dentro de los modelos y diseños establecidos, surge la preocupación de esta investigación, sobre cual método de diseño debe ser utilizado para la verificación del pavimento a analizar. Actualmente no hay respuesta sobre cuál de los dos modelos representará mejor las condiciones deseadas. Pero a conclusión personal se sugiere la utilización del modelo planteado para estabilidad Marshall, ya que actualmente es este el diseño de pavimento con el que se trabaja mayormente y el cual se conocerán las condiciones en base a los diseños dados.

Se propone, para futuras investigaciones, realizar el análisis con temperaturas y niveles de porcentaje de asfalto, más amplio a los ocupados en esta investigación, ya que esto permitirá tener un rango mayor de aplicación de la verificación en terreno y para mayor cantidad de obras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahlrich (1996), **Influence of Aggregate Gradation and Particle Shape/Texture on Permanent Deformation of Hot Mix Asphalt Pavements**, Us Army Corps of Engineers.
- [2] Al-Shalout I. and Stas R. (2007), **Effects of Moisture, Compaction Temperature and Gradation Types on Durability of Asphalt Concrete Mixtures**.
- [3] Ali and Koshla (1987), **Determination of Layer Moduli Using a Falling Weight Deflectometer**, Transportation Research Record.
- [4] Asphalt Institute (2001), **Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente**.
- [5] Avellaneda W. (2004), **Control de calidad en Mezclas Asfálticas en Caliente**.
- [6] Garrote E. (2007), **Ensayo de Tracción Indirecta**.
- [7] Kumar S. (2010), **Effect of Varying Mixing and Compaction Temperature on Marshall Properties of Bituminous Concrete Mix**, Center for Road Technology, Bangalore.
- [8] Manual de Carreteras (2012), Volumen 3, Ministerio de Obras Públicas.
- [9] Manual de Carreteras (2012), Volumen 8, Ministerio de Obras Públicas.
- [10] Martínez A. (2000), **Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución**, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [11] Montgomery D. (2005), **Diseño y Análisis de experimentos**, Universidad Estatal de Arizona. Segunda Edición.
- [12] Moreno J. (2005), **Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas**, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [13] Padilla A. (1998), **Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos**. ←
- [14] Reyes O. (2006), **Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica**.
- [15] Salgado J. y Fuentes C. (1990), **Curso laboratorista vial**, Ministerio Obras Publicas, Dirección de Vialidad.
- [16] Shell, (1978), **Shell Pavement Design Manual**, Shell International Petroleum Company Limited, England.
-

- [17] Silas L. (2005), **Evaluation of hot Asphalt properties compacted at various temperatures**, paper master student Faculty of Civil Engineering, University Technology Malaysia.
- [18] Thenoux G., Halles F. y Gonzales A. (2002), **Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito**. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas.
- [19] Zaghoul S. and Seed N. (1996), **The Use of FWD in Asphalt Pavement Construction**, ASTM Comitee D-4 on Road and Paving Materials pp. 66-81, USA.
- [20] Portal de Camineros de la Red, www.camineros.com
- [21] American Association of State Highway and Transportation Officials, "**Guide for Mechanistic – Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures**", Marzo 2004.
- [22] Jamet A. (2008) **Diseño Mecanista**
- [23] De Solminihac H. (2000) **Evaluación de la capacidad estructural y funcional del pavimento**.
- [24] Gómez E. (2009) **Factores que influyen en la heterogeneidad de la fabricación y extendido de las mezclas bituminosas en caliente así como el efecto en su comportamiento**. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [23] Morosini E. (2011) **Estimación Estadística**. Universidad de Asunción, Paraguay.
-

ANEXOS

ANEXO A

Cálculo de Módulo de Finura

Los cálculos del Módulo de finura, fueron calculados mediante la siguiente ecuación:

$$MF = \frac{(\sum \text{Retenidos Acumulados de la serie preferida})}{100}$$

Donde la serie preferida corresponde a las mallas $3/4''$; $3/8''$; malla #4; malla #8; malla #30; malla #50; malla #100.

1.1 Módulo de finura curva límite superior:

$$MF = \left(\frac{15 + 42 + 58 + 76 + 83 + 88}{100} \right) = 3.62$$

1.2 Módulo de finura curva límite inferior:

$$MF = \left(\frac{30 + 57 + 72 + 87 + 92 + 94}{100} \right) = 4.32$$

1.3 Módulo de finura curva óptima:

$$MF = \left(\frac{25 + 45 + 65 + 83 + 89 + 92}{100} \right) = 3.99$$

ANEXO B**Valores de Densidades, alturas y Absorción de probetas**

T1	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.3	10	490.87	1141.6	657.5	1144	0.5	2347
2	6.2	10	483.81	1139.8	657.6	1141	0.2	2358
3	6.1	10	479.88	1140.9	659.7	1142.2	0.3	2365
4	6.1	10	482.23	1143.1	660.3	1145.4	0.5	2356
5	6.2	10	484.59	1147.7	659.4	1149.1	0.3	2344
6	6.1	10	481.45	1141.7	659	1143.5	0.4	2356
								2354
T2	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.2	10	486.95	1136.8	656.7	1142.7	1.2	2339
2	6.2	10	489.30	1140.8	655.4	1143.4	0.5	2338
3	6.2	10	486.95	1140.1	655.8	1142.3	0.5	2343
4	6.1	10	481.45	1142	659.2	1143.6	0.3	2358
5	6.1	10	476.74	1133.9	653.6	1134.8	0.2	2356
6	6.1	10	482.23	1141.4	657.6	1142.9	0.3	2352
								2348
T3	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.0	10	472.02	1130.2	648.6	1131.1	0.2	2342
2	6.3	10	491.66	1132.5	650.2	1134.6	0.4	2338
3	6.2	10	486.95	1132.1	651.6	1134.5	0.5	2344
4	6.1	10	480.66	1136.8	654.4	1140	0.7	2341
5	6.1	10	481.45	1138.4	656.9	1140.8	0.5	2353
6	6.2	10	489.30	1141.7	654.5	1143.8	0.4	2333
								2342
T4	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.2	10	486.95	1127.2	644.7	1128.8	0.3	2328
2	6.2	10	484.59	1124	645.8	1126.4	0.5	2339
3	6.2	10	489.30	1137.6	656.2	1141.5	0.8	2344
4	6.3	10	490.87	1144.6	658.8	1148.9	0.9	2335
5	6.2	10	487.73	1141.3	659.6	1146.1	1.0	2346
6	6.3	10	492.44	1134.8	651.1	1137.9	0.6	2331
								2337
T5	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.1	10	479.88	1136.3	658.4	1137.1	0.2	2374
2	6.0	10	469.67	1136.5	661.4	1137.5	0.2	2387
3	6.0	10	474.38	1135.3	659.8	1136.5	0.3	2382
4	6.1	10	480.66	1140.5	660.1	1141.6	0.2	2369

T5	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
5	6.1	10	475.17	1142.9	662.5	1143.9	0.2	2374
6	6.1	10	481.45	1142	660.9	1143.4	0.3	2367
								2375
T6	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.1	10	482.23	1147.3	660.2	1148.6	0.3	2349
2	6.2	10	484.59	1135.2	654.6	1136.3	0.2	2357
3	6.0	10	469.67	1144	658.7	1146.2	0.5	2347
4	6.0	10	472.81	1141.4	656.5	1142.4	0.2	2349
5	6.1	10	482.23	1138.7	656.8	1140.9	0.5	2352
6	6.1	10	478.31	1141.5	656.2	1143.5	0.4	2342
								2349
T7	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.1	10	475.95	1125.8	653.1	1126.9	0.2	2376
2	6.2	10	484.59	1138	659.2	1138.8	0.2	2373
3	6.1	10	479.09	1127.6	650.9	1129.6	0.4	2356
4	6.2	10	483.02	1143.5	663.8	1145	0.3	2376
5	6.1	10	481.45	1131.3	653.3	1132.6	0.3	2360
6	6.2	10	483.81	1144.8	662.6	1145.7	0.2	2370
								2368
T8	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.4	10	498.73	1139.7	654.5	1144.7	1.0	2325
2	6.3	10	494.80	1136.9	652.3	1140.4	0.7	2329
3	6.2	10	489.30	1138.2	654.7	1141.1	0.6	2340
4	6.2	10	489.30	1140.9	657.8	1143.6	0.6	2348
5	6.3	10	491.66	1138.6	652.2	1140.2	0.3	2333
6	6.3	10	493.23	1135.9	650.4	1138.4	0.5	2328
								2334
T9	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.1	10	475.95	1138.6	659.4	1139.9	0.3	2370
2	6.1	10	477.52	1140.1	660.3	1140.9	0.2	2372
3	6.1	10	475.95	1142.8	662.1	1143.9	0.2	2372
4	6.0	10	468.88	1131.3	656.6	1133.9	0.5	2370
5	6.1	10	479.09	1145.8	662.4	1146.6	0.2	2366
6	6.1	10	477.52	1141.2	660	1142	0.2	2368
								2370
T10	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.1	10	482.23	1134.7	651	1137	0.5	2335

T10	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
2	6.2	10	485.38	1135.7	650.1	1138.2	0.5	2327
3	6.2	10	486.16	1127.2	645.9	1130.9	0.8	2324
4	6.1	10	480.66	1133.3	651.3	1135.1	0.4	2342
5	6.2	10	484.59	1125	646.6	1128	0.6	2337
6	6.1	10	480.66	1134.4	652.1	1138.2	0.8	2334
								2333
T11	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.1	10	479.88	1145.9	664.7	1147.4	0.3	2374
2	6.0	10	473.60	1137	655.6	1138.6	0.3	2354
3	6.0	10	474.38	1140.4	659.3	1141.4	0.2	2365
4	6.0	10	473.60	1145.5	664.1	1146	0.1	2377
5	6.1	10	475.17	1142.5	662.2	1143.4	0.2	2374
6	6.0	10	471.24	1139	660.8	1139.8	0.2	2378
								2370
T12	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.2	10	486.95	1125.1	644.8	1130.6	1.1	2316
2	6.3	10	491.66	1127.5	646.1	1133.3	1.2	2314
3	6.1	10	482.23	1135.3	652.3	1138.5	0.7	2335
4	6.2	10	488.52	1130.1	645.8	1135	1.0	2310
5	6.3	10	492.44	1126.9	644.9	1132.5	1.1	2311
6	6.2	10	488.52	1133	648.8	1137.1	0.8	2320
								2318
T13	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.2	10	489.30	1134.7	647.4	1138.6	0.8	2310
2	6.3	10	490.87	1137.7	647.6	1140.4	0.5	2309
3	6.3	10	492.44	1136	647.9	1139.2	0.7	2312
4	6.2	10	489.30	1138.2	653.1	1142.1	0.8	2328
5	6.2	10	485.38	1120.2	637.5	1122.3	0.4	2311
6	6.1	10	478.31	1133.6	646.2	1135.8	0.4	2315
								2314
T14	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.2	10	484.59	1137.5	653.7	1143.4	1.2	2323
2	6.3	10	496.37	1143.3	656.9	1147.2	0.8	2332
3	6.2	10	490.09	1133	651.8	1138.6	1.2	2327
4	6.3	10	496.37	1141.1	655.6	1145.5	0.9	2329
5	6.2	10	489.30	1140	655.6	1142.7	0.6	2340
6	6.3	10	494.80	1135.9	652.8	1140	0.8	2331
								2331
T15	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.1	10	479.88	1136.9	654.9	1139.6	0.6	2346

T15	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
2	6.1	10	482.23	1140.7	654.5	1143.8	0.6	2331
3	6.2	10	483.02	1134.1	651.1	1136.9	0.6	2334
4	6.1	10	482.23	1136.9	652.3	1139.6	0.6	2333
T15	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
5	6.1	10	481.45	1133.7	649.9	1136.5	0.6	2330
6	6.1	10	480.66	1136.9	655.3	1140.6	0.8	2343
								2336
T16	H(cm)	D(cm)	Vol.(cm3)	P.Seco (gr)	P.Sat (gr)	P.S.S.S (gr)	Abs (%)	D.R. (kg/cm3)
1	6.1	10	481.45	1140.3	658.5	1142.7	0.5	2355
2	6.1	10	481.45	1140.9	658.2	1142.7	0.4	2355
3	6.2	10	486.16	1140.9	656.7	1143.8	0.6	2342
4	6.1	10	475.95	1142.2	660.4	1143.6	0.3	2364
5	6.1	10	479.88	1135.8	655.1	1137.5	0.4	2354
6	6.2	10	483.81	1138.5	653.6	1140.6	0.4	2338
								2351

Los valores de densidad fueron calculados mediante la siguiente ecuación:

$$DR (kg / cm3) = \frac{P.Seco (gr)}{(P.S.S.S (gr) - P.Sat (gr))} * 1000$$

Los valores de absorción fueron calculados mediante la ecuación:

$$Abs (%) = \frac{(P.S.S.S (gr) - P.Seco (gr))}{(P.S.S.S (gr) - P.Sat (gr))} * 100$$

Ambas ecuaciones fueron obtenidas del manual de carreteras volumen 8.302.38

ANEXO C

Valores de Estabilidad Marshall (EM)

T1	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (0.01")
1	6.25	1.027	220	10193	20
2	6.16	1.053	220	10356	22
3	6.11	1.068	210	10029	18
				9386	20.0
T2	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (0.01")
1	6.26	1.024	222	10161	17
2	6.23	1.032	235	10836	19
3	6.15	1.056	222	10499	14
				10742	16.7
T3	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (0.01")
1	6.01	1.099	189	9288	17
2	6.26	1.024	201	9206	16
3	6.09	1.074	195	9370	14
				9681	15.7
T4	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (0.01")
1	6.20	1.040	207	9646	18
2	6.21	1.037	207	9600	15
3	6.23	1.032	210	9691	19
				9778	17.3
T5	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (0.01")
1	6.06	1.084	265	12826	17
2	5.98	1.109	250	12383	18
3	5.94	1.121	252	12617	17
				12609	17.3
T6	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (0.01")
1	6.00	1.103	260	12806	16
2	6.01	1.099	250	12272	18
3	5.98	1.109	255	12630	16
				12569	16.7

T7	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (0.01")
1	6.09	1.074	221	10610	16
2	6.17	1.049	225	10549	18
3	6.10	1.071	215	10295	16
				10485	16.7
T8	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (0.01")
1	6.35	1.000	213	9524	17
2	6.30	1.013	200	9063	16
3	6.23	1.032	201	9294	19
				9899	17.3
T9	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (mm)
1	6.06	1.084	217	10516	17
2	6.08	1.078	219	10540	16
3	6.06	1.084	218	10564	16
				10800	16.3
T10	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (mm)
1	6.14	1.059	238	11261	16
2	6.18	1.046	239	11169	15
3	6.17	1.049	255	11946	17
				11459	16
T11	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (mm)
1	6.11	1.068	248	11831	17
2	6.08	1.078	240	11562	14
3	6.10	1.010	236	11293	18
				10868	16.3
T12	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (mm)
1	6.28	1.019	224	10214	14
2	6.26	1.024	226	10343	16
3	6.14	1.059	213	10085	14
				10044	14.7
T13	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (mm)
1	6.23	1.032	213	9828	15
2	6.25	1.027	210	9644	15
3	6.27	1.021	205	9361	14
				9611	14.7

T14	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (mm)
1	6.23	1.032	214	9874	15
2	6.28	1.019	210	9569	14
3	6.27	1.021	209	9542	14
				9662	14.3
T15	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (mm)
1	6.1	1.068	270	12874	15
2	6.1	1.059	258	12201	17
T15	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (mm)
3	6.2	1.056	255	12026	17
				12367	16.3
T16	H(cm)	factor corrección altura	Lectura estabilidad	Estabilidad (N)	Fluencia (mm)
1	6.12	1.065	225	10710	16
2	6.08	1.078	221	10644	14
3	6.19	1.043	230	10720	14
				10964	14.7

Los valores de estabilidad fueron calculados a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Estabilidad (N)} = [(\text{Lect. estabilidad} * 0.0444) + 0.0663] * \text{Factor corrección altura} * 1000$$

ANEXO D

Valores de Tracción Indirecta ITS

T1	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.25	10	211	9.43	961.0
4	6.16	10	220	9.83	1016.3
5	6.11	10	210	9.39	978.4
				9.55	985.3
T2	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.26	10	275	12.28	1248.5
4	6.23	10	260	11.61	1186.4
5	6.15	10	270	12.05	1247.8
				11.98	1227.6
T3	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.01	10	204	9.12	966.5
4	6.26	10	215	9.61	977.5
5	6.09	10	190	8.50	888.8
				9.08	944.3
T4	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.20	10	232	10.37	1064.5
4	6.21	10	244	10.90	1117.4
5	6.23	10	239	10.68	1091.1
				10.65	1091.0
T5	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.06	10	234	10.46	1098.4
4	5.98	10	245	10.94	1165.1
5	5.94	10	237	10.59	1134.9
				10.66	1132.8
T6	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.00	10	275	12.28	1302.6
4	6.01	10	243	10.86	1149.9
5	5.98	10	233	10.41	1108.4
				11.18	1186.9
T7	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.09	10	215	9.61	1004.8
4	6.17	10	222	9.92	1023.9
5	6.10	10	209	9.35	975.4
				9.63	1001.4

T8	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.35	10	268	11.97	1199.6
4	6.30	10	260	11.61	1173.2
5	6.23	10	275	12.28	1254.5
				11.95	1209.1
T9	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.06	10	265	11.83	1243.0
4	6.08	10	247	11.03	1155.2
5	6.06	10	238	10.63	1117.1
				11.17	1171.8
T10	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.14	10	246	10.99	1139.4
4	6.18	10	243	10.86	1118.3
5	6.17	10	245	10.94	1129.2
				10.93	1128.95
T11	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.11	10	278	12.41	1293.0
4	6.08	10	287	12.81	1341.2
5	6.10	10	287	12.81	1336.8
				12.68	1323.7
T12	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.28	10	250	11.17	1132.0
4	6.26	10	241	10.77	1094.9
5	6.14	10	254	11.34	1176.2
				11.09	1134.4
T13	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.23	10	230	10.28	1050.3
4	6.25	10	215	9.61	979.1
5	6.27	10	218	9.75	989.5
				9.88	1006.3
T14	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.23	10	264	11.79	1204.6
4	6.28	10	257	11.48	1163.5
5	6.27	10	248	11.08	1124.7
				11.45	1164.3
T15	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.1	10	239	10.68	1112.6
4	6.1	10	270	12.05	1249.8
5	6.2	10	277	12.37	1280.0
				11.70	1214.1

T16	H(cm)	D (cm)	Lectura	Carga (KN)	ITS (Kpa)
3	6.12	10	290	12.94	1346.3
4	6.08	10	273	12.19	1276.1
5	6.19	10	260	11.61	1194.1
				12.25	1272.2

Los valores de Traccion Indirecta (ITS) fueron calculados a través de la siguiente ecuación:

$$ITS (KPa) = \left[\frac{2 * Carga (KN)}{(\pi * D(cm) * H(cm))} \right] * 10000$$

ANEXO E

Variables de respuesta para los tratamientos en Estabilidad Marshall (EM)

	T	Porcentaje de asfalto	T° Mezclado	T° Compactación	Módulo de Finura	Densidad (Kg/cm ³)	Estabilidad Marshall (N)
1	1	5.71	150	152	4.32	2356	10193
2	1	5.71	150	152	4.32	2344	10356
3	1	5.71	150	152	4.32	2356	10029
4	2	4.98	169	137	3.62	2358	10161
5	2	4.98	169	137	3.62	2356	10836
6	2	4.98	169	137	3.62	2352	10499
7	3	5.71	169	137	4.32	2341	9288
8	3	5.71	169	137	4.32	2353	9206
9	3	5.71	169	137	4.32	2333	9370
10	4	4.98	169	152	4.32	2335	9646
11	4	4.98	169	152	4.32	2346	9600
12	4	4.98	169	152	4.32	2331	9691
13	5	5.71	150	152	3.62	2369	12826
14	5	5.71	150	152	3.62	2374	12383
15	5	5.71	150	152	3.62	2367	12504
16	6	5.71	169	137	3.62	2349	12806
17	6	5.71	169	137	3.62	2352	12272
18	6	5.71	169	137	3.62	2342	12630
19	7	5.71	169	152	4.32	2376	10610
20	7	5.71	169	152	4.32	2360	10549
21	7	5.71	169	152	4.32	2370	10295
22	8	4.98	150	137	4.32	2348	9524
23	8	4.98	150	137	4.32	2333	9063
24	8	4.98	150	137	4.32	2328	9294
25	9	5.71	169	152	3.62	2370	10516
26	9	5.71	169	152	3.62	2366	10540
27	9	5.71	169	152	3.62	2368	10564
28	10	4.98	150	152	3.62	2342	11261
29	10	4.98	150	152	3.62	2337	11169
30	10	4.98	150	152	3.62	2334	11946
31	11	5.71	150	137	3.62	2377	11831
32	11	5.71	150	137	3.62	2374	11562
33	11	5.71	150	137	3.62	2378	11293

	T	Porcentaje de asfalto	T° Mezclado	T° Compactación	Módulo de Finura	Densidad (Kg/cm3)	Estabilidad Marshall (N)
34	12	4.98	150	152	4.32	2310	10214
35	12	4.98	150	152	4.32	2311	10343
36	12	4.98	150	152	4.32	2320	10085
37	13	5.71	150	137	4.32	2328	9828
38	13	5.71	150	137	4.32	2311	9644
39	13	5.71	150	137	4.32	2315	9361
40	14	4.98	169	137	4.32	2329	9874
41	14	4.98	169	137	4.32	2340	9569
42	14	4.98	169	137	4.32	2331	9542
43	15	4.98	169	152	3.62	2333	12874
44	15	4.98	169	152	3.62	2330	12201
45	15	4.98	169	152	3.62	2343	12026
46	16	4.98	150	137	3.62	2364	10710
47	16	4.98	150	137	3.62	2354	10644
48	16	4.98	150	137	3.62	2338	10720

ANEXO F

Variables de respuesta para tratamiento Tracción Indirecta (ITS)

	T	Porcentaje de asfalto	T° Mezcla do	T° Compactación	Módulo de Finura	Densidad (Kg/cm ³)	ITS (Kpa)
1	1	5.71	150	152	4.32	2347	961
2	1	5.71	150	152	4.32	2358	1016
3	1	5.71	150	152	4.32	2365	978
4	2	4.98	169	137	3.62	2339	1248
5	2	4.98	169	137	3.62	2338	1186
6	2	4.98	169	137	3.62	2343	1248
7	3	5.71	169	137	4.32	2342	966
8	3	5.71	169	137	4.32	2338	978
9	3	5.71	169	137	4.32	2344	889
10	4	4.98	169	152	4.32	2328	1065
11	4	4.98	169	152	4.32	2339	1117
12	4	4.98	169	152	4.32	2344	1091
13	5	5.71	150	152	3.62	2374	1098
14	5	5.71	150	152	3.62	2387	1165
15	5	5.71	150	152	3.62	2382	1135
16	6	5.71	169	137	3.62	2349	1303
17	6	5.71	169	137	3.62	2357	1150
18	6	5.71	169	137	3.62	2347	1108
19	7	5.71	169	152	4.32	2376	1005
20	7	5.71	169	152	4.32	2373	1024
21	7	5.71	169	152	4.32	2356	975
22	8	4.98	150	137	4.32	2325	1200
23	8	4.98	150	137	4.32	2329	1173
24	8	4.98	150	137	4.32	2340	1254
25	9	5.71	169	152	3.62	2370	1243
26	9	5.71	169	152	3.62	2372	1155
27	9	5.71	169	152	3.62	2372	1117
28	10	4.98	150	152	3.62	2335	1139
29	10	4.98	150	152	3.62	2327	1118
30	10	4.98	150	152	3.62	2324	1129
31	11	5.71	150	137	3.62	2374	1293
32	11	5.71	150	137	3.62	2354	1341
33	11	5.71	150	137	3.62	2365	1337

	T	Porcentaje de asfalto	T° Mezcla do	T° Compactación	Módulo de Finura	Densidad (Kg/cm3)	ITS (Kpa)
34	12	4.98	150	152	4.32	2316	1132
35	12	4.98	150	152	4.32	2314	1095
36	12	4.98	150	152	4.32	2335	1176
37	13	5.71	150	137	4.32	2310	1050
38	13	5.71	150	137	4.32	2309	979
39	13	5.71	150	137	4.32	2312	990
40	14	4.98	169	137	4.32	2323	1205
41	14	4.98	169	137	4.32	2332	1163
42	14	4.98	169	137	4.32	2327	1125
43	15	4.98	169	152	3.62	2346	1113
44	15	4.98	169	152	3.62	2331	1250
45	15	4.98	169	152	3.62	2334	1280
46	16	4.98	150	137	3.62	2355	1346
47	16	4.98	150	137	3.62	2355	1276
48	16	4.98	150	137	3.62	2342	1194

ANEXO G

Ejes equivalentes admisibles modelo correlación Estabilidad Marshall (EM)

Tabla G.1: Ejes equivalentes admisibles para CBR 20%

CBR 20%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
9329	4600337	4791866	4990301	5195854	5408741	5857413	6338164	6852938
9573	4611147	4805310	5006553	5215095	5431162	5886797	6375375	6898913
9579	4611374	4805593	5006895	5215500	5431634	5887416	6376159	6899883
9717	4617430	4813126	5016005	5226290	5444210	5903908	6397056	6925717
9823	4622050	4818874	5022957	5234525	5453812	5916503	6413021	6945461
9864	4623821	4821078	5025623	5237683	5457494	5921335	6419147	6953039
9967	4628257	4826599	5032301	5245596	5466721	5933445	6434504	6972039
9999	4629622	4828298	5034357	5248033	5469562	5937175	6439235	6977893
10109	4634349	4834183	5041478	5256471	5479404	5950097	6455628	6998183
10243	4640083	4841322	5050118	5266712	5491351	5965788	6475542	7022840
10248	4640304	4841596	5050450	5267105	5491810	5966391	6476308	7023788
10252	4640472	4841806	5050704	5267407	5492162	5966853	6476894	7024514
10387	4646168	4848900	5059290	5277587	5504040	5982461	6496709	7049058
10493	4650644	4854474	5066040	5285590	5513380	5994738	6512302	7068378
10534	4652360	4856612	5068629	5288660	5516963	5999449	6518286	7075795
10636	4656660	4861969	5075115	5296353	5525943	6011258	6533290	7094394
10778	4662567	4869330	5084032	5306930	5538292	6027502	6553936	7119995
10922	4668507	4876734	5093001	5317572	5550718	6043855	6574729	7145788
11065	4674391	4884068	5101887	5328118	5563035	6060072	6595357	7171387
11310	4684365	4896505	5116962	5346013	5583942	6087611	6630406	7214904
11315	4684575	4896767	5117280	5346390	5584383	6088191	6631146	7215822
11453	4690172	4903748	5125744	5356440	5596127	6103670	6650856	7240307
11559	4694445	4909080	5132209	5364118	5605101	6115502	6665927	7259036
11600	4696085	4911125	5134689	5367064	5608545	6120043	6671713	7266227
11703	4700193	4916251	5140907	5374449	5617178	6131430	6686224	7284266
11845	4705841	4923300	5149457	5384608	5629056	6147101	6706200	7309107
11988	4711523	4930392	5158063	5394834	5641015	6162886	6726328	7334146

Tabla G.2: Ejes equivalentes admisibles para CBR 15%

CBR 15%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
9329	3186895	3319578	3457044	3599441	3746920	4057738	4390780	4747390
9573	3194384	3328891	3468302	3612771	3762452	4078094	4416558	4779240
9579	3194542	3329087	3468539	3613052	3762779	4078523	4417101	4779912
9717	3198737	3334306	3474850	3620526	3771491	4089948	4431577	4797808
9823	3201937	3338288	3479667	3626231	3778142	4098673	4442637	4811486
9864	3203164	3339815	3481513	3628419	3780693	4102020	4446881	4816736
9967	3206237	3343639	3486140	3633901	3787085	4110410	4457520	4829898
9999	3207183	3344816	3487564	3635588	3789054	4112993	4460797	4833954
10109	3210458	3348893	3492497	3641434	3795872	4121945	4472153	4848010
10243	3214430	3353838	3498482	3648528	3804148	4132815	4485949	4865090
10248	3214582	3354028	3498712	3648801	3804466	4133233	4486479	4865747
10252	3214699	3354174	3498889	3649010	3804710	4133553	4486885	4866250
10387	3218645	3359088	3504837	3656062	3812938	4144365	4500612	4883253
10493	3221746	3362950	3509512	3661606	3819408	4152870	4511414	4896637
10534	3222935	3364431	3511306	3663733	3821891	4156134	4515559	4901775
10636	3225913	3368142	3515800	3669063	3828112	4164315	4525954	4914660
10778	3230006	3373241	3521976	3676390	3836666	4175568	4540256	4932395
10922	3234121	3378370	3528189	3683762	3845274	4186896	4554661	4950263
11065	3238196	3383451	3534346	3691068	3853807	4198130	4568951	4967997
11310	3245106	3392067	3544789	3703464	3868290	4217208	4593231	4998143
11315	3245252	3392248	3545009	3703726	3868596	4217610	4593743	4998780
11453	3249129	3397084	3550872	3710688	3876731	4228333	4607398	5015742
11559	3252089	3400778	3555351	3716007	3882948	4236530	4617838	5028716
11600	3253225	3402195	3557069	3718048	3885334	4239676	4621846	5033698
11703	3256071	3405746	3561376	3723164	3891315	4247564	4631899	5046194
11845	3259983	3410629	3567300	3730201	3899543	4258421	4645737	5063403
11988	3263920	3415542	3573261	3737285	3907828	4269356	4659682	5080749

Tabla G.3: Ejes equivalentes admisible para CBR 10%

CBR 10%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
9329	1811652	1887077	1965223	2046171	2130008	2306699	2496023	2698745
9573	1815909	1892372	1971623	2053749	2138838	2318270	2510677	2716850

CBR 10%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
9823	1820202	1897713	1978083	2061400	2147757	2329969	2525502	2735181
9864	1820900	1898581	1979133	2062644	2149207	2331872	2527915	2738166
9967	1822647	1900755	1981763	2065760	2152841	2336641	2533962	2745648
9999	1823184	1901425	1982573	2066720	2153960	2338110	2535825	2747953
10109	1825046	1903742	1985377	2070043	2157836	2343198	2542281	2755944
10243	1827304	1906554	1988779	2074076	2162541	2349378	2550123	2765654
10248	1827391	1906662	1988910	2074231	2162721	2349615	2550425	2766027
10252	1827457	1906744	1989010	2074349	2162860	2349797	2550656	2766313
10387	1829700	1909538	1992391	2078358	2167537	2355944	2558459	2775979
10493	1831463	1911733	1995049	2081510	2171216	2360778	2564599	2783587
10534	1832139	1912575	1996069	2082719	2172627	2362634	2566956	2786508
10636	1833832	1914684	1998623	2085749	2176163	2367284	2572865	2793832
10778	1836158	1917583	2002135	2089914	2181026	2373681	2580996	2803914
10922	1838498	1920499	2005667	2094105	2185920	2380121	2589184	2814072
11065	1840815	1923387	2009166	2098258	2190770	2386507	2597308	2824153
11310	1844742	1928285	2015103	2105305	2199003	2397353	2611110	2841290
11315	1844825	1928388	2015228	2105454	2199177	2397581	2611401	2841652
11453	1847029	1931137	2018561	2109411	2203802	2403677	2619163	2851294
11559	1848712	1933237	2021107	2112435	2207336	2408336	2625098	2858670
11600	1849358	1934042	2022084	2113595	2208692	2410125	2627377	2861502
11703	1850976	1936061	2024532	2116504	2212092	2414609	2633091	2868606
11845	1853200	1938837	2027900	2120504	2216770	2420781	2640958	2878388
11988	1855437	1941630	2031289	2124531	2221479	2426997	2648885	2888249

Tabla G.4: ejes equivalentes admisibles para CBR 5%

CBR 5%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
9329	647300	674249	702170	731093	761048	824179	891824	964256
9573	648821	676141	704457	733800	764203	828314	897060	970725
9579	648853	676181	704505	733857	764269	828401	897170	970862
9717	649705	677241	705787	735376	766039	830721	900111	974497
9823	650355	678049	706765	736534	767389	832493	902357	977275
9864	650604	678359	707140	736979	767908	833173	903219	978341
9967	651228	679136	708080	738092	769206	834877	905380	981015

CBR 5%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
10109	652085	680203	709371	739622	770991	837220	908352	984693
10243	652892	681208	710587	741063	772672	839428	911154	988163
10248	652923	681246	710634	741119	772736	839513	911262	988296
10252	652947	681276	710669	741161	772786	839578	911344	988398
10387	653748	682274	711878	742593	774457	841774	914132	991852
10493	654378	683059	712827	743720	775771	843502	916326	994570
10534	654620	683359	713192	744151	776275	844164	917168	995614
10636	655225	684113	714104	745234	777539	845826	919280	998231
10778	656056	685149	715359	746722	779276	848112	922185	1001833
10922	656892	686191	716621	748220	781025	850413	925110	1005462
11065	657719	687223	717871	749704	782758	852694	928013	1009064
11310	659123	688973	719992	752221	785700	856569	932945	1015187
11315	659152	689009	720037	752275	785762	856651	933049	1015317
11453	659940	689992	721228	753689	787414	858829	935822	1018762
11559	660541	690742	722138	754769	788677	860494	937943	1021397
11600	660772	691030	722487	755183	789161	861133	938757	1022409
11703	661350	691751	723362	756223	790376	862735	940798	1024947
11845	662145	692743	724565	757652	792048	864940	943609	1028442
11988	662944	693741	725776	759091	793730	867161	946441	1031966

ANEXO H

Ejes equivalentes admisibles con modelo de correlación Módulo Resiliente (MR)

Tabla H.1: Ejes equivalentes admisibles para CBR 20%

CBR 20%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
2350	367198	376314	435668	535559	680826	1154555	2005450	3477366
2400	372177	384284	446949	551639	703525	1198443	2085128	3628098
2450	377241	392465	459188	569096	727173	1242379	2172865	3787037
2500	382862	400864	471234	585639	750723	1288335	2256642	3946122
2550	388107	409488	483044	603616	775230	1336423	2348974	4104567
2600	393442	417816	495875	620558	800738	1384424	2441313	4280488
2650	399366	426896	508460	638987	826068	1434587	2533251	4445899
2700	404894	435668	521443	657176	852401	1484478	2629532	4629792
2750	411034	444664	534842	676012	878457	1536544	2730404	4812228
2800	416764	453893	547932	695524	905510	1590899	2830440	4992164
2850	423128	463360	561423	714713	933607	1644767	2935073	5192603
2900	429068	473075	575329	734565	961309	1700922	3038343	5390469
2950	435668	482413	589666	755107	990041	1756335	3146168	5584548
3000	441828	491982	603616	775230	1018251	1814010	3258790	5801235
3050	448097	502450	617979	796024	1049121	1874058	3369400	5999469
3100	455063	512516	632769	817515	1079446	1933055	3484716	6221296
3150	461567	522138	648002	839733	1109093	1994379	3604978	6437603
3200	468794	532698	663693	861410	1141596	2058139	3730442	6679836
3250	475543	543525	678895	883786	1173387	2120478	3853030	6898997
3300	482413	553878	694532	905510	1206286	2185182	3980666	7145103
3350	489407	565243	710619	929324	1238303	2252359	4104567	7383475
3400	496528	576114	726124	952452	1273487	2322122	4242685	7631812

Tabla H.2: Ejes equivalente para CBR 15%

CBR 15%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
2350	374468	380507	437895	535559	677932	1139759	1968839	3397779

CBR 15%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
2500	389553	404894	473075	584838	746372	1273487	2214261	3844703
2650	405909	430160	509807	637203	819948	1415215	2479510	4337980
2750	417289	448097	535559	674099	871851	1512838	2671430	4682544
2800	423128	457415	548671	692553	898651	1566148	2768776	4856446
2850	429068	466369	562184	711640	925066	1618973	2870571	5050102
2900	435113	475543	576114	731385	952452	1671075	2971016	5241211
2950	441264	485577	589666	750723	980854	1728352	3075866	5428605
3000	447523	495224	603616	771830	1008738	1781683	3185356	5624400
3050	453893	505110	617979	791343	1039248	1840398	3292864	5829050
3100	460376	514559	632769	812678	1067525	1898076	3404920	6043038
3150	466974	524928	647094	833487	1098515	1958018	3521754	6251638
3200	473690	534842	661823	854963	1128817	2020331	3635846	6469263
3250	480527	545723	676971	877131	1160165	2081246	3754567	6696385
3300	487487	556128	692553	900018	1192602	2144460	3878146	6916223
3350	494573	566781	708583	922240	1224167	2210078	4006821	7163097
3400	501787	577688	724033	945149	1256777	2273876	4131739	7402218

Tabla H.3: ejes equivalentes admisibles para CBR 10%

CBR 10%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
2350	386668	388107	441828	536277	673144	1119798	1911973	3272367
2400	391492	395897	452726	551639	695524	1160165	1987040	3404920
2450	396390	403377	464561	567551	717803	1202356	2065805	3551738
2500	401365	411551	476163	584038	739903	1246471	2148489	3698573
2550	406418	419931	488126	601125	763969	1290474	2231094	3844703
2600	411551	427981	499807	617979	787856	1336423	2313256	3998079
2650	416764	436223	511837	635425	811474	1382090	2399212	4159134
2700	422059	445234	524928	652569	835979	1429713	2489175	4318710
2750	427981	453893	536996	670292	861410	1476858	2578302	4485968
2800	433454	462762	550152	688616	886466	1528591	2671430	4650804
2850	439575	471847	562947	707568	912435	1577089	2768776	4823235
2900	445234	481155	576114	726124	939356	1630374	2864795	5003685
2950	450983	490049	589666	745289	967271	1682935	2964987	5180539
3000	457415	499807	603616	765086	994674	1734523	3063295	5377830

CBR 10%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
3150	476163	529149	646187	826068	1079446	1901539	3383553	5956290
3250	489407	548671	675054	867917	1139759	2020331	3604978	6374860
3350	503113	569871	705543	911045	1202356	2144460	3844703	6813661
3400	509807	580059	720910	933607	1234243	2205904	3963347	7038315

Tabla H.4: Ejes equivalentes admisibles para CBR 5%

CBR 5%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
2350	413106	403377	450404	537717	665570	1081163	1810745	3038343
2400	417289	410518	460971	552384	686658	1119798	1880882	3165687
2450	421526	418343	471847	567551	707568	1158291	1950845	3292864
2500	425815	425815	483044	583240	729275	1198443	2024073	3419258
2550	430706	433454	493924	599471	750723	1240339	2100748	3559284
2600	435668	441264	505778	615414	772961	1281945	2176962	3690659
2650	440137	449826	517299	631887	796024	1325301	2252359	3836399
2700	445234	458005	529149	648002	818730	1368189	2335500	3980666
2750	450404	466369	541338	665570	842248	1412816	2417811	4122657
2800	455649	474307	553878	682763	866611	1456775	2498887	4280488
2850	460971	483044	566011	700511	891856	1505037	2588448	4435951
2900	466974	491982	578477	717803	916621	1552604	2676725	4588122
2950	472460	501126	591286	735629	940800	1599257	2763254	4746835
3000	478027	509807	604450	755107	967271	1650569	2853286	4912430
3050	483676	519366	617979	772961	993127	1697907	2946994	5085267
3100	490049	528443	631007	792510	1019847	1750068	3044557	5265727
3150	495875	537717	645281	811474	1047467	1804236	3139695	5441392
3200	502450	547194	659030	831005	1074317	1857134	3245283	5624400
3250	508460	556881	673144	851123	1103789	1908487	3341316	5801235
3300	514559	566781	687637	871851	1130632	1965224	3448160	5999469
3350	521443	576900	701514	891856	1160165	2020331	3551738	6191137
3400	527737	587246	715742	912435	1190663	2077372	3659212	6390474
3450	534842	597001	731385	933607	1220165	2136429	3770759	6581606
3500	541338	607797	746372	955393	1250581	2197586	3886563	6796752
3550	547932	617979	761741	977815	1281945	2256642	3998079	7003160
3600	555377	628374	776367	999335	1312105	2317683	4113600	7217416

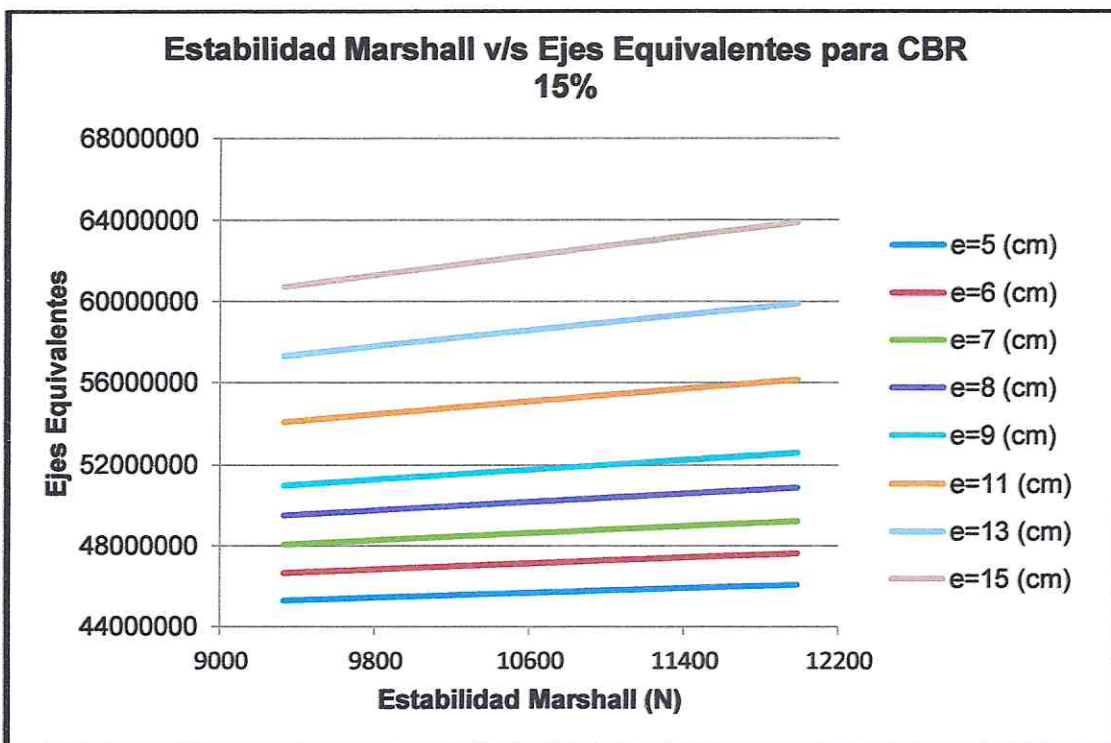


Figura G.2: Ábaco para el control de calidad en terreno con CBR 15%
Fuente: Elaboración propia

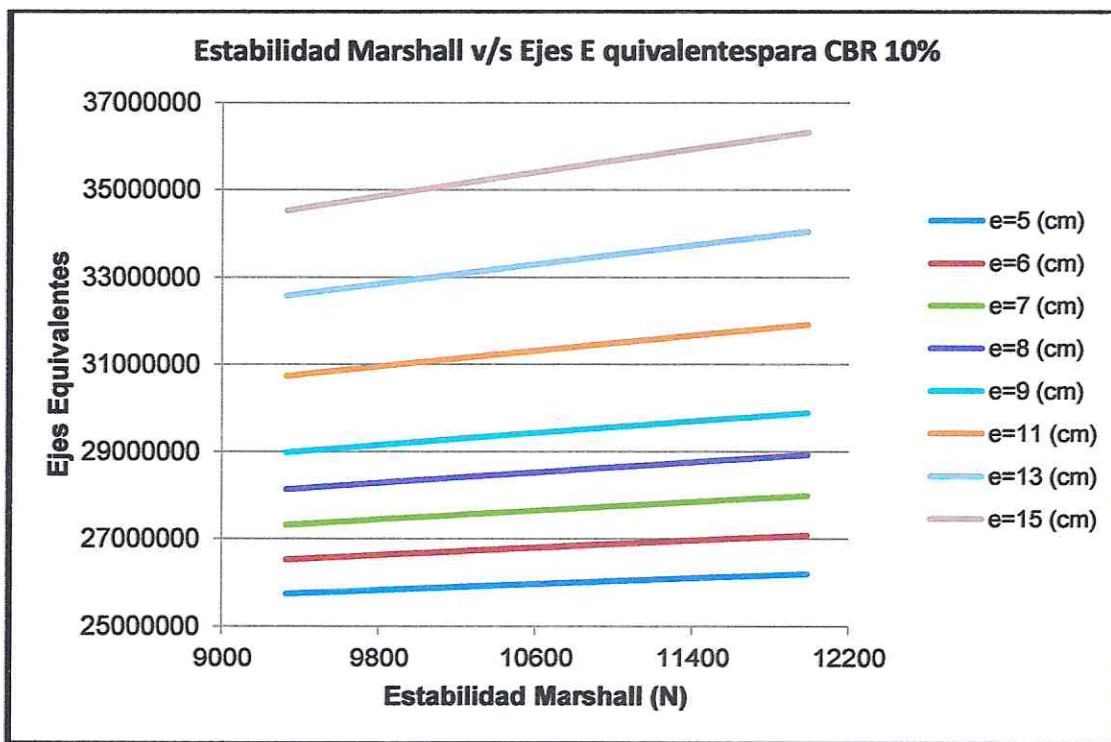


Figura G.3: Ábaco para el control de calidad en terreno con CBR 10%
Fuente: Elaboración propia

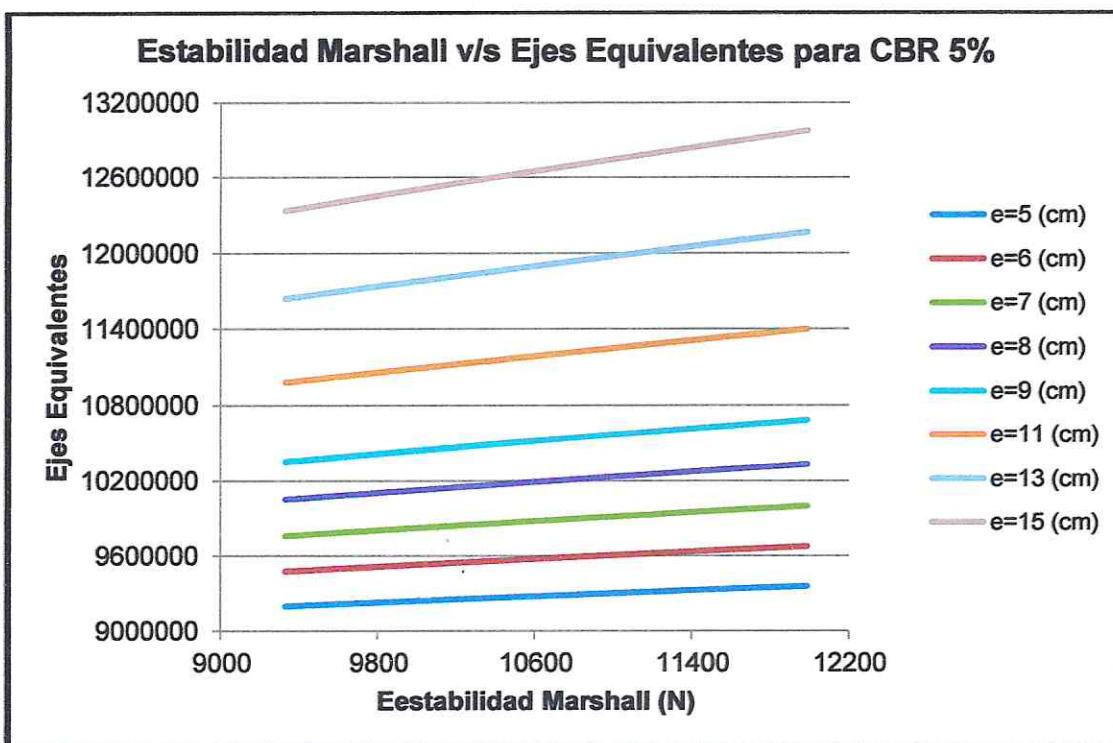


Figura G.4: Ábaco para el control en terreno con CBR 5%
Fuente: Elaboración propia

Tablas con valores de ejes equivalentes admisibles para cada caso anterior de CBR sub-rasante analizado:

Tabla I.1: Ejes equivalentes admisibles para CBR 20%

CBR 20%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
9329	65376999	67350986	69378242	71460055	73597739	78046130	82734511	87674459
9573	65488880	67488892	69543493	71654018	73821830	78334920	83094277	88111914
9579	65491234	67491794	69546971	71658101	73826548	78341002	83101856	88121132
9717	65553885	67569038	69639553	71766794	73952153	78502949	83303698	88366675
9823	65601667	67627957	69710183	71849728	74048006	78626570	83457817	88554214
9864	65619982	67650543	69737261	71881525	74084759	78673979	83516932	88626160
9967	65665848	67707111	69805082	71961175	74176832	78792766	83665075	88806488
9999	65679963	67724520	69825957	71985693	74205175	78829339	83710693	88862026
10109	65728829	67784797	69898239	72070594	74303334	78956019	83868729	89054457
10243	65788088	67857903	69985918	72173596	74422437	79109772	84060594	89288143
10252	65792107	67862863	69991866	72180584	74430519	79120206	84073617	89304007
10387	65850954	67935474	70078965	72282922	74548874	79273044	84264401	89536452

CBR 20%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
10534	65914909	68014400	70173655	72394198	74677585	79439309	84472012	89789479
10636	65959307	68069201	70239410	72471480	74766991	79554832	84616303	89965382
10778	66020297	68144490	70329762	72577688	74889875	79713658	84814734	90207352
10922	66081603	68220182	70420612	72684497	75013476	79873461	85014449	90450963
11065	66142307	68295142	70510599	72790309	75135942	80031846	85212455	90692564
11310	66245182	68422207	70663168	72969747	75343666	80300611	85548591	91102879
11315	66247349	68424884	70666382	72973528	75348044	80306277	85555679	91111533
11453	66305053	68496171	70751997	73074242	75464660	80457225	85744546	91342175
11559	66349107	68550602	70817375	73151162	75553736	80572556	85888886	91518487
11600	66366002	68571479	70842454	73180670	75587910	80616810	85944280	91586161
11703	66408338	68623796	70905304	73254627	75673569	80727750	86083167	91755863
11845	66466527	68695713	70991712	73356316	75791364	80880352	86274260	91989413
11988	66525054	68768059	71078648	73458644	75909916	81033980	86466695	92224674

Fuente: Elaboración propia

Tabla I.2: Ejes equivalentes admisibles para CBR 15%

CBR 15 %								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
9329	45290087	46657571	48061958	49504140	50985026	54066660	57314549	60736711
9573	45367593	46753106	48176437	49638508	51140265	54266720	57563777	61039759
9579	45369224	46755117	48178846	49641337	51143534	54270934	57569028	61046145
9717	45412625	46808627	48242982	49716634	51230548	54383123	57708855	61216245
9823	45445726	46849444	48291911	49774087	51296949	54468762	57815621	61346163
9864	45458414	46865091	48310669	49796114	51322410	54501604	57856573	61396004
9967	45490188	46904278	48357653	49851292	51386194	54583894	57959199	61520927
9999	45499966	46916338	48372114	49868277	51405829	54609230	57990801	61559400
10109	45533818	46958095	48422187	49927092	51473829	54696988	58100281	61692708
10243	45574870	47008740	48482927	49998447	51556338	54803501	58233196	61854594
10248	45576446	47010685	48485261	50001188	51559508	54807594	58238304	61860817
10252	45577654	47012176	48487048	50003288	51561936	54810730	58242218	61865584
10387	45618420	47062477	48547386	50074183	51643927	54916608	58374384	62026611
10636	45693482	47155116	48658535	50204807	51795028	55111818	58618165	62323754
10778	45735733	47207273	48721127	50278383	51880156	55221845	58755629	62491379
10922	45778203	47259709	48784063	50352375	51965781	55332549	58893982	62660141

CBR 15 %								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
11310	45891523	47399662	48952094	50549983	52194521	55628458	59264010	63111757
11315	45893024	47401517	48954321	50552602	52197554	55632383	59268920	63117753
11453	45932999	47450901	49013631	50622372	52278340	55736953	59399758	63277530
11559	45963517	47488608	49058922	50675659	52340048	55816849	59499750	63399671
11600	45975221	47503071	49076295	50696100	52363722	55847506	59538124	63446552
11703	46004550	47539314	49119835	50747334	52423062	55924360	59634339	63564114
11845	46044860	47589135	49179694	50817780	52504665	56030075	59766719	63725906
11988	46085405	47639252	49239919	50888667	52586792	56136502	59900029	63888884

Fuente: Elaboración propia

Tabla I.3: Ejes equivalentes admisibles para CBR 10%

CBR 10%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
9329	25746015	26523388	27321738	28141574	28983412	30735226	32581550	34526944
9573	25790075	26577697	27386816	28217958	29071661	30848954	32723229	34699217
9579	25791002	26578840	27388186	28219566	29073519	30851349	32726214	34702847
9717	25815674	26609259	27424645	28262371	29122984	30915125	32805701	34799544
9864	25841704	26641356	27463123	28307553	29175205	30982478	32889674	34901732
9967	25859767	26663633	27489832	28338919	29211464	31029258	32948014	34972746
9999	25865325	26670489	27498053	28348575	29222626	31043660	32965979	34994617
10109	25884569	26694226	27526518	28382009	29261281	31093548	33028215	35070398
10243	25907905	26723016	27561046	28422573	29308185	31154097	33103773	35162426
10248	25908802	26724122	27562373	28424131	29309987	31156424	33106677	35165963
10252	25909488	26724969	27563389	28425325	29311368	31158206	33108901	35168673
10387	25932663	26753564	27597689	28465626	29357977	31218395	33184034	35260212
10493	25950868	26776032	27624643	28497300	29394614	31265719	33243123	35332224
10534	25957849	26784646	27634979	28509447	29408665	31283872	33265793	35359856
10636	25975333	26806227	27660874	28539882	29443873	31329366	33322616	35429129
10778	25999351	26835877	27696455	28581707	29492266	31391913	33400760	35524418
11310	26087913	26945244	27827753	28736104	29670973	31623060	33689759	35877084
11315	26088767	26946298	27829019	28737593	29672697	31625291	33692550	35880492
11453	26111491	26974371	27862735	28777255	29718621	31684736	33766927	35971321
11559	26128839	26995807	27888481	28807546	29753700	31730154	33823770	36040754
11600	26135493	27004028	27898358	28819167	29767159	31747582	33845584	36067405
11703	26152165	27024631	27923109	28848292	29800891	31791271	33900279	36134235

CBR 10%								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
11988	26198129	27081443	27991373	28928635	29893967	31911867	34051316	36318857

Fuente: Elaboración propia

Tabla I. 4: Ejes equivalentes admisibles para CBR 5%

CBR 5 %								
EM (N)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
9329	9199001	9476755	9762004	10054930	10355717	10981637	11641325	12336410
9573	9214744	9496160	9785256	10082222	10387248	11022272	11691946	12397963
9579	9215075	9496568	9785746	10082796	10387912	11023127	11693013	12399260
9717	9223890	9507437	9798773	10098090	10405586	11045914	11721413	12433810
9823	9230614	9515727	9808711	10109760	10419073	11063309	11743099	12460198
9864	9233191	9518905	9812521	10114234	10424244	11069979	11751417	12470321
9967	9239644	9526864	9822064	10125441	10437199	11086694	11772262	12495694
9999	9241631	9529314	9825001	10128891	10441188	11091840	11778680	12503509
10109	9248506	9537795	9835171	10140837	10454999	11109664	11800917	12530585
10248	9257165	9548477	9847982	10155887	10472402	11132130	11828952	12564731
10252	9257410	9548780	9848345	10156313	10472895	11132767	11829746	12565699
10387	9265690	9558997	9860601	10170713	10489548	11154272	11856591	12598406
10493	9272195	9567024	9870232	10182030	10502639	11171181	11877703	12624135
10534	9274689	9570102	9873925	10186370	10507659	11177667	11885803	12634008
10636	9280936	9577813	9883177	10197245	10520239	11193922	11906106	12658759
10778	9289518	9588407	9895890	10212189	10537530	11216270	11934027	12692806
10922	9298144	9599057	9908673	10227218	10554921	11238755	11962128	12727084
11065	9306686	9609605	9921335	10242106	10572153	11261041	11989989	12761079
11310	9321161	9627483	9942802	10267354	10601381	11298858	12037286	12818813
11315	9321466	9627860	9943255	10267886	10601997	11299655	12038283	12820030
11600	9338161	9648487	9968029	10297033	10635748	11343349	12092962	12886814
11703	9344118	9655848	9976873	10307439	10647801	11358960	12112504	12910692
11845	9352306	9665968	9989031	10321747	10664375	11380432	12139392	12943554
11988	9360541	9676147	10001263	10336145	10681056	11402048	12166469	12976657

Fuente: Elaboración propia

ANEXO J

Ábacos y ejes equivalentes admisibles con MR para otros casos de espesores

A continuación se muestran los ábacos y las tablas de las cantidades de ejes equivalentes admisibles, a través del modelo correlacional obtenido para Estabilidad Marshall, los datos para la fabricación de estos resultados son:

- Carga de la rueda: 20 (KN).
- Posición de la carga: Según lo especificado en la figura.
- Base granular: se considero como base granular de CBR = 80%, el cual corresponde a un MR = 246 (Mpa), un módulo de Poisson de 0.35 y un espesor estándar de 30 (cm).
- Sub-base granular: se considero una sub-base granular de CBR = 40%, que corresponde a un MR = 168 (Mpa), un módulo de Poisson de 0.35 y un espesor estándar de 30 (cm).
- Capa asfáltica: se considero un espesor variable de 5, 7, 9, 11, 13 y 15 (cm).
- Sub-Rasante: se consideraron tres tipos de Sub-Rasante con CBR = 5%, CBR=10%, CBR =15% y CBR = 20% y cada una de ellas con un módulo de Poisson de 0.4.

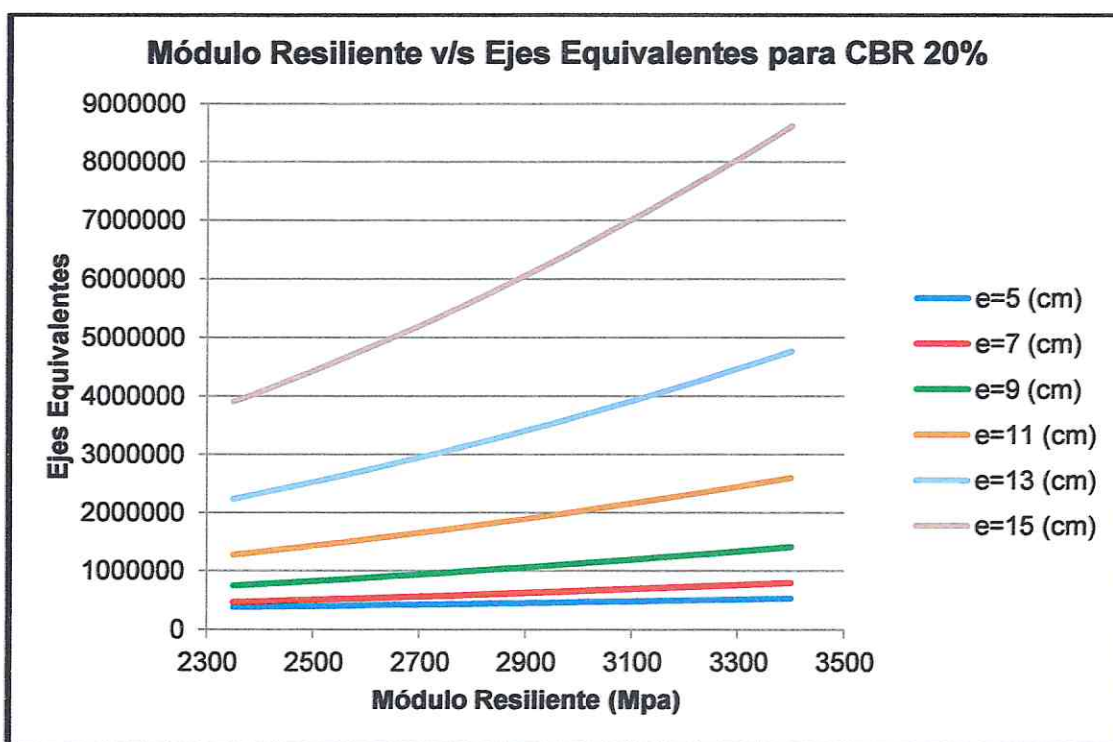


Figura J.1: Ábaco para CBR 20%
Fuente: Elaboración propia

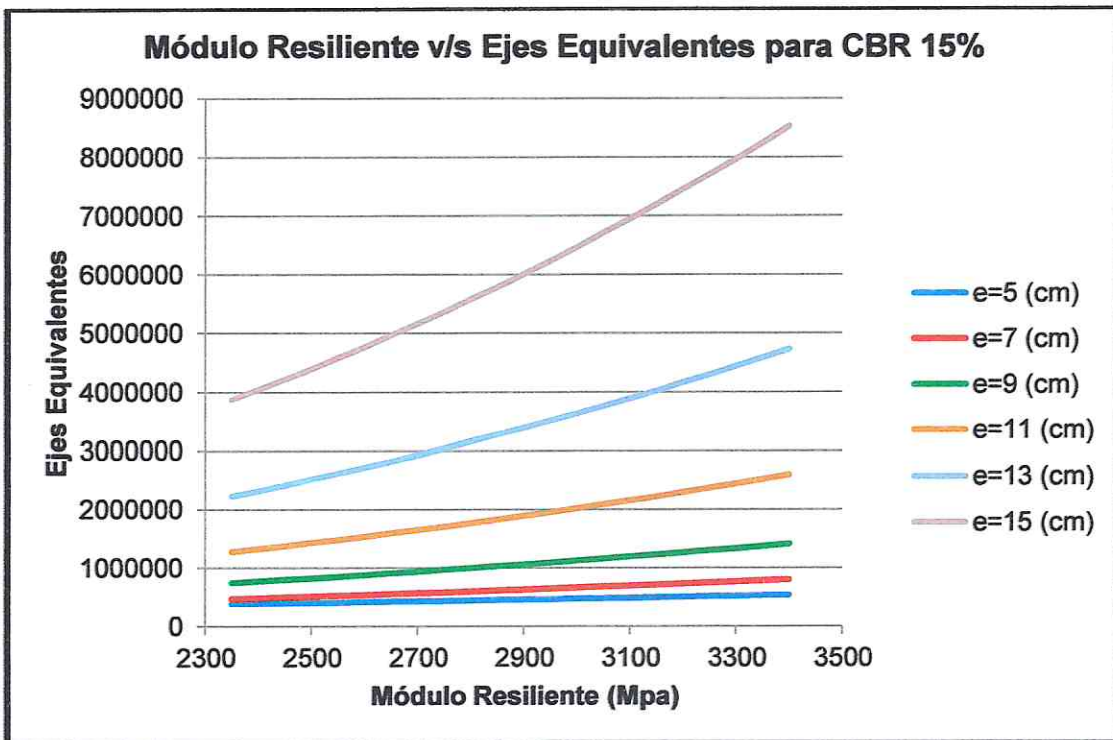


Figura J.2: Ábaco para CBR 15%
Fuente: Elaboración propia

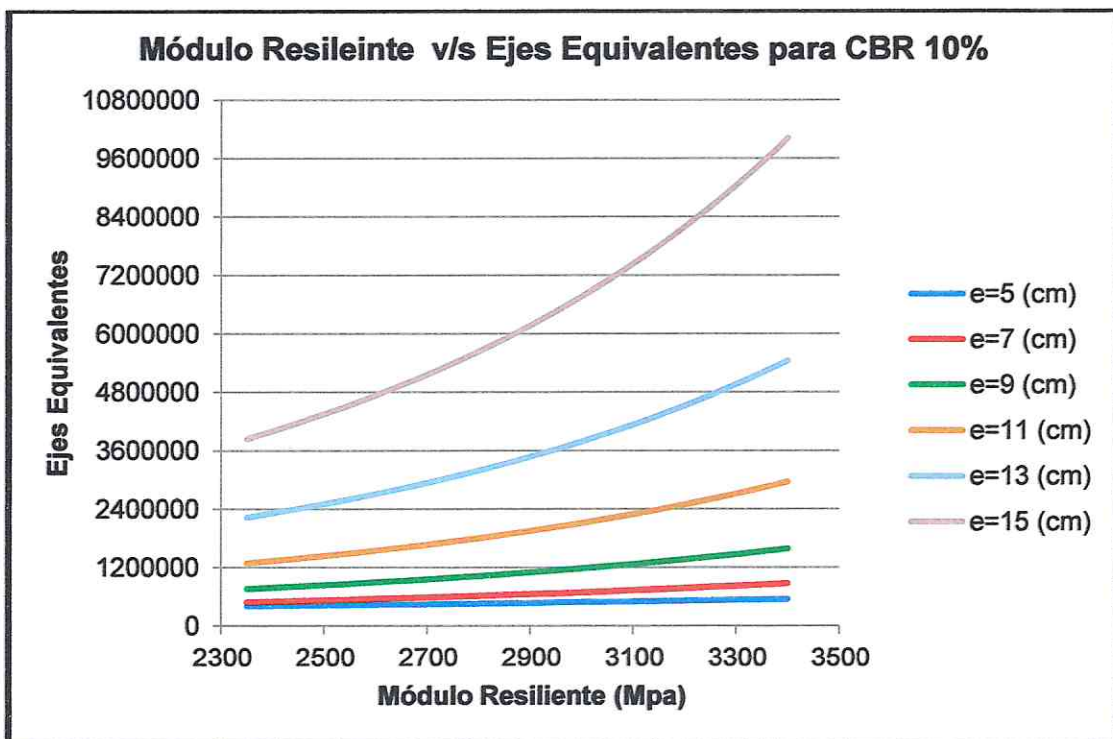


Figura J.3: Ábaco para CBR 10%
Fuente: Elaboración propia

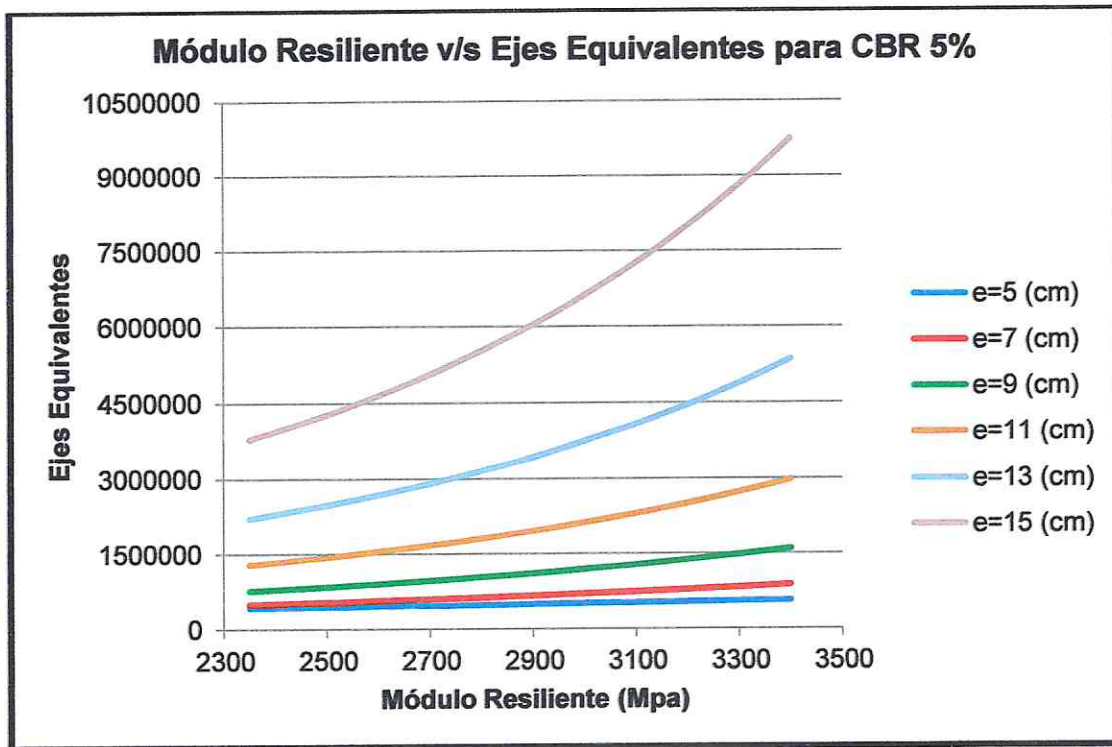


Figura J.4: ábaco para CBR 5%

Fuente: Elaboración propia

Tablas con valores de ejes equivalentes admisibles para cada caso de CBR sub-rasante analizado:

Tabla J.1: Ejes equivalentes admisibles para CBR 20%

CBR 20%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
2350	385712	401365	470012	583240	746372	1277707	2235327	3903465
2400	391492	410518	483044	601125	771830	1327516	2331030	4068684
2450	397379	419401	495875	620558	798377	1379761	2427178	4252096
2500	403377	429068	509807	638987	824839	1429713	2523373	4426031
2550	409488	438455	523531	659030	852401	1484478	2624352	4619331
2600	415714	448097	537717	678895	881117	1539206	2730404	4812228
2650	422059	458005	551639	699510	909657	1596465	2836130	5003685
2700	428524	467580	566011	719872	939356	1653479	2946994	5204702
2750	435113	478027	580852	740976	968769	1710005	3057033	5415856
2800	441828	488126	596180	762854	999335	1772124	3172226	5624400
2850	448673	499149	611168	784387	1031109	1833757	3286014	5843020
2900	455649	509807	626627	806681	1062466	1894622	3412080	6072302

CBR 20%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
3000	470012	531275	659030	852401	1127006	2024073	3659212	6533164
3050	477405	542795	675054	875807	1160165	2092920	3787037	6779895
3100	484942	560905	691566	900018	1194545	2160635	3920459	7020710
3150	492628	565243	708583	925066	1230200	2231094	4050888	7272248
3200	500466	576900	725077	949522	1265097	2300036	4186755	7535087
3250	507787	588858	743128	974788	1301234	2371646	4328332	7789804
3300	515927	600297	760631	999335	1338662	2446048	4475909	8055311
3350	524229	612862	778648	1026264	1375118	2523373	4619331	8332161
3400	531986	624885	796024	1052438	1415215	2598644	4768509	8620936

Fuente: Elaboración propia

Tabla J.2: Ejes equivalentes admisibles para CBR 15%

CBR 15 %								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
2350	392953	407438	474925	588051	750723	1279824	2231094	3878146
2400	398868	416239	488126	606121	776367	1329736	2322122	4050888
2450	404388	425276	501787	624885	803109	1379761	2417811	4223939
2500	410518	434559	515242	644377	829767	1432147	2518452	4396436
2550	416764	444095	528443	663693	857534	1484478	2619186	4588122
2600	423128	453893	542795	683734	885125	1539206	2719562	4768509
2650	429614	463960	556881	703525	913828	1596465	2824764	4969220
2700	435668	473690	571424	725077	942247	1653479	2935073	5168509
2750	442394	483676	586442	745289	973279	1710005	3044557	5365229
2800	449249	494573	601125	767326	1002457	1768953	3159164	5584548
2850	456237	505110	616268	789016	1034356	1830447	3272367	5787389
2900	463360	515242	631887	811474	1065836	1894622	3390656	6013949
2950	470012	526331	648002	833487	1098515	1958018	3514308	6236444
3000	477405	536996	663693	857534	1130632	2020331	3635846	6469263
3050	484942	548671	679860	881117	1163924	2089019	3762652	6712984
3100	491982	559904	696518	904133	1198443	2156577	3895003	6950836
3150	499807	571424	713687	929324	1232220	2222658	4024376	7199253
3200	507787	583240	730329	953921	1269283	2295650	4168315	7458802
3250	515242	594543	748544	979333	1303399	2367090	4299546	7710305
3300	523531	606958	766205	1004023	1340905	2441313	4445899	7972435

CBR 15 %								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
3400	539162	631007	801922	1055767	1415215	2593540	4736044	8530775

Fuente: Elaboración propia

Tabla J.3: Ejes equivalentes admisibles para CBR 10%

CBR 10%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
2350	405401	416764	483676	596180	758415	1284071	2226871	3844703
2400	411034	425815	497182	614562	783235	1334189	2317683	4006821
2450	416764	435113	510483	633653	810272	1384424	2408490	4177522
2500	422593	444664	523531	652569	837228	1434587	2503760	4357358
2550	429068	453893	537717	672192	864006	1487028	2603760	4536688
2600	435002	464080	552458	693443	894159	1545351	2710927	4738200
2650	441264	474307	567551	715124	924782	1604860	2822498	4946407
2700	447638	484815	583160	737655	956720	1667243	2939834	5166107
2750	454126	495614	599306	761075	990041	1732669	3063295	5398069
2800	460733	506714	616011	785426	1024816	1801317	3193266	5643119
2850	467459	518125	633299	810753	1061122	1873378	3330163	5902150
2900	474307	529856	651195	837103	1099041	1949057	3474432	6176125
2950	481281	541920	669723	864526	1138659	2028574	3626551	6466088
3000	488382	554327	688911	893074	1180068	2112164	3787037	6773167
3050	495614	567089	708787	922804	1223365	2200078	3956446	7098583
3100	502980	580218	729381	953774	1268654	2292586	4135378	7443660
3150	510483	593727	750723	986047	1316047	2389979	4324480	7809837
3200	518125	607629	772848	1019688	1365659	2492569	4524450	8198674
3250	525909	621938	795789	1054767	1417618	2600689	4736044	8611867
3300	533840	636669	819582	1091359	1472057	2714700	4960079	9051263
3350	541920	651836	844266	1129543	1529119	2834991	5197439	9518873
3400	550152	667454	869881	1169401	1588957	2961979	5449082	10016891

Fuente: Elaboración propia

Tabla J.4: Ejes equivalentes admisibles para CBR 5%

CBR 5%								
MR (Mpa)	EE (5 cm)	EE (6 cm)	EE (7 cm)	EE (8 cm)	EE (9 cm)	EE (11 cm)	EE (13 cm)	EE (15 cm)
2350	431254	437337	502450	612862	774094	1292617	2214261	3778887
2400	436780	446377	515242	631887	799556	1340905	2304432	3937545
2450	442960	455649	528443	649824	824839	1391455	2394590	4104567
2500	448673	465163	542066	669344	852401	1441936	2484336	4270998
2550	454770	474925	556128	689598	880451	1497286	2585907	4455874
2600	460911	484942	570647	710518	909796	1554492	2690021	4647644
2650	467156	495224	585639	732232	940366	1614440	2799397	4849781
2700	473506	505778	601125	754777	972224	1677288	2914356	5062961
2750	479963	516612	617123	778191	1005434	1743207	3035242	5287914
2800	486531	527737	633653	802515	1040067	1812377	3162423	5525425
2850	493211	539162	650737	827792	1076194	1884991	3296296	5776342
2900	500005	550895	668398	854065	1113895	1961257	3437286	6041579
2950	506915	562947	686658	881383	1153251	2041396	3585850	6322125
3000	513945	575329	705543	909796	1194350	2125646	3742480	6619047
3050	521096	588051	725077	939356	1237286	2214261	3907705	6933502
3100	528372	601125	745289	970119	1282158	2307516	4082094	7266742
3150	535774	614562	766205	1002144	1329069	2405702	4266263	7620123
3200	543306	628374	787856	1035495	1378134	2509135	4460873	7995120
3250	550969	642574	810272	1070236	1429470	2618154	4666640	8393330
3300	558768	657176	833487	1106437	1483204	2733123	4884338	8816494
3350	566704	672192	857534	1144173	1539473	2854434	5114804	9266503
3400	574780	687637	882450	1183522	1598419	2982511	5358942	9745419