



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAR DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Comparación del diseño MARSHALL con el diseño balanceado de
una mezcla asfáltica caliente.**

AUTOR:

Peña Burgos Omar Israel

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.

Guayaquil, Ecuador

23 de febrero del 2023



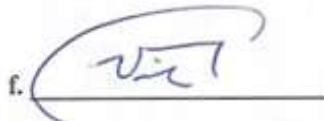
UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

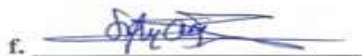
Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Peña Burgos, Omar Israel** como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

f. 

Ing. Rolando Vila Romani, PhD.

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. 

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.

Guayaquil, a los 23 días del mes de febrero del año 2023



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Peña Burgos, Omar Israel

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación: **Comparación del diseño MARSHALL con el diseño balanceado de una mezcla asfáltica caliente**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 23 días del mes de febrero del año 2023

EL AUTOR:

f. _____

Peña Burgos, Omar Israel



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Peña Burgos, Omar Israel**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Comparación del diseño MARSHALL con el diseño balanceado de una mezcla asfáltica caliente**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 23 días del mes de febrero del año 2023

EL AUTOR:

f. _____

Peña Burgos, Omar Israel

REPORTE URKUND

Document Information

Analyzed document	Tesis de Omar Peña FINAL.pdf (D158292861)
Submitted	2/10/2023 12:18:00 AM
Submitted by	
Submitter email	clara.glas@cu.ucsg.edu.ec
Similarity	1%
Analysis address	clara.glas.ucsg@analysis.orkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil / TRABAJO FINAL EMILY urkund.docx Document TRABAJO FINAL EMILY urkund.docx (D143547420) Submitted by: claglas@hotmail.com Receiver: clara.glas.ucsg@analysis.orkund.com	 3
SA	9632--minaya_gs.pdf Document 9632--minaya_gs.pdf (D35877762)	 1
W	URL: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1334/ICI_076.pdf?sequence=1%3F Fetched: 7/14/2022 5:47:35 AM	 1

Entire Document

FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL TEMA: COMPARACIÓN DEL DISEÑO MARSHALL CON EL DISEÑO BALANCEADO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE. AUTOR: Peña Burgos Omar Israel
Trabajo de titulación

previo a

la obtención del título de INGENIERO CIVIL TUTOR: Ing. Vila Romani, Rolando, PhD. Guayaquil, Ecuador 17 de febrero del 2023

FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por Peña Burgos, Omar Israel

como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero Civil. TUTOR f. _____ Ing. Rolando Vila

Romani, PhD. DIRECTOR DE LA CARRERA f. _____ Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc. Guayaquil, a los 17 días del mes de febrero del año 2023

FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD Yo, Peña Burgos, Omar Israel DECLARO QUE: El Trabajo de Titulación, COMPARACIÓN DEL DISEÑO MARSHALL CON EL DISEÑO BALANCEADO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE

previo

a la obtención del título de Ingeniero Civil, ha sido desarrollado

respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido. Guayaquil, a los 17 días del mes de febrero del año 2023

f. 
Ing. Rolando Vila Romani, PhD.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a mis padres, Omar Mauricio Peña Estrella y Sandra Marisol Burgos Barre, mis hermanas, Karelys Romina Peña Burgos y Bianca Susana Peña Burgos, mis abuelos, Jorge Heriberto Peña Narváez y Susana Oliva Estrella Navarro, mi tía Gioconda de la Merced Peña Estrella, mis tíos y primos quienes son mi motor para seguir adelante.

A todos los docentes de la UCSG que forjaron mi carácter y fueron parte de mi formación integral, en especial al Ing. Rolando Vila Romaní, PhD, quien, con mucha paciencia y entrega, me supo guiar a lo largo de este trabajo de titulación, al igual que al Ing. Walter Antonio Mera Intriago, a la Ing. María Fernanda Márquez Cueva, quienes fueron de vital apoyo en todos los procedimientos realizados en el laboratorio.

A la familia del Ing. Renato Vittorio Parodi Zambrano y la Ing. María Gabriela Pileggi Veliz, quienes nos acogieron con mucho cariño en su hogar y nos trataron como si fuésemos sus hijos a mí y mis compañeros.

Y finalmente un agradecimiento a mis compañeros de carrera, quienes desde primer semestre supimos conformar un gran grupo de estudio para afrontar todos los retos que esta bonita carrera nos tuvo que ofrecer.

DEDICATORIA

A la familia, quienes a veces son el refugio en la tormenta, y a veces la tormenta misma.

A los grandes amigos, aquellos que están en las buenas y malas y nos reconfortan en nuestros días grises.

A los profesores, quienes con su esfuerzo, compromiso y dedicación formaron a profesionales de calidad.

A mí mismo, por creer en mí y por no haberme rendido a lo largo de esta carrera.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

f. 
Ing. Rolando Vila Romani, PhD.

TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. 

Ing. Nancy Fátima Varela Terreros, MSc.

f. 
DOCENTE

Ing. Federico Von Buchwald de Janón, PhD.

OPONENTE

ÍNDICE

Capítulo 1	2
1 Introducción	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Justificación e importancia del tema	5
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Alcance.....	6
1.5 Metodología	6
Capítulo 2.....	10
2 Marco teórico	10
2.1 Mezclas asfálticas.....	10
2.1.1 Generalidades	10
2.1.2 Propiedades de agregados minerales.....	10
2.1.3 Cementos asfálticos - Propiedades.....	11
2.1.4 Propiedades de las mezclas asfálticas.	12
2.1.4.1 Resistencia a la deformación permanente	12
2.1.4.2 Resistencia a la fatiga.....	13
2.1.4.3 Durabilidad.....	14
2.1.4.4 Resistencia al deslizamiento	14
2.2 Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas	15
2.2.1 Generalidades	15
2.2.2 Parámetros volumétricos	16
2.2.2.1 Gravedad específica Bulk de los agregados (Gsb).....	16
2.2.2.2 Gravedad específica efectiva de los agregados (Gse).....	16

2.2.2.3 Porcentaje de asfalto absorbido (Pba)	16
2.2.2.4 Gravedad específica Bulk de la mezcla (Gmb).....	17
2.2.2.5 Gravedad específica máxima (Gmm).....	17
2.2.2.6 Vacíos de aire en mezcla asfáltica (Va)	18
2.2.2.7 Vacíos en el agregado mineral (VAM)	18
2.2.2.8 Vacíos rellenos de asfalto (VFA).....	19
2.2.3 Parámetros resistentes	20
2.2.4 Descripción del proceso	22
2.3 Pruebas para asegurar el comportamiento de las mezclas	24
2.4 Diseño balanceado de mezcla según los métodos de prueba del Instituto de Transporte de Texas (TTI)	26
2.4.1 Introducción	26
2.4.2 Prueba IDEAL CT.....	27
2.4.3 Prueba IDEAL RT.....	30
Capítulo 3.....	32
3 Trabajo experimental	32
3.1 Propiedades de los agregados y el cemento asfáltico a emplear.....	32
3.1.1 Generalidades.....	32
3.1.1.1 Granulometría (Según INEN 696)	33
3.1.1.2 Gravedad específica (Según INEN 857 y 856).....	34
3.1.1.3 Abrasión “Los Ángeles” (INEN 860)	35
3.1.1.4 Durabilidad ante el sulfato de sodio (INEN 863).....	35
3.1.1.5 Equivalente de arena (ASTM D 2419).....	35
3.1.2 Propiedades del cemento asfáltico	36
3.2 Diseño Marshall de la mezcla	37
3.2.1 Parámetro RICE	37
3.3 Diseño balanceado de mezcla según TTI.....	40

3.3.1 Confección de probetas en el compactador giratorio.....	40
3.3.2 Procedimiento	42
3.3.3 Resultados obtenidos en las pruebas IDEAL.....	50
3.3.3.1 Procedimiento para prueba CT Index	50
3.3.4 Determinación del índice de tolerancia al agrietamiento (CT Index)...	51
3.3.5 Procedimiento para prueba RT Index	53
3.3.6 Determinación del índice de tolerancia al ahuellamiento (RT Index) ..	54
3.3.7 Resultados del Diseño Balanceado	56
3.4 Análisis de resultados.....	57
Capítulo 4.....	58
4 Conclusiones y recomendaciones	58
4.1 Conclusiones	58
4.2 Recomendaciones.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Principios básicos del diseño de mezcla asfáltica balanceado. Tomado de “Asphalt Mix Performance Testing for PA. An Update”, Hoffman, G. & Solaimanian, M. PAPA REGIONAL TECHNICAL MEETINGS. 2019.....	4
Figura 2.- Metodología del trabajo experimental.....	9
Figura 3.- Carril con ahuellamiento - Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.....	13
Figura 4.- Agrietamiento por fatiga tipo piel de cocodrilo - Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.	13
Figura 5.- Pavimento asfáltico con peladuras - Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.....	14
Figura 6.- Medición del coeficiente de fricción con péndulo TRL. - Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.....	15
Figura 7.- Equipos empleados en la prueba RICE.	17
Figura 8.- Pavimento con exudación. Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.....	20
Figura 9.- Prueba de estabilidad y flujo Marshall	21
Figura 10.- Gráficos para el diseño Marshall.....	22
Figura 11.- Prueba IDEAL CT en el Laboratorio de Carreteras de la UCSG.....	27
Figura 12.- Parámetros para la determinación del CT Index -Tomado de: Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance. Final Report for NCHRP IDEA Project 195. Zhou, F. 2019.	29
Figura 13.- Cabezal de prueba IDEAL RT y probeta fallada por cortante. Tomado de: Performance Testing for Quality Control and Acceptance of Balanced Mix Design. NCAT Report 20-02. Yin, F., Taylor, A.J. & Tran, N. Auburn University. 2020....	30
Figura 14.- Curva típica carga vs desplazamiento en prueba IDEAL RT.	31
Figura 15.- Cantera de Equitransa S.A y planta de asfalto, ubicados en Marcelino Maridueña.	32
Figura 16.- Granulometría combinada a utilizar.....	34
Figura 17.- Gráficos para el diseño Marshall.....	39
Figura 18.- Pesaje de agregados.....	42
Figura 19.- Calentamiento del asfalto	42
Figura 20.- Mezclado de agregados con asfalto.....	43

Figura 21.- Horno de convección.....	43
Figura 22.- Colocación de material dentro de molde para compactación giratoria. ..	44
Figura 23.- Colocación de tapa.	44
Figura 24.- Colocación de molde dentro de compactador giratorio.....	45
Figura 25.- Programación del compactador giratorio	45
Figura 26.- Manipulación de probeta realizada.....	46
Figura 27.- Probetas de 5.0% y 5.5%	46
Figura 28.- Probetas de 6.0%	47
Figura 29.- Probetas de 6.5%	47
Figura 30.- Probetas de 7.0%	47
Figura 31.- Balanza electrónica.....	48
Figura 32.- Pesaje en seco de probeta	48
Figura 33.- Pesaje de especímenes sumergidos en agua.	49
Figura 34.- Pesaje parcialmente seco de probeta	49
Figura 35.- Colocación de probeta en cabezal para CT Index.	50
Figura 36.- Espécimen ensayado para CT Index.	50
Figura 37.- Gráfico de carga versus desplazamiento obtenido.	51
Figura 38.- Variación del CT Index con el porcentaje de asfalto.	52
Figura 39.- Colocación de probeta en cabezal para RT Index.	53
Figura 40.- Espécimen ensayado para RT Index.	53
Figura 41.- Gráfico de carga versus desplazamiento obtenido.	54
Figura 42.- Variación del RT Index con el porcentaje de asfalto.	55
Figura 43.- Obtención de la zona balanceada.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Resumen de pruebas exigidas a los agregados en Ecuador Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.....	11
Tabla 2.- Clasificación por viscosidad.....	12
Tabla 3.- Exigencias que cumplir en función del tráfico (excepto VMA).....	23
Tabla 4.- Porcentajes mínimos exigidos de VMA.	23
Tabla 5.- Resumen de pruebas de agrietamientos y ahuellamientos.....	25
Tabla 6.- Resumen de pruebas para evaluar el daño por el agua.	25
Tabla 7.- Granulometrías resultantes en los agregados minerales	33
Tabla 8.- Dosificación de agregados y granulometría combinada.	33
Tabla 9.- Resultados obtenidos en la fracción gruesa y fina de la mezcla de agregados	34
Tabla 10.- Prueba de abrasión a la fracción gruesa.....	35
Tabla 11.- Resultado de la prueba de durabilidad.....	35
Tabla 12.- Resultado de la prueba de equivalente de arena.	36
Tabla 13.- Resultados de las pruebas al cemento asfáltico.	36
Tabla 14.- Resultados obtenidos de ensayos RICE para las probetas de diferentes porcentajes de asfalto.	37
Tabla 15.- Cálculo de los parámetros volumétricos y resistentes.	38
Tabla 16.- Determinación del porcentaje de asfalto.....	39
Tabla 17.- Cálculo de pesos para probetas con 5.0% de asfalto.	40
Tabla 18.- Cálculo de pesos para probetas con 5.5% de asfalto.	40
Tabla 19.- Cálculo de pesos para probetas con 6.0% de asfalto.	41
Tabla 20.- Cálculo de pesos para probetas con 6.5% de asfalto.	41
Tabla 21.- Cálculo de pesos para probetas con 7.0% de asfalto.	41
Tabla 22.- Cálculo del CT Index.....	51
Tabla 23.- Resumen de resultados del CT Index	52
Tabla 24.- Cálculo del RT Index.....	54
Tabla 25.- Resumen de resultados del RT Index.	55
Tabla 26.- Límites sugeridos de desempeño con las pruebas IDEAL. Tomado de: IDEAL CT and -RT for balanced mix design and QC/QA. Texas A&M Transportation Institute. Zhou, F. February 27, 2020.....	56

RESUMEN

Un problema muy común en el Ecuador es agrietamiento de los pavimentos, los cuales sufren procesos en los que desarrollan fallas mediante los efectos de las cargas del tráfico pesado, las condiciones ambientales, en ocasiones un mantenimiento inadecuado, entre otros factores. No obstante, a pesar de que el Ministerio de Transporte y Obras Públicas posea controles y regularizaciones estipuladas en sus actuales especificaciones técnicas para dar solución a estas problemáticas, estas son insuficientes.

Contemplado esto, en el presente trabajo de titulación se compararán el Diseño Marshall versus el Diseño balanceado de mezclas (BMD), para estudiar sus procedimientos, analizando el efecto de la variación de porcentajes de asfalto para estas dos metodologías y finalmente emitir recomendaciones respecto al método de diseño más efectivo que se debería implementar en el país.

Según la metodología del Texas A&M Transportation Institute (TTI), como resultado pudo observarse que, en la zona balanceada, la cual es un umbral permisible del contenido de asfalto que satisface ambos criterios, entre los límites de agrietamiento y fatiga, era más baja que el rango de cumplimiento de todas las propiedades determinadas por el método Marshall, de 6.10 a 6.30%. De igual forma, los valores óptimos obtenidos fueron distintos, de 6.00% para el TTI y 6.20% para el diseño Marshall, sin embargo, en el presente trabajo de titulación se contemplaron las exigencias de las condiciones de su país de origen, por lo que se concluye que estos resultados deben ajustarse a las exigencias de las respectivas regiones geográficas del Ecuador, para tener otro panorama sobre la durabilidad de los pavimentos asfálticos, y junto con una creciente toma de conciencia de las deficiencias de los sistemas de diseño de mezclas volumétricas, lleven a la industria de los pavimentos asfálticos a explorar el uso del Diseño Balanceado como un nuevo enfoque para el diseño de las mezclas asfálticas, fomentando así su investigación.

Palabras claves: *CT Index, RT Index, Diseño balanceado, Diseño Marshall, BMD, agrietamiento, fatiga, pavimentos asfálticos.*

ABSTRACT

A very common problem in Ecuador is the cracking of pavements, which undergo processes in which they develop failures due to the effects of heavy traffic loads, environmental conditions, and sometimes inadequate maintenance, among other factors. However, despite the fact that the Ministry of Transport and Public Works has controls and regulations stipulated in its current technical specifications to solve these problems, these are insufficient.

Contemplating this, in the present degree work the Marshall Design will be compared versus the Balanced Mixture Design (BMD), to study their procedures, analyzing the effect of the variation of asphalt percentages for these two methodologies and finally issuing recommendations regarding which is the most effective method design that should be implemented in the country.

According to the methodology of the Texas A&M Transportation Institute (TTI), as a result it could be observed that, in the balanced zone, which is an allowable threshold of the asphalt content that satisfies both criteria, between the limits of cracking and rutting, it was lower than the compliance range of all the properties determined by the Marshall method, from 6.10 to 6.30%. In the same way, the optimal values obtained were different, 6.00% for the TTI and 6.20% for the Marshall design, however, in the present titling work the requirements of the conditions of their country of origin were contemplated, for which reason it is concluded that these results must be adjusted to the requirements of the respective geographic regions of Ecuador, in order to have another outlook on the durability of asphalt pavements, and together with a growing awareness of the deficiencies of the volumetric mix design systems, lead the asphalt pavement industry to explore the use of Balanced Design as a new approach to asphalt mix design, thus furthering their research.

Key words: *CT Index, RT Index, Balanced Design, Marshall Design, BMD, cracking, fatigue, asphalt pavements.*

Capítulo 1

1 Introducción

1.1 Antecedentes

El método Marshall de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado por Bruce Marshall en el Departamento de Carreteras de Mississippi en 1939, y usado en el Ecuador, se practica ampliamente en los laboratorios de materiales de construcción de todo el mundo para seleccionar y dosificar materiales de asfalto y agregados para la construcción de pavimentos. Este enfoque global para el diseño de mezclas de pavimento asfáltico implica la selección de agregados minerales y materiales aglutinantes que cumplan ciertas exigencias, la preparación de muestras compactadas, determinación de ciertos parámetros volumétricos, así como la realización de pruebas con prensa de carga para determinar la resistencia y el flujo de los materiales. Estos dos parámetros están asociados con las deformaciones plásticas que pueden ocurrir en la mezcla bajo el paso de las cargas. Según (White, 1985) “el método Marshall busca seleccionar el contenido de ligante asfáltico en una densidad deseada que satisfaga la estabilidad mínima y el rango de valores de flujo”.

Pero si bien el método Marshall ha sido sin dudas el más universal, junto con él se desarrollaron otros métodos de diseño de mezclas fundamentados en otros dispositivos o cabezales para evaluar el efecto de las cargas. Tal es el caso del método Hveem, el Hubbard-Field y el método triaxial de Smith.

Ya que el comportamiento de los pavimentos bajo las cargas era muy complejo, se comenzaron a desarrollar a partir de los años 50 otras pruebas como la tracción indirecta con cabezal Lottman, la máquina giratoria del Cuerpo de Ingenieros y variantes de pruebas de rueda cargada en pista (Wheel tracking test). Posteriormente comenzó el desarrollo de las pruebas dinámicas que culminaron en procedimientos para evaluar el módulo dinámico, la fatiga y la deformación bajo cargas repetidas a cierta temperatura y tiempos de aplicación de cargas. Los procedimientos de estas pruebas aparecen en la norma (UNE-EN, 2019)

En la década de los 90 el sistema SUPERPAVE, el cual es un acrónimo de “Superior Performance Asphalt Pavement”, surgió como parte del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras. Este sistema se enfoca en reducir al mínimo deterioros tales como deformaciones plásticas o ahuellamientos, así como grietas por fatiga y por

baja temperatura en los pavimentos, partiendo del estudio del ligante asfáltico y los rangos esperados de temperaturas de trabajo. Incluye un método de diseño de mezclas que puede variar sus procedimientos y pruebas según 3 niveles de diseño en función del tráfico.(U.S. Department of Transportation, 1995)

Es decir, que los objetivos principales de este método son: (1) una mejor incorporación del tráfico y las condiciones climáticas, (2) una mejor evaluación y selección de aglutinantes y agregados asfálticos, (3) mejores enfoques volumétricos para el diseño de la mezcla (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

Sin embargo, las pruebas de desempeño SUPERPAVE para mezclas asfálticas (niveles de diseño 1 y 2) solo se han utilizado de manera limitada para proyectos experimentales y otras aplicaciones especiales (McDaniel, 2007), manteniéndose esta situación hasta el presente. Estas pruebas incluyen: ensayo volumétrico, deformación específica uniaxial, corte repetido a una relación de tensiones constante, corte simple a altura constante y barrido de frecuencia a altura constante.(U.S. Department of Transportation, 1995)

Los equipos requeridos para estas pruebas dinámicas son complejos y costosos, siendo estas las mayores limitantes para su empleo masivo.

De todas las experiencias acumuladas a lo largo de los años, queda claro que el mejor diseño de mezcla será uno balanceado que garantice un buen desempeño tanto por deformación (ahuellamientos) como por agrietamiento, empleando equipos o tecnologías que no sean costosos y que puedan manejarse a nivel rutinario en los laboratorios de materiales. Según la normativa AASHTO PP 105 (2020), el diseño balanceado se define como: “diseño de mezcla asfáltica utilizando pruebas de desempeño en muestras debidamente acondicionadas que abordan múltiples modos de deterioro teniendo en cuenta el envejecimiento de la mezcla, el tráfico, el clima y la ubicación dentro de la estructura del pavimento”. Ver Figura 1.

En la dirección del diseño balanceado se emplearon fundamentalmente como prueba de ahuellamiento la denominada Rueda de Hamburgo, que es un tipo de rueda cargada en pista, y para el agrietamiento la prueba de flexión semicircular (SCB) o la prueba de tracción en disco barrenado (DCT).

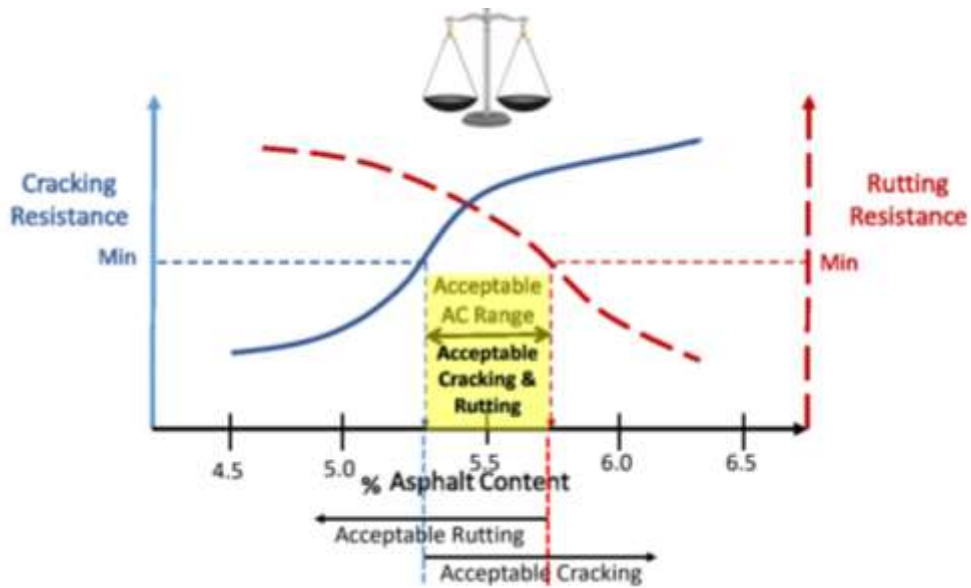


Figura 1.- Principios básicos del diseño de mezcla asfáltica balanceado. Tomado de “Asphalt Mix Performance Testing for PA. An Update”, Hoffman, G. & Solaimanian, M. PAPA REGIONAL TECHNICAL MEETINGS. 2019.

A finales de la década pasada se generó en el Texas Transportation Institute (TTI), la denominada prueba IDEAL CT, que determina la resistencia al agrietamiento de las mezclas asfálticas a través de un parámetro basado en la mecánica de fractura, el denominado Índice de tolerancia al agrietamiento (*CT Index*).

Con el éxito del procedimiento de prueba IDEAL CT, que se está convirtiendo rápidamente en la prueba de agrietamiento elegida para el diseño de mezcla balanceada, el Dr. Zhou de la Universidad Texas A&M se dispuso a desarrollar una prueba rápida para evaluar la formación de roderas o ahuellamientos, que en la mayoría de los pavimentos se debe a la deformación por cortante de la capa de mezcla asfáltica.

El concepto de dicha prueba de deformación, denominada IDEAL RT, se deriva de las pruebas de flexión en viga de tres puntos y SCB, pero con dos cambios significativos. Al igual que con IDEAL CT, se utiliza una muestra de compactador giratorio (150 mm de diámetro y 62 mm de altura). Pero, en lugar de asentarse sobre rodillos, la muestra está restringida por un accesorio rígido. Tanto en IDEAL RT, como en IDEAL CT, también se utiliza una prensa tipo Marshall, usual en la mayoría de los laboratorios de mezclas en todo el mundo. En la prueba IDEAL CT, se crea una tensión de tracción horizontal dominante cuando se aplica la carga a la muestra. Sin embargo, en las pruebas IDEAL RT con su accesorio rígido, se desarrollan dos planos de corte

separados sobre la carga que se aplica a la muestra. (Zhou & Texas A&M Transportation Institute, 2019).

1.2 Justificación e importancia del tema

El comportamiento ante el agrietamiento, fallo típico de nuestras capas asfálticas en carreteras y responsable de su baja durabilidad, no se considera en el diseño Marshall de mezclas establecido desde hace décadas en el Ecuador. Tampoco en los controles rutinarios de las mezclas calientes producidas en planta que se rigen por los mismos parámetros del diseño Marshall.

Este trabajo se enfoca en procedimientos de pruebas sencillos que permiten un diseño balanceado o equilibrado de mezclas atendiendo a su comportamiento tanto a la deformación como al agrietamiento. En particular se empleará el método TTI para el diseño balanceado, que comprende el empleo de las pruebas IDEAL CT e IDEAL RT, además de pruebas de resistencia retenida para chequear el daño del agua con el porcentaje de asfalto obtenido.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Comparar los resultados obtenidos en el diseño de una mezcla asfáltica caliente tipo densa considerando los criterios del método Marshall y del método de diseño balanceado de Texas Transportation Institute (TTI), empleando los cabezales apropiados para evaluar el agrietamiento (IDEAL CT) y la deformación (IDEAL RT), lo que permitirá estimar sus ventajas y desventajas, así como sus implicaciones en el futuro comportamiento de la mezcla.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Estudiar los procedimientos de diseño Marshall y Balanceado TTI.
2. Diseñar una mezcla asfáltica densa por ambos procedimientos, con variaciones de 0,5% de asfalto, entre 5 y 7%, procedente de la Refinería de Esmeraldas sin aditivos.
3. Analizar y comparar el efecto de la variación de los porcentajes de asfalto en las propiedades de las mezclas, según ambos procedimientos.
4. Hacer recomendaciones respecto al método de diseño más efectivo que se debería emplear en Ecuador.

1.4 Alcance

El trabajo que se propone, por su objeto de estudio y los objetivos planteados, es de alcance local y nacional. Los resultados que se obtengan serán de interés y posible aplicación por el M.I. Municipio de Guayaquil, el MTOP, consultores y técnicos en general vinculados a la temática.

El trabajo aportará:

- a) Conocimientos sobre nuevas pruebas simples a mezclas asfálticas para evaluar tanto el agrietamiento (IDEAL CT) como la deformación (IDEAL RT).
- b) Una comparación entre dos posibles métodos de diseño rutinarios, que permitirá recomendar el más adecuado para contrarrestar la baja durabilidad de nuestros pavimentos por los problemas de agrietamientos.

1.5 Metodología

El presente trabajo de investigación se hará utilizando métodos generales de análisis y síntesis. Se realizará investigación bibliográfica, tratamiento experimental de datos en el laboratorio de carreteras de la UCSG y aplicación de modelos estadísticos para el procesamiento de datos.

El proceso se concibe desde la obtención de los materiales a emplear, provenientes de una cantera perteneciente a la empresa Equitransa, ubicada en Marcelino Maridueña, de la cual se extrajeron los agregados para la confección de las probetas a utilizar, adicionalmente el asfalto, el cual fue proporcionado por el laboratorio de carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

El punto de partida es un diseño Marshall, en donde mediante cálculos, se dosificaron los agregados y asfalto según los respectivos porcentajes requeridos, los cuales fueron desde 5.0% hasta 7.0% de asfalto, en intervalos de 0.5%, de tal manera que nos permita hallar un porcentaje óptimo de asfalto.

Se prosiguen a mezclar los agregados con el asfalto a una temperatura de 150 °C, y concluido este proceso, los especímenes fueron puestos en el horno de convección a un envejecimiento por un periodo entre 3 a 4 horas a 135 °C.

Posteriormente, se compactaron las muestras mediante impacto, utilizando un martillo automático, en briquetas de 4 pulgadas de diámetro, aplicándose en ellas 75 golpes por

cara, para esperar un porcentaje de vacíos del 4%, en caso de no lograrse este porcentaje de vacíos, se repetía la confección de briquetas.

Se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto, y se confeccionó 1 briqueta adicional en caso de emergencia si se presentaba una distorsión de datos. Es decir, se contó con un total de 15 briquetas para ensayar, y 5 briquetas de reserva.

A estas briquetas de 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0% se les realizaron controles volumétricos tales como:

- Gravedad específica bulk de sus agregados (Gsb)
- Gravedad específica efectiva de sus agregados (Gse)
- Gravedad específica bulk de la mezcla (Gmb)
- Gravedad específica máxima (Gmm) mediante prueba RICE.
- Vacíos de aire en mezcla asfáltica (Va)
- Vacíos en agregado mineral (VAM)
- Vacíos rellenos de asfalto (VFA)

Una vez confeccionadas las briquetas se realizaron ensayos de tracción indirecta para hallar la estabilidad y flujo para cada uno de los especímenes según sus porcentajes de asfalto mencionados, mediante una prensa Marshall.

Realizado este paso, se realizó el procesamiento de datos para graficar los siguientes resultados:

- Estabilidad (libras) vs. porcentaje de asfalto
- Flujo 0.01” vs. porcentaje de asfalto
- Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ vs. porcentaje de asfalto
- porcentaje de vacíos en agregados vs. porcentaje de asfalto
- porcentaje de vacíos en mezcla vs. porcentaje de asfalto
- porcentaje de vacíos en rellenos vs. porcentaje de asfalto

Como siguiente paso, se procederá a ajustar las dosificaciones de agregados y asfalto para probetas de 2.5 pulgadas (62 mm) de espesor y 4 pulgadas de diámetro (150 mm) de igual manera para 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0% de asfalto para realizar el Diseño balanceado según los métodos de prueba del Instituto de Transporte de Texas (TTI).

Se realiza un proceso de mezclado de los agregados y asfalto a 150 °C, y envejecimiento de los especímenes a 135°C, para posterior compactación mediante el compactador giratorio Superpave, en donde se espera conseguir un 7% de vacíos de aire.

El compactador giratorio Superpave será configurado de tal manera que las probetas tengan las dimensiones anteriormente mencionadas (62 mm de espesor y 150 mm de diámetro) a una razón de hasta 300 revoluciones, y aplicándose una presión de hasta 600 kPa.

Una vez completada la compactación, se retiran las probetas para su almacenamiento y posteriores controles volumétricos, en donde una vez realizados, sus resultados serán tabulados para procesamiento de resultados y sean ensayados tanto para CT Index como para RT Index.

Para estos dos ensayos, al momento de realizarse las pruebas de tracción indirecta, se utilizaron intervalos de 0.5 segundos para el procesamiento de las gráficas.

Se promedian los resultados de CT Index y RT Index para así armar la gráfica *“Porcentaje de asfalto vs. CT Index-RT Index”* de tal modo que se logre hallar el rango óptimo de asfalto que satisfaga los criterios tanto de agrietamiento y fatiga, justificando así su razón de diseño balanceado.

Finalmente, se realizarán comparaciones, comentarios y conclusiones para el proceso de confección, así como para el procesamiento de los resultados.

A continuación, en la figura 2 se muestra la metodología empleada para el presente trabajo de titulación:

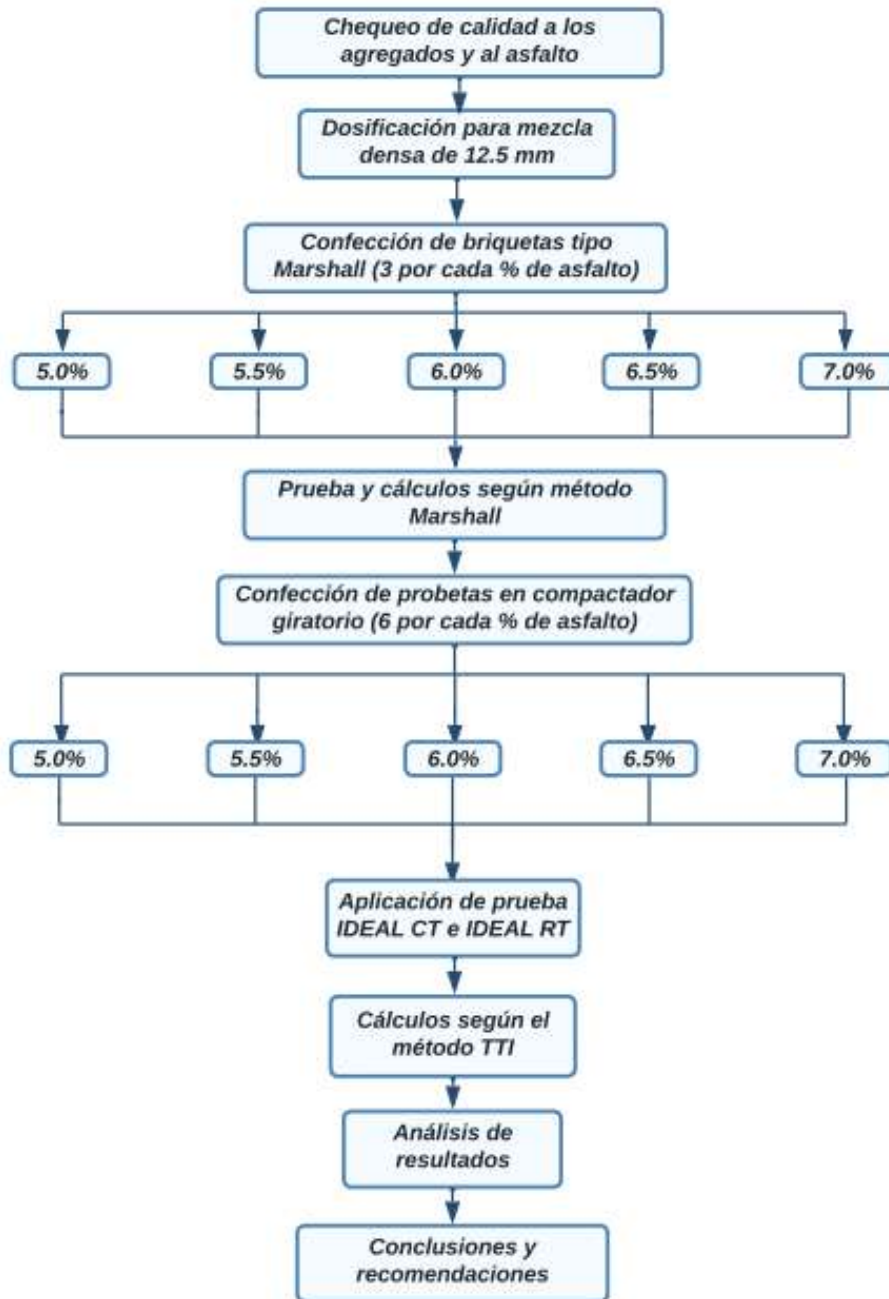


Figura 2.- Metodología del trabajo experimental

Capítulo 2

2 Marco teórico

2.1 Mezclas asfálticas

2.1.1 Generalidades

Una mezcla asfáltica es un material en el que los agregados minerales y el asfalto se mezclan en una proporción específica, para alcanzar ciertas características que le permitan ser utilizados como capa superficial, intermedia o de base en un pavimento flexible. La mezcla asfáltica se comportará de manera diferente bajo diferentes condiciones de temperatura. Cuando la temperatura es alta, la viscosidad del aglutinante disminuirá drásticamente, al igual que la adhesión entre los agregados. (Sun, 2016).

2.1.2 Propiedades de agregados minerales

Los agregados para mezcla en caliente en planta asfáltica estarán compuestos de partículas de piedra triturada, grava triturada, grava o piedra natural, arena, etc., de tal manera que cumplan los requisitos de graduación que se establecen en la normativa vigente del MTOP. Los agregados serán fragmentos limpios, resistentes y duros, libres de materia vegetal y de exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, así como de material mineral cubierto de arcilla u otro material inconveniente. Se utilizarán agregados completamente secos, la humedad de los agregados no puede exceder de 1% (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

En la Tabla 1 se resumen las pruebas a realizar a los agregados gruesos y finos para dichas mezclas, así como los valores exigidos entre paréntesis, de acuerdo con la mencionada normativa.

Tabla 1.- Resumen de pruebas exigidas a los agregados en Ecuador Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

PRUEBAS	AGREGADOS MINERALES	
	GRUESOS	FINOS
FORMA	Caras fracturadas (>80% - 2) Planas y alargadas (<10%)	Anguilaridad (>45%)
DUREZA	Abrasión Los Ángeles (<40%) Sulfatos (<12%)	Sulfatos (<12%)
LIMPIEZA	Deletéreos (<1%)	Deletéreos (<1%) Equivalente de arena (>50%) Índice de plasticidad (<4)
ADHERENCIA	Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%) Resistencia retenida en prueba de tracción indirecta (>80%)	

2.1.3 Cementos asfálticos - Propiedades

El cemento asfáltico se define como un “material cementoso de color marrón oscuro o negro que existe en la naturaleza o se obtiene mediante la refinación de petróleo crudo”. (American Society for Testing and Materials, 1998). Las principales propiedades beneficiosas del asfalto vienen por su carácter adhesivo e impermeabilizante. Además, también es un material fuerte bajo condiciones de temperatura ambiente con una buena durabilidad. Todas estas propiedades lo convierten en un valioso material de ingeniería. Generalmente, el asfalto es sólido o semisólido a temperatura ambiente y a la presión atmosférica, pero puede licuarse por calentamiento o disolución en disolventes de petróleo. Además, se puede emulsionar en agua cuando se utilizan los tensioactivos apropiados.

La calidad del cemento asfáltico se analiza en el Ecuador a partir de las pruebas incluidas en la clasificación por viscosidad, como se recoge en la NTE INEN 2515, Enmienda 1 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014). Ver Tabla 2. Casi la totalidad del asfalto empleado en las obras se produce en la Refinería de Esmeraldas y usualmente clasifica, atendiendo a su viscosidad a 60°C, como AC-20, aunque con ciertas insuficiencias luego de su envejecimiento en el horno de película delgada (RTFOT).

Tabla 2.- Clasificación por viscosidad.

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, ^c	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^a		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en homo rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^a , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^a Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min. ^a Índice de penetración = $\frac{1952-500 \log pen - 20 SP}{50 \log pen - SP - 120}$ donde: pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
^c Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

2.1.4 Propiedades de las mezclas asfálticas.

Las propiedades deseables de las mezclas asfálticas son:

2.1.4.1 Resistencia a la deformación permanente

La mezcla no debe distorsionarse ni desplazarse cuando se somete a cargas de tránsito, lo que puede originar las llamadas roderas o ahuellamientos que aparecen longitudinalmente. Se trata de deformaciones no recuperables que se producen con tráfico pesado, a alta temperatura o baja velocidad de circulación. Otras variables que influyen en su formación son el tipo y calidad del ligante, la rigidez del mástico bituminoso (filler más betún), la granulometría de la mezcla y la angulosidad del ligante (Recuenco Aguado, 2017) Ver Figura 3.



Figura 3.- Carril con ahuellamiento - Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

2.1.4.2 Resistencia a la fatiga

La mezcla no debe agrietarse cuando se somete a cargas repetidas durante un período de tiempo. En presencia de bajas o intermedias temperaturas y de elevadas velocidades las mezclas tienden a un comportamiento elástico, donde el paso de las cargas, generalmente inferiores a las de rotura, va produciendo un agotamiento progresivo por fatiga del material. La fatiga se traduce en un aumento de las deflexiones (deformaciones elásticas en superficie) y, cuando se llega a un avanzado estado en la misma, en agrietamientos generalizados tipo “piel de cocodrilo”. Ver Figura 4. Este tipo de fallo se verá influenciado, además de los aspectos ya mencionados, por los espesores empleados de capa asfáltica y la rigidez de las capas que le sirven de soporte. Por ejemplo, una menor rigidez de la capa de base de agregados podrá incrementar las deformaciones por tracción en la parte inferior de la capa asfáltica, acelerando la fatiga.



Figura 4.- Agrietamiento por fatiga tipo piel de cocodrilo - Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

2.1.4.3 Durabilidad

Puede decir que está asociada a la resistencia a los agentes externos, de diversa índole, aparte de la acción de las cargas. La radiación solar, el efecto de las altas temperaturas, la oxidación del ligante y la acción del agua son factores que afectan la durabilidad, lo que puede provocar microfisuras, pérdida de agregados finos y stripping, entre otros. Aparecen así deterioros como desmoronamientos, desprendimientos, peladuras y baches. La mezcla debe contener suficiente cemento asfáltico para asegurar un espesor de película adecuado alrededor de las partículas de agregado. La mezcla compactada no debe tener vacíos de aire muy altos, lo que acelera el proceso de envejecimiento. Ver Figura 5.



Figura 5.- Pavimento asfáltico con peladuras - Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

2.1.4.4 Resistencia al deslizamiento

Las mezclas empleadas en capas de rodadura deben de proporcionar una adecuada resistencia al deslizamiento, la que debe mantenerse con el paso de los años. Así se evita el deslizamiento de los neumáticos de vehículos, incluso bajo la condición de que el pavimento esté mojado. Para ello es preciso que, si se trata de carreteras con tráfico intenso y rápido, los agregados tengan un alto coeficiente de pulido acelerado y que la macro textura de la mezcla puesta en obra sea suficientemente rugosa. Notar que en todas las propiedades mencionadas pueden incidir en mayor o menor medida la calidad de ligante asfáltico empleado y de los agregados minerales.



Figura 6.- Medición del coeficiente de fricción con péndulo TRL. - Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020

2.2 Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas

2.2.1 Generalidades

El método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas fue desarrollado originalmente por Bruce Marshall del Departamento de Carreteras de Mississippi en 1939. La idea principal del método implica la selección del contenido de ligante asfáltico con una densidad adecuada que satisfaga la estabilidad mínima y el rango de valores de flujo. El método aparece explicado en detalle en el Manual Series 2 “Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types” (Asphalt Institute, 1997).

El método Marshall consta principalmente de los siguientes pasos:

1. Determinación de las propiedades físicas, tamaño y granulometría de los agregados.
2. Selección del tipo de ligante asfáltico en función del clima.
3. Preparar muestras iniciales, cada una con diferente contenido de ligante asfáltico. Por ejemplo: preparar tres muestras cada una con 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 y 6,5 por ciento de asfalto en peso, para un total de 15 muestras. Debe haber al menos dos muestras por encima y dos por debajo del contenido óptimo estimado de asfalto.
4. Determinar los parámetros volumétricos y ciertos parámetros resistentes establecidos por el método.
5. Determinar, a partir de esa información, el contenido óptimo de asfalto de la mezcla.

2.2.2 Parámetros volumétricos

Los parámetros volumétricos que emplea el método analizado son: gravedad específica bulk de los agregados (G_{sb}), gravedad específica efectiva de los agregados (G_{se}), porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba}), gravedad específica bulk de la mezcla (G_{mb}), gravedad específica máxima (G_{mm}), vacíos de aire en mezcla asfáltica (V_a), vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos rellenos de asfalto (VFA).

2.2.2.1 Gravedad específica Bulk de los agregados (G_{sb})

Es la relación entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. Para los diferentes agregados empleados en la dosificación de la mezcla el G_{sb} combinado puede calcularse según:

$$G_{sb} = \frac{\sum \% \text{ En peso del agregado}}{\sum \frac{\% \text{ En peso del agregado}}{G_{E \text{ bulk del agregado}}}}$$

2.2.2.2 Gravedad específica efectiva de los agregados (G_{se})

Esta incluye todos los espacios vacíos en los agregados excepto aquellos que absorbieron asfalto. Para su cálculo se necesita conocer la G_{mm} de la mezcla en particular (se explica más adelante), que puede determinarse con la prueba RICE.

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla (cero vacíos con aire).

P_b : Porcentaje de asfalto o betún.

G_b : Gravedad específica del asfalto.

2.2.2.3 Porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba})

Se determina como un porcentaje en peso del agregado mineral, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} * G_b$$

Donde:

Gse: Gravedad específica efectiva de los agregados.

Gsb: Gravedad específica bulk de los agregados combinados.

Gb: Gravedad específica del asfalto.

2.2.2.4 Gravedad específica Bulk de la mezcla (Gmb)

Es la relación entre la masa de un volumen de mezcla asfáltica compactada y la masa de un volumen igual de agua a una determinada temperatura. Usualmente se calcula según:

$$Gmb = \frac{P. Aire}{P. SSS - P. Agua}$$

Donde:

P. Aire: Peso de la probeta en aire.

P. SSS: Peso de la probeta saturada superficialmente seca en el aire.

P. Agua: Peso de la probeta en agua.

2.2.2.5 Gravedad específica máxima (Gmm)

Debe determinarse para cada contenido de asfalto sobre la mezcla suelta por la llamada prueba RICE, cuyos procedimientos se recogen en la normativa ASTM D 2041. De esta forma, con la bomba de vacíos se puede garantizar la extracción de todo el aire atrapado entre las partículas. Ver Figura 7.



Figura 7.- Equipos empleados en la prueba RICE.

La determinación del Gmm se realiza según:

$$Gmm = \frac{A}{A - (B - C)}$$

Donde:

A: Peso del picnómetro + agua.

B: Peso del picnómetro + agua + material.

C: Peso del material suelto.

2.2.2.6 Vacíos de aire en mezcla asfáltica (Va)

Corresponde a los vacíos con aire que quedan atrapados en la mezcla durante el proceso de mezclado y compactación. Es un porcentaje del volumen total de la mezcla. Se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Donde:

Gmm: Gravedad específica máxima.

Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla.

2.2.2.7 Vacíos en el agregado mineral (VAM)

Es el espacio de aire entre las partículas de agregado mineral en la mezcla compactada, incluidos los vacíos de aire y el volumen asfáltico efectivo, expresado como porcentaje del volumen total o bulk (Asphalt Institute, 1997). Su determinación se realiza según:

$$VAM = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

Donde:

Gmb: Gravedad específica bulk de la mezcla.

Ps: Porcentaje o contenido total de agregados.

Gsb: Gravedad específica neta total de los agregados.

2.2.2.8 Vacíos rellenos de asfalto (VFA)

Es el porcentaje de los espacios vacíos intergranulares entre las partículas de los agregados (VMA) que son rellenas con asfalto. El VFA no incluye el asfalto absorbido y se determina por la expresión:

$$VFA = \frac{100 * (VAM - Va)}{VAM}$$

Donde:

VAM: Vacíos en el agregado mineral.

Va: Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

De acuerdo con una de las virtudes del Método Marshall es la importancia que se le asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico. Este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla durable. Un determinado porcentaje de vacíos de aire es necesario en todas las mezclas de carreteras de grado denso para permitir alguna compactación adicional del pavimento bajo el tráfico y para proporcionar espacios en los que puedan fluir pequeñas cantidades de asfalto durante esta compactación posterior. El porcentaje permitido de vacíos de aire (en muestras de laboratorio) está entre 3,0 y el 5,0%, con un referente de 4,0% para el diseño y un 7.0% para mezclas compactadas. La durabilidad de un pavimento de asfalto es una función del contenido de vacíos de aire. Esto se debe a que cuanto más bajos son los vacíos de aire, menos permeable se vuelve la mezcla, disminuyendo la entrada de aire y agua dañinos. Esto de por si disminuye el efecto del envejecimiento. Sin embargo, porcentajes de vacíos muy bajos, por ejemplo, menores al 2.0%, pueden provocar exudación, una condición en la que el exceso de asfalto sale de la mezcla a la superficie. Ver Figura 8.



Figura 8.- Pavimento con exudación. Tomado de: Clases de la asignatura de Pavimentos. UCSG. Ing. Rolando Vila, 2020.

2.2.3 Parámetros resistentes

La estabilidad y el flujo Marshall son parámetros utilizados tanto para el diseño como para los controles de calidad a mezclas asfálticas, y así monitorear su proceso de producción. El ensayo mide la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas y es realizado de acuerdo con la normativa ASTM D6927. Durante la prueba Marshall de estabilidad y flujo, muestras cilíndricas de asfalto de 4 pulgadas o 101.6 mm de diámetro se colocan entre dos segmentos cilíndricos o cabezales de prueba, y son cargados con un movimiento vertical uniforme de 50,8 mm/min.

La prueba generalmente se realiza a 60°C para mezcla asfáltica en caliente (ASTM International, 2015) en prensas de carga como la mostrada en la Figura 9. La estabilidad Marshall se determina a partir de la carga máxima de rotura. El desplazamiento vertical (o deformación) desde la carga cero hasta la carga máxima se denomina flujo Marshall. El cálculo de la estabilidad Marshall debe comprender un factor de corrección por altura para ajustar los resultados a probetas de referencia de 2.5 pulgadas o 63.5 mm de altura.



Figura 9.- Prueba de estabilidad y flujo Marshall

La variabilidad de la estabilidad y el flujo de Marshall, como los índices de otras pruebas de deformación bajo carga monótonica, es baja. Por ejemplo, la variabilidad de un solo operador para la estabilidad de Marshall se reporta como 6 %, mientras que es 9 % para el flujo Marshall para especímenes de 4 pulgadas de diámetro (ASTM International, 2015).

Hay una gran cantidad de literatura sobre la prueba de flujo y estabilidad de Marshall y su sensibilidad a los cambios en las propiedades de la mezcla asfáltica, así como su capacidad para indicar la resistencia de mezclas asfálticas a la deformación permanente (ahuellamiento). Se informa que la prueba es sensible a cambios en el tipo de agregado, gradación, forma, tamaño máximo y contenido de asfalto (Roberts et al., 2002); (Rushing, 2009). A pesar de que estos parámetros resistentes del método Marshall aún son utilizados por algunas agencias de EE. UU. y en todo el mundo, la capacidad de la prueba para capturar el comportamiento de la mezcla a la formación de surcos o ahuellamientos es discutible. Estudios han mostrado que la prueba de estabilidad y flujo Marshall es un pobre indicador de una mezcla asfáltica para resistir la deformación permanente en el campo (Brown et al., 2001)

El método Marshall tiene deficiencias y limitaciones, como la dificultad para replicar la compactación por impacto utilizada, que no simula la densificación de la mezcla como ocurre en el pavimento real con rodillos.

La estabilidad de Marshall tampoco estima adecuadamente la resistencia al corte de una mezcla asfáltica en caliente. Estas situaciones dificultan asegurar la resistencia al ahuellamiento de la mezcla diseñada, por lo tanto, ha habido un sentimiento creciente entre los tecnólogos del asfalto de que el método Marshall ha dejado de ser útil para el diseño de mezclas asfálticas. (Bhatti, 2021).

2.2.4 Descripción del proceso

Luego de calcular los parámetros volumétricos y resistentes para las probetas con diferentes contenidos de asfalto, mencionado en el numeral 2.2.1, se procede a graficar los mismos, como se muestra en la Figura 10.

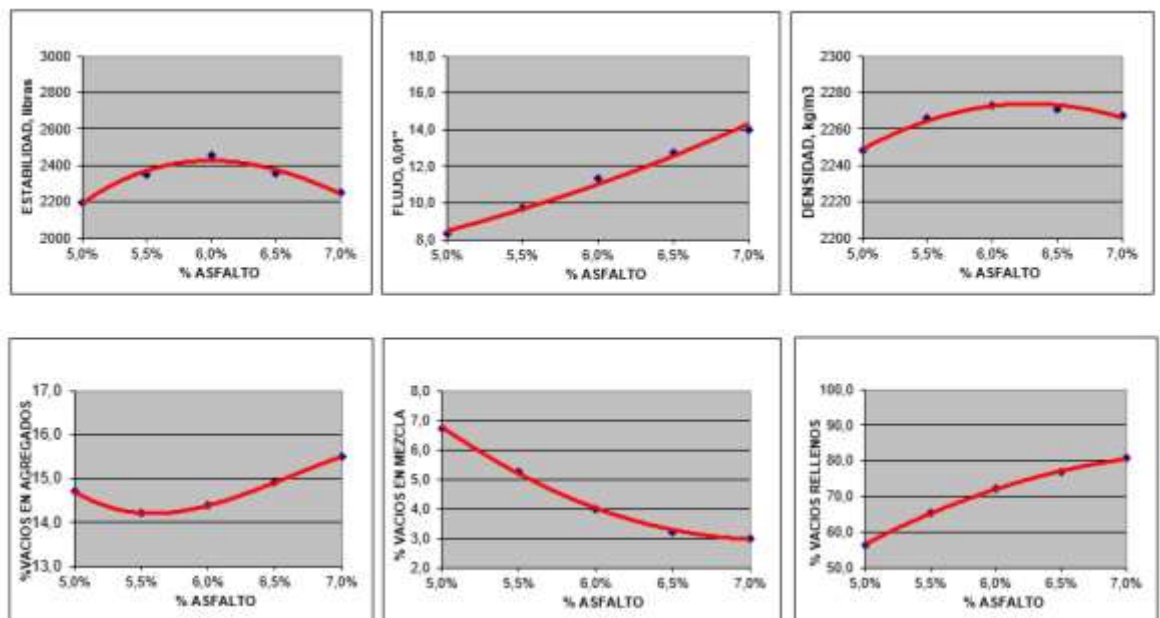


Figura 10.- Gráficos para el diseño Marshall

Entonces debe determinarse el contenido de ligante asfáltico que corresponde al porcentaje de vacíos de 4.0%. Con este valor se debe entrar en cada gráfico para obtener las propiedades correspondientes y comparar cada uno de estos valores con los requisitos de diseño. Dichos requisitos o exigencias se muestran en las Tablas 3 y 4. Si todos cumplen entonces el contenido óptimo de ligante asfáltico seleccionado es aceptable. De lo contrario, la mezcla debe ser rediseñada.

Tabla 3.- Exigencias que cumplir en función del tráfico (excepto VMA).

Marshall Method Mix Criteria ¹	Light Traffic Surface & Base		Medium Traffic Surface & Base		Heavy Traffic Surface & Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compaction, number of blows each end of specimen	35		50		75	
Stability, N (lb.)	3336 (750)	—	5338 (1200)	—	8006 (1800)	—
Flow, 0.25 mm (0.01 in.)	8	18	8	16	8	14
Percent Air Voids	3	5	3	5	3	5
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA)	See Table 5.3					
Percent Voids Filled With Asphalt (VFA)	70	80	65	78	65	75

Tabla 4.- Porcentajes mínimos exigidos de VMA.

Nominal Maximum Particle Size ^{1, 2}		Minimum VMA, percent		
		Design Air Voids, Percent ³		
mm	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

1 - Standard Specification for Wire Cloth Sieves for Testing Purposes, ASTM E11 (AASHTO M92)
 2 - The nominal maximum particle size is one size larger than the first sieve to retain more than 10 percent.
 3 - Interpolate minimum voids in the mineral aggregate (VMA) for design air void values between those listed.

La clasificación del tráfico se realiza en función de los ejes simples equivalentes de 8.2 ton esperados en el carril de diseño durante el período de diseño (ESAL). De esta manera el tráfico se considera ligero para ESAL menores a 10^4 , medio para ESAL entre 10^4 y 10^6 , así como pesado para ESAL mayores a 10^6 ejes.



















2.3 Pruebas para asegurar el comportamiento de las mezclas

En general las mezclas asfálticas presentan dos tipos de comportamientos clásicos en los cuales se ha trabajado desde el inicio de esta tecnología, los agrietamientos (por fatiga, bajas temperaturas, reflexión, entre otros) y las deformaciones o ahuellamientos. Ambos han incidido en mayor o menor medida en diferentes momentos en todo el mundo y han sido considerados en todos los métodos de diseño de pavimentos. Por ejemplo, en los países más desarrollados, con el empleo masivo de materiales asfálticos recuperados (RAP) en la producción de mezclas se incrementaron los fallos por agrietamientos.

Puede decirse que desde los años 60 se empezaron a desarrollar pruebas para evaluar y poder contrarrestar estos problemas, mejorando los controles de calidad. Algo que se ha acelerado con las mejoras tecnológicas en los últimos años. Un resumen de las pruebas comunes que se emplean en la actualidad se muestra en la Tabla 5, de acuerdo con las informaciones existentes (West et al., 2018); (Hajj et al., 2019); (Zhou et al., 2020).



Puede observarse que la estabilidad Marshall es solo un ensayo básico de deformación de la mezcla, asociado al ahuellamiento que puede motivar este parámetro en una capa asfáltica. Hace muchos años en los controles de calidad la estabilidad fue sustituida o ampliada con ensayos en pista de laboratorio, como la Rueda de Hamburgo (HWTT) sumándose además pruebas para el control específico del agrietamiento, mayormente del tipo de flexión semicircular (SCB).

Tabla 5.- Resumen de pruebas de agrietamientos y ahuellamientos.

Cracking test		Rutting test	
ASTM D7313 Disk-shaped compact tension (DCT) test		ASTM D6927 Marshall stability test	
AASHTO TP105 Semi-circular bend (SCB)-low temperature		AASHTO T324 HWTT	
ASTM D8044 SCB-critical strain energy release rate (Jc) test		AASHTO T340 Asphalt pavement analyzer (APA) test	
AASHTO TP124 [24] Illinois flexibility index test		AASHTO TP79 Flow number test	
IDT-University of Florida method or AASHTO T322		AASHTO T320 Superpave simple shear test	
Tex-248-F OT		AASHTO TP116 iRLPD test	
AASHTO T321 Beam fatigue test		AASHTO TP 134 Stress sweep rutting test	
ASTM D8225 IDEAL-CT		High-temperature IDT strength test (Christensen et al. 2002)	
AASHTO TP107 AMPT cyclic fatigue test		ASTM WK71466 IDEAL-RT shear strength test (Zhou et al. 2019)	

Adicionalmente a estas pruebas suele realizarse el control del daño por el agua, que suele realizarse internacionalmente con las pruebas mostradas en la Tabla 6. En Ecuador las especificaciones técnicas (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002) recomiendan el empleo de la prueba TSR y también de la prueba de peladura en agua hirviendo (ASTM D 3625), que es la más empleada pero que presenta poco reconocimiento internacional.

Tabla 6.- Resumen de pruebas para evaluar el daño por el agua.

Moisture damage test	
AASHTO T283 Tensile strength ratio (TSR) test	
AASHTO T324 HWTT	

2.4 Diseño balanceado de mezcla según los métodos de prueba del Instituto de Transporte de Texas (TTI)

2.4.1 Introducción

El diseño balanceado de mezcla (BMD, por sus siglas en inglés) es un método alternativo para diseñar mezclas asfálticas mediante pruebas de comportamiento en especímenes acondicionados adecuadamente para abordar múltiples modos de deterioro al considerar el envejecimiento de la mezcla, el tráfico, el clima y la ubicación dentro de la estructura del pavimento. Con el BMD, las mezclas están diseñadas para lograr un equilibrio entre la resistencia al ahuellamiento y al agrietamiento mediante la aplicación de pruebas específicas para ambos tipos de deterioros.

El BMD permite la optimización de las mezclas en términos de uso rentable de materiales (por ejemplo, ligante asfáltico, agregados, material reciclado, aditivos, etc.) y su desempeño. Sin conocer el verdadero desempeño de las mezclas, es probable que las decisiones sobre el uso de materiales se tomen en base a suposiciones, experiencias pasadas (que pueden no ser ciertas en la actualidad), el costo bruto o los límites y restricciones de las especificaciones actuales.

Es importante destacar que la intención original del método de diseño de mezcla Superpave desarrollado en los años 90 iba por esa dirección. O sea, era probar diseños de mezclas de prueba con ensayos de desempeño, pero el tiempo de flujo y el módulo dinámico desarrollados como pruebas de desempeño se consideraron demasiado complicados para el uso rutinario.

Como resultado, el sistema de diseño de mezcla Superpave se implementó casi totalmente a partir de análisis volumétricos. Muchos factores han cambiado desde el desarrollo de Superpave. Estos incluyen el uso de RAP, RAS, aditivos de mezclas tibias, polímeros, rejuvenecedores y fibras de frecuente uso en las mezclas actuales. Sin embargo, el diseño volumétrico del Superpave no fue desarrollado para materiales tan complicados y se requirieron pruebas adicionales para validar las mezclas, lo que genera incertidumbres y dificultades.

Desde la pasada década el Dr. Fujie Zhou y sus colegas del Texas A&M Transportation Institute han estado trabajando para desarrollar pruebas simples de desempeño que permiten finalmente convertirlas en pruebas rutinarias para el control de producción y

de calidad de mezcla, así como facilitar el diseño balanceado de mezclas. Esto conllevó serias investigaciones y correlaciones entre las pruebas propuestas, que se detallan en los próximos numerales, respecto a pruebas más laboriosas y costosas como la HWTT, los módulos y la SCB.

2.4.2 Prueba IDEAL CT

Esta es una nueva y prometedora prueba de agrietamiento, similar atendiendo al cabezal, a la prueba tradicional de resistencia a la tracción indirecta, pero con una adquisición y procesamiento de los datos mucho más rigurosa. Se ejecuta a temperatura ambiente (25° C) con especímenes cilíndricos de diámetro 150 mm y altura de 62 mm aproximadamente, a una velocidad de carga de 50 mm/min en términos de desplazamiento del cabezal. Ver Figura 11.



Figura 11.- Prueba IDEAL CT en el Laboratorio de Carreteras de la UCSG.

Se debe considerar que esta prueba podría ser realizada a otras temperaturas de prueba (como una temperatura más baja que la temperatura ambiente). La razón para recomendar la temperatura ambiente es usar marcos de carga (prensas) existentes que a menudo están equipados sin una cámara térmica para el control de la temperatura.

Con el procedimiento de IDEAL CT se determina la resistencia al agrietamiento de mezclas asfálticas a través de un parámetro basado en la mecánica de fractura: el índice de tolerancia al agrietamiento (CT Index). Cuanto mayor sea el CT Index, mejor será la resistencia al agrietamiento (Zhou & Texas A&M Transportation Institute, 2019).

Los pasos adecuados para desarrollar la prueba IDEAL, según el resumen realizado por (Romero, 2022) son:

1. Moldear de tres a cinco probetas cilíndricas compactados por compactador giratorio, los cuales tengan un porcentaje aproximado de vacíos de aire de un $7\pm 0.5\%$. También debe aplicarse un envejecimiento a corto antes de compactar la mezcla suelta y finalmente un envejecimiento a largo plazo de ser necesario.
2. Acondicionar en una cámara ambiental las muestra a 25° C, durante un período de tiempo de 2 a 3 horas.
3. Revisar los accesorios, comprobando la limpieza de estos. Para ejecutar el ensayo se coloca y alinea la muestra en el marco de carga, luego se procede a cargar la muestra a una velocidad constante 50 mm/min hasta producir la falla.
4. Registrar los datos y graficar la curva carga (kN) vs desplazamiento (mm) mediante algún procedimiento, durante el desarrollo del ensayo.
5. Obtener el trabajo de fractura (W_f) en Joules ($1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$), calculando el área bajo la curva determinada en el paso anterior.
6. Determinar la energía de fractura mediante la siguiente fórmula:

$$G_f = \frac{W_f}{D \times t} \times 10^6$$

Donde:

$G_f =$ Energía de fractura (Joules/m²)

$W_f =$ Trabajo de fractura (Joules)

$D =$ Diámetro de la muestra o espécimen (mm)

$t =$ Espesor de la muestra o espécimen (mm)

7. Calcular la pendiente absoluta de la zona tangencial al 75% de la carga máxima posterior al pico (PPP75), o sea, $|m_{75}|$ en N/m. Para ello se determinan en la curva de carga-deformación las cargas post-pico (máxima) y los desplazamientos post-pico al 65, 75 y 85% de la carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$), que se expresan de esta forma: cargas PPP65, PPP75 y PPP85; desplazamientos I_{65} , I_{75} y I_{85} , respectivamente. Ver Figura 12. Se calcula $|m_{75}|$ mediante la siguiente ecuación:

$$|m_{75}| = \frac{PPP_{85} - PPP_{65}}{I_{85} - I_{65}}$$

8. Determinar finalmente el índice de resistencia al agrietamiento (CT Index) mediante la siguiente fórmula:

$$CT\ Index = \frac{t}{62} \times \frac{I_{75}}{D} \times \frac{Gf}{|m_{75}|} \times 10^6$$

En la misma, 10^6 es un factor de escala.

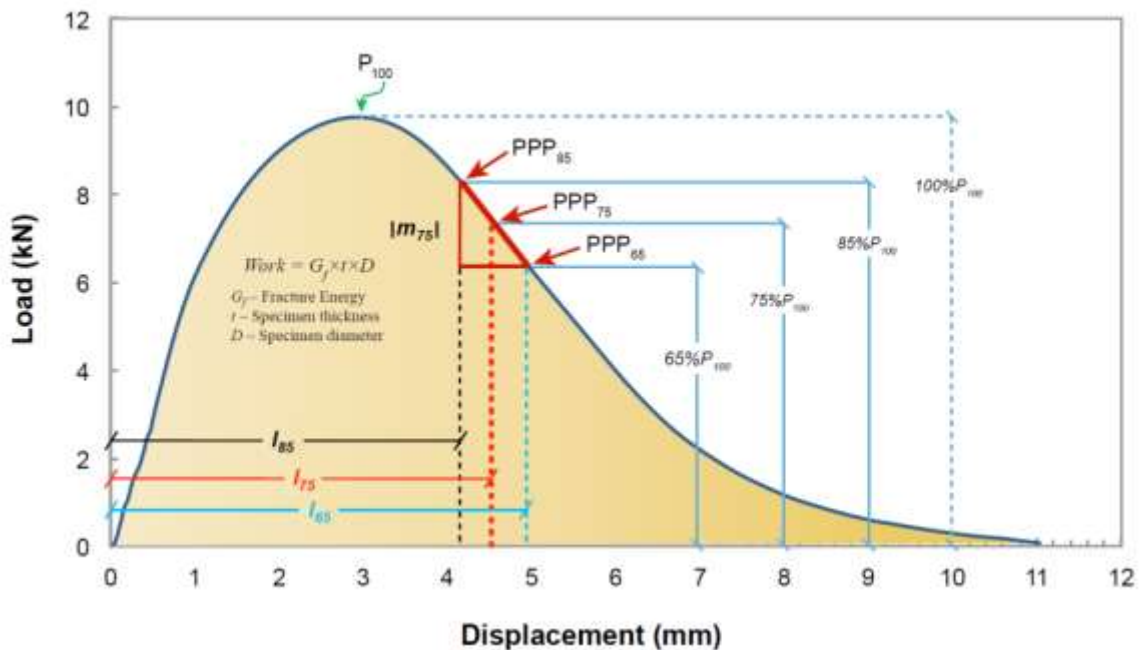


Figura 12.- Parámetros para la determinación del CT Index -Tomado de: Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance. Final Report for NCHRP IDEA Project 195. Zhou, F. 2019.

2.4.3 Prueba IDEAL RT

En el TTI desarrollaron recientemente una prueba de ahuellamiento de carga monotónica, denominada “prueba de ahuellamiento por cortante IDEAL” (IDEAL RT), para uso rutinario por parte de agencias y contratistas en los procesos de diseño de mezclas de laboratorio, producción de plantas y colocación en el campo (Zhou et al., 2019). La prueba IDEAL RT se deriva de las pruebas de flexión de tres puntos y se realiza de manera similar a la prueba IDEAL CT, excepto que se utiliza un cabezal de corte en lugar del cabezal de tracción indirecta. Una probeta de prueba se coloca en un cabezal de cortante en forma de “U” después de una duración de acondicionamiento prescrita a una temperatura de interés, usualmente 50° C. Luego, se aplica una velocidad constante de desplazamiento axial de 50 mm/min en el plano diametral de las muestras cilíndricas. En la Figura 13 se observa el cabezal de cortante y una briqueta ensayada.

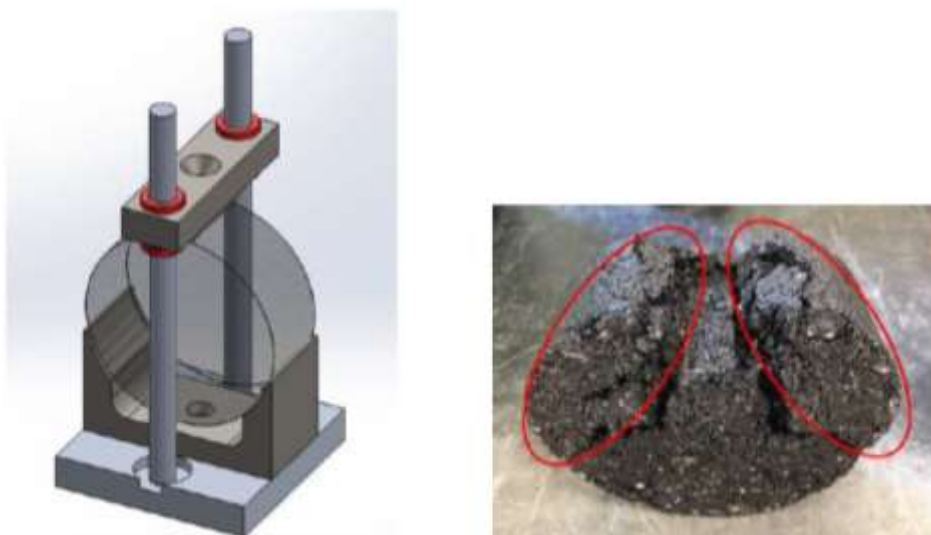


Figura 13.- Cabezal de prueba IDEAL RT y probeta fallada por cortante. Tomado de: Performance Testing for Quality Control and Acceptance of Balanced Mix Design. NCAT Report 20-02. Yin, F., Taylor, A.J. & Tran, N. Auburn University. 2020.

La Figura 14 muestra una curva típica de carga frente a desplazamiento de esta prueba. Debe tenerse en cuenta que el procedimiento de trabajo para IDEAL RT se encuentra actualmente en trámite para su publicación como norma de ASTM (ASTM WK71466 Test Method for Determination of Rutting Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Rapid Rutting Test).

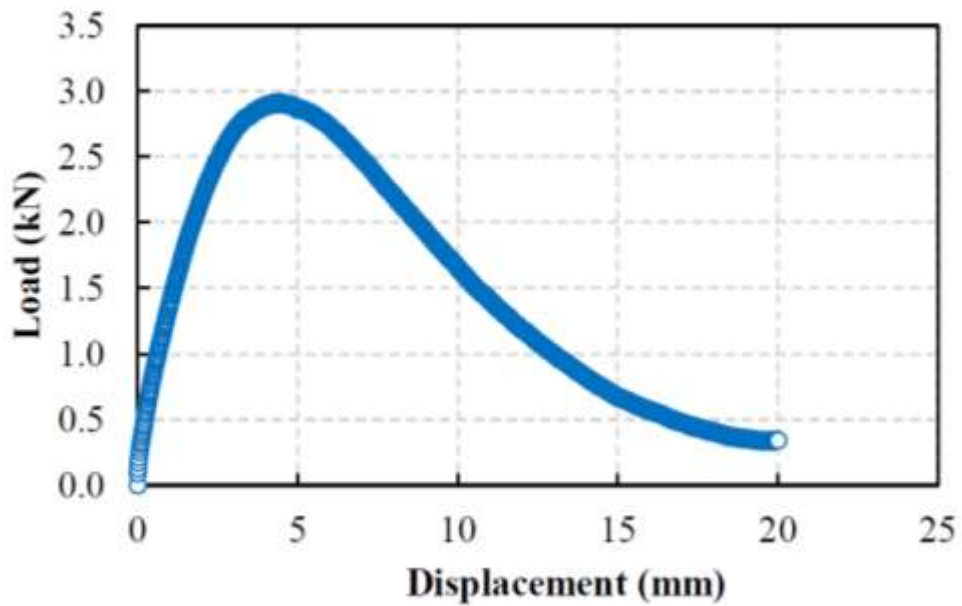


Figura 14.- Curva típica carga vs desplazamiento en prueba IDEAL RT.

El potencial de formación de ahuellamientos de las mezclas asfálticas en esta prueba se cuantifica mediante el índice de tolerancia a la formación de surcos (*RT INDEX*), a partir de la carga máxima (P_{max} en N) experimentada en una muestra y se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$RT_{index} = 6.618 * 10^{-5} * 0.356 * \frac{P_{max}}{t * w}$$

donde:

t = espesor de la probeta, m

w = ancho de la franja de carga superior; 0,0191 m.

Los autores recomendaron el uso del mismo tamaño de muestra que se usa en una prueba HWT típica: una probeta de 150 mm de diámetro y 62 mm de altura con $7 \pm 0,5\%$ de vacíos de aire.

Capítulo 3

3 Trabajo experimental

3.1 Propiedades de los agregados y el cemento asfáltico a emplear

3.1.1 Generalidades

Para los diseños de mezclas a realizar se emplearon 4 tipos de agregados procedentes de la mina de la empresa EQUITRANSA en el Río Chimbo, cerca de la población de Marcelino Maridueña, donde tienen instalados modernos equipos de trituración.

En el presente trabajo de investigación se determinará un diseño balanceado mediante los ensayos CT Index y RT Index para establecer el contenido óptimo de asfalto, de tal manera que satisfaga los criterios de fatiga y agrietamiento, mediante el procesamiento de los resultados.

El tipo de asfalto empleado fue un AC-20 proveniente de la Refinería de Esmeraldas, el cual fue proporcionado por EQUITRANSA a través del Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.



Figura 15.- Cantera de Equitransa S.A y planta de asfalto, ubicados en Marcelino Maridueña.

3.1.1.1 Granulometría (Según INEN 696)

Ver resultados en la Tabla 7.

Tabla 7.- Granulometrías resultantes en los agregados minerales

ABERTURA DE TAMICES		AGREGADOS SEGÚN TAMAÑO MÁXIMO (TM)			
No.	mm	TM 3/4" (19,1 mm)	TM 1/2" (12,7 mm)	TM 3/8" (9,5 mm)	ARENA RÍO
3/4"	19,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	60,6	94,5	100,0	100,0
3/8"	9,5	17,4	46,9	100,0	100,0
# 4	4,75	0,0	0,0	86,0	100,0
# 8	2,36	0,0	0,0	63,0	88,3
# 16	1,19	0,0	0,0	46,1	72,2
# 30	0,59	0,0	0,0	33,7	46,4
# 50	0,297	0,0	0,0	23,5	14,9
# 100	0,149	0,0	0,0	12,7	2,7
# 200	0,074	0,0	0,0	7,1	1,1

Para la realización de las pruebas de control de calidad a los agregados se partió de emplear como único agregado el obtenido de la dosificación para cumplir la granulometría exigida para mezclas asfálticas de tamaño máximo nominal de 12,7 mm (MOP, 2002). Esta dosificación se muestra en la Tabla 8 y la Figura 16.

La misma corresponde, en porcentajes respecto al peso total de agregados a: 10 % de agregados de TM 3/4", 15% de TM 1/2", 65% de TM 3/8" y 10% de arena natural.

Tabla 8.- Dosificación de agregados y granulometría combinada.

ABERTURA DE TAMICES		TM 3/4"	TM 1/2"	TM 3/8"	ARENA RÍO	GRANUL.	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	10,0	15,0	65,0	10,0	COMBINADA	Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	10,0	15,0	65,0	10,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	6,1	14,2	65,0	10,0	95,2	90	100
3/8"	9,50	1,7	7,0	65,0	10,0	83,8		
# 4	4,75	0,0	0,0	55,9	10,0	65,9	44	74
# 8	2,36	0,0	0,0	40,9	8,8	49,8	28	58
# 16	1,19	0,0	0,0	30,0	7,2	37,2		
# 30	0,59	0,0	0,0	21,9	4,6	26,5		
# 50	0,30	0,0	0,0	15,3	1,5	16,8	5	21
# 100	0,15	0,0	0,0	8,3	0,3	8,5		
# 200	0,10	0,0	0,0	4,6	0,1	4,7	2	10

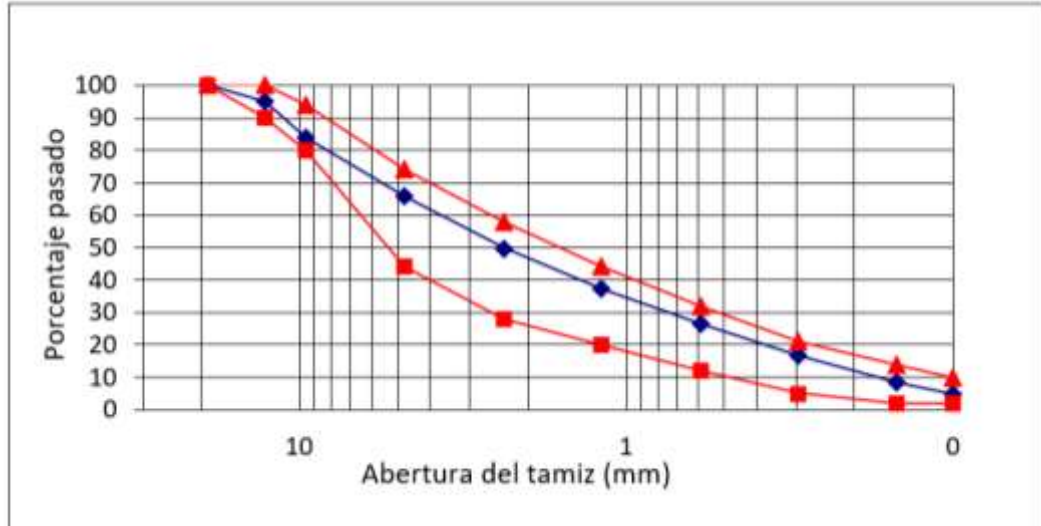


Figura 16.- Granulometría combinada a utilizar.

3.1.1.2 Gravedad específica (Según INEN 857 y 856)

Los cálculos se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9.- Resultados obtenidos en la fracción gruesa y fina de la mezcla de agregados

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA			
MUESTRA DE AGREGADOS GRUESOS:		Retenidos en Tz # 4.	
A= Peso seco en aire, gramos.		A=	1824,0
B= Peso saturado en aire con superficie seca, gramos.		B=	1841,0
C= Peso sumergido en agua de la muestra saturada, gramos.		C=	1178,0
Gravedad específica bulk=	$A / (B - C)$	Gravedad específica bulk=	2,751
Gravedad específica bulk (S.S.S.)=	$B / (B - C)$	Gravedad específica bulk (S.S.S.)=	2,777
Gravedad específica aparente=	$A / (A - C)$	Gravedad específica aparente=	2,824
Absorción, %=	$[(B-A)/A] \times 100$	Absorción, %=	0,93
ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA			
MUESTRA DE AGREGADOS FINOS:		Pasados por Tz # 4.	
A= Peso seco en aire, gramos.		A=	494,12
V= Peso en picnómetro		V=	500,00
W= Peso del agua, gramos.		W=	315,73
Gravedad específica bulk=	$A / (V-W)$	Gravedad específica bulk=	2,681
Gravedad específica bulk (S.S.S.)=	$500 / (V-W)$	Gravedad específica bulk (S.S.S.)=	2,713
Gravedad específica aparente=	$A / [(V-W)-(500-A)]$	Gravedad específica aparente=	2,770
Absorción, %=	$[(500-A)/A] \times 100$	Absorción, %=	1,19

Como se observa, el material ensayado es de alta gravedad específica ($> 2,2$) y baja absorción en agua ($< 1,5\%$), lo que lo hace adecuado para mezclas asfálticas según este ensayo. Considerando que en la mezcla de agregados para llegar a la granulometría combinada el 65,9% pasa el tamiz # 4 y por ende el 34,1% es retenido en dicho tamiz, se tiene que:

$$GE \text{ bulk de los agregados (Gsb)} = (0,341 \times 2,751) + (0,659 \times 2,681) = \mathbf{2,705}$$

3.1.1.3 Abrasión “Los Ángeles” (INEN 860)

La prueba realizada a la fracción gruesa según la Gradación C, presenta los resultados que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.- Prueba de abrasión a la fracción gruesa

ENSAYO DE ABRASIÓN "LOS ANGELES"			
TAMICES	PESO ANTES ENSAYO (gr)	PESO DESPUÉS ENSAYO (gr)	PORCENTAJE DE PÉRDIDA
1/4" No. 4	2500 2500		
SUMA:	5000	4125	17,5%
EXIGENCIA:	< 40%		

3.1.1.4 Durabilidad ante el sulfato de sodio (INEN 863)

Para la fracción fina se tienen los resultados mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11.- Resultado de la prueba de durabilidad.

ENSAYO DE DURABILIDAD EN SULFATO DE SODIO					
FRACCIÓN	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% Pérdida parcial	Granulometría original	% Pérdida total corregida
#4 - #8	100	98,1	1,90	16,1	0,31
#8 - #16	100	98,6	1,40	12,6	0,18
#16 - #30	100	97,9	2,10	10,7	0,22
#30 - #50	100	98,3	1,70	9,7	0,16
#50 - #100					
				PÉRDIDA:	0,87
EXIGENCIA:	< 12%				

3.1.1.5 Equivalente de arena (ASTM D 2419)

La limpieza de la fracción fina según la prueba de equivalente de arena mostró el resultado que se observa en la Tabla 12.

Tabla 12.- Resultado de la prueba de equivalente de arena.

ENSAYO EQUIVALENTE DE ARENA		
Ensayo No	1	2
Probeta No.	1	2
Lectura suspensión : A	5,64	5,66
Lectura sedimento: B	3,91	3,94
Equivalente de arena = (B/A) x 100	69,3	69,6
Promedio (%)	69,5	
EXIGENCIA:	> 50 %	

3.1.2 Propiedades del cemento asfáltico

Las pruebas de calidad al cemento asfáltico empleado corresponden a las establecidas en la norma INEN-2515, Enmienda 1. En la Tabla 13, pueden apreciarse los resultados obtenidos junto con los valores exigidos.

Tabla 13.- Resultados de las pruebas al cemento asfáltico.

PROPIEDAD	UNIDAD	MÉTODO	EXIGENCIAS INEN		RESULTADOS
			AC-20	AC-30	
LIGANTE ORIGINAL:					
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	200 ± 40	300 ± 60	258
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² /s	ASTM D 2170	300 mín	350 mín	380
Punto de inflamación Cleveland	°C	NTE INEN 808	232 mín	232 mín	290
Solubilidad en tricloroetileno	%	NTE INEN 915	99,0 mín	99,0 mín	NO
Gravedad específica 25°C/25°C		ASTM D 70	Informar	Informar	1,017
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s	0,1 mm	ASTM D-5			67
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D-36			52,0
Índice de penetración		ASTM D 5/D5M	-1.5 a +1.0	-1.5 a +1.0	0,0
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)					
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D 2171	800 máx	1200 máx	1500
Cambio de masa	% w/w	ASTM D 2872	1.0 máx	1.0 máx	-0,03
Ductilidad 25°C, 5 cm/min	cm	NTE INEN 916	50 mín	40 mín	35

En general, el ligante supera ligeramente el rango de viscosidad para clasificarse como AC 20, entrando en el rango de AC 30. No obstante, el residuo del RTFOT no cumple con los valores especificados, mostrando una viscosidad muy alta y una ductilidad muy baja, resultados que son típicos de los asfaltos producidos en la Refinería de Esmeraldas y que constituyen sus principales insuficiencias (Vila et al., 2019)

3.2 Diseño Marshall de la mezcla

Se realizó todo el trabajo experimental previsto para este tipo de diseño. El cuadro resumen con los resultados del diseño se muestra en la Tabla 15.

A partir de estos valores se confeccionaron las gráficas establecidas en este método de diseño. Ver Figura 17. En la misma puede apreciarse que el valor correspondiente al 4% de vacíos con aire en la mezcla, criterio de diseño, se obtiene con 6.4% de asfalto, que es un valor relativamente elevado. A dicho valor le corresponde un 75% de vacíos rellenos, que está en el límite de la exigencia.

Por esta razón, se decidió llegar al porcentaje óptimo evaluando el valor medio del rango común de los porcentajes de asfalto donde se cumplan todas las propiedades. Este análisis se muestra en la Tabla 16.

3.2.1 Parámetro RICE

Para el respectivo procesamiento de datos se requirió realizar un ensayo RICE para las probetas de 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0% de asfalto para determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica sin compactar (G_{mm}), recordando que su fórmula es:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (B - C)}$$

Donde:

A: Peso del picnómetro + agua.

B: Peso del picnómetro + agua + material.

C: Peso del material suelto.

En la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 14.- Resultados obtenidos de ensayos RICE para las probetas de diferentes porcentajes de asfalto.

% de asfalto	RICE
5,0%	2,636
5,5%	2,558
6,0%	2,511
6,5%	2,483
7,0%	2,445

Tabla 15.- Cálculo de los parámetros volumétricos y resistentes.

Mezcla		Peso (gramos)			VOL.		DENSIDAD		Volumen % Total			%		ESTABILIDAD (lbs)			Flujo (0,01")
No.	ASFALTO	SECO EN AIRE	EN AGUA	S.S.S. EN AIRE	(cm³)	BULK	RICE	AGREG.	ASFALTO	VACIOS AIRE	V.M.A.	V.F.A.	FACTOR DE CORRECCION	LECTURA	CORREGIDA		
NUMERO DE GOLPES POR CARA:		75			GRAV. ESPEC. EFEC. AGREGADO (Gse):		2,773										
GRAVEDAD ESPECIFICA DE C.A. (Gb):		1,012			C.A. ABSORBIDO POR EL AGREG (Pba):		0,92										
GRAV. ESPEC. BRUTA AGREGADOS (Gsb):		2,705															
1		1164,5	668,9	1166,4	497,5	2,341							1,04	276	2761	11	
2		1168,9	666,3	1170,1	503,8	2,320							1,04	331	3299	13	
3		1163,1	669,5	1165,8	496,3	2,344							1,09	317	3321	12	
% C.A.	5,0					2,335	2,636	82,0	6,6	11,4	18,0	36,4			3127	12,0	
4		1176,4	678	1178,3	500,3	2,351							1,04	320	3193	11	
5		1163,1	669,5	1165,8	496,3	2,344							1,04	287	2870	13	
6		1169	675,8	1172,5	496,7	2,354							1,04	356	3555	14	
% C.A.	5,5					2,349	2,558	82,1	9,8	8,1	17,9	54,6			3206	12,7	
7		1178,7	684,5	1179,8	495,3	2,380							1,09	331	3466	14	
8		1188,3	692,5	1189,2	496,7	2,392							1,04	349	3484	12	
9		1176,5	679,8	1177,3	497,5	2,365							1,04	300	3000	13	
% C.A.	6,0					2,379	2,511	82,7	12,1	5,2	17,3	69,7			3317	13,0	
10		1184	689,6	1184,6	495	2,392							1,09	324	3390	13	
11		1170,9	682,3	1171,5	489,2	2,393							1,09	306	3205	13	
12		1163,1	677,2	1163,4	486,2	2,392							1,09	309	3237	14	
% C.A.	6,5					2,393	2,483	82,7	13,7	3,6	17,3	78,9			3277	13,3	
13		1167	678,6	1168	489,4	2,385							1,09	280	2932	14	
14		1173,6	677,5	1174,4	496,9	2,362							1,04	228	2278	14	
15		1176,2	682,0	1176,8	494,8	2,377							1,09	260	2725	15	
% C.A.	7,0					2,375	2,445	81,6	15,5	2,9	18,4	84,3			2645	14,3	

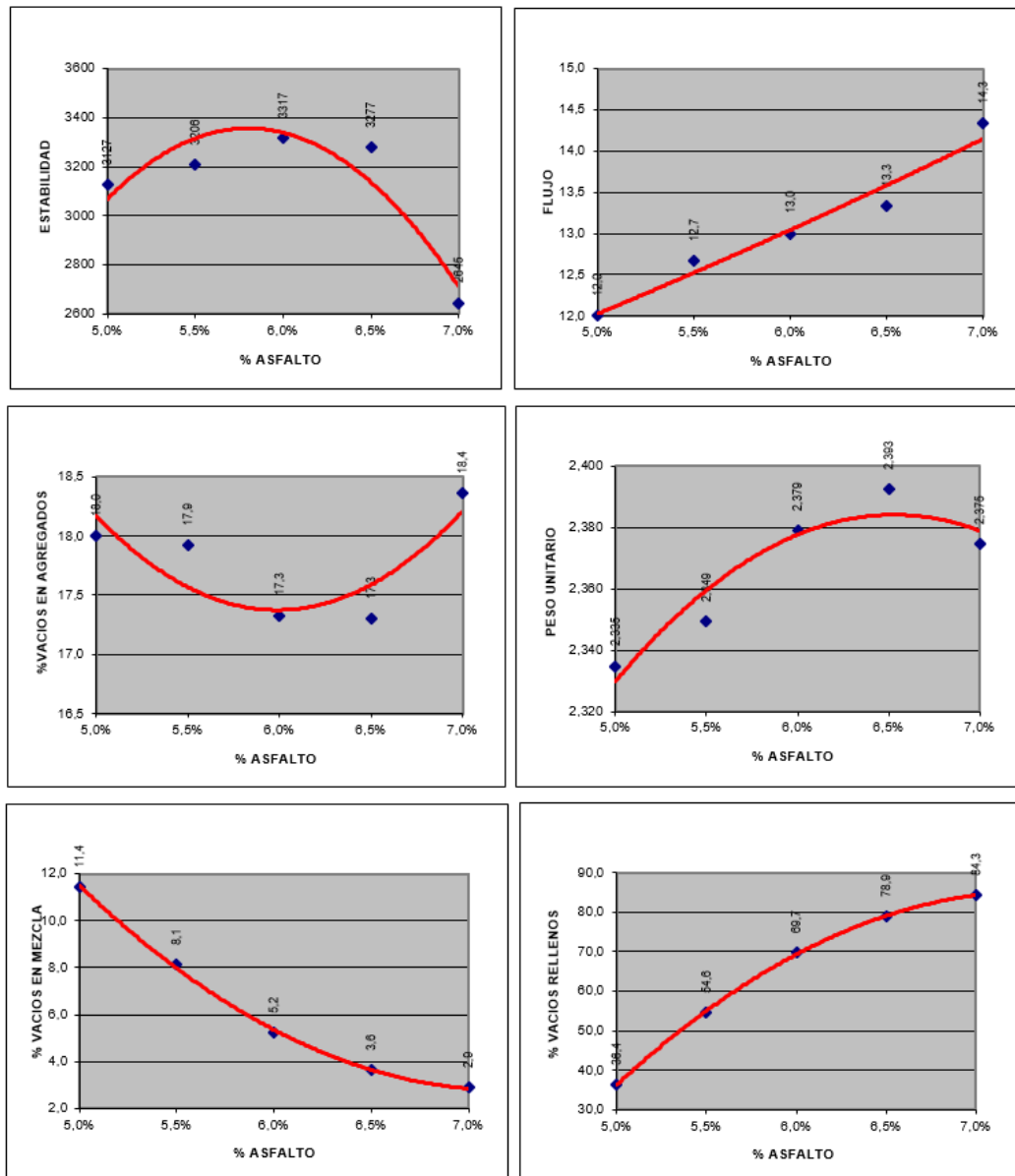


Figura 17.- Gráficos para el diseño Marshall.

Tabla 16.- Determinación del porcentaje de asfalto

PROPIEDADES	EXIGENCIAS	RANGO DONDE CUMPLE
ESTABILIDAD	+ 1800 lbs	5 a 7%
FLUJO	8 - 14 pulg/100	5 a 6,9%
PESO UNITARIO	NO ESPECIFICADO	NO ESPECIFICADO
VACIOS EN MEZCLA	3,0 – 5.0 %	6,1 – 6,8%
VACIOS EN AGREGADO	+ 14 %	5 a 7%
VACIOS RELLENOS	65 – 75 %	5,8 a 6,3%
RANGO COMÚN DE CUMPLIMIENTO		6,1 – 6,3%
PORCENTAJE DE ASFALTO ÓPTIMO		6,20%
TOLERANCIA DEL PORCENTAJE ÓPTIMO		± 0,1%

3.3 Diseño balanceado de mezcla según TTI

3.3.1 Confección de probetas en el compactador giratorio

El empleo de las pruebas IDEAL CT e IDEAL RT, en las que se basa fundamentalmente el método de diseño balanceado del TTI, partió de confeccionar probetas de 150 mm de diámetro y 62 mm de altura en el compactador giratorio Superpave. Todas las probetas, confeccionadas con los mismos porcentajes de asfalto del método Marshall, debieron tener porcentajes de vacíos entre 6.5 y 7.5%, similar al rango esperado en obra. De no alcanzarse esto se repetía el trabajo.

Para alcanzar ese porcentaje de vacíos se determinó el peso de mezcla necesario y de sus componentes, para cada porcentaje de asfalto, que posibilite llegar al volumen esperado con una densidad igual al 93% del Gmm correspondiente a cada uno de dichos porcentajes. Los Gmm ya habían sido determinados entre los parámetros volumétricos del diseño Marshall. En las tablas 17 a 21 se muestran los cálculos de los pesos a emplear para garantizar las probetas adecuadas.

Tabla 17.- Cálculo de pesos para probetas con 5.0% de asfalto.

PROBETAS EN COMPACTADOR GIRATORIO. 5,0% ASFALTO			
NO.	PROPIEDAD	VALOR	CÁLCULO
1	Gmm:	2,636	
2	Gmb (93% Gmm):	2,452	(2)=(1) x 0,93
3	Volumen probeta (cm ³):	1095,6	(3)=(3,1416 x (15 ²)/4) x 6,2
4	Peso probeta (g):	2686,3	(4)=(3) x (2)
5	Peso de asfalto/probeta	134,3	(5)=(4) x 0,05
6	Peso total de agregados/probeta	2552,0	(6)=(4) - (5)
7	Peso de agregado 19 mm/probeta	255,2	(7)=(6) * 0,10
8	Peso de agregado 12,5 mm/probeta	382,8	(8)=(6) * 0,15
9	Peso de agr. 9,5 mm+ cisco /probeta	1658,8	(8)=(6) * 0,65
10	Peso de arena/probeta	255,2	(9)=(6) * 0,10

Tabla 18.- Cálculo de pesos para probetas con 5.5% de asfalto.

PROBETAS EN COMPACTADOR GIRATORIO. 5,5% ASFALTO			
NO.	PROPIEDAD	VALOR	CÁLCULO
1	Gmm:	2,558	
2	Gmb (93% Gmm):	2,378	(2)=(1) x 0,93
3	Volumen probeta (cm ³):	1095,6	(3)=(3,1416 x (15 ²)/4) x 6,2
4	Peso probeta (g):	2605,9	(4)=(3) x (2)
5	Peso de asfalto/probeta	143,3	(5)=(4) x 0,055
6	Peso total de agregados/probeta	2462,6	(6)=(4) - (5)
7	Peso de agregado 19 mm/probeta	246,3	(7)=(6) * 0,10
8	Peso de agregado 12,5 mm/probeta	369,4	(8)=(6) * 0,15
9	Peso de agr. 9,5 mm+ cisco /probeta	1600,7	(8)=(6) * 0,65
10	Peso de arena/probeta	246,3	(9)=(6) * 0,10

Tabla 19.- Cálculo de pesos para probetas con 6.0% de asfalto.

PROBETAS EN COMPACTADOR GIRATORIO. 6,0% ASFALTO			
NO.	PROPIEDAD	VALOR	CÁLCULO
1	Gmm:	2,511	
2	Gmb (93% Gmm):	2,335	(2)=(1) x 0,93
3	Volumen probeta (cm ³):	1095,6	(3)=(3,1416 x (15 ²)/4) x 6,2
4	Peso probeta (g):	2558,2	(4)=(3) x (2)
5	Peso de asfalto/probeta	153,5	(5)=(4) x 0,06
6	Peso total de agregados/probeta	2404,8	(6)=(4) - (5)
7	Peso de agregado 19 mm/probeta	240,5	(7)=(6) * 0,10
8	Peso de agregado 12,5 mm/probeta	360,7	(8)=(6) * 0,15
9	Peso de agr. 9,5 mm+ cisco /probeta	1563,1	(8)=(6) * 0,65
10	Peso de arena/probeta	240,5	(9)=(6) * 0,10

Tabla 20.- Cálculo de pesos para probetas con 6.5% de asfalto.

PROBETAS EN COMPACTADOR GIRATORIO. 6,5% ASFALTO			
NO.	PROPIEDAD	VALOR	CÁLCULO
1	Gmm:	2,483	
2	Gmb (93% Gmm):	2,309	(2)=(1) x 0,93
3	Volumen probeta (cm ³):	1095,6	(3)=(3,1416 x (15 ²)/4) x 6,2
4	Peso probeta (g):	2530,0	(4)=(3) x (2)
5	Peso de asfalto/probeta	164,5	(5)=(4) x 0,065
6	Peso total de agregados/probeta	2365,6	(6)=(4) - (5)
7	Peso de agregado 19 mm/probeta	236,6	(7)=(6) * 0,10
8	Peso de agregado 12,5 mm/probeta	354,8	(8)=(6) * 0,15
9	Peso de agr. 9,5 mm+ cisco /probeta	1537,6	(8)=(6) * 0,65
10	Peso de arena/probeta	236,6	(9)=(6) * 0,10

Tabla 21.- Cálculo de pesos para probetas con 7.0% de asfalto.

PROBETAS EN COMPACTADOR GIRATORIO. 7,0% ASFALTO			
NO.	PROPIEDAD	VALOR	CÁLCULO
1	Gmm:	2,445	
2	Gmb (93% Gmm):	2,274	(2)=(1) x 0,93
3	Volumen probeta (cm ³):	1095,6	(3)=(3,1416 x (15 ²)/4) x 6,2
4	Peso probeta (g):	2491,3	(4)=(3) x (2)
5	Peso de asfalto/probeta	174,4	(5)=(4) x 0,07
6	Peso total de agregados/probeta	2316,9	(6)=(4) - (5)
7	Peso de agregado 19 mm/probeta	231,7	(7)=(6) * 0,10
8	Peso de agregado 12,5 mm/probeta	347,5	(8)=(6) * 0,15
9	Peso de agr. 9,5 mm+ cisco /probeta	1506,0	(8)=(6) * 0,65
10	Peso de arena/probeta	231,7	(9)=(6) * 0,10

Con el procedimiento aplicado se garantizó que todas las probetas compactadas estuvieran dentro del rango de vacíos necesarios. Las probetas se organizaron de manera que los valores promedios de los porcentajes de vacíos de las 3 probetas para la prueba IDEAL CT estuvieran muy próximos al promedio de las probetas para IDEAL RT.

3.3.2 Procedimiento

1. Por cada juego de probetas, se realiza el pesaje de los distintos agregados según las dosificaciones previamente establecidas hasta alcanzar la granulometría combinada deseada, tal como se muestra en la Figura 18.



Figura 18.- Pesaje de agregados.

2. Se calienta el asfalto a 150 °C hasta que tenga una consistencia líquida.



Figura 19.- Calentamiento del asfalto

3. Se vierte el asfalto en los agregados y se procede al mezclado hasta que toda la granulometría combinada se encuentre embebida en el asfalto, tal y como se muestra en la Figura 20.



Figura 20.- Mezclado de agregados con asfalto.

4. Una vez mezcladas las muestras, se dejan reposar las bandejas en el horno de convección durante un periodo de 4 horas a 135°C.



Figura 21.- Horno de convección

5. Una vez pasado el tiempo de compactación, se procede a verter el contenido dentro de un molde, tal y como se muestra en la Figura 22. Se recomienda realizar este paso con asistencia.



Figura 22.- Colocación de material dentro de molde para compactación giratoria.

6. Se coloca la tapa utilizando un imán con pasta de grafito.



Figura 23.- Colocación de tapa.

7. Con la ayuda de pinzas, se procede a colocar el molde dentro del compactador giratorio.



Figura 24.- Colocación de molde dentro de compactador giratorio.

8. Se inicia la compactación una vez establecida la configuración en el compactador giratorio.



Figura 25.- Programación del compactador giratorio

9. Una vez compactada la muestra, se la retira con pinzas y se coloca para que repose.



Figura 26.- Manipulación de probeta realizada.

Finalmente se almacenan las probetas para su posterior experimentación para las pruebas CT Index y RT Index.



Figura 27.- Probetas de 5.0% y 5.5%



Figura 28.- Probetas de 6.0%



Figura 29.- Probetas de 6.5%



Figura 30.- Probetas de 7.0%

Una vez realizadas las probetas se realizó un control volumétrico en todas las probetas para verificar que se hayan cumplido los porcentajes vacíos en mezcla.

Utilizando la balanza electrónica como se muestra en la Figura 31, se pesaron los especímenes en seco, sumergidos en agua y superficialmente secos.



Figura 31.- Balanza electrónica



Figura 32.- Pesaje en seco de probeta



Figura 33.- Pesaje de especímenes sumergidos en agua.



Figura 34.- Pesaje parcialmente seco de probeta

3.3.3 Resultados obtenidos en las pruebas IDEAL.

3.3.3.1 Procedimiento para prueba CT Index

Se colocaron las probetas en el cabezal para prueba CT Index, para iniciar la prueba de tracción indirecta en la prensa Marshall a una razón de 50 mm/min, hasta tomar la lectura de desplazamiento máximo recorrido.



Figura 35.- Colocación de probeta en cabezal para CT Index.



Figura 36.- Espécimen ensayado para CT Index.

3.3.4 Determinación del índice de tolerancia al agrietamiento (CT Index)

Un ejemplo de los cálculos realizados correspondientes a la Probeta 2 con 5.5% de asfalto se muestra a continuación en la Figura 37 y la Tabla 22.

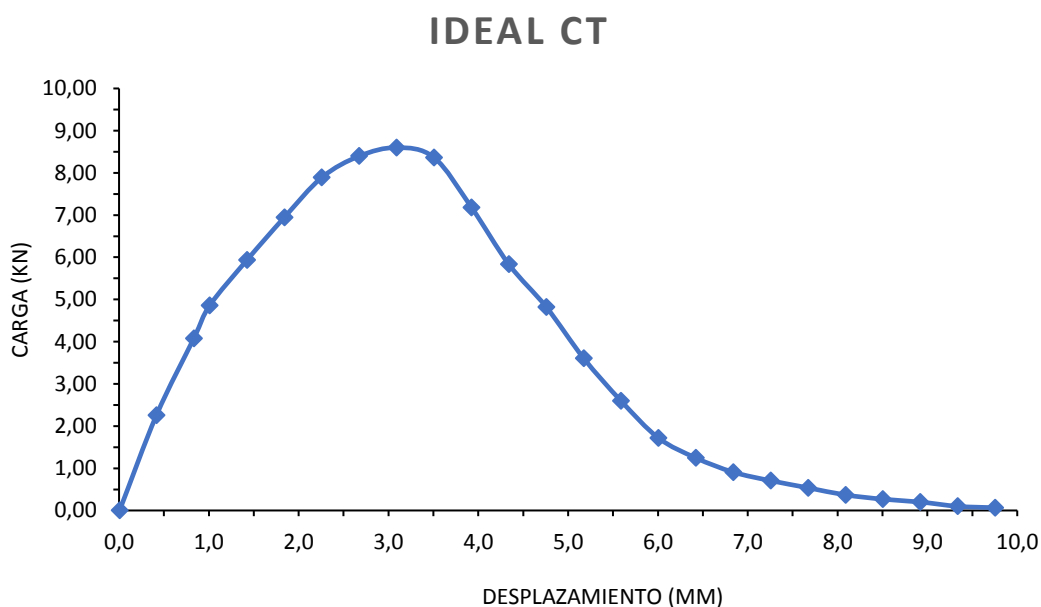


Figura 37.- Gráfico de carga versus desplazamiento obtenido.

Tabla 22.- Cálculo del CT Index

Wf (Joules)	35,3	
D (mm)	150	
t (mm)	61	
Gf (Joules/m²)	3862	
CARGA MÁX (%)	DESPLAZ (mm)	CARGA (kN)
P100	3,090	8,6
P85	3,885	7,3
P65	4,423	5,6
P75	4,160	6,4
l75/D	0,028	
m75	3,20	
Ctindex	33,0	

En la Tabla 23 se resumen todos los resultados obtenidos, los que aparecen graficados en la Figura 38.

Tabla 23.- Resumen de resultados del CT Index

Probeta	Altura, mm	CT index	Promedio	Desviación	Coef. Variación
5,0%					
5	64	12,6	12,6	0,05	0,39
1	63	12,6			
4	63	12,5			
5,5%					
4	61	42,7	37,1	5,04	13,60
3	61	35,5			
2	61	33,0			
6,0%					
5	62	64,8	73,2	9,15	12,51
2	62	71,8			
4	62	83,0			
6,5%					
2	62	118,2	118,2	17,27	14,62
3	63	100,9			
1	62	135,4			
7,0%					
3	63	198,1	170,6	23,97	14,06
4	63	154,1			
2	62	159,5			

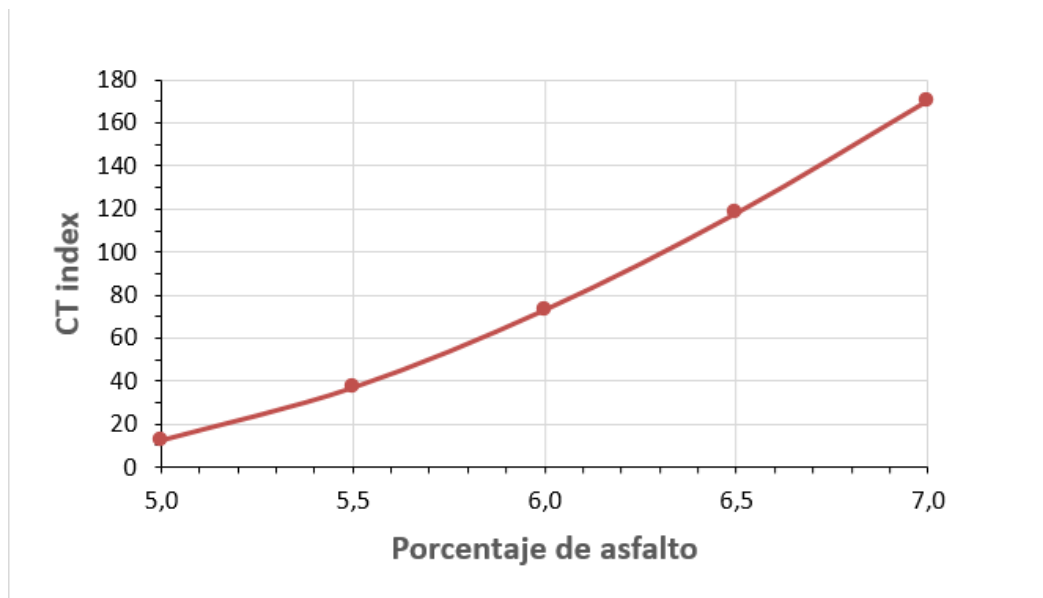


Figura 38.- Variación del CT Index con el porcentaje de asfalto.

3.3.5 Procedimiento para prueba RT Index

Se colocaron las probetas en el cabezal para prueba RT Index, para iniciar la prueba de tracción indirecta en la prensa Marshall a una razón de 50 mm/min, hasta tomar la lectura de desplazamiento máximo recorrido.



Figura 39.- Colocación de probeta en cabezal para RT Index.



Figura 40.- Espécimen ensayado para RT Index.

3.3.6 Determinación del índice de tolerancia al ahuellamiento (RT Index)

Un ejemplo de los cálculos realizados correspondientes a la Probeta 6 con 5.5% de asfalto se muestra a continuación en la Figura 41 y la Tabla 24.

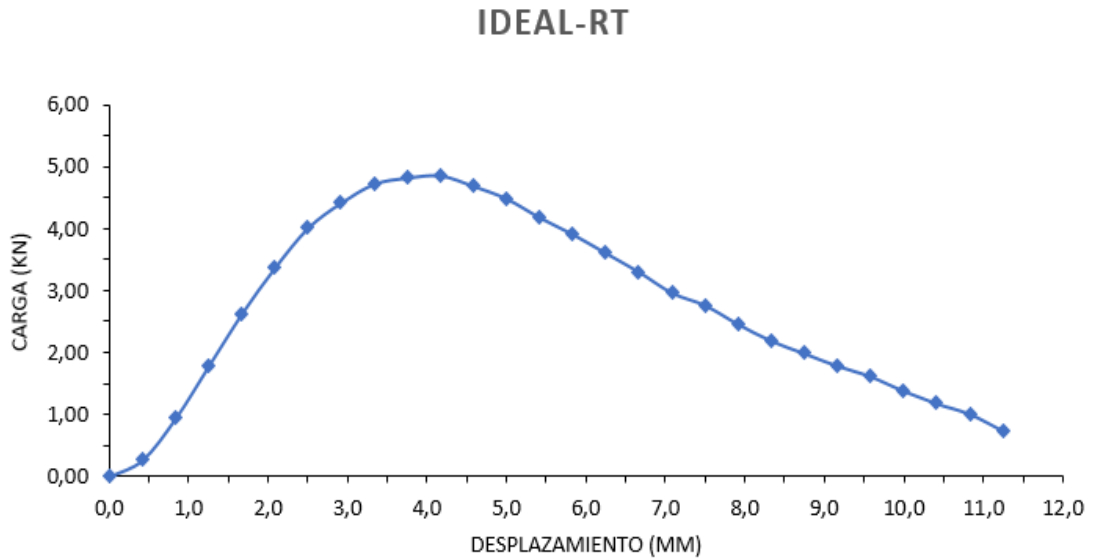


Figura 41.- Gráfico de carga versus desplazamiento obtenido.

Tabla 24.- Cálculo del RT Index

ESPESOR (mm)	LECT. ANILLO (0,0001")	CARGA (lbs)	CARGA (kN)	RT index
63	111,8	1084	4,8	94,4

En la Tabla 25 y la Figura 43 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 25.- Resumen de resultados del RT Index.

Probeta	Altura, mm	RT index	Promedio	Desviación	Coef. Variación
5,0%					
2	64	159,7	169,8	10,00	5,89
3	63	179,7			
6	63	170			
5,5%					
6	63	94,4	102,6	10,04	9,79
5	62	99,6			
1	63	113,8			
6,0%					
3	60	58,8	59,8	1,12	1,88
1	61	61,0			
6	60	59,5			
6,5%					
6	61	49,6	51,4	5,66	11,02
4	62	46,8			
5	60	57,7			
7,0%					
1	60	47,2	43,7	3,55	8,13
5	61	40,1			
6	61	43,7			

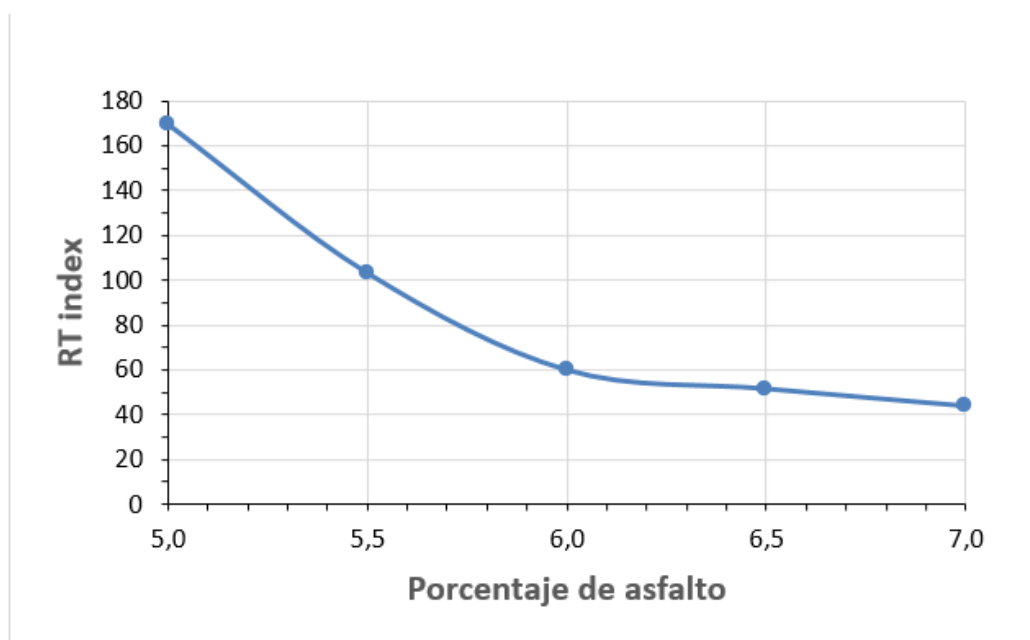


Figura 42.- Variación del RT Index con el porcentaje de asfalto.

3.3.7 Resultados del Diseño Balanceado

La obtención del rango de asfalto posible según el diseño balanceado del TTI depende de los valores exigidos que se pretendan cumplir, por lo que se utilizará en el trabajo los recomendados en la Tabla 26. Estos valores deben ser ajustados de acuerdo con la problemática vial del Ecuador.

Tabla 26.- Límites sugeridos de desempeño con las pruebas IDEAL. Tomado de: IDEAL CT and -RT for balanced mix design and QC/QA. Texas A&M Transportation Institute. Zhou, F. February 27, 2020.

Test	Parameter	Suggested Performance Threshold
IDEAL-RT	RT _{Index}	≥ 58 for PG 64-XX
		≥ 66 for PG 70-XX
		≥ 75 for PG 76-XX
IDEAL-CT	CT _{Index}	>65 for Dense-graded
		>105 for Superapve
		>145 for SMA

Ya que el asfalto ecuatoriano califica usualmente como PG 64-22 o PG 64-28 (Vila et al., 2017), para el RT Index se exigirán valores por encima de 58, mientras que para el CT Index valores mayores a 65, por tratarse de una mezcla densa. De esta forma se puede apreciar en la Figura 43 la determinación de la zona balanceada, que en este caso comprende el rango de 5.90% a 6.05% de asfalto en peso de la mezcla, con un promedio aproximado de 6,00%.

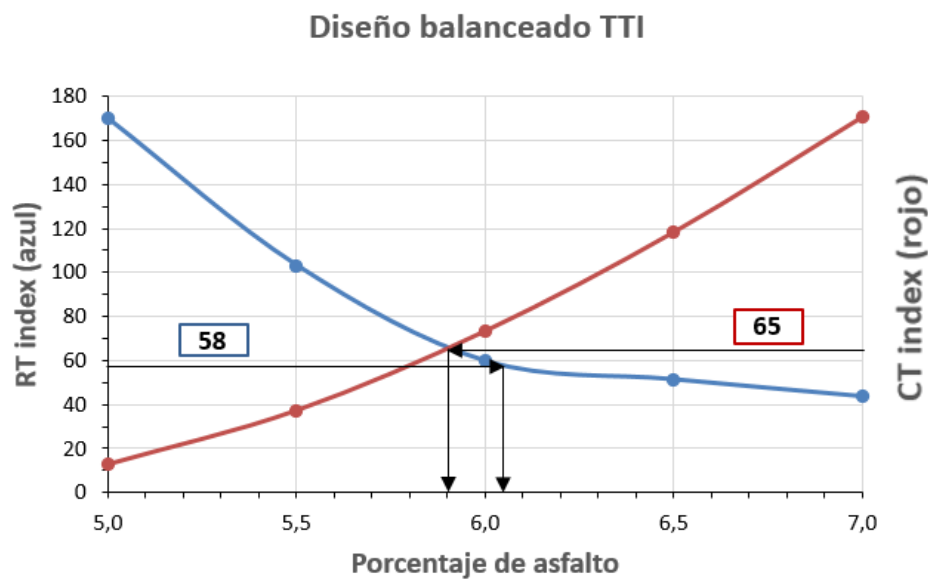


Figura 43.- Obtención de la zona balanceada.

3.4 Análisis de resultados

Puede observarse que la zona balanceada ubicada en el rango de 5.90 a 6.05% de asfalto, según el TTI, es más bajo que el rango de cumplimiento de todas las propiedades determinado por el método Marshall, de 6.10 a 6.30%. De igual forma los óptimos obtenidos son diferentes, de 6.00% para el TTI y 6.20% para el Marshall.

Estos resultados en particular deben verse como una primera aproximación al tema, debido a que se necesita investigar las exigencias para el CT Index y RT Index en su relación con el comportamiento de los pavimentos de acuerdo con nuestras regiones geográficas. Esto sería fundamental para el buen uso del método TTI.

Las comparaciones también deben hacerse con cuidado ya que las condiciones del diseño Marshall son diferentes al del TTI, en el primero se trabaja con probetas en condiciones ideales de compactación (100% de la densidad relativa), mientras que, en el segundo, en las condiciones reales que se tendría en obra (aproximadamente 97%). Es decir, en un marco más real. Por otra parte, en el primero solo se atiende a las deformaciones, mientras que en el segundo se atienden tanto a las deformaciones (RT Index) como al agrietamiento (CT Index).

Capítulo 4

4 Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

1. El diseño Marshall realizado para lograr una mezcla de granulometría densa con materiales aluviales triturados y arena de río presenta un contenido óptimo de asfalto de 6,20% con un rango de cumplimiento entre 6,10 y 6,30 %. Por otra parte, en el diseño según el método TTI la zona balanceada se ubica en el rango de 5.90 a 6.05%, con un óptimo de 6,00%.
2. Al incrementar el contenido de asfalto para valorar su efecto en el comportamiento de los parámetros resistentes, empleando ambos métodos, se observa que la estabilidad Marshall sufre un incremento hasta un 5,90% de asfalto y luego comienza a descender. Mientras, el flujo Marshall aumenta sistemáticamente de 12 a más de 14 centésimas de pulgadas. Si se comparan estos resultados con las exigencias, ambos parámetros cumplirían empleando contenidos de asfalto entre 5,00 y 6,90%, es decir, casi con cualquiera de los contenidos analizados.
3. En el método balanceado del TTI, los valores del CT Index aumentaron de forma directamente proporcional con el porcentaje de asfalto, mientras que los valores del RT Index son inversamente proporcionales. Esto presenta una lógica simple, con mayor contenido de asfalto la mezcla debe aumentar su resistencia al agrietamiento y disminuir su resistencia a la deformación.
4. Más allá de los porcentajes óptimos y rangos de cumplimiento de las exigencias por ambos métodos, estos resultados deben verse como una primera aproximación a este tipo de diseño balanceado, ya que sus resultados dependen de manera directa con las exigencias empleadas para el CT Index y RT Index, que en este caso corresponden a valores sugeridos para los EE. UU. No obstante, ha quedado claro el potencial de este método para buscar un equilibrio entre el comportamiento al agrietamiento y a la deformación de las mezclas asfálticas mediante pruebas simples.
5. A lo largo del trabajo ha quedado constancia de la importancia del valor del RICE en los cálculos realizados para confeccionar probetas en el compactador giratorio Superpave, relacionados tanto con sus dimensiones, como con los porcentajes de vacíos con aire necesarios para su empleo en el método TTI.

4.2 Recomendaciones

1. Hacer las investigaciones pertinentes para ajustar las exigencias del CT Index y RT Index según nuestras regiones geográficas, de tal manera que se puedan tener mejores criterios al momento de diseñar una mezcla asfáltica duradera y por consiguiente económica a largo plazo.
2. Divulgar el empleo de los métodos de trabajo con el CT Index y RT Index en las empresas contratistas vinculadas al municipio de Guayaquil, prefectura del Guayas y en general a al MTOP, de manera tal que nos permita adquirir más experiencias con el manejo de estos resultados.

Referencias Bibliográficas

- American Society for Testing and Materials. (1998). Standard Test Method For Asphalt Content Of Hot-Mix Asphalt By Ignition Method. En *ASTM D6307-98*.
- Asphalt Institute. (1997). *Mix Design Methods For Asphalt Concrete And Other Hot-Mix Types* (6a ed.).
- ASTM International. (2015). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*.
- Bhatti, M. (2021, septiembre 22). *Comparing Marshall and Superpave Asphalt Mix Designs* | *LinkedIn*. Comparing Marshall and Superpave Asphalt Mix Designs. <https://www.linkedin.com/pulse/comparing-marshall-superpave-asphalt-mix-designs-muhammad-bhatti/>
- Brown, E. R., Kandhal Prithvi S., & Zhang, J. (2001). Performance Testing for Hot Mix Asphalt. En *Report No. NCAT 2001-05*. National Center for Asphalt Technology.
- Hajj, E., Hand, A. J. T., Chkaiban, R., & Aschenbrener, T. (2019). Index-Based Tests for Performance Engineered Mixture Designs for Asphalt Pavements. En *FHWA-HIF-19-103*. FHWA.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). Productos Derivados Del Petróleo. Cemento Asfáltico (Clasificación Por Viscosidad) Requisitos. En *NTE INEN 2515 - Enmienda 1*.
- McDaniel, Rebecca. S. (2007). Current Superpave Mix Design Practice. En *Transportation Research Circular Number E-C 124. T.R.B* (pp. 2–11).
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. En *MOP - 001-F 2002*.
- Recuenco Aguado, E. (2017). *Firmes y pavimentos de carreteras y otras infraestructuras* (2a ed.).
- Roberts, F. L., Mohammad, L. N., & Wang, L. B. (2002). History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(4), 279–293.

- Romero, E. A. (2022). *Valoración Experimental De Soluciones Para Mejorar El Índice De Tolerancia Al Agrietamiento En Mezclas Asfálticas*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Rushing, J. F. (2009). Development of Ndesign Criteria for Using the Superpave Gyrotory Compactor to Design Asphalt Pavement Mixtures for Airfields. En *ERDC/GSL TR-09-39*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Sun, L. (2016). *Distribution of the temperature field in a pavement structure - ScienceDirect* (L. Sun, Ed.; 1a ed.). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012849908500002X>
- UNE-EN. (2019). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 10: Compactibilidad*.
- U.S. Department of Transportation. (1995). Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave. En *Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave*.
- Vila, R., García, G., Jaramillo, J., Pinargote, K., & Ramos, K. (2019, noviembre 25). Análisis de la Calidad del Cemento Asfáltico Ecuatoriano durante el 2018. *Memorias del XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. Retos y Oportunidades en el Mundo del Asfalto*.
- Vila, R., García, G., Jaramillo, J., & Troya, H. (2017, noviembre). Estudio del asfalto ecuatoriano a temperaturas intermedias con la tecnología Superpave -. *Congreso Ibero-Latinoamericano SUPERPAVE. XIX CILA*.
- West, R., Rodezno, C., Leiva, F., & Yin, F. (2018). Development of a Framework for Balanced Mix Design. En *Final Report of NCHRP 20-07/Task 406*.
- White, T. (1985). Marshall Procedures for Design and Quality Control of Asphalt Mixtures. En *Asphalt Paving Technology: Proceedings* (Vol. 54, pp. 265–284). Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT).
- Zhou, F., Crockford, B., Zhang, J., Hu, S., Epps, J., & Sun, L. (2019). Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 88(4), 719–750.

- Zhou, F., Hu, S., & Newcomb, D. (2020). Development of a performance-related framework for production quality control with ideal cracking and rutting tests. *Elsevier*, 261.
- Zhou, F., & Texas A&M Transportation Institute. (2019). Development of an IDEAL Cracking Test for Asphalt Mix Design, Quality Control and Quality Assurance. *Transportation Research Board*.
<https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/IDEA/FinalReports/Highway/NCHRP195.pdf>
- Zumrawi, M., & Sheikh Edrees, S. A. (2016). Comparison of Marshall and Superpave Asphalt Design Methods for Sudan Pavement Mixes. *International Journal of Scientific and Technical Advancements*, 2(1), 29–35.
https://www.researchgate.net/publication/292323113_Comparison_of_Marshall_and_Superpave_Asphalt_Design_Methods_for_Sudan_Pavement_Mixes



DECLARACIÓN Y AUTOIZACIÓN

Yo, **Omar Israel Peña Burgos**, con C.C: **0921680922** autor del trabajo de titulación: **Comparación del diseño MARSHALL con el diseño balanceado de una mezcla asfáltica caliente**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, a los 23 días del mes febrero del año 2023

AUTOR

f. _____
Nombre: **Peña Burgos, Omar Israel**
C.C: **0921680922**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Comparación del diseño MARSHALL con el diseño balanceado de una mezcla asfáltica caliente.		
AUTOR(ES)	Omar Israel Peña Burgos		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	23 de febrero del 2023	No. DE PÁGINAS:	62
ÁREAS TEMÁTICAS:	Mezclas Asfálticas, Asfalto, Pavimentos, Diseño Balanceado de Mezclas Asfálticas.		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Prueba IDEAL CT, Prueba IDEAL RT, Diseño Balanceado, Diseño Marshall, Superpave, Ensayo RICE.		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>Un problema muy común en el Ecuador es agrietamiento de los pavimentos, los cuales sufren procesos en los que desarrollan fallas mediante los efectos de las cargas del tráfico pesado, las condiciones ambientales, en ocasiones un mantenimiento inadecuado, entre otros factores. No obstante, a pesar de que el Ministerio de Transporte y Obras Públicas posea controles y regularizaciones estipuladas en sus actuales especificaciones técnicas para dar solución a estas problemáticas, estas son insuficientes.</p> <p>Contemplado esto, en el presente trabajo de titulación se compararán el Diseño Marshall versus el Diseño balanceado de mezclas (BMD), para estudiar sus procedimientos, analizando el efecto de la variación de porcentajes de asfalto para estas dos metodologías y finalmente emitir recomendaciones respecto al método de diseño más efectivo que se debería implementar en el país.</p> <p>Según la metodología del Texas A&M Transportation Institute (TTI), como resultado pudo observarse que, en la zona balanceada, la cual es un umbral permisible del contenido de asfalto que satisface ambos criterios, entre los límites de agrietamiento y fatiga, era más baja que el rango de cumplimiento de todas las propiedades determinadas por el método Marshall, de 6.10 a 6.30%. De igual forma, los valores óptimos obtenidos fueron distintos, de 6.00% para el TTI y 6.20% para el diseño Marshall, sin embargo, en el presente trabajo de titulación se contemplaron las exigencias de las condiciones de su país de origen, por lo que se concluye que estos resultados deben ajustarse a las exigencias de las respectivas regiones geográficas del Ecuador, para tener otro panorama sobre la durabilidad de los pavimentos asfálticos, y junto con una creciente toma de conciencia de las deficiencias de los sistemas de diseño de mezclas volumétricas, lleven a la industria de los pavimentos asfálticos a explorar el uso del Diseño Balanceado como un nuevo enfoque para el diseño de las mezclas asfálticas, fomentando así su investigación.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-986739720	E-mail: omarisraell@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Clara Glas Cevallos		
	Teléfono: +593-4 -2206956		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			