

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN TRES  
MEZCLAS ASFÁLTICAS PRODUCIDAS EN LA REGIÓN  
SIERRA**

**AUTOR:**

**Garcés Andrade, Dennis Xavier**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**Ing. Vila Romani, Rolando. PhD.**

**Guayaquil, Ecuador**

**2016**



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 **Garcés Andrade, Dennis Xavier**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

**TUTOR**

---

**Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.**

**DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas, Msc.**

**Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2016**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Garcés Andrade, Dennis Xavier**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, **Evaluación del daño por humedad en tres mezclas asfálticas producidas en la región Sierra** 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 20 días del mes de septiembre del año 2016**

**EL AUTOR**

f.   
**Garcés Andrade, Dennis Xavier**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

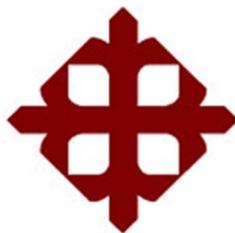
Yo, **Garcés Andrade, Dennis Xavier**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Evaluación del daño por humedad en tres mezclas asfálticas producidas en la región Sierra**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 20 días del mes de septiembre del año 2016**

**EL AUTOR:**

f.   
\_\_\_\_\_  
**Garcés Andrade, Dennis Xavier**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.**

TUTOR

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Federico Von Buchwald.**

OPONENTE

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas, Msc.**

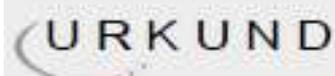
DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Adolfo Caicedo. Msc.**

DOCENTE DE LA CARRERA

# REPORTE URKUND



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TRABAJO DE TITULACIÓN - EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN TRES MEZCLAS ASFÁLTICAS DE LA REGIÓN SIERRA (GA RCÉS) . final.docx (D21578176)  
**Submitted:** 2016-09-01 22:59:00  
**Submitted By:** ifiuc.ucatolica@cu.ucsg.edu.ec  
**Significance:** 9 %

### Sources included in the report:

tesis final jane (Reparado). 1 2.docx (D21577992)  
TESIS 2014 - Gelo A. Cárdenas Alchundia.pdf (D10648990)  
tesis final.docx (D21503652)  
TESIS (AVANCE, 27 AGOSTO 2015) II.docx (D15165211)  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/4331/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-133.pdf>  
<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/79932/Estudio%20del%20da%C3%B1o%20por%20humedad%20en%20mezclas%20bituminosas%20fabricadas%20con%20%C3%A1ridos%20sider%C3%BArgicos.pdf;sequence=1>  
<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt267.pdf>  
<http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNA/IC/article/viewFile/393/381>  
<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt246.pdf>  
[http://www.trb.org/publications/conf/reports/moisture/03\\_TOP3.pdf](http://www.trb.org/publications/conf/reports/moisture/03_TOP3.pdf)  
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/77954/TLMM1de1..pdf.txt;sequence=2>  
[http://ing.unne.edu.ar/mecap/Apuntes/Estabilidad\\_4Mod1/Estab4c3.pdf](http://ing.unne.edu.ar/mecap/Apuntes/Estabilidad_4Mod1/Estab4c3.pdf)  
<http://www.elcomercio.com/actualidad/quito-calles-avenidas-baches-epmmop.html>  
<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/3027/4461>

### Instances where selected sources appear:

29

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios y a mi familia, por su apoyo incondicional, además a todos los que de una u otra forma me han ayudaron a lo largo de todos estos años de universidad y mi estancia en Guayaquil.

Debo agradecer de manera especial al Dr. Rolando Vila, por su tiempo, dedicación y paciencia en el desarrollo de este trabajo además al Ing. José Jaramillo cuyos aportes han sido invaluable.

**Dennis Garcés Andrade**

## **DEDICATORIA**

Dedicado especialmente a mi abuelo, Vicente Andrade Lara, porque ha sido una de las personas más honestas, respetuosas y ejemplares para sus hijas, nietos y bisnietos.

**Dennis Garcés Andrade**

# ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 Antecedentes.....	19
1.2 Estudios previos .....	20
1.3 Importancia y justificación.....	21
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo general .....	22
1.4.2 Objetivos específicos .....	23
1.5 Alcance .....	23
CAPÍTULO 2.- INCIDENCIA DE LA HUMEDAD EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	25
2.1 Criterios generales sobre mezclas asfálticas.....	25
2.1.1 Generalidades .....	25
2.1.2 Parámetros volumétricos.....	26
2.1.3 Parámetros resistentes .....	38
2.2 Daño por humedad .....	39
2.2.1 Generalidades .....	39
2.2.2 Mecanismos de falla asociados al daño por agua.....	42
2.3 Estudio experimental programado para evaluar daño por agua .....	47
2.3.1 Metodología de trabajo.....	47
2.4 Ensayos a realizarse.....	53
2.4.1 Ensayos convencionales recomendados por el MTOP .....	53
2.4.2 Ensayos propuestos en el laboratorio .....	58

CAPÍTULO 3.- RESULTADOS OBTENIDOS .....	68
3.1 Pruebas convencionales recomendadas por el MTOP .....	68
3.1.1 Prueba de agua hirviendo (Boiling test) .....	68
3.1.2 .Resultados de tracción indirecta .....	70
3.1.3 Resultados de estabilidad Marshall.....	76
3.2 Resultados de los ensayos propuestos en el laboratorio.....	82
3.2.1 Resultados de módulo de rigidez .....	82
3.3 Resultados de las pruebas de fatiga.....	85
3.4 Resultados de la deformación bajo compresión cíclica (Creep) .....	94
CAPÍTULO 4.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	98
4.1 Análisis de los resultados de las pruebas convencionales recomendadas por el MTOP .....	98
4.1.1 Análisis de los resultados de la prueba de Agua Hirviendo (Boiling Test) .....	98
4.1.2 Análisis de los resultados de tracción indirecta .....	99
4.1.3 Análisis de los resultados de estabilidad Marshall .....	100
4.2 Análisis de los resultados de los ensayos propuestos en el laboratorio	102
4.2.1 Análisis de los resultados de módulo de rigidez.....	102
4.2.2 Análisis de los resultados de las pruebas de fatiga.....	104
4.2.3 Análisis de los resultados de la deformación bajo compresión cíclica (Creep).....	107
CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES .....	109
CAPÍTULO 6.- RECOMENDACIONES.....	111
CAPÍTULO 7.- BIBLIOGRAFÍA.....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. El pavimento de la av. Cardenal de la Torre, sur de Quito, tiene fisuras y hueco.....	22
Figura 1.2. Peladura en Capa Asfáltica .....	24
Figura 2.1. Ilustración de los parámetros de diseño volumétricos .....	26
Figura 2.2. Granulometría de la planta A.....	33
Figura 2.3. Granulometría de la planta B.....	34
Figura 2.4. Granulometría de la planta C.....	34
Figura 2.5. Fallas en la adherencia entre el agregado y asfalto.....	40
Figura 2.6. Pérdida de cohesión del mástico asfáltico .....	40
Figura 2.7. Degradación del agregado mineral.....	41
Figura 2.8. Desprendimiento en pavimento .....	43
Figura 2.9. Distribución de briquetas por planta.....	49
Figura 2.10. Distribución de briquetas .....	50
Figura 2.11. Balanza digital del laboratorio de la UCSG.....	51
Figura 2.12. Picnómetro y bomba de vacíos.....	51
Figura 2.13. Baño maría del laboratorio de carreteras de la UCSG.....	52
Figura 2.14. Briquetas en baño maría.....	53
Figura 2.15. Ensayo de tracción indirecta.....	56
Figura 2.16. Ensayo de estabilidad Marshall .....	57
Figura 2.17. Ensayo de módulo de rigidez con equipo NAT .....	59
Figura 2.18. Ensayo de módulo de rigidez en equipo NAT con inmersión...	60

Figura 2.19. Resultado de módulo de rigidez bajo deformación controlada. Briqueta A16 .....	61
Figura 2.20. Resultado de módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado. Briqueta A16 .....	62
Figura 2.21. Ensayo de fatiga con equipo NAT.....	63
Figura 2.22. Resultado de fatiga. Briqueta A4 .....	64
Figura 2.23. Ensayo de fatiga en equipo NAT con inmersión .....	65
Figura 2.24. Resultado de deformación bajo compresión cíclica. Briqueta B4 .....	66
Figura 2.25. Ensayo de deformación bajo compresión cíclica en equipo NAT con inmersión.....	67
Figura 3.1. Daño en agua. Planta A.....	68
Figura 3.2. Daño en agua. Planta B.....	69
Figura 3.3. Daño en agua. Planta C.....	69
Figura 3.4. Resultados Tracción Indirecta. Planta A.....	74
Figura 3.5. Resultados Tracción Indirecta. Planta B.....	74
Figura 3.6. Resultados Tracción Indirecta. Planta C.....	75
Figura 3.7. Resultados Estabilidad Marshall. Planta A .....	80
Figura 3.8. Resultados Estabilidad Marshall. Planta B .....	80
Figura 3.9. Resultados Estabilidad Marshall. Planta C .....	81
Figura 3.10. Resultados Smix. Planta A .....	83
Figura 3.11. Resultados Smix. Planta B .....	83
Figura 3.12. Resultados Smix. Planta C .....	84

Figura 3.13. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta A. .....	86
Figura 3.14. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta A. ....	87
Figura 3.15. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta B. .....	89
Figura 3.16. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta B. ....	89
Figura 3.17. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta C. .....	91
Figura 3.18. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta C.....	91
Figura 3.19 Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Briquetas con 100% de la densidad relativa – sin inmersión..	92
Figura 3.20. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Briquetas con 97% de la densidad relativa – con inmersión...	93
Figura 3.21. Resultados Creep. Planta A.....	95
Figura 3.22. Resultados Creep. Planta B.....	96
Figura 3.23. Resultados Creep. Planta C .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores RICE por planta .....	28
Tabla 2.2. Porcentaje de pasantes para capas de rodadura en los pavimentos asfálticos del Ecuador .....	33
Tabla 2.3. Contenido de asfalto. Planta A.....	37
Tabla 2.4. Contenido de asfalto. Planta B.....	37
Tabla 2.5. Contenido de asfalto. Planta C .....	38
Tabla 2.6. Clasificación del agregado mineral por planta .....	48
Tabla 3.1. Resultados de la prueba de agua hirviendo.....	70
Tabla 3.2. Resultados de ensayo de tracción indirecta de la planta A; 97% de la densidad relativa de compactación; sin inmersión.....	71
Tabla 3.3. Resultados de ensayo de tracción indirecta de la planta C; 97% de energía de compactación; con inmersión. ....	71
Tabla 3.4. Resultados de ensayos de tracción indirecta de todas las plantas, 97% de la densidad relativa de compactación; sin inmersión.....	72
Tabla 3.5. Resultados de ensayos de tracción indirecta de todas las plantas, 97% de la densidad relativa de compactación; con inmersión.....	73
Tabla 3.6. Resultados de porcentaje de resistencia retenida (TSR) por planta .....	75
Tabla 3.7. Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de la planta A; 97% de la densidad relativa de compactación; sin inmersión. ....	76
Tabla 3.8 Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de la planta A; 97% de la densidad relativa compactación; con inmersión.....	77
Tabla 3.9. Resultados de ensayos de estabilidad Marshall de todas las plantas, 97% de la densidad relativa de compactación; sin inmersión. ....	78

Tabla 3.10. Resultados de ensayos de estabilidad Marshall de todas las plantas, 97% de densidad relativa de compactación; con inmersión.....	79
Tabla 3.11. Resultados de porcentaje de estabilidad Marshall retenida por planta .....	81
Tabla 3.12. Resultados de los ensayos de módulo de rigidez .....	82
Tabla 3.13. Resumen de las afectaciones al módulo de acuerdo a la compactación y a la inmersión.....	84
Tabla 3.14. Resultados de ensayo de fatiga planta A.....	85
Tabla 3.15. Resultados de ensayo de fatiga planta B.....	87
Tabla 3.16. Resultados de ensayo de fatiga planta C.....	90
Tabla 3.17. Resultados de los ensayos de deformación bajo compresión cíclica.....	94
Tabla 3.18. Resumen de las afectaciones al Creep de acuerdo a la compactación y a la inmersión.....	97
Tabla 3.19. Resumen de todos los resultados obtenidos en los ensayos....	97

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tablas de densidades y porcentaje de vacíos por planta. ....	115
---	-----

## RESUMEN

En este estudio se presenta la ejecución de una evaluación del daño por humedad en tres mezclas asfálticas provenientes de la región Sierra del Ecuador. Las plantas utilizan agregados con diferentes composiciones mineralógicas y diseños aprobados. Con las mezclas obtenidas se elaboraron briquetas con 100% y 97% de densidad relativa de compactación, las cuales se analizarán con y sin inmersión en agua. El objetivo general del estudio es la evaluación del daño en agua empleando pruebas convencionales (agua hirviendo, tracción indirecta y estabilidad Marshall), y pruebas de desempeño con equipo NAT (módulo de rigidez, fatiga y creep).

Los resultados principales de este estudio son: en las pruebas de agua hirviendo solo en la planta C se presenta evidencias de peladura. En las pruebas de resistencia a la tracción indirecta retenida solo la planta C no sobrepasa el 80% exigido, aunque la planta A presenta un resultado muy aproximado (79,2%) al exigido. En las pruebas de estabilidad Marshall retenida solo la planta C presenta un resultado inferior al (80%) valor tomado como referencia. Las pruebas de desempeño parecen ser viables para evaluar el daño en agua, el mejor comportamiento empleando la prueba de módulo de rigidez lo obtuvo la planta B y el peor la planta C. Un comportamiento similar se obtiene en la prueba creep. Sin embargo, el mejor comportamiento empleando la prueba de fatiga lo muestra la planta C y el peor la planta A.

**Palabras Claves:** daño en agua, tracción indirecta, estabilidad Marshall, Equipo NAT, módulo de rigidez, fatiga.

## ABSTRACT

In this study the execution of an assessment of moisture damage occurs in three asphalt mixtures from the Sierra region of Ecuador. Plants use aggregates with different mineralogical compositions and approved designs. With the mixtures obtained briquettes were made with 100% and 97% relative packing density, which is analyzed with and without immersion in water. The overall objective of the study is the assessment of damages in water using conventional tests (boiling water, indirect traction and stability Marshall), and equipment performance testing with NAT (modulus, fatigue and creep).

The main results of this study are: in boiling water tests only at C peeling evidence is presented. In tests of indirect tensile strength retained only the C plant does not exceed 80% required, although the plant A has a very approximate result (79.2%) than required. The retained Marshall stability tests only C plant has a lower result at (80%) used as a reference value. Performance tests appear to be feasible to assess the damage in water, the best performance test using modulus was obtained by the plant B and C. worst plant A similar behavior is obtained in the creep test. However, the best performance using the fatigue test plant C shows the worst plant and A.

**Keywords:** water damage, indirect tensile, Marshall, NAT equipment, stiffness modulus, fatigue.

## **CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

La Red Vial Estatal está constituida por todas las vías administradas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas como única entidad responsable del manejo y control de aproximadamente 9660 km de carreteras (incluyendo vías primarias y secundarias), en las que más del 80% están constituidas por pavimentos flexibles. Los diseños de mezclas asfálticas a nivel nacional están enmarcados en los criterios del método Marshall (Asphalt Institute, 1997), que también es el punto de partida para los controles de calidad rutinarios.

Cabe destacar que en la región sierra el patrón de las precipitaciones no está tan bien delimitado como en la costa. A menudo las mañanas son soleadas mientras que en la tarde el cielo se cubre de nubes y las lluvias pueden aparecer con frecuencia. Por ejemplo, en Quito la distribución de lluvias oscila entre 75 y 150 mm por mes, con la excepción de junio, julio y agosto en los cuales es menor. A pesar de que se elaboran diseños y se realizan los controles rutinarios en las mezclas asfálticas, es común encontrarnos con pavimentos muy deteriorados al poco tiempo de su construcción, lo que muestra poca durabilidad de las vías de nuestro país. La usual estabilidad Marshall es un parámetro resistente para considerar las deformaciones plásticas, en cuanto a las pruebas para el control de fisuras y del efecto producido por el agua se considera que nuestras especificaciones son aún insuficientes.

La evaluación de la incidencia de la humedad se lo realiza de dos maneras: la primera una inspección visual de los desprendimientos superficiales del asfalto en una mezcla colocada en agua hirviendo (ensayo de escasa exactitud); y la segunda calculando la resistencia a la tracción indirecta retenida en briquetas luego de un proceso de inmersión en agua, procedimiento vinculado al fallo por agrietamiento. (MTO, 2002).

## **1.2 Estudios previos**

De acuerdo a estudios internacionales el efecto del agua influye al deterioro de los pavimentos asfálticos. En el Ecuador son escasos los estudios respecto a este tema.

Un factor importante a considerar es la calidad de los agregados que componen la mezcla asfáltica, en donde sus características inciden directamente en la mayor o menor adherencia con el asfalto. Sin embargo en el Ecuador no existe un ensayo estandarizado para estudiar la adherencia agregado-asfalto, y de hecho, no se considera en la práctica que exista un control riguroso y sistemático de este tema.

Este trabajo de titulación está orientado dentro de un proyecto de investigación que se realiza en el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil y su objetivo es establecer nuevas exigencias a las mezclas asfálticas fundamentadas en pruebas de desempeño considerando las distintas regiones climáticas del país.

En este caso en particular se estudiarán mezclas asfálticas representativas de la región Sierra considerando diferentes tipos de agregados minerales.

Según algunos autores (Tarrer & Wagh, 1991), los mecanismos de falla por humedad más característicos son: el desprendimiento, el desplazamiento, la emulsificación espontánea y la socavación hidráulica. Otros mecanismos son la presión de poros, que pudiera incidir también en el desvestimiento, y los efectos ambientales; los cuales provocan el desprendimiento de los agregados en la mezcla asfáltica y la aparición de baches en las vías.

### **1.3 Importancia y justificación**

En la región sierra, en la cual la estación lluviosa es casi permanente, la magnitud de los daños por humedad es significativa y los trabajos de mantenimiento y rehabilitación son considerables cada año. El daño producido en las calzadas afecta proporcionalmente a los usuarios que la transitan, induciendo daños en los vehículos y aumentando los tiempos de viaje. Ver Figura 1.1.

Se debe evaluar el funcionamiento del sistema ligante asfáltico – agregado mineral. De hecho existen estándares de calidad para el asfalto y para el agregado mineral por separado, siendo favorable analizar los diferentes comportamientos de una mezcla (fatiga, deformaciones plásticas), variando la calidad del agregado mineral y utilizando diferentes condiciones de trabajo con y sin inmersión. En los últimos 10 años es que se está tratando este asunto con más profundidad a nivel internacional.



**Figura 1.1. El pavimento de la av. Cardenal de la Torre, sur de Quito, tiene fisuras y huecos.**

**Fuente:** (El Comercio, 2006)

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar el daño por humedad mediante pruebas convencionales de tracción indirecta y pruebas dinámicas de módulo de rigidez, creep y fatiga, en briquetas de mezclas asfálticas densas provenientes de tres plantas de la región sierra y producidas con agregados minerales de diferentes canteras más el asfalto AC-20 de la refinería de Esmeraldas.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Preparar las briquetas correspondientes a cada planta.
- Determinar los parámetros volumétricos y resistentes convencionales de las mezclas de plantas de acuerdo a las normativas vigentes.
- Determinar la resistencia retenida por acción del agua de acuerdo a la normativa ASTM.
- Realizar las pruebas dinámicas de acuerdo a las normativas CEN en briquetas secas y luego del proceso de inmersión en agua.
- Analizar los resultados obtenidos de acuerdo a criterios estadísticos

#### **1.5 Alcance**

Este trabajo está enmarcado dentro de un proyecto de investigación que realiza el Laboratorio de Carreteras del IIFIUC para evaluar el nivel de daño ante la acción del agua en diferentes mezclas asfálticas calientes producidas en el Ecuador, mediante pruebas convencionales, de desempeño y un procedimiento experimental nuevo con pruebas de corte, que hace énfasis en la incidencia de la adherencia correspondiente al sistema particular “agregado mineral-asfalto”, para formular recomendaciones de orden teórico-práctico. En este caso se estudiará el comportamiento ante el agua de mezclas provenientes de 3 plantas de la región sierra.

En las mezclas asfálticas el daño por humedad se define como la pérdida de rigidez o resistencia causada por la exposición a la humedad bajo cargas mecánicas, lo que puede acelerar varios tipos de daños en las capas asfálticas, como son los desprendimientos de agregados (peladuras), fisuras y baches.

Se considera que un estudio que permita el conocimiento de los mecanismos de fallo de las mezclas, considerando agregados de diferentes canteras y nuevas tecnologías para las pruebas, sería de gran importancia para minimizar los daños por el agua y mejorar la durabilidad de los pavimentos flexibles.



**Figura 1.2. Peladura en capa asfáltica**

**Fuente:** (Autor)

## **CAPÍTULO 2.- INCIDENCIA DE LA HUMEDAD EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.1 Criterios generales sobre mezclas asfálticas**

#### **2.1.1 Generalidades**

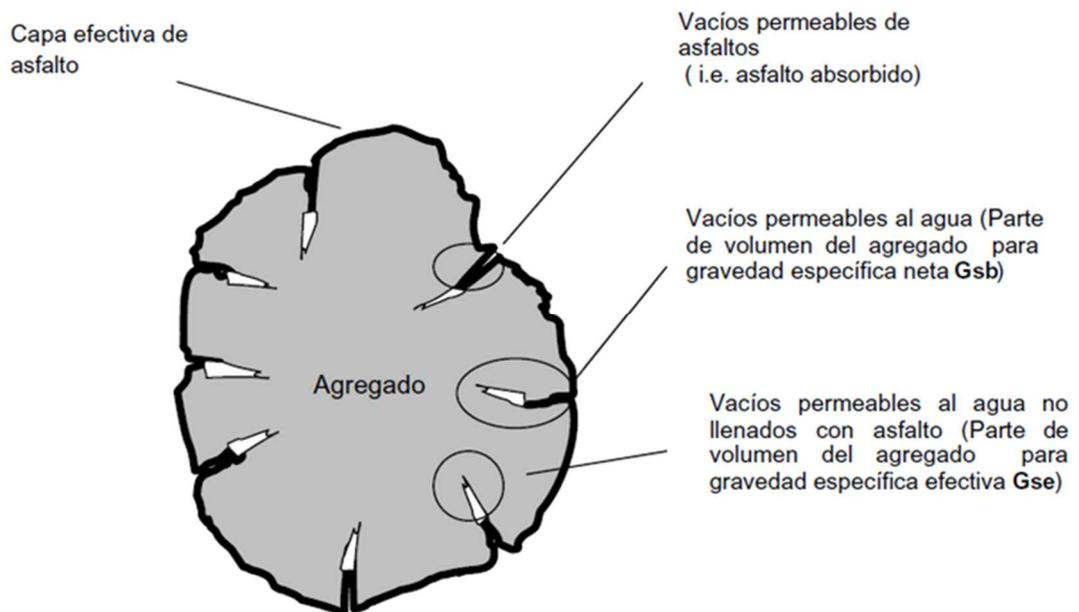
En una mezcla asfáltica, también conocidas como aglomerados, el asfalto (ligante hidrocarbonado) y los agregados pétreos son combinados en proporciones exactas: Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado. Existen varios métodos de diseño utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla. Ellos son el método Marshall, método Hveem, método SUPERPAVE, entre otros. En el presente estudio sólo trataremos el método Marshall para la preparación de briquetas debido que es el método más utilizado en el Ecuador.

Cabe señalar, que el asfalto colocado en nuestras plantas es del tipo AC-20 de acuerdo a la normativa ASTM D-3381, encontrándose el porcentaje de asfalto que se utiliza en las mezclas entre el 5,5 y el 6,5%.

Es importante acotar, que para el presente trabajo no se realizó ningún diseño de mezcla, dado que este estudio se rige en mezclas con diseños aprobados y producidas por importantes plantas de la región sierra.

## 2.1.2 Parámetros volumétricos

Para cumplir con un control de calidad rutinario a las mezclas producidas en planta, se debe determinar los parámetros volumétricos, dado que se relacionan con: la estructura, compactación y su potencial funcionamiento. El punto de partida de estos análisis es la estructura de la piedra y la forma de interactuar esta con el asfalto. Ver Figura 2.1.



**Figura 2.1. Ilustración de los parámetros de diseño volumétricos**

**Fuentes:** (Garnica, Delgado, Gómez, Alonso, & Alonso, 2004)

### 2.1.2.1 Gravedad específica bruta "bulk" ( $G_{mb}$ )

Es la relación entre el peso seco de una unidad de volumen de mezcla asfáltica en caliente compactada (incluyendo vacíos de aire), y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. El procedimiento de ensayo para calcular este parámetro consta en la norma AASHTO T166.

Para que una mezcla en un pavimento terminado llegue a un alto rendimiento es necesario alcanzar un elevado  $G_{mb}$ . El resultado obtenido en el laboratorio se lo considera como una densidad de referencia, y es empleada como guía para verificar si la densidad de las capas asfálticas compactadas es óptima. (Asphalt Institute, 1992) ; (Araiza Armenta, 2002)

✓ **Resumen del procedimiento para su determinación según ASTM D2726 o AASHTO T 166:**

- a) Pesar la briqueta empleando una balanza calibrada, para determinar el peso seco.
- b) Inmediatamente, se pesa la briqueta mientras se encuentra sumergida en un reservorio que contiene agua a 25°C para obtener el peso en agua.
- c) Finalmente, se seca superficialmente la briqueta a penas ésta se retirada del reservorio con agua, para que la misma pueda ser pesada en la balanza, para obtener el peso superficialmente seco.

✓ **Fórmula empleada para su cálculo:**

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

En donde:

A= masa de la muestra en el aire (gr)

B= masa de la muestra saturada superficialmente seca en el aire (gr)

C= masa de la muestra en agua (gr)

**Fuente:** (Asphalt Institute, 1997).

### 2.1.2.2 Densidad máxima teórica (Gmm)

Es la relación entre el peso seco de una unidad de volumen de mezcla asfáltica suelta (sin incluir vacíos de aire), y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. El procedimiento de ensayo para calcular este parámetro consta en la norma AASHTO T209. También se llama gravedad específica RICE, en reconocimiento al investigador James Rice, quien desarrolló el método de prueba.

Para encontrar la densidad o gravedad específica máxima teoría se utiliza el RICE, en la Tabla 2.1 muestran los valores obtenidos por cada planta.

**Tabla 2.1. Valores RICE por planta**

PLANTA	RICE
A	2,392
B	2,242
C	2,237

**Fuente:** Autor

#### ✓ Resumen del procedimiento para su determinación según AASHTO T 209:

- a) Se apartan las partículas de la muestra de mezcla a mano, pero siendo muy cautos para no fracturar las partículas minerales.
- b) Se enfría a 25°C la muestra, es decir, se la lleva a temperatura ambiente, y se pesa. Se designa el peso neto de mezcla suelta como A. Se agrega agua a 25°C hasta cubrir completamente la muestra y se tapa el picnómetro.

c) Se transporta el picnómetro que contiene al agua y a la muestra, hacia el dispositivo de vibración mecánica. En este mecanismo se eliminará el aire que se encuentra dentro de la muestra, incrementando paulatinamente la presión de vacíos hasta que el manómetro marque 4 kPa de presión, todo esto en un lapso de 15 minutos.

✓ **Fórmula empleada para su cálculo:**

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

En donde:

A = Peso Picnómetro + Agua (gr)

B = Peso Picnómetro + Agua + Material (gr)

C = Peso de la Mezcla Suelta (gr)

**Fuente:** (Asphalt Institute, 1997).

### **2.1.2.3 Porcentaje de vacíos con aire (Va)**

Es el volumen de aire (Va) en la muestra compactada, expresado siempre como porcentaje del volumen total de la mezcla.

El aire que se halla entre las partículas del agregado revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas conserven algún porcentaje de vacíos para poder admitir una compactación adicional y proporcionar espacios para acomodar el asfalto ante las variaciones de temperatura. La durabilidad del pavimento asfáltico está en función del contenido de vacíos, mientras sea menor la cantidad de vacíos, la

permeabilidad de la mezcla asfáltica también será menor. Por otra parte, un mayor contenido de vacíos puede ser perjudicial ya que pudiera permitir la entrada de agua y aire a la mezcla, lo que aceleraría su deterioro (Asphalt Institute, 1992).

Es notable la correlación de la densidad y el contenido de vacíos. En cuanto más elevada resulte la densidad el porcentaje de vacíos en la mezcla será inferior e inversamente. De hecho las exigencias de compactación en obra indican alcanzar al menos el 97% de densidad de laboratorio correspondiente a la mezcla diseñada con 4% de vacíos. (Asphalt Institute, 1992). Se obtiene este valor mediante la fórmula:

✓ **Fórmula empleada para el cálculo:**

$$V_a = 100 * \left( \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right)$$

En donde:

V<sub>a</sub>= vacíos de aire en la mezcla compactada, en porcentaje del volumen total.

G<sub>mm</sub> = Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.

G<sub>mb</sub> = Gravedad específica de una mezcla compactada.

**Fuente:** (Asphalt Institute, 1997).

#### **2.1.2.4 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)**

Es el espacio intergranular ocupado por la suma del volumen del asfalto efectivo y el volumen del aire, expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. (Asphalt Institute, 1997)

El VMA se calcula en base a la gravedad específica bruta del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen bruto de la mezcla de pavimentación compactada. Por lo tanto, el VMA se puede calcular restando el volumen del agregado determinado por su peso específico bruto, del volumen bruto de la mezcla de pavimentación compactada. (Asphalt Institute, 1997)

A medida que el VMA sea más elevado, el espacio libre para las capas de recubrimiento de asfalto será mayor. Los valores mínimos para VMA se relacionan con el hecho de que mientras mayor espesor tenga la capa de asfalto que recubre las partículas de agregado, la mezcla tendrá un mejor desempeño. Se obtiene este valor mediante la fórmula:

✓ **Fórmula empleada para el cálculo:**

$$VMA = 100 - \left( \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \right)$$

En donde:

Gsb: Gravedad específica bruta del agregado.

Gmb: Gravedad específica bruta de las briquetas compactadas.

Ps: Porcentaje o contenido de agregados.

**Fuente:** (Asphalt Institute, 1997).

#### **2.1.2.5 Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)**

Se define como el porcentaje de los VMA que contienen asfalto. Se expresa como un porcentaje de los vacíos en el agregado mineral (VAM). (Asphalt Institute, 1997).

✓ **Fórmula empleada para el cálculo:**

$$VFA = \frac{100 * (VMA - V_a)}{VMA}$$

En donde:

VFA: Volumen llenos de asfalto, en %.

Va: Porcentaje de vacíos con aire.

VMA: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

**Fuente:** (Asphalt Institute, 1997).

#### **2.1.2.6 Granulometría combinada**

Es la distribución final por tamaños de las partículas de los diferentes agregados ya mezclados. Para conocer la distribución de tamaños de las partículas que componen una muestra de agregado se separan estos mediante tamices.

La especificación: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1, que es la que se maneja generalmente para capas de rodadura en los pavimentos flexibles del Ecuador, se muestra en Tabla 2.2. En la mencionada especificación se pueden hallar los porcentajes de pasantes acumulados.

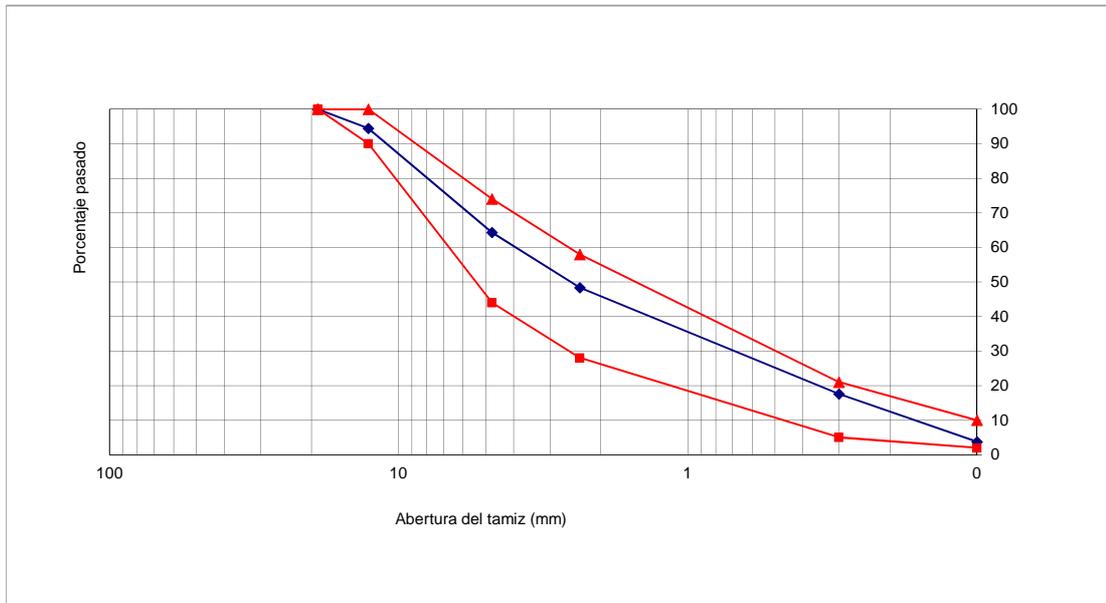
**Tabla 2.2. Porcentaje de pasantes para capas de rodadura en los pavimentos asfálticos del Ecuador**

**Tabla 405-5.1.**

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80	--	90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

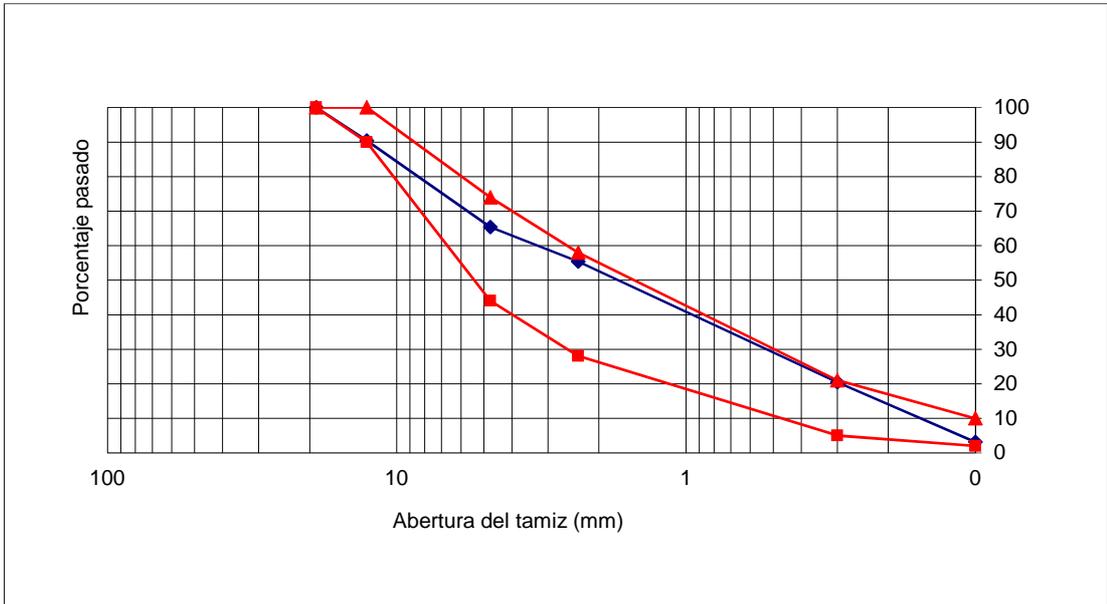
**Fuente:** (MTO, 2002)

Desde la Figura 2.2 hasta la Figura 2.4 pueden observarse las granulometrías combinadas correspondientes a cada planta estudiada.



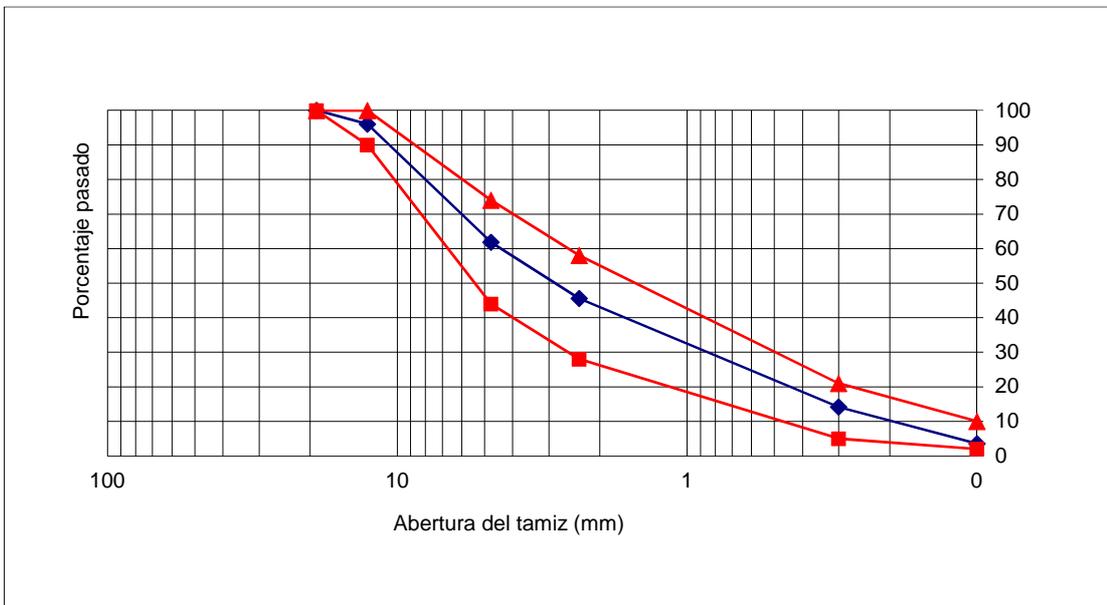
**Figura 2.2. Granulometría de la planta A**

**Fuente:** Autor



**Figura 2.3. Granulometría de la planta B**

**Fuente:** Autor



**Figura 2.4. Granulometría de la planta C**

**Fuente:** Autor

### **2.1.2.7 Porcentaje de asfalto (Pb)**

Se define como la cantidad total de aglutinante en una mezcla asfáltica expresada como un porcentaje de la masa total mezcla. También se puede expresar como porcentaje del agregado de la masa. (Haddock, 2011)

Es importante recalcar que el porcentaje de asfalto se encuentra relacionado con la granulometría y la absorción del agregado. Dado que, mientras más cantidad de finos tenga la granulometría empleada se tendrá superior área superficial total, lo que implica la necesidad de más cantidad de asfalto para poder recubrirlos, además del resto de las fracciones. Las mezclas con agregados gruesos requieren menos porcentaje de asfalto puesto que ellas tienen menor área superficial total.

La capacidad de absorción del agregado, es decir cuánto asfalto puede absorber o retener dicho agregado mineral que compone la mezcla, también es un factor a considerar. Convergen dos aspectos relacionados con esta propiedad: el contenido total de asfalto y el contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es el porcentaje de asfalto que necesita una mezcla para llegar a las condiciones demandadas por el diseño. Mientras que el contenido efectivo de asfalto se lo considera como el volumen de asfalto que no ha sido absorbido por el agregado, también conocido como la cuantía de asfalto que forma la capa que recubre la superficie de los agregados. Para obtener el contenido efectivo de asfalto debe restarse la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. (Asphalt Institute, 1997)

Es importante agregar, que el contenido de asfalto se calcula mediante el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 164 y en la ASTM D2127. El porcentaje de asfalto en el laboratorio se determina por el método de la centrífuga. En este método se coloca una muestra de mezcla asfáltica dentro del equipo de centrifugado y esta muestra se reviste usualmente con tricloroetileno y se tapa el equipo. A continuación se inicia el proceso de centrifugado aumentando progresivamente la velocidad de los giros hasta un máximo de 3600 rpm, luego de haber fluido el solvente con el asfalto disuelto se repite el proceso añadiendo más tricloroetileno. Esta secuencia se repite hasta que el líquido salga lo más claro posible.

✓ **Fórmula empleada para el cálculo:**

$$P_b = \left[ \frac{(W1 - W2) - (W3 + W4)}{(W1 - W2)} \right] * 100$$

En donde:

W1: Peso de la muestra de mezcla asfáltica (gr)

W2: Contenido de humedad (gr)

W3: Peso del agregado, incluyendo filtro (gr)

W4: Peso de material mineral en extracto (gr)

**Fuente:** (Asphalt Institute, 1997)

Se muestran desde la Tabla 2.3 hasta la Tabla 2.5 el porcentaje de asfalto de cada planta estudiada en este trabajo.

**Tabla 2.3. Contenido de asfalto. Planta A**

<b>EXTRACCION DE ASFALTO</b>	
W1=PESO ANTES DE LA EXTRACCION	1000,0
PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCION	9,0
W2= PESO DESPUES DE LA EXTRACCION	930,0
PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCION	11,0
W3=DIFERENCIA DEL FILTRO	2,0
W4= VOLUMEN DE DISOLVENTE EMPLEADO(cc)x0,001	3,0
<b>% ASFALTO</b> $\frac{W1 - (W2 + W3 + W4)}{W1} \times 100$	6,50

**Fuente:** Autor

**Tabla 2.4. Contenido de asfalto. Planta B**

<b>EXTRACCION DE ASFALTO</b>	
W1=PESO ANTES DE LA EXTRACCION	1000,0
PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCION	9,1
W2= PESO DESPUES DE LA EXTRACCION	935,0
PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCION	10,2
W3=DIFERENCIA DEL FILTRO	1,1
W4= VOLUMEN DE DISOLVENTE EMPLEADO(cc)x0,001	3,5
<b>% ASFALTO</b> $\frac{W1 - (W2 + W3 + W4)}{W1} \times 100$	6,04

**Fuente:** Autor

**Tabla 2.5. Contenido de asfalto. Planta C**

<b>EXTRACCION DE ASFALTO</b>	
W1=PESO ANTES DE LA EXTRACCION	1000,0
PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCION	15,9
W2= PESO DESPUES DE LA EXTRACCION	942,4
PESO DEL FILTRO DESPUES DE LA EXTRACCION	17,2
W3=DIFERENCIA DEL FILTRO	1,3
W4= VOLUMEN DE DISOLVENTE EMPLEADO(cc)x0,001	3,5
<b>% ASFALTO</b>	$\frac{W1 - (W2 + W3 + W4)}{W1} \times 100$
	5,28

**Fuente:** Autor

### **2.1.3 Parámetros resistentes**

#### **2.1.3.1 Estabilidad Marshall**

Es la capacidad de poder soportar el paso de las cargas y de resistir tensiones, las cuales se producen por deformaciones tolerables. Se suelen comprobar esta propiedad mediante ensayos empíricos, entre los principales se encuentran: Marshall, Hveem y Hubbard-Field. La estabilidad Marshall y el valor del flujo asociado a esta (ASTM D 1559) son los más empleados a nivel internacional.

El contenido del cemento asfáltico es uno de los elementos que influyen en la estabilidad de la mezcla asfáltica, aunque hay otros factores que influyen como la angularidad y caras fracturadas del árido, tamaño, etc. (Luis Naveda, 2014)

Para obtener el valor de la estabilidad se aplica la carga con la prensa Marshall (5 cm/min), a través de cabezales estándares que aprisionan la briqueta a ensayar. Esta briqueta debe ser previamente calentada a 60°C en un baño de María durante 20 a 30 minutos. La carga máxima de rotura corregida en función del espesor de la briqueta es el valor de la Estabilidad Marshall. (Asphalt Institute, 1992) ; (Araiza Armenta, 2002). Suele determinarse además en esta prueba un valor de flujo o fluencia que es la variación del diámetro de la briqueta desde la carga cero hasta la de rotura.

## **2.2 Daño por humedad**

### **2.2.1 Generalidades**

El efecto del agua en mezclas asfálticas genera la disminución de la rigidez y de la resistencia, provocada por fuerzas mecánicas en condiciones de humedad. El daño de las mezclas asfálticas debido a aspectos relacionados con el agua puede enfocarse en tres direcciones diferentes (Velasquez, Moraes, & Bahia, 2011)

#### *1. Fallas de adherencia*

Pérdida del poder de adherencia debido a una disolución de enlaces entre moléculas de diferentes fases, como se observa en la Figura 2.5.



**Figura 2.5. Fallas en la adherencia entre el agregado y asfalto.**

**Fuente:** (Gutierrez & Ramirez, 2008)

*2. Fallas de cohesión (rotura de la película de asfalto)*

Perdida de cohesión debido a una ruptura de enlaces entre moléculas en la película de asfalto, como se evidencia en la Figura 2.6.



**Figura 2.6. Pérdida de cohesión del mástico asfáltico**

**Fuente:** (Gutierrez & Ramirez, 2008)

*3. Degradación del agregado mineral*

Es la disminución de resistencia de los agregados minerales debido a procesos químicos y mecánicos. Los procesos químicos influyen a la

descomposición de ciertos minerales propios que conforman los agregados, mientras que los mecánicos se producen por la desintegración del agregado, como se muestra en la Figura 2.7. (Tamayo, Gutierrez , & Cabrera, 1983)



**Figura 2.7. Degradación del agregado mineral**

**Fuente:** (Gutierrez & Ramirez, 2008)

El daño por agua sobre el desempeño del pavimento puede ser el resultado de más de uno de estos fallos.

Existen factores independientes del agua que contribuyen al deterioro de las mezclas asfálticas como la temperatura y el aire. Se considera que la causa principal del daño es la carga vehicular cuando se encuentra condiciones ambientales moderadas y una buena calidad en los materiales. Las grandes cargas vehiculares generan desmoronamiento, ahuellamiento y fatiga en los pavimentos. Tanto el tráfico como la presencia de agua conducen a la degradación en las mezclas, sin embargo es el agua el principal causante de la disminución de adherencia, lo que provoca una pérdida de resistencia en el pavimento. La falta de adherencia genera que la fuerza adhesiva de la capa asfáltica falle. ( (Gorkem & Sengoz, 2009)

## **2.2.2 Mecanismos de falla asociados al daño por agua**

### **2.2.2.1 Stripping**

Este mecanismo denominado Stripping o desvestimiento es una falla que genera la dispersión física del cemento asfáltico y el agregado mineral por la pérdida de adherencia entre sí, causado principalmente por la acción del agua o vapor de agua. Es decir, la separación se incrementa debido a la presencia de superficies lisas de agregados y de una blanda textura. (McGennis, Kennedy, & Machemehl, 1984)

Una revisión literaria realizada por (Tarrer & Wagh, 1991) dice que no existe un mecanismo que genere stripping admitido como el origen de éste. Los mecanismos son los que se presentan a continuación:

#### **➤ Desprendimiento**

Se inicia una reducción total de la adherencia entre la película del asfalto y la superficie del agregado, como se observa en la Figura 2.8 en efecto, la teoría considera a la adherencia como un fenómeno termodinámico en la que se relaciona las tensiones superficiales de los distintos materiales inmersos en la mezcla asfáltica. El asfalto tiene una tensión superficial mayor a la del agua (Tarrer & Wagh, 1991)

En particular la teoría de la energía interfacial hace énfasis en las moléculas que se encuentran en la parte superficial de las fases y principalmente en su polaridad. El asfalto posee poca polaridad debido a su peso molecular alto al estar compuesto por hidrocarburos. Los agregados minerales, suelen presentar superficies con altas cargas eléctricas. Debido a

estas dos condiciones, la unión entre el asfalto y el agregado mineral se da de forma general por la baja fuerza de dispersión. Las moléculas de agua, a diferencia del asfalto, presentan una polaridad alta, por lo que es atraída por los agregados minerales (Tarrer & Wagh, 1991)



**Figura 2.8. Desprendimiento en pavimento**

**Fuente:** Autor

➤ **Desplazamiento**

Se define como una falla de una película de asfalto producida por la filtración de agua en la superficie del agregado. Esta falla se produce de dos maneras posibles, primero, a un escaso recubrimiento del agregado mineral y segundo, producido por la falla de la película de asfalto. De hecho los resultados de la cargas de tráfico genera una rotura de película de asfalto por lo general en las esquinas de los agregados angulares y en los bordes

terminados en punta, ya que en esta zona la película de asfalto tiende a ser delgada (Tarrer & Wagh, 1991)

Es decir, al rodear un agregado mineral con polvo, se forman poros en la película de asfalto, lo que da origen al mecanismo de desplazamiento. Otro factor que intervine es del orden químico. Cambios en el pH del agua en la superficie de los agregados minerales puede alterar el grupo polar y el estado de ionización. Dado a esta esta condición el agregado mineral atraerá más agua que asfalto para poder equilibrar las cargas, dando lugar a la división entre agregado y asfalto (Tarrer & Wagh, 1991)

#### ➤ **Emulsificación espontánea**

Es la integración del agua y asfalto, creando una emulsión invertida. El agua incorpora la fase discontinua y el asfalto la fase continua. La existencia de emulsificadores como lo son aditivos para el asfalto y las arcillas minerales desarrollan el stripping.

En otras palabras, la emulsificación espontanea sucede cuando las películas de asfalto se empapan en agua, pero depende de la presencia de aditivos y de la naturaleza del asfalto para que se dé la emulsión (Fromm, 1974).

#### ➤ **Abrasión o socavación hidráulica**

Este mecanismo pasa exclusivamente en la superficie del pavimento. Es la consecuencia de la acción ejercida por las llantas sobre el pavimento

saturado. Es decir, las llantas con la zona frontal ejercen presión dentro del pavimento y con la zona posterior se extrae agua hacia afuera del pavimento. Esto genera una aceleración en el proceso de abrasión (Tarrer & Wagh, 1991)

#### **2.2.2.2 Presión de poros**

Este efecto puede relacionarse tanto al fenómeno de “stripping” o desvestimiento, como directamente con el daño mecánico en las mezclas.

Considerando que, la presión de poros puede originar daño por la presencia de agua en mezclas asfálticas con un contenido de vacíos alto. El daño se engrandece cuando se trata de vacíos impermeables donde el agua está atrapada.

Por lo tanto concurren dos formas para que se genere presión de poros en los vacíos de las mezclas asfálticas:

- *Bombeo generado por tráfico*

El tráfico vehicular produce presión sobre los vacíos con agua puesto que, si la mezcla no está diseñada con una alta permeabilidad como es el caso de las mezclas drenantes y los diseños estructurales asociados a este tipo de mezcla, el agua atrapada en los poros soportará una alta presión que afectará la resistencia estructural de la mezcla, provocando daños mecánicos.

- *Inducción térmica*

El agua presente en los vacíos de las mezclas asfálticas, con temperaturas altas, sufre una expansión. Esta expansión con una baja

proporción de vacíos en la mezcla afecta su estructura (McGennis, Kennedy, & Machemehl, 1984).

La presión de poros es uno de los aspectos que aporta a que se genere el fenómeno “stripping”.

### **2.2.2.3 . Efectos ambientales**

El daño por agua de mezclas asfálticas causado por efectos ambientales se da por diversos aspectos acorde a la posición geográfica. Estos determinan la cantidad de humedad presente en una zona, siendo de mayor trascendencia:

#### *a) Índice de humedad Thornthwaite*

Se lo utiliza para calcular la evapotranspiración potencial. Se emplea en la ingeniería para tener una referencia del rendimiento de los pavimentos. Índices elevados indican que el suelo posee un excedente humedad, lo que indica que la humedad en el suelo dada por una precipitación es mayor que la humedad perdida por la evapotranspiración (McGennis, Kennedy, & Machemehl, 1984).

#### *b) Precipitación Anual*

Es la cantidad de agua que cae a los pavimentos flexibles cada año.

#### *c) Humedad Relativa*

Se define como la relación de la cantidad de humedad que una muestra de aire contiene a una cierta temperatura. Humedades relativas altas proporcionan una fuente de agua disponible para activar mecanismos de daño de humedad (McGennis, Kennedy, & Machemehl, 1984)

## **2.3 Estudio experimental programado para evaluar daño por agua**

### **2.3.1 Metodología de trabajo**

Para este estudio se mantuvo la misma metodología utilizada en el trabajo de titulación denominado “Estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas empleando diferentes métodos” (Hidalgo-Riera, 2016).

Se va a evaluar el daño en agua mediante pruebas convencionales de agua hirviendo, tracción indirecta, estabilidad Marshall y pruebas dinámicas de módulo de rigidez, creep y fatiga, en briquetas de mezclas asfálticas densas provenientes de tres plantas de la región. Las plantas serán denominadas por las letras A, B y C. La principal diferencia entre ellas se basa en el agregado mineral empleado en la producción, como se muestra en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6. Clasificación del agregado mineral por planta**

<b>Plantas</b>	<b>Clasificación del agregado mineral</b>
<b>A</b>	Ignimbritas (tobas duras)
<b>B</b>	Lavas andesíticas
<b>C</b>	Lavas andesíticas

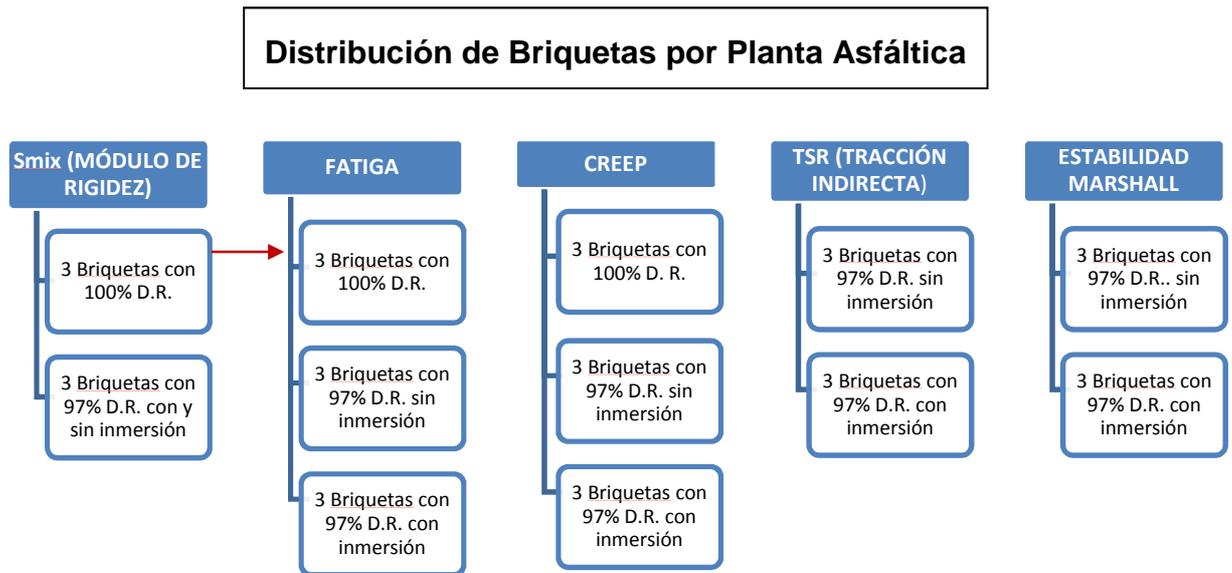
**Fuente:** Autor

➤ **Distribución de briquetas**

Las mezclas asfálticas fueron tomadas directamente de las 3 plantas estudiadas. Se empleó el método de compactación Marshall, el cual usa muestras de forma cilíndrica con un diámetro de 4" (102 mm). La altura recomendada de cada briqueta es de 2 ½" (64 mm), aunque en la práctica las alturas tuvieron alguna variación.

Para las briquetas con el 100% de densidad relativa de compactación se aplican 75 golpes con el martillo Marshall por cada cara de la briqueta. En el caso de 97% de densidad relativa de compactación el número de golpes se debe determinar con una serie de pruebas preliminares. Los valores del número de golpes para tener un 7% de vacíos variaron entre 35 y 40 golpes por cara.

Se realizaron 36 briquetas por cada planta las mismas que serán distribuidas de la siguiente manera, como se observa en la Figura 2.9.



**Figura 2.9. Distribución de briquetas por planta**

**Fuente:** Autor

Las líneas en rojo señalan las briquetas que pudieron aprovecharse en dos pruebas diferentes. Algunas briquetas se muestran en la Figura 2.10.

Se realizaron 36 briquetas de cada una de las plantas, donde 30 de las cuales se confeccionaron con el 97% de densidad relativa de compactación y 6 briquetas con 100% de densidad relativa de compactación. Considerando el trabajo con mezclas de 3 plantas se tendrá como resultado 108 briquetas en total.



**Figura 2.10. Distribución de briquetas**

**Fuente:** Autor

➤ **Metodología de saturación**

Para la saturación de las briquetas a la condición húmeda (semisaturadas con 24 horas de inmersión en agua). Se consideró para todas las pruebas realizar el procedimiento correspondiente, establecido en la norma ASTM 4867M-96.

Primero se debe determinar los parámetros volumétricos por cada briqueta mediante una balanza, como se muestra en la Figura 2.11.



**Figura 2.11. Balanza digital del laboratorio de la UCSG**

**Fuente: Autor**

Utilizando una bomba de vacíos, como se observa en la Figura 2.12, se saturan las briquetas con una presión de vacíos de aproximadamente 20 pulgadas de mercurio. El tiempo en que se aplica la presión varía de acuerdo a la mezcla. El porcentaje de saturación de las briquetas según la norma ASTM 4867M-96 debe encontrarse entre 55 – 80%.



**Figura 2.12. Picnómetro y bomba de vacíos**

**Fuente: Autor**

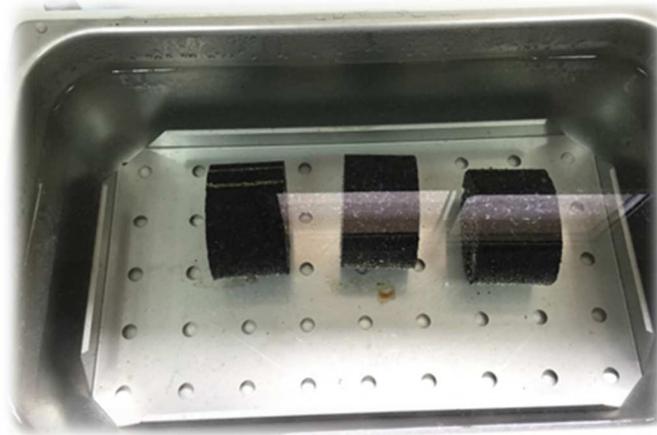
Alcanzado el porcentaje de saturación dentro del rango se ubican las briquetas en baño María por 24 horas a una temperatura de 60°C, como se evidencia en la Figura 2.13 y en la Figura 2.14.

Para ejecutar los distintos ensayos se deben mantener las briquetas a la temperatura de prueba durante dos horas. En el caso de módulo de rigidez y fatiga la temperatura es de 20°C, mientras que para el ensayo de deformación plástica (creep) la temperatura es de 40°C. Para la prueba de TSR la temperatura es de 25°C y para la estabilidad Marshall es de 60°C, por lo cual esta última no requeriría ajustes de temperatura al salir del baño María.



**Figura 2.13. Baño María del Laboratorio de Carreteras**

**Fuente:** Autor



**Figura 2.14. Briquetas en baño María**

**Fuente:** Autor

## **2.4 Ensayos a realizarse.**

### **2.4.1 Ensayos convencionales recomendados por el MTOP**

#### **I. Prueba de agua hirviendo (Boiling Test) – ASTM D 3625**

Se realiza con la finalidad de estudiar la incidencia de la humedad de un pavimento asfáltico mediante la observación del nivel de desvestimiento que se origina en una muestra de mezcla luego de ser sometida a un procedimiento de hervidura en agua destilada. Dicho procedimiento asimismo se lo utiliza para valorar el rendimiento de los aditivos anti desvestimiento incluidos en ciertas mezclas que sufren más con el agua (Kennedy, Roberts, & Anagnos, 1984)

### **Procedimiento de Ensayo ASTM D 3625.**

- Se coloca alrededor de 950 ml de agua destilada en un vaso de precipitados de 1500-2000 ml.
- Se calienta el agua para que hierva y se aproxime hasta el punto de ebullición, y a continuación se agrega la mezcla.
- Luego se lleva a la mezcla hasta el punto de ebullición y se la mantiene en el agua hirviendo durante 10 minutos.
- Posteriormente se decanta el asfalto del vaso de precipitados y se llena el mismo con agua fría y se espera hasta que llegue a temperatura ambiente manteniéndola dentro del vaso.
- A continuación se retira el agua de vaso y se esparce la mezcla sobre un papel en donde se espera hasta que la misma seque.
- Finalmente se aprecia mediante la observación, la cantidad de asfalto que ha quedado en el agregado después del proceso de hervido. El porcentaje del área visible total del agregado que conservó su recubrimiento original de asfalto está clasificado como superior o inferior a 95%.
- **Fuente:** (González, 2015); (Hicks, 1991)

### **II. Pérdida de resistencia por tracción indirecta (TSR) – ASTM D 4867 – AASHTO T 283**

El ensayo representa el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. Es un método práctico y sencillo para

caracterizar las propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción.

El comportamiento de las briquetas al estar sometido a los mencionados esfuerzos, es capturado por medidores de deformación, para posteriormente ser evaluados (Morales, 2007)

### **Procedimiento de ensayo**

- Se colocan las muestras en un baño de agua a 77 ° F (25 ° C) durante un mínimo de 2 horas.
- Se ejecuta un ensayo de tracción indirecta sobre cada muestra mediante la colocación de la muestra entre las dos placas de apoyo de la máquina de ensayo y se le aplica la carga a una velocidad constante de 2 pulgadas / minuto (50 mm / minuto).
- Se registran los valores de las cargas de rotura y se calculan los valores de la resistencia a la tracción indirecta (St).

$$St = \frac{2 * Pmax}{\pi * t * d}$$

En donde:

St= resistencia a la rotura por tracción indirecta (Kg/cm<sup>2</sup>)

Pmax= carga máxima o carga de rotura (Kg)

t= espesor de la biqueta (cm)

d= diámetro de la biqueta (cm)

**Fuente:** (Asphalt Institute, 1997)

Calcular el porcentaje de resistencia retenida (TSR) por medio de la expresión.

$$TSR = 100 * \frac{St_{con\ inmersión}}{St_{sin\ inmersión}}$$

En la Figura 2.15 se muestra un ensayo de tracción indirecta realizado para el presente trabajo.



**Figura 2.15. Ensayo de tracción indirecta**

**Fuente: Autor**

### III. Estabilidad Marshall retenida

Si bien, es cierto este ensayo no se lo utiliza para evaluar el daño por agua en el Ecuador, aún es utilizado en algunos países latinoamericanos por lo que se decidió incluirlo. Se puede observar en Figura 2.16 la prensa Marshall y diales empleados para las pruebas realizadas en este trabajo.



**Figura 2.16. Ensayo de estabilidad Marshall**

**Fuente:** Autor

Se utilizara juegos de briquetas secas y semisaturadas, utilizando para esto último un procedimiento similar al de tracción indirecta (ASTM D4867).

## **2.4.2 Ensayos propuestos en el laboratorio**

Usando el mismo proceso de saturación de la prueba ASTM 4867M-96 para TSR, se aplicará para las briquetas que se van a usar en las pruebas dinámicas de desempeño asociadas al equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester modelo NU-10). Estas pruebas son:

### **I. Módulo de rigidez**

Se puede obtener el módulo de rigidez bajo deformación controlada y bajo esfuerzo controlado. El equipo NAT aplica cargas a las muestras por medio de un sistema neumático con servo-control y se mide la fuerza aplicada por el transductor de la celda de carga. Este equipo utiliza una computadora para operar el equipo. En la Figura 2.17 se muestra un ensayo de módulo de rigidez efectuado en este trabajo.



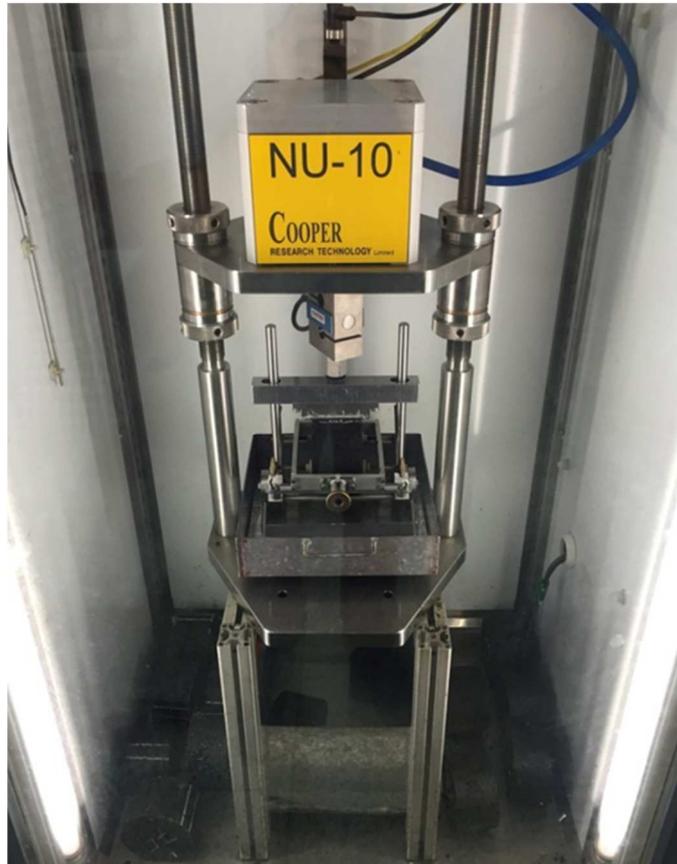
**Figura 2.17. Ensayo de módulo de rigidez con equipo NAT**

**Fuente:** Autor

✓ *Módulo de rigidez bajo deformación controlada*

El ensayo de módulo de rigidez bajo deformación controlada se lo realizó empleando un cabezal de carga de tracción indirecta. La temperatura a la cual se realizaron este ensayo fue de 20°C para condiciones seca y de semi-saturación, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y cargas haversine con intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima (tiempo de aplicación de carga) de 0,12 segundos. (Vila & García, 2015)

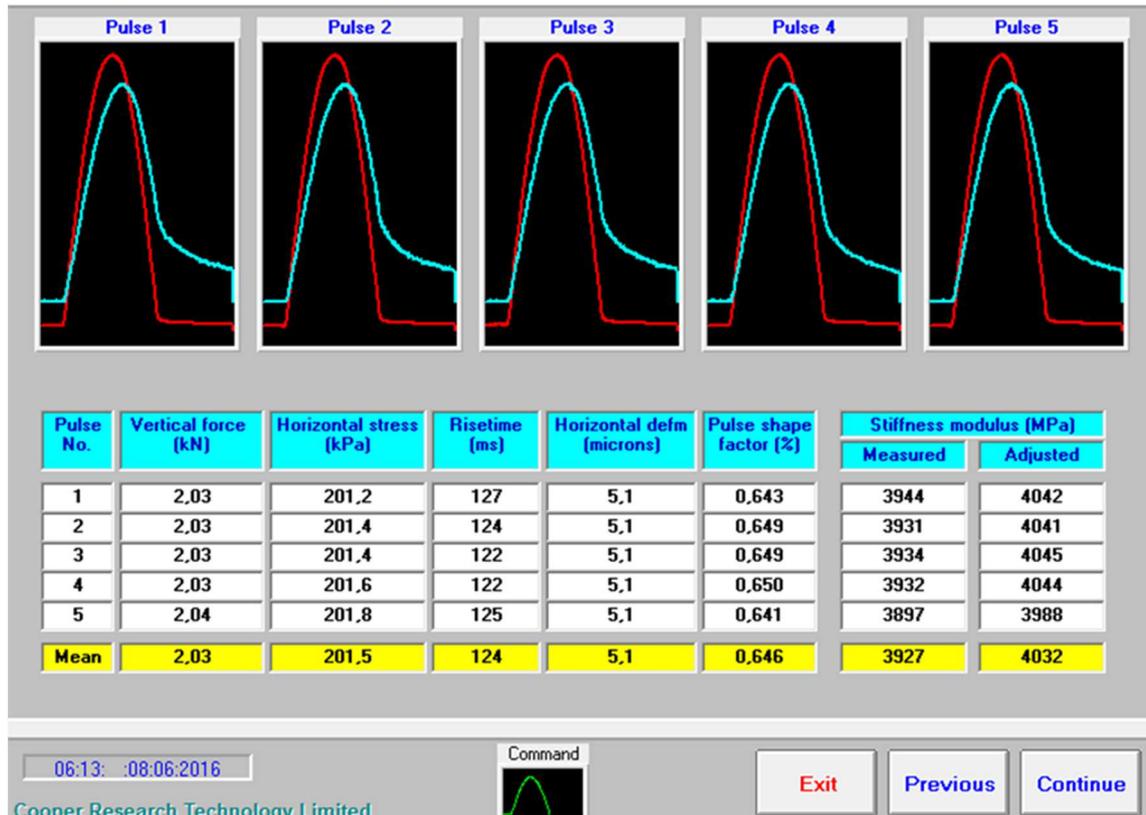
Para una medida de protección se utilizó una bandeja para evitar la caída de agua durante las pruebas realizadas con las muestras inmersas en agua.



**Figura 2.18. Ensayo de módulo de rigidez en equipo NAT con inmersión**

**Fuente: Autor**

Los resultados obtenidos del programa son como la que se muestra en la Figura 2.19 correspondiente a la briqueta No. 16 de la planta A.

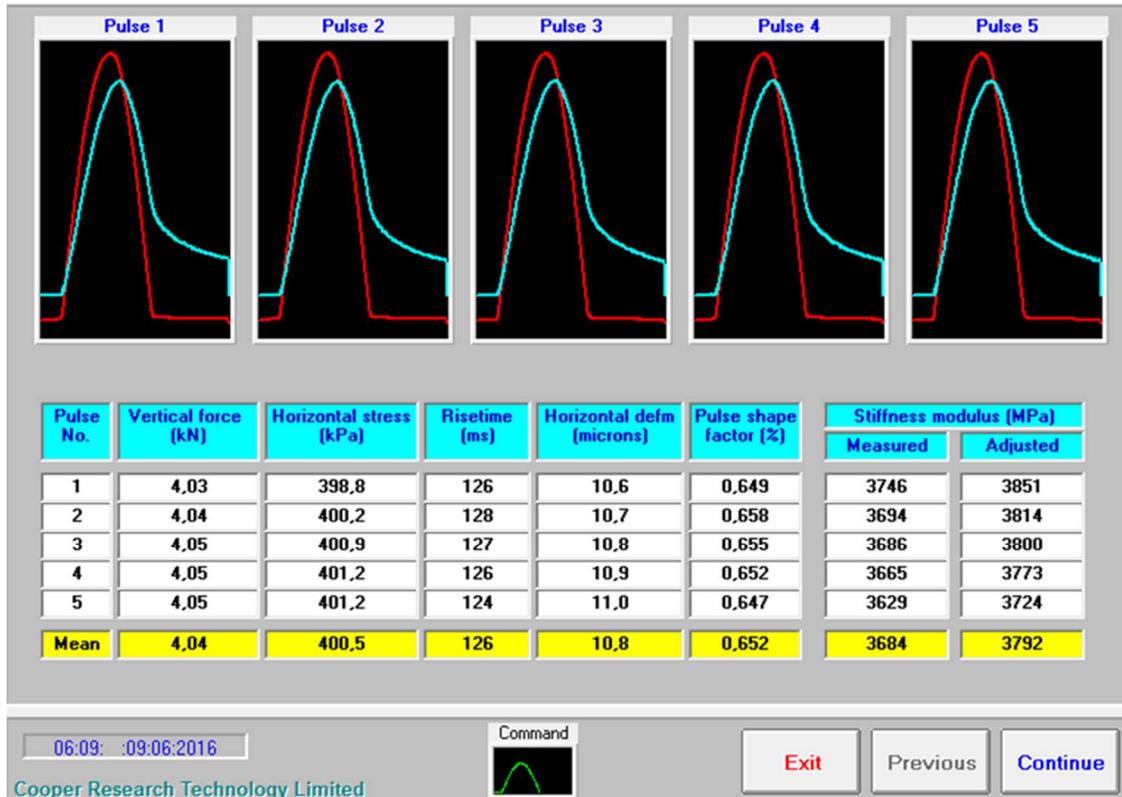


**Figura 2.19. Resultado de módulo de rigidez bajo deformación controlada. Briqueta A16**

**Fuente: Autor**

✓ *Módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado*

El proceso es similar al de deformación controlada, con la variación de que en este caso se tiene que imponer una carga al programa, la cual es la misma carga que se empleará para el ensayo de fatiga. Se puede observar en la Figura 2.20 un resultado obtenido al efectuar estos ensayos.



**Figura 2.20. Resultado de módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado. Briquea A16**

**Fuente: Autor**

## **II. Fatiga**

Se realiza empleando tensiones controladas que varían entre 100 y 500 kPa, determinándose el número de pulsos requeridos para que la muestra falle por agrietamientos o en su defecto llegue a una deformación vertical máxima de 5mm. Estos pulsos también poseen un tiempo de aplicación de carga de 0,12 segundos. La temperatura empleada para estos ensayos, tanto con y sin inmersión en agua, fue constante y de 20°C, valor usual. Se muestra en la Figura 2.21 un ensayo de fatiga realizado para la obtención de datos del presente trabajo.



**Figura 2.21. Ensayo de fatiga con equipo NAT**

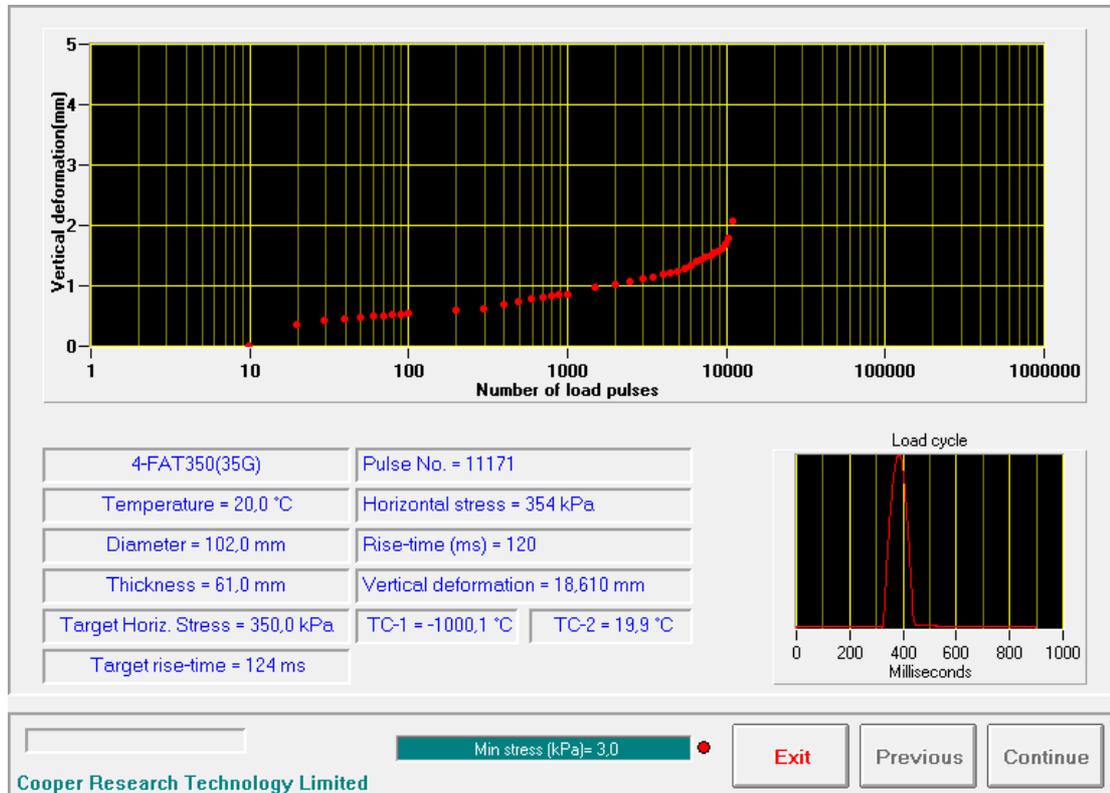
**Fuente:** Autor

El tratamiento de la prueba de fatiga comienza con la determinación del módulo de rigidez ( $S_m$ ) bajo la carga ( $\sigma$ ) en cuestión, tal como se expresó anteriormente. Considerando el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ), con un valor de 0,35, se puede calcular la deformación unitaria por tracción inicial ( $\varepsilon$ ) según la siguiente expresión (Vila & García, 2015).

$$\varepsilon = \frac{\sigma(kPa) * (1 + 3\mu)}{S_m(kPa)}$$

Los valores de  $\varepsilon$  se presentan en:  $\frac{mm}{mm} \times 10^{-6}$

Por medio de los datos obtenidos se realiza una gráfica logarítmica de Deformación contra número de repeticiones, como se presenta en la Figura 2.22.



**Figura 2.22. Resultado de fatiga. Briqueeta A4**

**Fuente:** Autor

Para el ensayo con inmersión se empleó una bandeja en la cual se mantienen las briquetas inmersas durante toda la prueba para evitar pérdida de agua, como se muestra en la Figura 2.23.



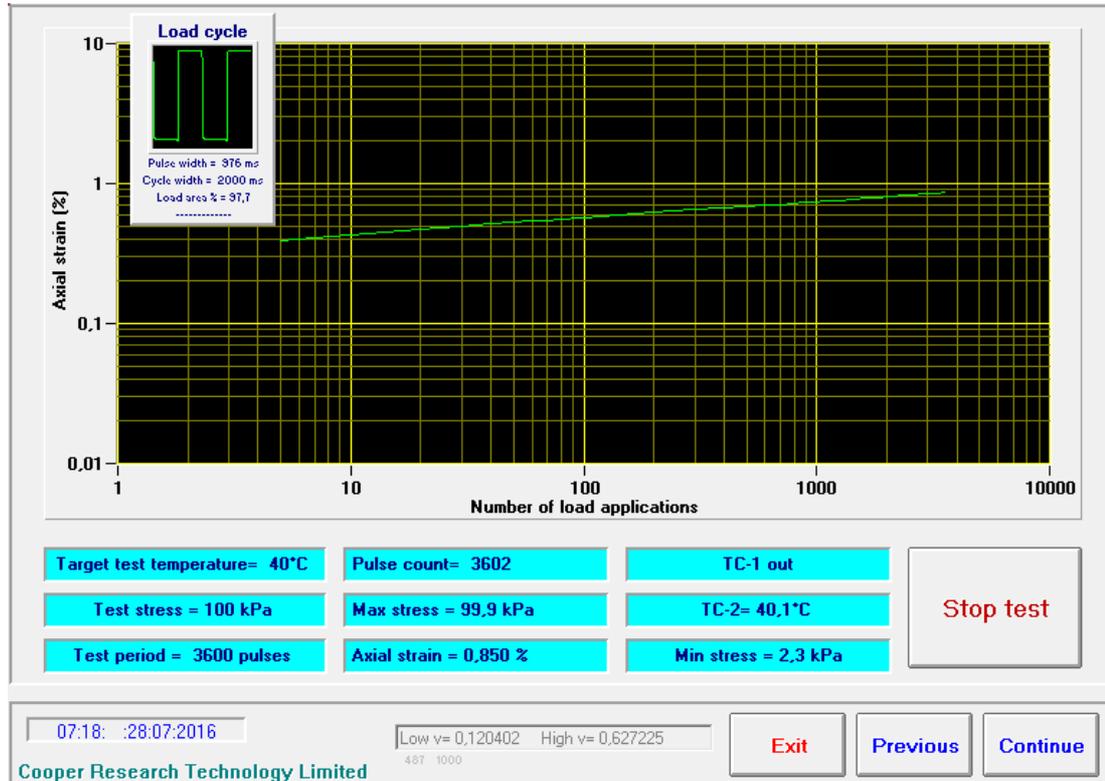
**Figura 2.23. Ensayo de fatiga en equipo NAT con inmersión**

**Fuente:** Autor

### **III. Deformación bajo compresión cíclica (Creep)**

El ensayo de carga axial repetida, conocida como creep dinámico, se efectuó para estimar el comportamiento ante las deformaciones plásticas. Un ciclo de carga consiste en la aplicación de un esfuerzo durante 1 segundo de descanso, es decir, se emplearon ondas cuadráticas. El ensayo se realizó a una temperatura de 40°C, midiendo las deformaciones provocadas por 3600 repeticiones de cargas de 100kPa. Para determinar si una mezcla asfáltica presenta un buen comportamiento a la deformación plástica, el valor de la deformación no debe ser superior al 1% (Vila & García, 2015). En la Figura

2.24 se muestra el resultado de una briqueta luego de efectuarse un ensayo de deformación bajo compresión cíclica.



**Figura 2.24. Resultado de deformación bajo compresión cíclica.**

**Briqueta B4**

**Fuente: Autor**

De la misma forma en la ejecución de las pruebas con inmersión, se utilizó una bandeja metálica mostrada en la Figura 2.25 para mantener las briquetas sumergidas en agua mientras dura el ensayo.



**Figura 2.25. Ensayo de deformación bajo compresión cíclica en equipo NAT con inmersión**

**Fuente: Autor**

## **CAPÍTULO 3.- RESULTADOS OBTENIDOS**

### **3.1 Pruebas convencionales recomendadas por el MTOP**

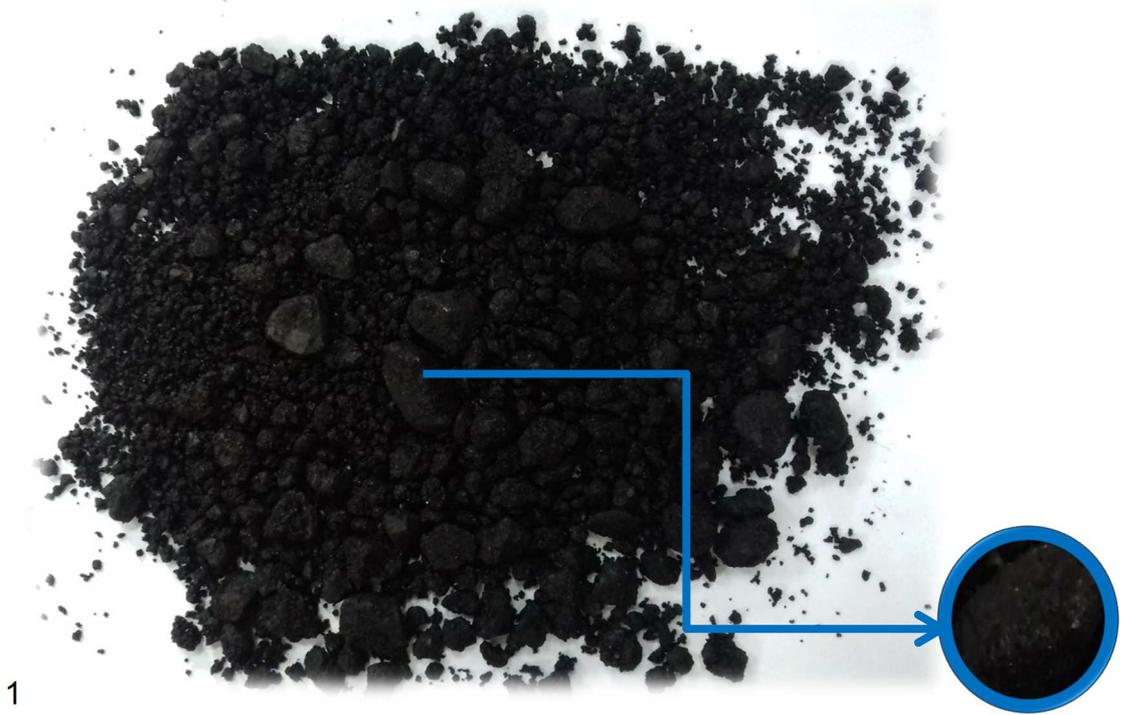
#### **3.1.1 Prueba de agua hirviendo (Boiling test)**

Se muestra en la Figura 3.1, Figura 3.2 y Figura 3.3 las diferentes mezclas luego de realizarse este ensayo. De acuerdo a la especificación vigente, la mezcla luego de este ensayo no debe presentar evidencias de peladura.



**Figura 3.1. Daño en agua. Planta A**

**Fuente: Autor**



**Figura 3.2. Daño en agua. Planta B**

Fuente: Autor



**Figura 3.3. Daño en agua. Planta C**

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos se los muestra en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1. Resultados de la prueba de agua hirviendo**

<b>ENSAYO DE DAÑO EN AGUA</b>	
Planta A	Sin evidencia de peladura
Planta B	Sin evidencia de peladura
Planta C	Con evidencia de peladura

**Fuente:** Autor

### **3.1.2 Resultados de tracción indirecta**

Para iniciar este ensayo a continuación se muestra un ejemplo del tratamiento matemático empleado en cada una de las pruebas de tracción indirecta realizadas. En las Tabla 3.2 y Tabla 3.3 se presenta el valor de la resistencia a la tracción indirecta ( $St$ ), el cual se calcula a partir de la carga máxima de ruptura y espesor de la briqueta.

#### **PLANTA A**

BRIQUETA 3: **SIN INMERSIÓN**

ESPESOR: 62 mm

**Tabla 3.2. Resultados de ensayo de tracción indirecta de la planta A; 97% de la densidad relativa de compactación; sin inmersión.**

Muestra	Espesor	DEF	CARGA	St	St
	cm	0,0001"	kg	kg/cm <sup>2</sup>	kPa
<b>T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA A 3</b>	6,2	135	589	6,00	588,28

**Fuente:** Autor

Para la condición con inmersión el proceso de ensayo y cálculo es similar al mostrado anteriormente, aunque en todos los casos los resultados se contraen sin lugar a duda por el proceso de saturación.

## **PLANTA A**

### **BRIQUETA 6: CON INMERSIÓN**

ESPESOR: 61 mm

**Tabla 3.3. Resultados de ensayo de tracción indirecta de la planta C; 97% de energía de compactación; con inmersión.**

Muestra	Espesor	DEF	CARGA	St	St
	cm	0,0001"	kg	kg/cm <sup>2</sup>	kPa
<b>T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA A 6</b>	6,1	96	422	4,33	424,95

**Fuente:** Autor

Luego de aplicar este procedimiento a todas las briquetas correspondientes de cada planta para la prueba de tracción indirecta en particular se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5.

**Tabla 3.4. Resultados de ensayos de tracción indirecta de todas las plantas, 97% de densidad relativa de compactación; sin inmersión.**

PLANTA A	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (kg)	St (kg/cm <sup>2</sup> )	St (KPa)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN	3	135	588,76	6,00	588
	11	131	574,70	5,42	531
	23	141	617,79	6,14	603
PROMEDIO					574
DESVIACIÓN ESTANDAR					37,9
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					6,59

PLANTA B	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (kg)	St (kg/cm <sup>2</sup> )	St (KPa)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN	14	128	561	5,17	507
	22	135	591	5,29	519
	14	120	528	4,73	464
PROMEDIO					497
DESVIACIÓN ESTANDAR					29,1
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					5,85

PLANTA C	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (kg)	St (kg/cm <sup>2</sup> )	St (KPa)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN	6	94	413	3,98	391
	8	82	361	3,33	326
	23	90	396	3,76	369
PROMEDIO					362
DESVIACIÓN ESTANDAR					32,7
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					9,04

**Fuente:** Autor

Para la condición con inmersión el proceso de ensayo y cálculo es similar al mostrado anteriormente.

**Tabla 3.5. Resultados de ensayos de tracción indirecta de todas las plantas, 97% de densidad relativa de compactación; con inmersión.**

PLANTA A	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (kg)	St (kg/cm <sup>2</sup> )	St (KPa)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN	6	96	422	4,33	425
	12	119	523	4,82	473
	28	112	492	4,74	465
PROMEDIO					454
DESVIACIÓN ESTANDAR					25,7
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					5,65

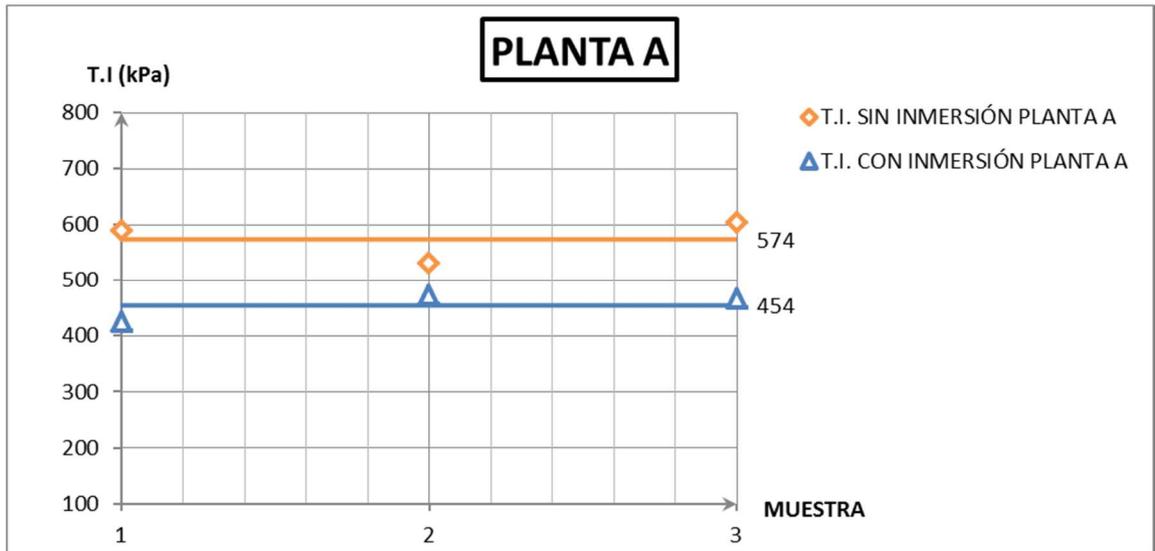
PLANTA B	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (kg)	St (kg/cm <sup>2</sup> )	St (KPa)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN	8	112	492	4,47	438
	10	99	426	3,99	391
	16	112	435	4,33	424
PROMEDIO					418
DESVIACIÓN ESTANDAR					24,1
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					5,77

PLANTA C	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (kg)	St (kg/cm <sup>2</sup> )	St (KPa)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN	3	71	313	2,97	291
	9	59	261	2,51	247
	17	69	304	2,93	288
PROMEDIO					275
DESVIACIÓN ESTANDAR					24,9
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					9,04

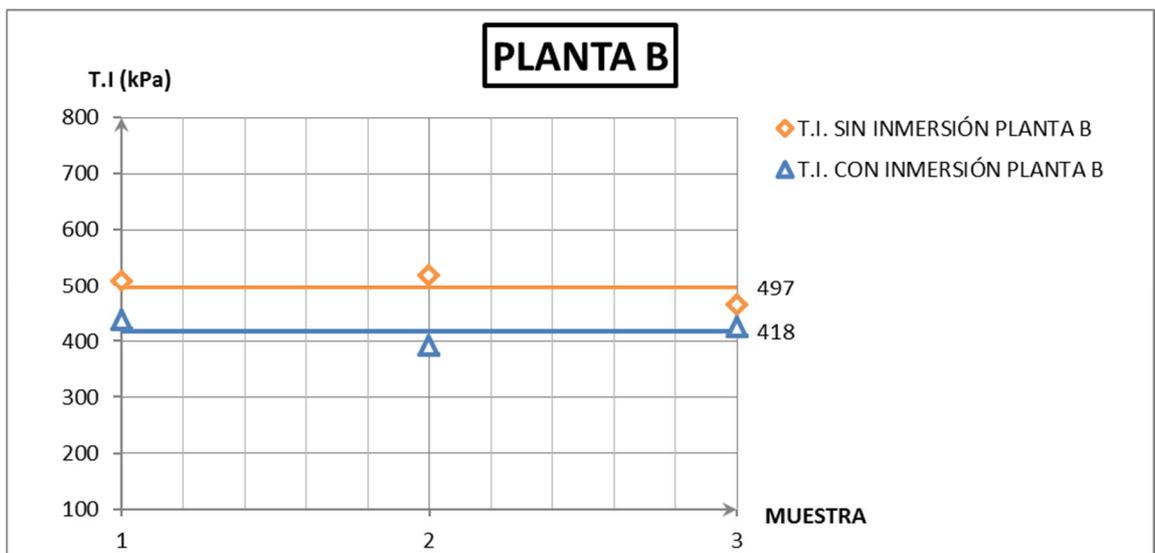
**Fuente:** Autor

Todos los resultados anteriores aparecen graficados por planta desde la Figura 3.4 hasta Figura 3.6.



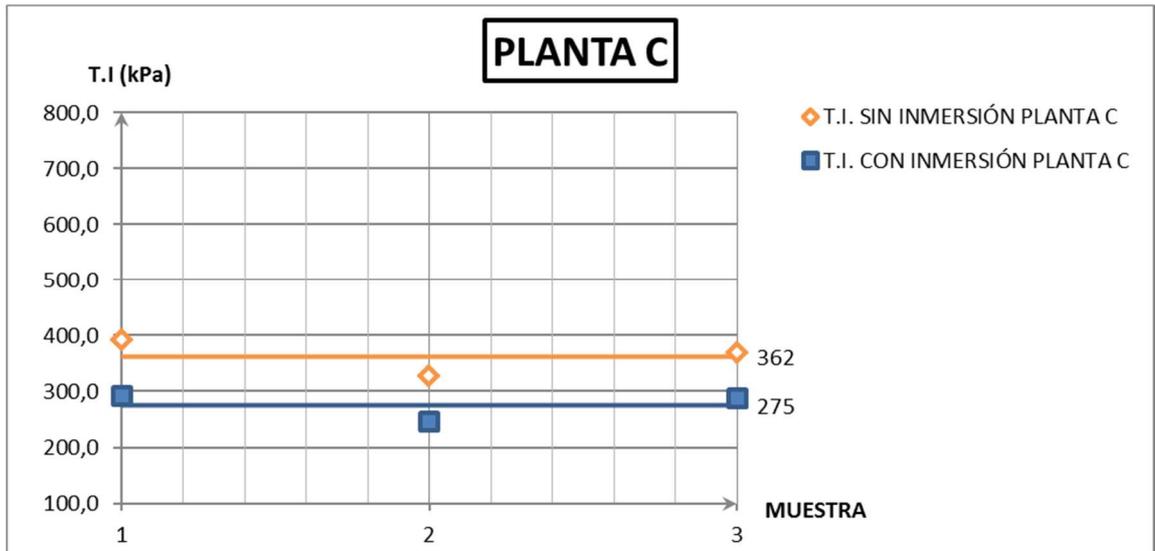
**Figura 3.4. Resultados Tracción Indirecta. Planta A**

Fuente: Autor



**Figura 3.5. Resultados Tracción Indirecta. Planta B**

Fuente: Autor



**Figura 3.6. Resultados Tracción Indirecta. Planta C**

**Fuente:** Autor

Se muestra en la Tabla 3.6 los valores obtenidos como resultado de los porcentajes de resistencia retenida.

**Tabla 3.6. Resultados de porcentaje de resistencia retenida (TSR) por planta**

PLANTA	TSR
A	79,15%
B	84,10%
C	76,06%

**Fuente:** Autor

### 3.1.3 Resultados de estabilidad Marshall

La Prueba Marshall se utiliza tanto en el laboratorio para diseño y en obra para el control de calidad de la mezcla. En la prueba Marshall la resistencia a la deformación plástica de un cilindro de mezcla bituminosa es medido cuando el espécimen se carga diametralmente a un rango de deformación de 50mm por minuto

A continuación se muestra un ejemplo del tratamiento matemático empleado en cada una de las pruebas de estabilidad Marshall realizadas, donde se relacionan las deformaciones versus las cargas. Ver Tabla 3.7 y Tabla 3.8. En las tablas antes mencionadas se expresa el resultado de la estabilidad Marshall a partir de la carga máxima.

#### PLANTA A

BRIQUETA A20: **SIN INMERSIÓN**

ESPESOR: 64 mm

FACTOR DE CORRECCIÓN: 1,00.

**Tabla 3.7. Resultado del ensayo de estabilidad Marshall de la planta A; 97% de densidad relativa de compactación; sin inmersión.**

MUESTRA	ESPESOR	FACTOR	LECTURA	CARGA	ESTABILIDAD	ESTABILIDAD
	cm	CORRECCIÓN	0,0001"	kg	Kg	lbs
<b>E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA A 20</b>	6,4	1,00	137	600	600	1323

**Fuente:** Autor

Para la condición con inmersión el proceso de ensayo y cálculo es similar al mostrado anteriormente.

## PLANTA A

BRIQUETA A2: **CON INMERSIÓN**

ESPESOR: 59 mm

FACTOR DE CORRECCIÓN: 1,14

**Tabla 3.8. Resultado del ensayo de estabilidad Marshall de la planta A; 97% de densidad relativa compactación; con inmersión**

MUESTRA	ESPESOR	FACTOR	LECTURA	CARGA	ESTABILIDAD	ESTABILIDAD
	cm	CORRECCIÓN	0,0001"	kg	Kg	lbs
<b>E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA A 2</b>	5,9	1,14	102	448	511	1126

**Fuente:** Autor

Luego de aplicar este procedimiento a todas las briquetas correspondientes a cada planta para la prueba de estabilidad Marshall en particular se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3.9 y Tabla 3.10.

**Tabla 3.9. Resultados de los ensayos de estabilidad Marshall de todas las plantas, 97% de densidad relativa de compactación; sin inmersión.**

PLANTA A	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (Lbs)	FACTOR CORRECCIÓN	E.M. (Lbs)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN	20	137	1323	1,00	1323
	22	129	1247	0,96	1197
	30	146	1410	0,96	1354
PROMEDIO					1291
DESVIACIÓN ESTANDAR					82,9
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					6,42
PLANTA B	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (Lbs)	FACTOR CORRECCIÓN	E.M. (Lbs)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN	5	229	2203	0,89	1961
	9	221	2127	0,86	1829
	13	209	2012	0,93	1871
PROMEDIO					1887
DESVIACIÓN ESTANDAR					67,1
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					3,56
PLANTA C	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (Lbs)	FACTOR CORRECCIÓN	E.M. (Lbs)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN	2	149	1440	0,96	1382
	15	159	1534	0,93	1427
	28	162	1564	0,86	1345
PROMEDIO					1385
DESVIACIÓN ESTANDAR					40,8
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					2,95

**Fuente:** Autor

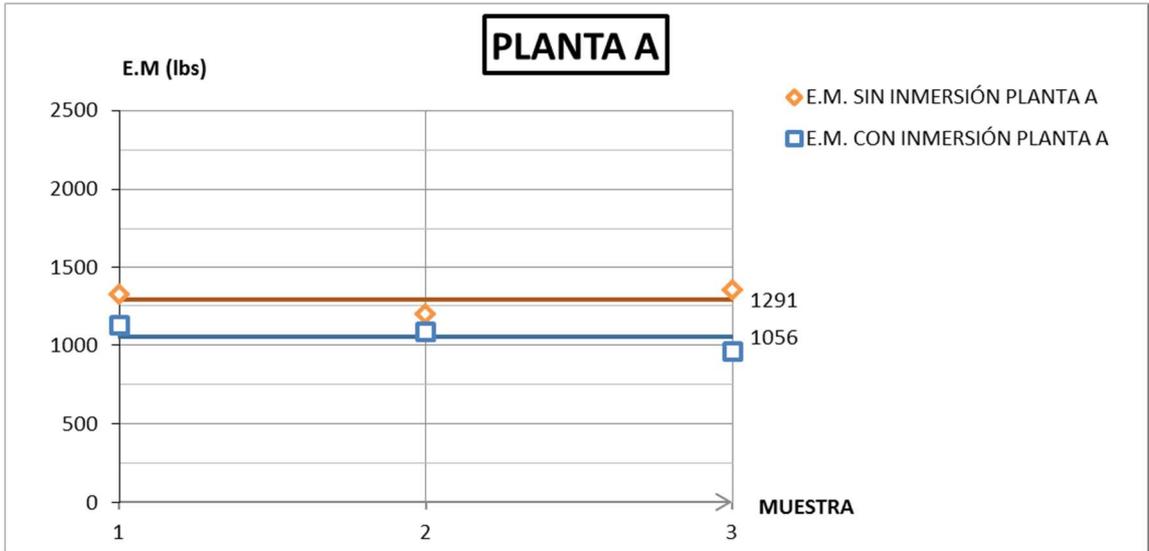
Para la condición con inmersión el proceso de ensayo y cálculo es similar al mostrado anteriormente.

**Tabla 3.10. Resultados de los ensayos de estabilidad Marshall de todas las plantas, 97% de densidad relativa de compactación; con inmersión.**

PLANTA A	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (Lbs)	FACTOR CORRECCIÓN	E.M. (Lbs)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN	2	102	988	1,14	1126
	18	112	1084	1,00	1084
	19	99	959	1,00	959
PROMEDIO					1056
DESVIACIÓN ESTANDAR					87,0
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					8,24
PLANTA B	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (Lbs)	FACTOR CORRECCIÓN	E.M. (Lbs)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN	1	197	1898	0,96	1822
	15	200	1927	0,93	1792
	29	205	1974	0,86	1698
PROMEDIO					1771
DESVIACIÓN ESTANDAR					64,9
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					3,67
PLANTA C	No. BRIQUETA	Lectura dial	Carga (Lbs)	FACTOR CORRECCIÓN	E.M. (Lbs)
97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN	4	112	1084	0,96	1041
	11	109	1055	0,93	981
	25	116	1125	1,09	1226
PROMEDIO					1083
DESVIACIÓN ESTANDAR					127,8
COEFICIENTE DE VARIACIÓN					11,81

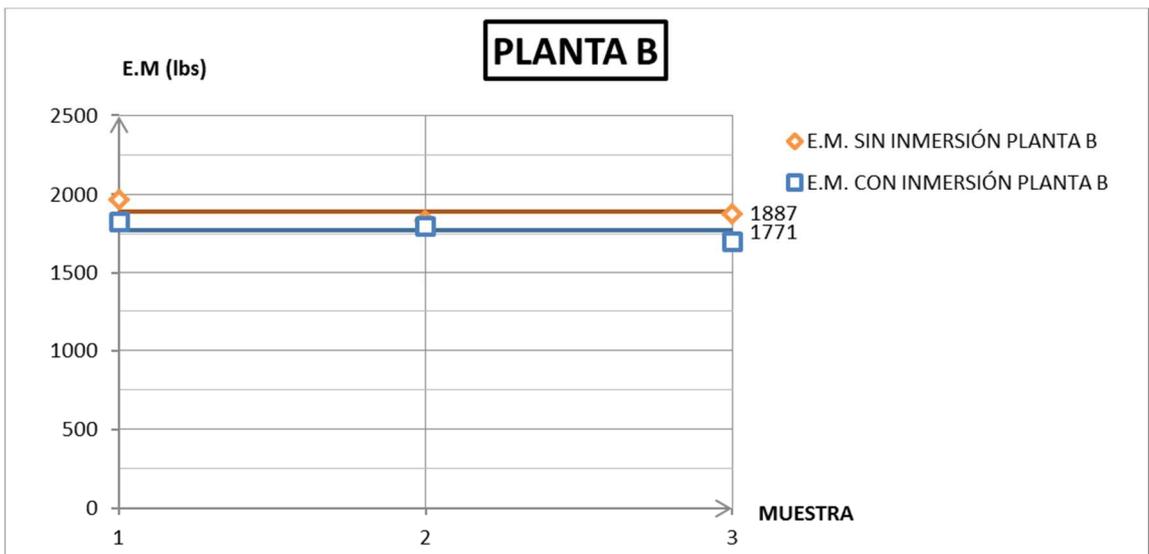
**Fuente:** Autor

Todos los resultados anteriores aparecen graficados por planta desde la Figura 3.7 a la Figura 3.9.



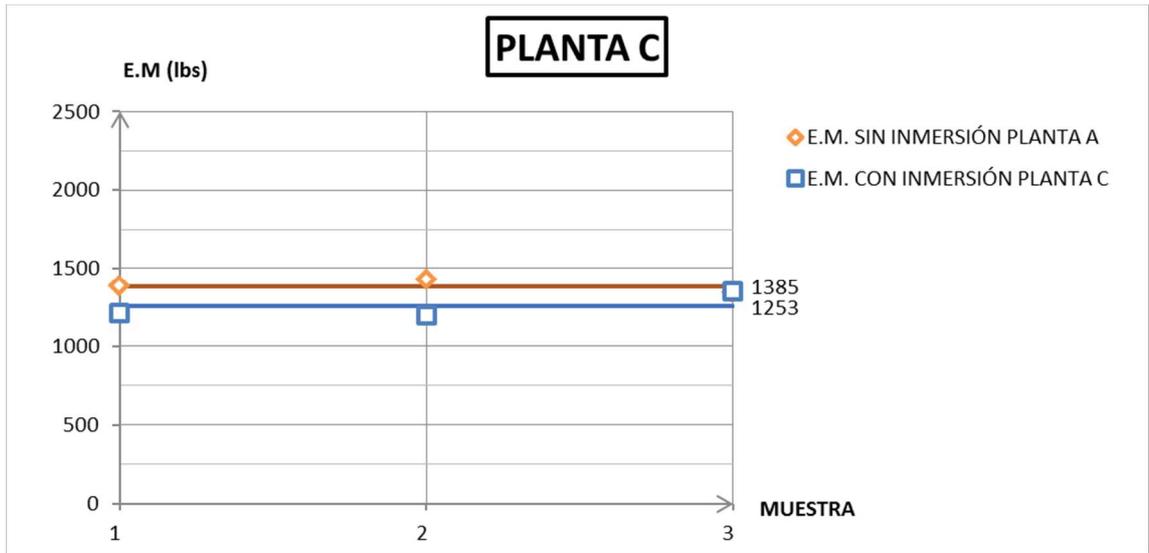
**Figura 3.7. Resultados Estabilidad Marshall. Planta A**

Fuente: Autor



**Figura 3.8. Resultados Estabilidad Marshall. Planta B**

Fuente: Autor



**Figura 3.9. Resultados Estabilidad Marshall. Planta C**

**Fuente:** Autor

Se muestra en la Tabla 3.11 los valores obtenidos como resultado de los porcentajes de resistencia retenida.

**Tabla 3.11. Resultados de porcentaje de estabilidad Marshall retenida por planta**

PLANTA	EMR
A	81,8%
B	93,8%
C	78,2%

**Fuente:** Autor

### 3.2 Resultados de los ensayos propuestos en el laboratorio

#### 3.2.1 Resultados de módulo de rigidez

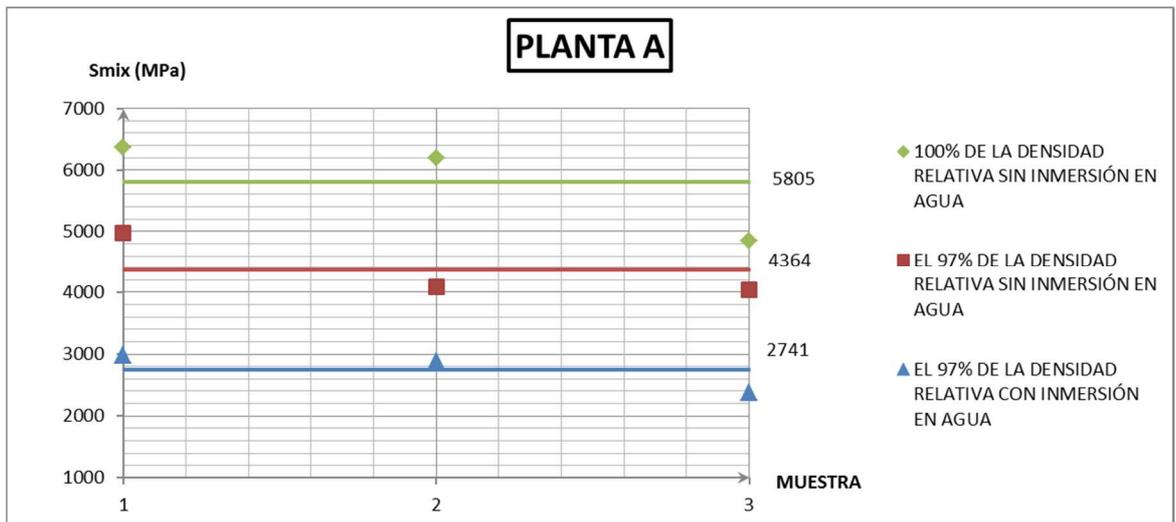
En la Tabla 3.12 se puede observar el procesamiento estadístico de los resultados.

**Tabla 3.12. Resultados de los ensayos de módulo de rigidez**

PLANTA	100% DE DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN EN AGUA					EL 97% DE DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN EN AGUA					EL 97% DE DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN EN AGUA				
	#	Smix (MPa)	PROMEDIOS (MPa)	DESV. EST.	COEF. VARIACION	#	Smix (MPa)	PROMEDIOS (MPa)	DESV. EST.	COEF. VARIACION	#	Smix (MPa)	PROMEDIOS (MPa)	DESV. EST.	COEF. VARIACION
A	A1	6369	5805	833	14,3	A7	4973	4364	528	12,1	A1	2975	2741	323	11,8
	A3	6198				A12	4087				A24	2875			
	A4	4849				A16	4032				A25	2372			
B	B1	4356	4352	306	7,0	B10	3357	3663	320	8,7	B10	3131	3361	266	7,9
	B2	4656				B12	3996				B12	3299			
	B3	4044				B14	3635				B14	3653			
C	C1	3086	3125	330	10,6	C8	2731	2892	209	7,2	C8	2205	2143	58	2,7
	C2	3472				C9	3128				C9	2090			
	C3	2816				C11	2817				C11	2134			

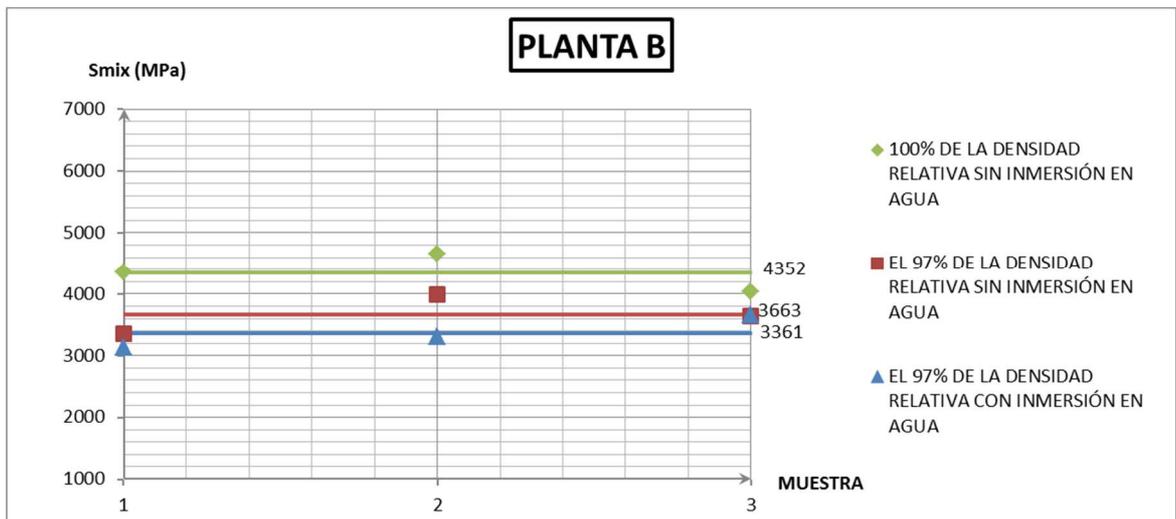
Fuente: Autor

Todos los resultados anteriores aparecen graficados por planta desde la Figura 3.10 hasta la Figura 3.12.



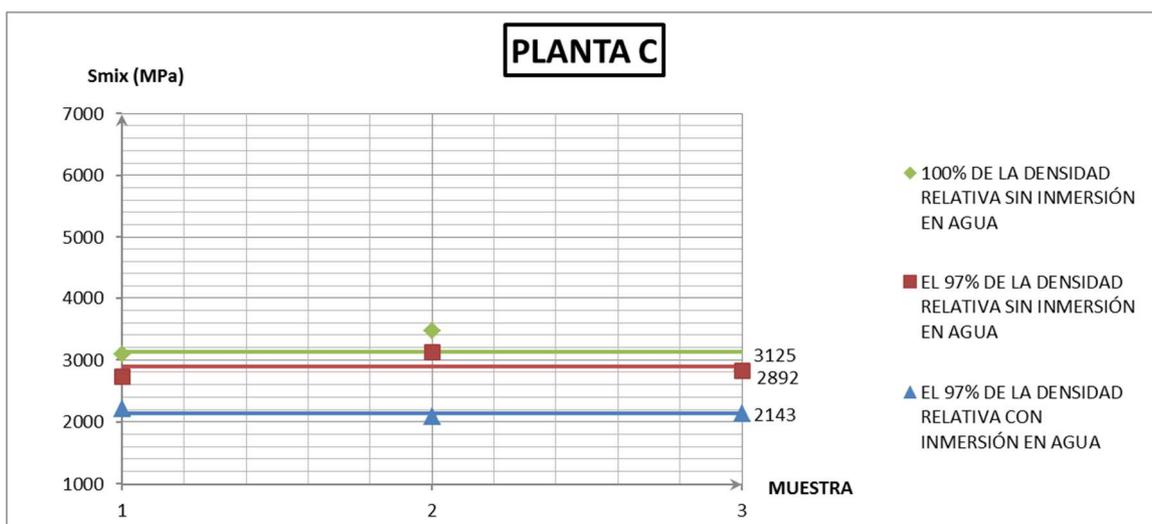
**Figura 3.10. Resultados Smix. Planta A**

Fuente: Autor



**Figura 3.11. Resultados Smix. Planta B**

Fuente: Autor



**Figura 3.12. Resultados Smix. Planta C**

Fuente: Autor

A continuación en la Tabla 3.13 se muestra un resumen de las afectaciones al módulo de rigidez al aplicar estos procedimientos.

**Tabla 3.13. Resumen de las afectaciones al módulo de acuerdo a la compactación y a la inmersión**

PLANTA	100% D. R. SIN INMERSIÓN	97% D. R. SIN INMERSIÓN	97% D. R. CON INMERSIÓN	% DE RIGIDEZ RETENIDA	DISMINUCIÓN DEL MÓDULO POR MENOR COMPACTACIÓN		DISMINUCIÓN DEL MÓDULO POR INMERSIÓN EN AGUA		DISMINUCIÓN DEL MÓDULO POR AMBOS FACTORES	
	(MPa)	(MPa)	(MPa)		MPa	%	MPa	%	MPa	%
<b>A</b>	5805	4364	2741	62,80%	1441	24,8	1623	37,2	3065	52,8
<b>B</b>	4352	3663	3361	91,76%	689	15,8	302	8,2	991	22,8
<b>C</b>	3125	2892	2143	74,10%	233	7,4	749	25,9	982	31,4

Fuente: Autor

### 3.3 Resultados de las pruebas de fatiga.

Se detallan los resultados de las tres plantas del ensayo de fatiga para las tres condiciones de estudio.

**Tabla 3.14. Resultados de ensayo de fatiga planta A.**

<b>FATIGA PLANTA "A"</b>			
<b>COMPACTACIÓN CON 100% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN</b>			
COEF. POISSON = 0,35			
<b>ESFUERZO (kPa)</b>	<b>REPETI- CIONES</b>	<b>DEFOR- MACIÓN (x 10<sup>-6</sup>)</b>	<b>MÓDULO RIGIDEZ (MPa)</b>
200			
250			
300			
350	6998	160	4491
400	4038	219	3745
450	995	276	3341
500			
<b>COMPACTACIÓN CON 97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN</b>			
COEF. POISSON = 0,35			
<b>ESFUERZO (kPa)</b>	<b>REPETI- CIONES</b>	<b>DEFOR- MACIÓN (x 10<sup>-6</sup>)</b>	<b>MÓDULO RIGIDEZ (MPa)</b>
200			
250	14216	166	3094
300	3004	208	2951
350			
400	833	489	1676
450			
500			

COMPACTACIÓN CON 97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
150			
200	14722	108	3794
250	1051	206	2488
300	689	272	2262
350			
400			
450			
500			

Fuente: Autor

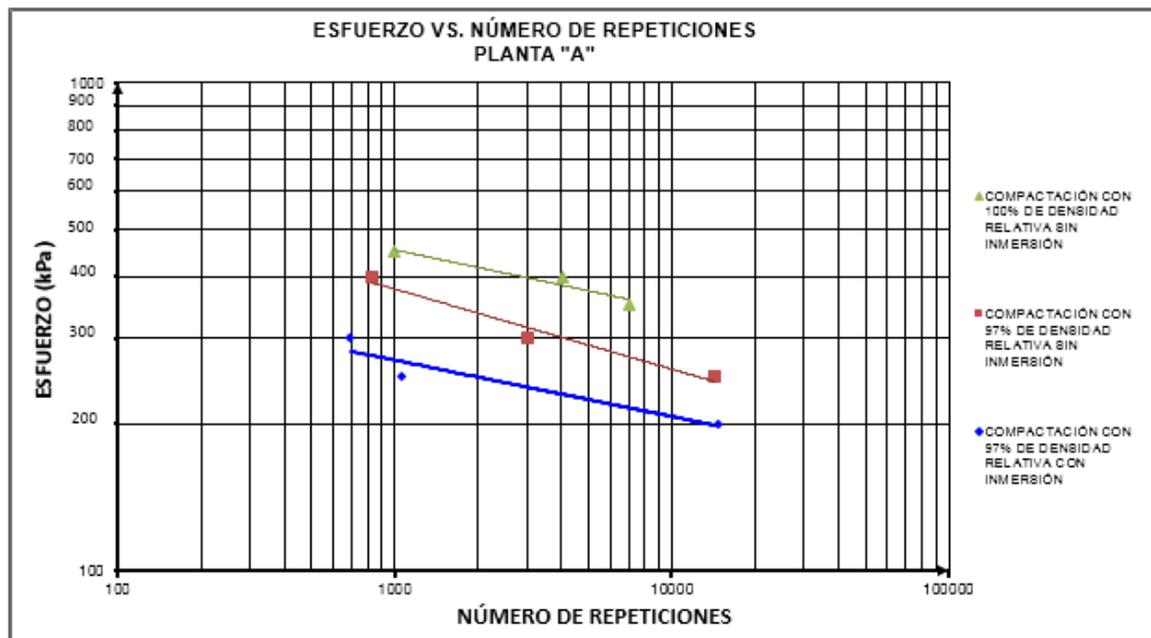
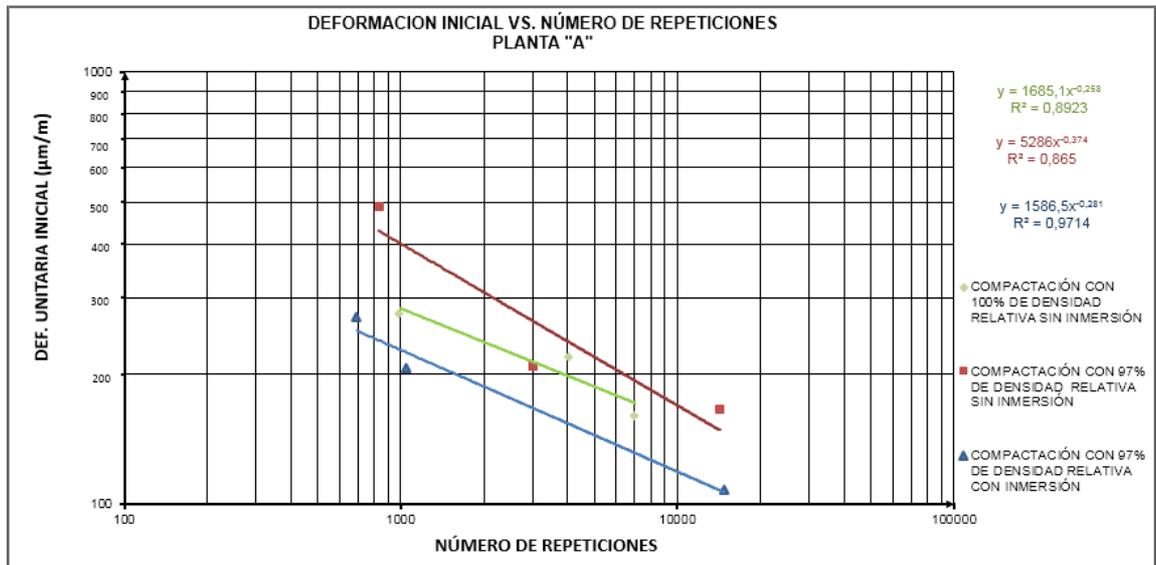


Figura 3.13. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones.  
Planta A.

Fuente: Autor



**Figura 3.14. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta A.**

**Fuente:** Autor

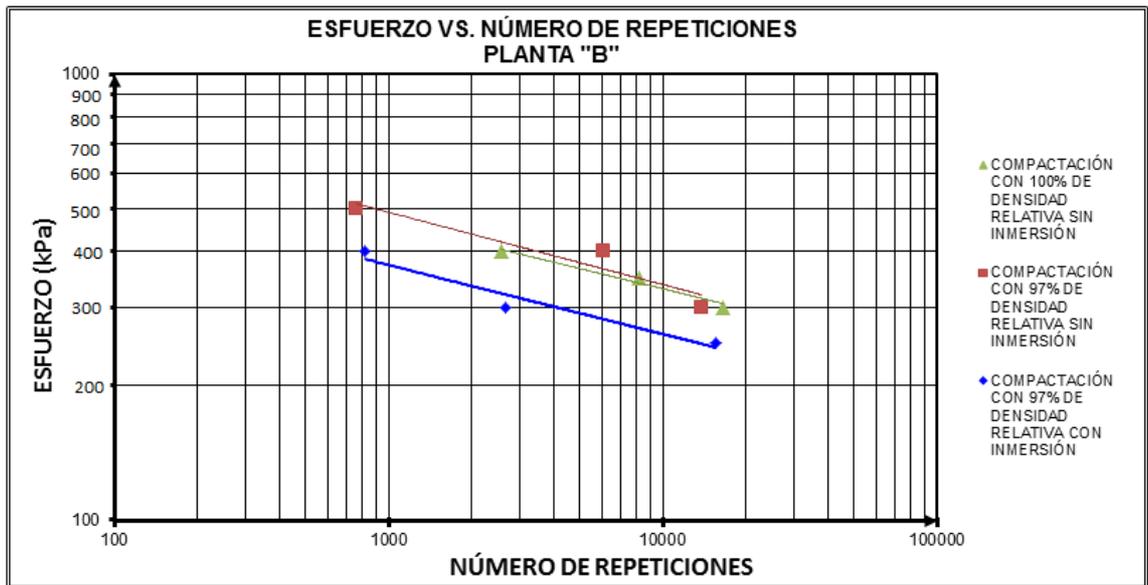
**Tabla 3.15. Resultados de ensayo de fatiga planta B.**

FATIGA PLANTA "B"			
COMPACTACIÓN CON 100% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETI- CIONES	DEFOR- MACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200			
250			
300	16676	133	4636
350	8211	218	3292
400	2581	210	3896
450			
500			

COMPACTACIÓN CON 97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETI- CIONES	DEFOR- MACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200	13861	158	3881
250			
300			
350			
400	6091	215	3806
450	761	341	3008
500			

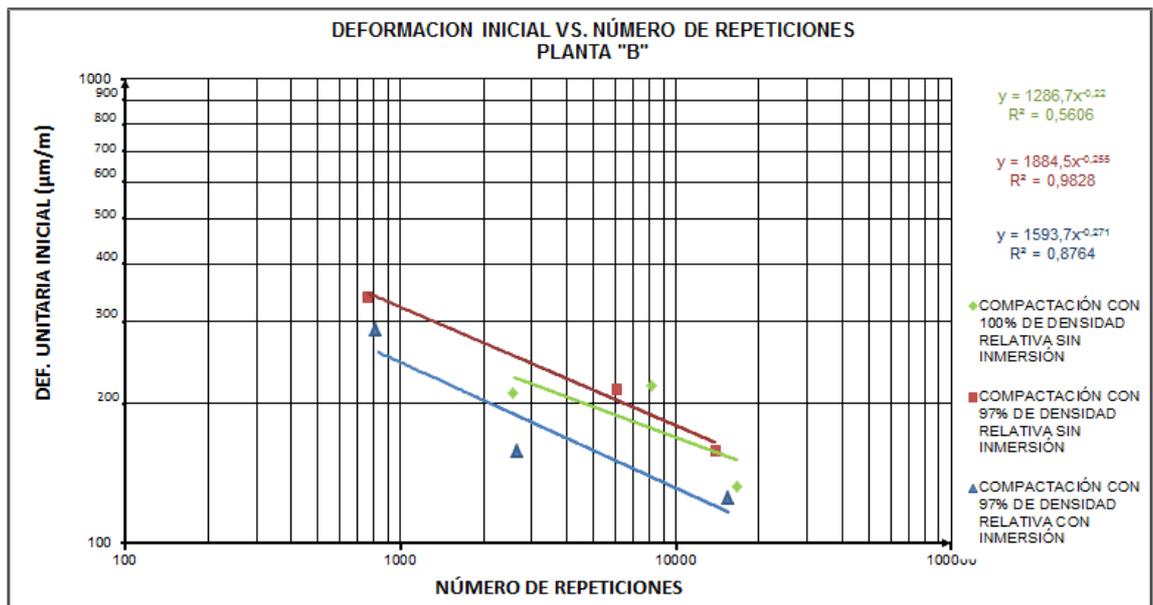
COMPACTACIÓN CON 97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETI- CIONES	DEFOR- MACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
150	15621	125	4101
200			
250			
300			
350	2681	158	3891
400			
450	821	287	2856
500			

Fuente: Autor



**Figura 3.15. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones.  
Planta B.**

Fuente: Autor



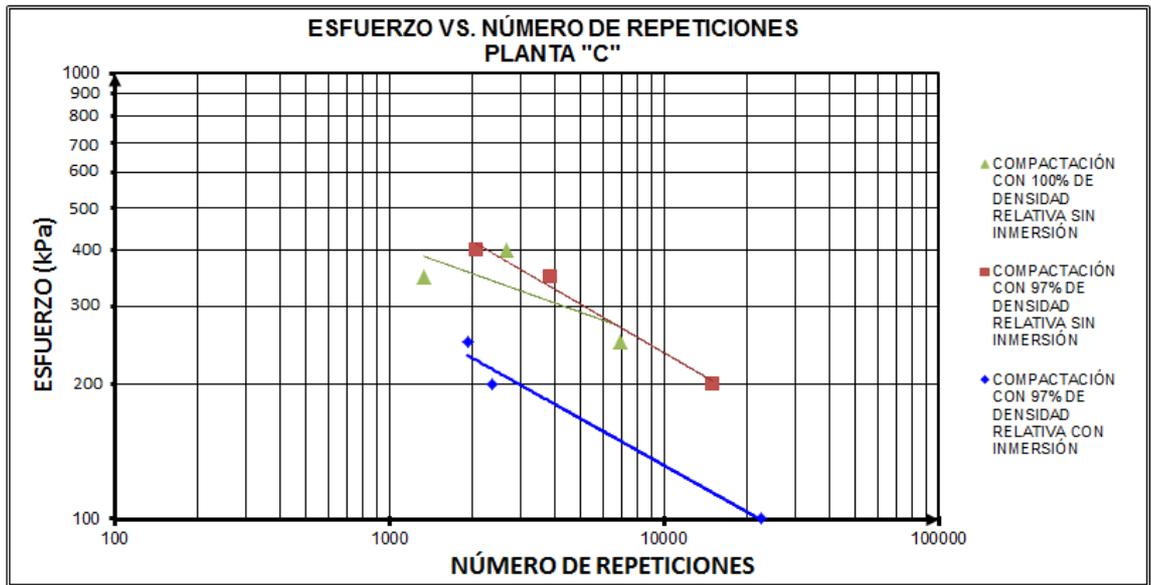
**Figura 3.16. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta B.**

Fuente: Autor

**Tabla 3.16. Resultados de ensayo de fatiga planta C.**

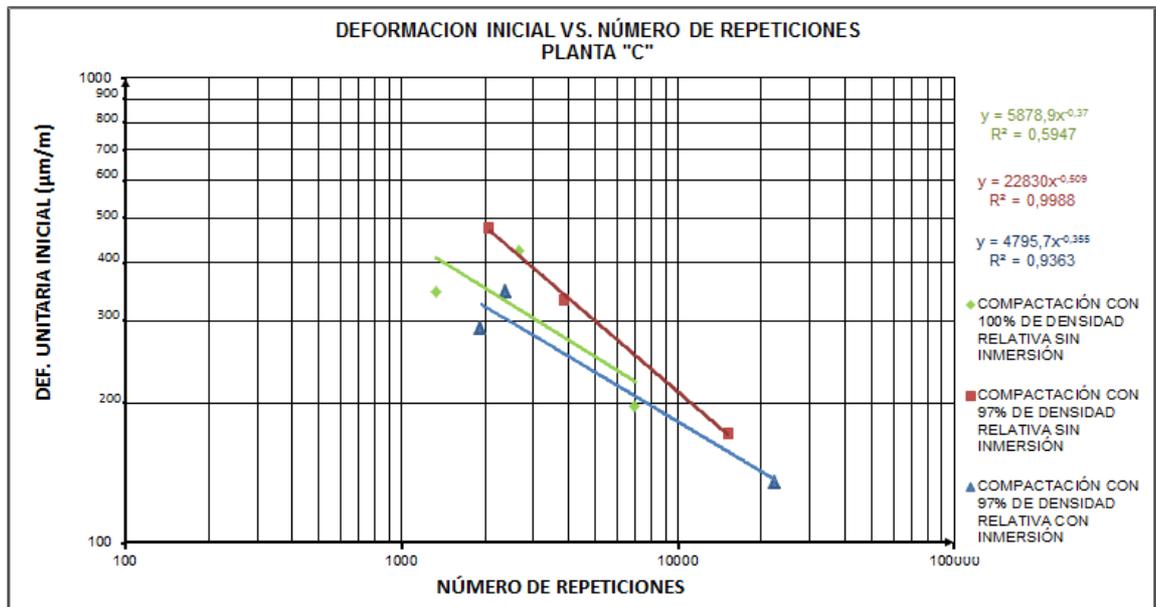
<b>FATIGA PLANTA "C"</b>			
<b>COMPACTACIÓN CON 100% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN</b>			
COEF. POISSON = 0,35			
<b>ESFUERZO (kPa)</b>	<b>REPETI- CIONES</b>	<b>DEFOR- MACIÓN (x 10<sup>-6</sup>)</b>	<b>MÓDULO RIGIDEZ (MPa)</b>
200	6981	197	2607
250			
300			
350	1331	346	2071
400	2671	425	1930
450			
500			
<b>COMPACTACIÓN CON 97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN</b>			
COEF. POISSON = 0,35			
<b>ESFUERZO (kPa)</b>	<b>REPETI- CIONES</b>	<b>DEFOR- MACIÓN (x 10<sup>-6</sup>)</b>	<b>MÓDULO RIGIDEZ (MPa)</b>
200	15111	172	2381
250			
300			
350	3861	335	2139
400	2071	477	1720
450			
500			
<b>COMPACTACIÓN CON 97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN</b>			
COEF. POISSON = 0,35			
<b>ESFUERZO (kPa)</b>	<b>REPETI- CIONES</b>	<b>DEFOR- MACIÓN (x 10<sup>-6</sup>)</b>	<b>MÓDULO RIGIDEZ (MPa)</b>
100	22521	135	1519
200	2381	346	1186
250	1931	290	1770
300			
350			
400			

**Fuente:** Autor



**Figura 3.17. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones.  
Planta C.**

Fuente: Autor



**Figura 3.18. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta C**

Fuente: Autor

Para otra apreciación de los resultados de fatiga se realizaron figuras comparativas, en las cuales se grafican todas las plantas en una misma condición, como puede observarse en la

Figura 3.19 y Figura 3.20.

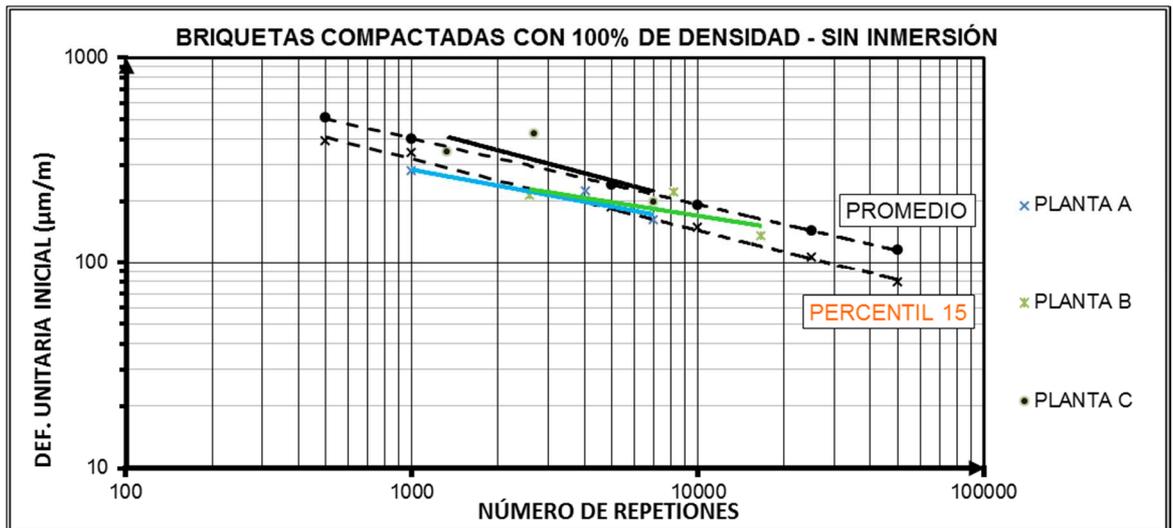
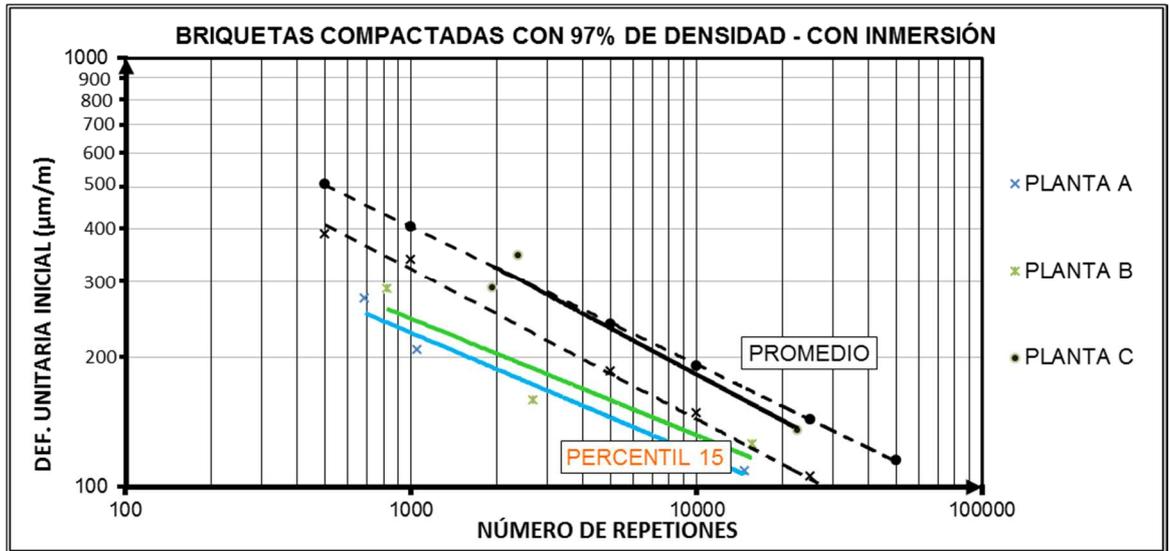


Figura 3.19. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Briquetas con 100% de densidad relativa – sin inmersión.

Fuente: Autor



**Figura 3.20. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Briquetas con 97% de densidad relativa – con inmersión.**

Fuente: Autor

### 3.4 Resultados de la deformación bajo compresión cíclica (Creep)

En la Tabla 3.17 se puede observar el procesamiento estadístico de los resultados.

**Tabla 3.17. Resultados de los ensayos de deformación bajo compresión cíclica**

PLANTA	100% DE DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN				97% DE LA DENSIDAD RELATIVA SIN INMERSIÓN EN AGUA				97% DE LA DENSIDAD RELATIVA CON INMERSIÓN EN AGUA						
	#	CREEP DINAMICO (%)	PROMEDIOS (%)	DESV. EST.	COEF. VARIACION	#	CREEP DINAMICO (%)	PROMEDIOS (%)	DESV. EST.	COEF. VARIACION	#	CREEP DINAMICO (%)	PROMEDIOS (%)	DESV. EST.	COEF. VARIACIÓN
A	A3	0,48%	0,42%	0,001	22,0	A10	0,55%	0,58%	0,000	5,0	A8	0,85%	0,97%	0,002	21,6
	A5	0,32%				A13	0,59%				A14	1,21%			
	A6	0,47%				A17	0,60%				A25	0,85%			
B	B1	0,66%	0,63%	0,001	14,4	B4	0,85%	0,73%	0,001	16,2	B12	0,98%	0,89%	0,001	9,2
	B2	0,71%				B17	0,72%				B18	0,83%			
	B6	0,53%				B18	0,62%				B23	0,85%			
C	C1	0,56%	0,62%	0,001	8,6	C12	0,74%	0,70%	0,001	7,8	C7	1,24%	1,29%	0,001	8,5
	C4	0,63%				C14	0,72%				C10	1,42%			
	C5	0,66%				C27	0,64%				C13	1,22%			

Fuente: Autor

Todos los resultados anteriores aparecen graficados por planta desde la Figura 3.21 hasta la Figura 3.23.

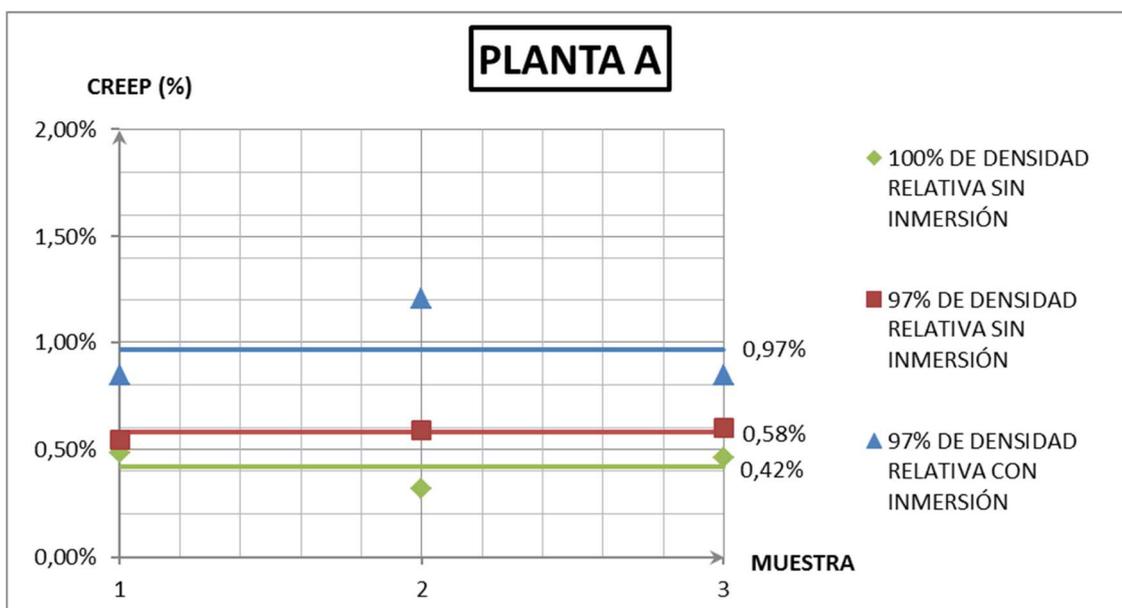
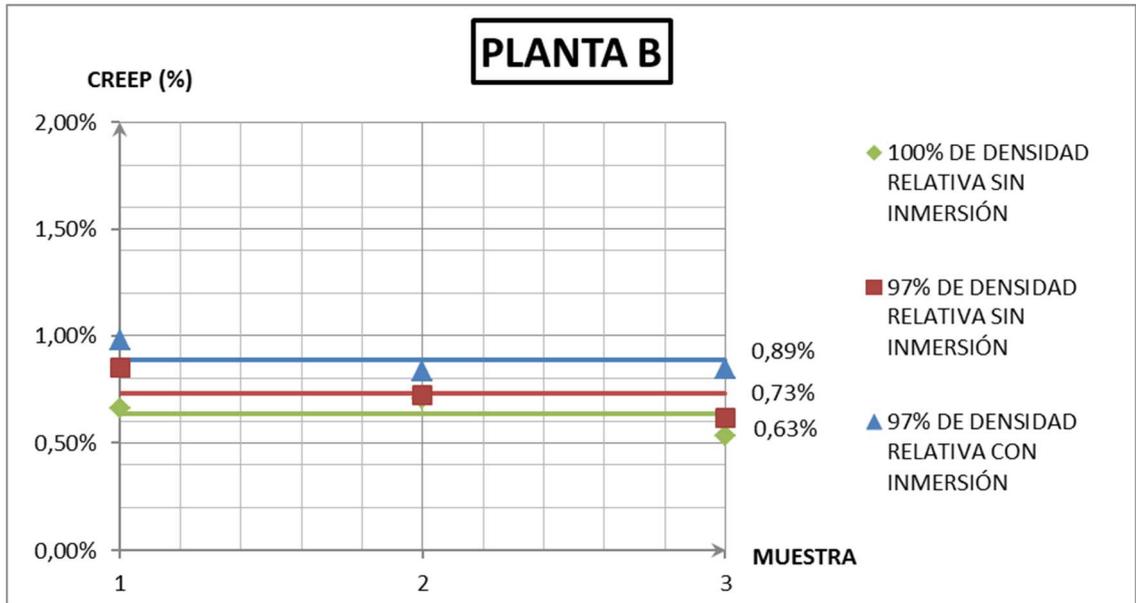


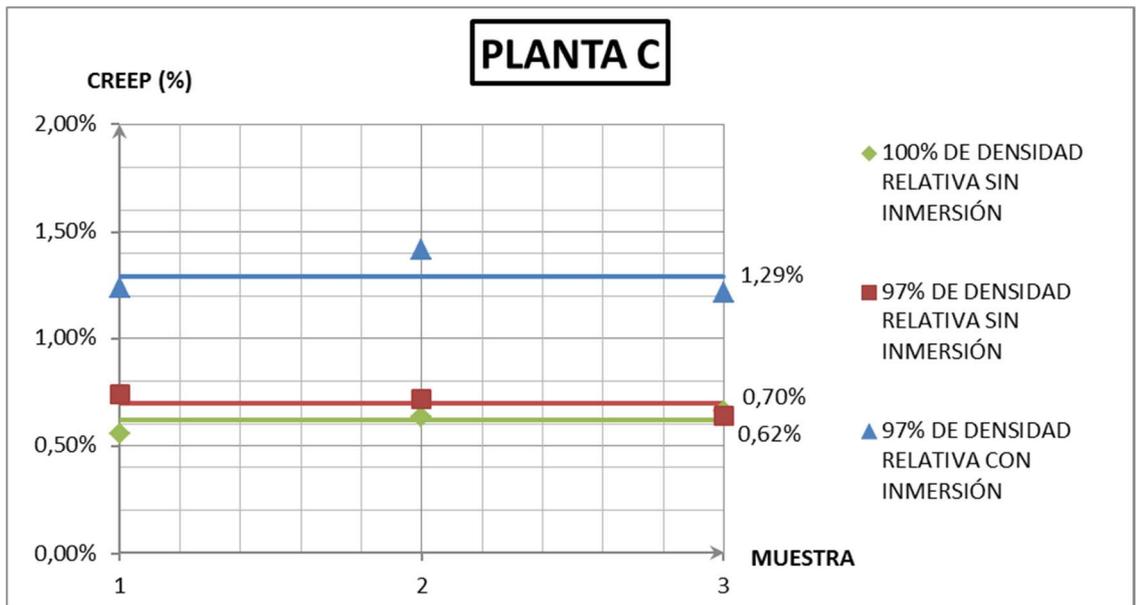
Figura 3.21. Resultados Creep. Planta A

Fuente: Autor



**Figura 3.22. Resultados Creep. Planta B**

Fuente: Autor



**Figura 3.23. Resultados Creep. Planta C**

Fuente: Autor

Se puede apreciar en la Tabla 3.18 un resumen de las afectaciones a la deformación bajo compresión cíclica al aplicar estos procedimientos.

**Tabla 3.18. Resumen de las afectaciones al Creep de acuerdo a la compactación y a la inmersión**

PLANTA	100% D. R. SIN INMERSIÓN	97% D.R. SIN INMERSIÓN	97% D.R. CON INMERSIÓN	AUMENTO DE LA DEFORMACIÓN POR MENOR COMPACTACIÓN	AUMENTO DE LA DEFORMACIÓN POR INMERSIÓN EN AGUA	AUMENTO DE LA DEFORMACIÓN POR AMBOS FACTORES
<b>A</b>	0,42%	0,58%	0,97%	0,16%	0,39%	0,54%
<b>B</b>	0,63%	0,73%	0,89%	0,09%	0,16%	0,25%
<b>C</b>	0,62%	0,70%	1,29%	0,08%	0,59%	0,67%

**Fuente:** Autor

A continuación se muestra en la Tabla 3.19 el resumen de resultados, todos los cuales han sido obtenidos considerando solamente mezclas con 97% de densidad relativa de compactación sin y con inmersión en agua.

**Tabla 3.19. Resumen de todos los resultados obtenidos en los ensayos**

PLANTA	ENSAYOS					
	AGUA	T. I.	E. M.	Smix	FATIGA	CREEP
	HIRVIENDO	RETENIDO	RETENIDA	RETENIDO	(*)	INCREMENTO DEF.
A	Cumple	79,15%	81,82%	62,80%	3	0,39%
B	Cumple	84,10%	93,83%	91,76%	2	0,16%
C	NO Cumple	76,06%	78,19%	74,10%	1	0,59%

**Fuente:** Autor

(\*) Se observa en la Tabla 3.19 que en el caso de fatiga se enumera de 1 a 3, en donde 1 es el mejor comportamiento y 3 es el peor comportamiento ante la fatiga, desde el punto de vista cualitativo.

## **CAPÍTULO 4.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

### **4.1 Análisis de los resultados de las pruebas convencionales recomendadas por el MTOP**

#### **4.1.1 Análisis de los resultados de la prueba de Agua Hirviendo (Boiling Test)**

Como se muestra desde la Figura 3.1 hasta la Figura 3.3, luego de haberse realizado las pruebas de agua hirviendo (Boiling test), se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.1, los cuales indican que las mezclas correspondientes a las plantas A y B cumplen la exigencia, ya que no se muestran evidencias de desprendimientos de asfalto y la mezcla de la planta C si presenta evidencias, razón por la cual esta mezcla no cumple con los requisitos necesarios según la especificaciones del MTOP.

Es importante considerar que esta prueba es visual, y es por esta razón que en capítulos anteriores del presente trabajo se muestran las imágenes que demuestran el efecto del agua hirviendo luego de haber realizado las pruebas.

Además cabe acotar que se puede observar en cada una de las figuras antes mencionadas, un círculo de color azul, en donde se encuentra un acercamiento de imagen que demuestra la veracidad de los resultados obtenidos.

Como era de esperarse la mezcla de la planta C, al tener un contenido de asfalto bastante bajo, como se evidencia en la Tabla 2.5, no cumple con esta prueba de agua hirviendo (Boiling Test).

#### **4.1.2 Análisis de los resultados de tracción indirecta**

1.- En la Tabla 3.4 se puede apreciar que para la condición de 97% de densidad relativa de compactación sin inmersión el valor de tracción indirecta mayor es el de la planta A, con un promedio de 574 kPa. Mientras que el menor valor lo tiene la planta C con un promedio de 362 kPa. La planta B presenta un valor de 497 kPa.

El coeficiente de variación se encuentra en general por debajo del 10%.

2.- Observando la Tabla 3.5 correspondiente a mezclas compactadas con el 97% de la densidad relativa con inmersión en agua, se puede apreciar una reducción de la tracción indirecta promedio de cada planta con respecto a la Tabla 3.4 (sin inmersión).

El coeficiente de variación se encuentra en general por debajo del 10%.

3.- Se puede observar desde la Figura 3.4 hasta la Figura 3.6, los gráficos en donde se relacionan los resultados de cada una de las 3 briquetas ensayadas por planta respecto a su valor de tracción indirecta.

Cabe mencionar que en dichos gráficos se encuentran marcados en naranja y azul los resultados para las diferentes alternativas de trabajo, en color naranja están los correspondientes a briquetas con 97% de densidad

relativa de compactación sin inmersión, y en color azul las briquetas con 97% de densidad relativa de compactación con inmersión. Además se muestran líneas horizontales para cada uno de los colores antes mencionados, las cuales corresponden al promedio de los valores de la tracción indirecta.

Es de notar que con los valores promedio que están trazados con líneas horizontales, se puede determinar la variación que se tiene por afectación del agua, entre el naranja y el azul.

4.- En la Tabla 3.6 se muestra los valores del porcentaje de resistencia retenida. Dos plantas se encuentran por debajo del 80% que es el valor mínimo aceptable según la normativa vigente. La mezcla de la planta B tiene un porcentaje retenido por tracción indirecta de 84,10%, que es el valor más alto. La mezcla proveniente de la planta C tiene un porcentaje de 76,06%, siendo el valor más bajo de todas las mezclas evaluadas. Mientras que la planta A tiene un porcentaje retenido por tracción indirecta de 79,15%, el cual es un valor muy próximo al exigido.

#### **4.1.3 Análisis de los resultados de estabilidad Marshall**

1.- En la Tabla 3.9 se muestran los resultados de los ensayos de estabilidad Marshall con 97% de densidad relativa de compactación sin inmersión. Se puede observar que el valor mayor de estabilidad Marshall promedio es de la planta B, que es de 1887 lbs. La planta A tiene el menor valor promedio que es de 1291 lbs.

El coeficiente de variación se encuentra en general por debajo del 10%.

2.- En la Tabla 3.10 se aprecia una reducción de la estabilidad Marshall al ensayar briquetas con 97% de densidad relativa de compactación con inmersión en agua, respecto a los resultados de la Tabla 3.9.

La mezcla de la planta con el valor más alto de estabilidad es la B con 1771 lbs. El valor más bajo corresponde a la mezcla de la planta A tiene una estabilidad de 1056lbs.

La planta con el coeficiente de variación más alto es la C con 11,81%. Por otra parte el valor más bajo es el de la planta B con un coeficiente de variación de 3,67%.

3.- Se puede observar desde la Figura 3.7 hasta la Figura 3.9, los gráficos en donde se relacionan los resultados de cada una de las 3 briquetas ensayadas por planta respecto a su valor de estabilidad Marshall. Cabe mencionar que en dichos gráficos se encuentran marcados en naranja y azul los resultados para las diferentes alternativas de trabajo, en color naranja están los correspondientes a briquetas con 97% de densidad relativa de compactación, y en color azul las briquetas con 97% de densidad relativa de compactación con inmersión. Además se muestran líneas horizontales para cada uno de los colores antes mencionados, las cuales corresponden al promedio de los valores de la estabilidad Marshall. Es de notar que con los valores promedio que están trazados con líneas horizontales, se puede determinar la variación que se tiene por afectación del agua, entre el naranja y el azul.

4.- Por medio de la Tabla 3.11 se puede visualizar los porcentajes de la estabilidad Marshall retenida por efecto de la inmersión en agua. La mezcla

de la planta B prácticamente no tuvo mucha afectación ya que el porcentaje de estabilidad Marshall retenida es de 93,8%. La mezcla con el porcentaje inferior pertenece a la planta C, con 78,2%. La planta A tiene como resultado un valor retenido de 81,8%. Aunque no existe un valor exigido para esta prueba de acuerdo al método empleado en este estudio, se considera que un valor contenido del 80% pudiera ser adecuado. Por esta razón puede asumirse que las plantas A y B presentan un buen desempeño.

## **4.2 Análisis de los resultados de los ensayos propuestos en el laboratorio**

### **4.2.1 Análisis de los resultados de módulo de rigidez**

1.- En la Tabla 3.12 pueden apreciarse los valores promedios de las briquetas compactadas al 100% de densidad relativa sin inmersión. Se observa que la planta A tiene el valor más alto con 5805 MPa, le siguen la planta B con un módulo de 4352 MPa y la planta C con 3125 MPa. De acuerdo con la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT desarrollada por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG, y en fase de prueba por parte del MTOP, la calificación de las mezclas asfálticas en función del módulo de rigidez es: Mezclas asfálticas satisfactorias de 3000 a 4000 MPa; mezclas tolerables de 2500 a 3000 MPa y de 4000 a 5000 MP; y mezclas inadecuadas valores menores a 2500 MPa o mayores a 5000 MPa. (Vila & García, 2015). De acuerdo con este criterio la mezcla correspondiente a la

planta A es inadecuada, la mezcla de la planta B es tolerable y la mezcla de la planta C es satisfactoria.

2.- La variación en cada una de las plantas por la influencia de la compactación de las mezclas o de su inmersión en agua ha tenido un comportamiento homogéneo. Por ejemplo:

En general en las mezclas de las plantas A, B y C la incidencia o caída de rigidez por efecto de la compactación es muy variable, oscilando entre 24,8% planta A y 7,4% para la planta C.

Respecto a la incidencia del agua en la rigidez, el efecto mayor aparece en la mezcla de la planta A (37,2%), seguido por la planta C (25,9). En la planta B el efecto es muy pequeño.

3.- Se puede observar desde la Figura 3.10 hasta la Figura 3.12, los gráficos en donde se relacionan los resultados de cada una de las 3 briquetas ensayadas por planta respecto a su módulo de rigidez ( $S_{mix}$ ).

Cabe mencionar que en dichos gráficos se encuentran marcados en verde, rojo y azul los resultados para las diferentes alternativas de trabajo, en color verde están los correspondientes a briquetas con 100% de densidad relativa de compactación, en color rojo las briquetas con 97% de densidad relativa de compactación sin inmersión en agua, y en color azul las briquetas con 97% de densidad relativa de compactación con inmersión. Además se muestran líneas horizontales para cada uno de los colores antes mencionados, las cuales corresponden al promedio de los respectivos módulos.

Es de notar que con los valores promedio que están trazados con líneas horizontales, se puede determinar la variación que se tiene por pérdida de compactación, entre el verde y el rojo, y por afectación del agua, entre el rojo y el azul.

#### **4.2.2 Análisis de los resultados de las pruebas de fatiga**

1.- Para el análisis del ensayo de fatiga se elaboró una tabla por planta (ver desde la Tabla 3.14 hasta la Tabla 3.16 en donde se muestran las tres condiciones de estudio. Para cada condición se muestra el esfuerzo empleado en el ensayo, la deformación unitaria inicial calculada, el módulo de rigidez (para el esfuerzo utilizado) y el número de repeticiones. Se realizaron gráficos de fatiga con dichos resultados para poder visualizar de esta forma el comportamiento a la fatiga de las plantas en cada condición (ver desde la Figura 3.13 hasta la Figura 3.18).

Las figuras muestran para cada planta en un primer caso las relaciones entre el número de repeticiones versus los esfuerzos en kPa, y en un segundo caso las relaciones entre el número de repeticiones versus las deformaciones unitarias iniciales (microstrain). En todas las plantas para las líneas de tendencia se emplea el mismo color para cada condición: color verde para 100% de densidad relativa de compactación sin inmersión, rojo para 97% de densidad relativa de compactación sin inmersión y azul para 97% de densidad relativa con inmersión en agua.

### Observaciones sobre las gráficas de repeticiones versus esfuerzos

Pueden apreciarse en la Figura 3.13, Figura 3.15 y Figura 3.17 que para todas las plantas los comportamientos obtenidos en las mezclas con el 100% de densidad relativa sin inmersión se ubican en la posición correspondiente a las mezclas de mayor rigidez (superior derecha), mientras que las mezclas con 97% de densidad relativa con inmersión en agua se sitúan en la posición de las menos rígidas (inferior izquierda). Sin embargo, en las plantas B y C las líneas de ajustes correspondientes al 100% y 97% (sin inmersión) intercambian posiciones.

### Observaciones sobre las gráficas de repeticiones versus deformaciones unitarias

Teóricamente y considerando sólo la rigidez las líneas debían de situarse de la siguiente forma: la azul (superior derecha), luego la roja y finalmente la verde (inferior izquierda), la cual tendría la mayor rigidez. Sin embargo, el comportamiento obtenido en la Figura 3.14, Figura 3.16 y Figura 3.18 muestran que la última posición mencionada ha sido ocupada en realidad por la mezcla con 97% de densidad relativa de compactación con inmersión para todas las plantas. Es decir, que el mayor daño a la fatiga está fuertemente vinculado al efecto del agua.

### Observaciones generales

En la Figura 3.19 se muestra el comportamiento a la fatiga de todas las plantas con el 100% de densidad relativa de compactación, adicionándole además las líneas de referencia correspondientes al “promedio” y al “percentil 15” de la propuesta de exigencias a mezclas asfálticas desarrollada por el Laboratorio de Carreteras de la UCSG (Vila & García, 2015). Puede observarse que la planta C en esta condición se encuentra ubicada por encima de la línea promedio, lo que indica un comportamiento adecuado. Las plantas B y A se encuentran en general entre rangos dados por el promedio y el percentil 15, por lo que su comportamiento estimado puede considerarse tolerable hasta nuevos afinamientos a futuro.

Al graficar las curvas de todas las plantas con menor compactación con inmersión (Figura 3.20) puede observarse que existe en esta condición extrema un mejor comportamiento a la fatiga en la planta C, (rango tolerable) mientras que las plantas A y B se mantiene en el rango inadecuado respecto a su desempeño a la fatiga.

#### **4.2.3 Análisis de los resultados de la deformación bajo compresión cíclica (Creep)**

1.- En la Tabla 3.17 se muestra que los valores promedios de las briquetas compactadas al 100% de densidad relativa sin inmersión para todas las plantas tienen valores por debajo de 1% de deformación. Es importante subrayar que de acuerdo a la propuesta de exigencias para pruebas de desempeño con equipo NAT desarrollado en el Laboratorio de Carreteras de la UCSG, la calificación de las mezclas asfálticas en función del porcentaje de deformación en la prueba de compresión cíclica es la siguiente: mezclas satisfactorias para valores menores o iguales a 1%, y mezclas inadecuadas para valores mayores a 1%. (Vila & García, 2015)

2.- Se puede ver desde la Figura 3.21 hasta la Figura 3.23 los gráficos en donde se reflejan los resultados de cada una de las 3 briquetas ensayadas por planta respecto a su respectiva deformación bajo compresión cíclica.

Es importante recalcar que en estos gráficos se pueden observar marcados en verde, rojo y azul los resultados para las diferentes alternativas de trabajo, en color verde están los correspondientes a briquetas con 100% de densidad relativa de compactación, en color rojo las briquetas con 97% de densidad relativa de compactación sin inmersión en agua, y en color azul las briquetas con 97% de densidad relativa de compactación con inmersión en agua. Adicionalmente, se puede ver en líneas horizontales para cada uno de los colores anteriormente mencionados, las cuales corresponden al promedio de sus respectivas deformaciones bajo compresión cíclica.

Cabe señalar, que con los valores promedio que se encuentran trazados con líneas horizontales, se puede determinar la variación que se tiene por menor compactación, entre la línea verde y la roja, y por afectación del agua, entre la línea roja y la azul.

3.- Es interesante apreciar en la Tabla 3.18 que para las briquetas compactadas al 97% de densidad relativa sin inmersión, los valores de los porcentajes de deformación continúan estando por debajo de 1%, valores adecuados.

Sin embargo, al someter las briquetas en esta última densidad relativa a la inmersión, aparece un incremento notorio en las deformaciones, especialmente en las plantas C (+0,59%) y A (+0,39).

## **CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES**

1.- En la evaluación del daño en agua empleando las pruebas convencionales recomendadas por el MTOP puede apreciarse que en la prueba de agua hirviendo de las mezclas asfálticas solo la Planta C no cumpliría la exigencia, al presentar evidencias de peladuras.

2.- Las pruebas de resistencia retenida mediante el empleo de tracción indirecta (cabezal Lottman), arrojaron valores aceptables, excepto planta C cuyo resultado es relativamente bajo.

3.- Al recurrir a la prueba de estabilidad Marshall para evaluar el daño en agua, se consideró un procedimiento similar al de tracción indirecta (ASTM 4867M) para la preparación e inmersión de briquetas. El valor más bajo obtenido lo ofrece la planta C con 78,2% y el más elevado la planta B con el 93.8%.

4.- Los resultados de rigidez retenida tuvieron poca variación entre las plantas A y C con módulos retenidos en el orden del 62,80% al 74,10% siendo el mejor comportamiento el de la planta B con el 91,76% retenido.

5.- El ensayo de fatiga se considera el más complejo de los realizados en el estudio, y se puede concluir que es el menos viable para el estudio del daño por humedad. El cambio de posición de las líneas de tendencia en las diferentes condiciones analizadas (100% de compactación sin inmersión y 97% de compactación sin y con inmersión), apreciados en los gráficos de repeticiones versus esfuerzo y repeticiones versus deformación unitaria, demuestra que existe un gran efecto del daño del agua en el comportamiento

a la fatiga, como se explica en el análisis de resultados correspondiente, pero sin tendencias claras. De acuerdo al trabajo realizado no se recomienda esta prueba para la evaluación del daño en agua

5.- Se considera que la prueba de deformación bajo compresión cíclica (Creep) es una de las que mejor evalúa el daño ante el agua en las mezclas, debido a la posibilidad del desarrollo de presiones de poros bajo las cargas distribuidas por las placas metálicas. Los resultados obtenidos indican que la planta con mayor afectación en esta prueba es la planta C.

6.- En general, si se hace una comparación entre las pruebas convencionales y de desempeño (excluyendo la fatiga) las tendencias obtenidas son coherentes, el peor comportamiento lo tendría la planta C y el mejor la planta B.

## **CAPÍTULO 6.- RECOMENDACIONES**

1.- Continuar estudiando ésta temática con mayor intensidad, vinculándola con la calidad y composición mineralógica de las rocas.

2.- En el proceso de elaboración de las briquetas se debe tener mayor control con la temperatura y con el número de golpes por su incidencia en el porcentaje de vacíos, parámetro vital que influye directamente en los resultados.

3.- En cuanto a la saturación en las briquetas se debe controlar cuidadosamente su variación. Para próximas investigaciones se recomienda en lo posible mantener porcentajes de saturación en rangos más pequeños, es decir del 60% al 70% de saturación en las briquetas a ensayar, aunque en las normas sea permitido desde el 55% hasta el 80% de saturación, con la finalidad de obtener resultados más precisos.

## CAPÍTULO 7.- BIBLIOGRAFÍA

Araiza Armenta, J. A. (2002). Manejo de planta de concreto asfáltico y construcción de carpeta. Universidad de Sonora.

Asphalt Institute. (1992). *Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente MS-22*. Obtenido de [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_130\\_181\\_83\\_1181.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf)

Asphalt Institute. (1997). *Mix Design Methods for Asphalt Concrete* (Sexta ed.). Lexington, Kentucky, Estados Unidos: Manual Series No. 2.

El comercio, P. R. (2016). *El pavimento de la av. Cardenal de la Torre, sur de Quito, tiene fisuras y huecos*. Obtenido de <http://www.elcomercio.com/actualidad/quito-calles-avenidas-baches-epmmop.html>

Gamba, G., & Mercado, J. (2004). Concepción de un ensayo para establecer el efecto de la presión de poro en el deterioro por humedad de las mezclas asfálticas. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Garnica, P., Delgado, H., Gómez, J., Alonso, S., & Alonso, H. (2004). *Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.

González, S. (2015). Estado del Arte en el Estudio de la adherencia entre el asfalto y el agregado. Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Gorkem, C., & Sengoz, B. (2009). *Predicting Stripping and Moisture Induced Damage of Asphalt Concrete Prepared With Polymer Modified Bitumen and Hydrated Lime*. Construction and Building Materials.

Gutierrez, A., & Ramirez, L. E. (2008). Como saber si nuestra mezcla asfáltica será resistente a la acción del agua. *XXXV Reunión del Asfalto*. QuimiKao Mexico S.A. de C. V. Obtenido de <https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwi76KGpw4zLAhWGKB4KHfgXCGUQFgggMAE&url=http%3A%3A>

2F%2Fxa.yimg.com%2Fkq%2Fgroups%2F13240622%2F47306812%2Fname%2FComo-saber-si-nuestra-mexcla-asfaltica-sera-resistente-al-agua.pdf&us

Haddock, J. (2011). *HMA Volumetric Handout*. Obtenido de Purdue University: <https://engineering.purdue.edu/CE/Academics/Groups/Materials/Details/FacultyInfo/JHaddock/CE331PDFFILES/HMAVolumetricHandout.pdf>

Hidalgo-Riera. (2016). ESTUDIO DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFALTICAS.

Ingeniería civil en el Salvador. (marzo de 2009). Obtenido de <http://ingenieriasalva.blogspot.com/2009/03/deterioros-de-pavimentos-flexibles.html>

Kennedy, T. W., Roberts, F. L., & Anagnos, J. N. (1984). *Texas Boiling Test for Evaluating Moisture Suceptibility of Asphalt Mixtures*. Austin: Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.

Kraemer, C., & Del Val, M. A. (1993). *Firmes y Pavimentos*. Madrid.

Luis Naveda, H. (2014). INCIDENCIA DEL CONTENIDO DE ARENA DE RÍO EN LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

McGennis, R. B., Kennedy, T. W., & Machemehl, R. B. (1984). *STRIPPING AND MOISTURE DAMAGE IN ASPHALT IN ASPHALT MIXTURES*. Austin.

Morales, C. A. (30 de Noviembre de 2007). Análisis de la Metodología Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas en México. Cholula, Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.

MTOP, M. (2002). *Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Quito, Ecuador: MOP-001-F2002.

Nuñez, K. (2014). Trabajo de Titulación. *Estudio de Mezclas Asfálticas colocadas en vías de la Región Sierra del Ecuador mediante Pruebas de Desempeño*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Reyes, O. J., & Camacho, J. (8 de abril de 2008). *Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas*. Obtenido de Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, No. 23:

<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/3027/4461>

- Salado Martínez, F., & Estrada, M. (2013). Evaluación del efecto de la humedad en mezclas tibias al utilizar los aditivos rediset y sasobit. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 13(1).
- Tamayo, J., Gutierrez, C., & Cabrera, J. (1983). Estudio de la Degradación de los Agregados Pétreos durante la Vida Útil de los Pavimentos. *Ingeniería e Investigación*, 13-21.
- Tarrer, A., & Wagh, V. (1991). *The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding*. Washington: Strategic Highway Research Program.
- Velasquez, R., Moraes, R., & Bahia, H. (Diciembre de 2011). Measuring the Effect of Moisture on Asphalt-Aggregate Bond with the Bitumen Bond Strength Test. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD: JOURNAL OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD*, No. 2209, págs. 70-81.
- Vila, R., & García, G. (2015). Propuesta de exigencias en la evaluación de desempeño de mezclas asfálticas con equipo Nottingham Asphalt Mix Tester. *Alternativas*, 18-24.

## ANEXOS

### Anexo 1. Tablas de densidades y porcentaje de vacíos por planta.

PLANTA A						
7% DE VACIOS				# DE GOLPES=	35	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1084	600	1088	488	2221	7,14
2	1064	590	1068	478	2226	6,94
3	1135	628	1139	511	2221	7,14
4	1118	620	1123	503	2223	7,08
5	1224	679	1228	549	2230	6,79
6	1104	613	1109	496	2226	6,95
7	1130	624	1134	510	2216	7,37
8	1167	648	1172	524	2227	6,89
9	1231	685	1236	551	2234	6,60
10	1241	690	1246	556	2232	6,69
11	1208	670	1212	542	2229	6,82
12	1170	649	1175	526	2224	7,01
13	1167	649	1172	523	2231	6,72
14	1184	658	1188	530	2234	6,61
15	1090	600	1094	494	2206	7,76
16	1170	649	1173	524	2233	6,65
17	1147	636	1151	515	2227	6,89
18	1152	638	1157	519	2220	7,21
19	1144	634	1148	514	2226	6,95
20	1133	628	1138	510	2222	7,13
21	1135	630	1138	508	2234	6,59
22	1171	649	1175	526	2226	6,93
23	1163	644	1167	523	2224	7,04
24	1086	600	1090	490	2216	7,34
25	1143	631	1147	516	2215	7,39
26	1142	633	1146	513	2226	6,93
27	1184	657	1188	531	2230	6,78
28	1187	657	1191	534	2223	7,07
29	1207	670	1211	541	2231	6,73
30	1174	650	1178	528	2223	7,04
4% DE VACIOS				# DE GOLPES=	75	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1278	723	1281	558	2290	4,25
2	1259	714	1262	548	2297	3,95
3	1251	712	1255	543	2304	3,68
4	1269	719	1272	553	2295	4,07
5	1281	725	1284	559	2292	4,20
6	1255	714	1258	544	2307	3,55

PLANTA B						
7% DE VACIOS				# DE GOLPES=	38	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1146	600	1150	550	2084	7,06
2	1158	604	1161	557	2062	8,01
3	1136	594	1140	546	2081	7,20
4	1129	590	1133	543	2079	7,26
5	1201	628	1205	577	2081	7,16
6	1186	618	1189	571	2077	7,36
7	1156	605	1160	555	2083	7,10
8	1205	631	1209	578	2085	7,01
9	1208	632	1212	580	2083	7,10
10	1170	610	1174	564	2074	7,47
11	1148	597	1151	554	2072	7,57
12	1109	578	1112	534	2077	7,37
13	1130	592	1135	543	2081	7,18
14	1117	586	1122	536	2084	7,05
15	1145	597	1148	551	2078	7,31
16	1078	663	1182	519	2077	7,36
17	1098	574	1102	528	2080	7,25
18	1056	552	1060	508	2079	7,28
19	1108	580	1112	532	2083	7,10
20	1100	575	1104	529	2079	7,25
21	1049	547	1052	505	2077	7,35
22	1239	649	1242	593	2089	6,81
23	1222	640	1226	586	2085	6,99
24	1200	629	1205	576	2083	7,08
25	1196	630	1204	574	2084	7,06
26	1199	628	1204	576	2082	7,15
27	1196	627	1202	575	2080	7,23
28	1181	618	1186	568	2079	7,26
29	1215	636	1220	584	2080	7,20
30	1192	622	1196	574	2077	7,37
4% DE VACIOS				# DE GOLPES=	75	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1227	658	1230	572	2145	4,32
2	1149	615	1152	537	2140	4,56
3	1218	652	1221	569	2141	4,52
4	1159	620	1162	542	2138	4,62
5	1207	650	1210	560	2155	3,86
6	1167	623	1170	547	2133	4,84

PLANTA C						
7% DE VACIOS				# DE GOLPES=	37	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1065	557	1068	511	2085	6,8
2	1080	560	1082	522	2070	7,5
3	1201	625	1202	577	2081	7,0
4	1101	570	1104	535	2059	7,9
5	1105	576	1106	529	2087	6,7
6	1125	585	1126	541	2080	7,0
7	1185	614	1186	572	2070	7,4
8	1067	555	1068	513	2081	7,0
9	1087	565	1088	523	2078	7,1
10	1190	618	1191	573	2077	7,1
11	1127	584	1128	544	2072	7,4
12	1228	644	1232	588	2089	6,6
13	1049	544	1050	505	2075	7,2
14	1118	584	1120	536	2087	6,7
15	1215	632	1217	585	2078	7,1
16	1094	571	1095	523	2089	6,6
17	1081	564	1083	519	2082	6,9
18	1189	617	1190	573	2074	7,3
19	1109	582	1113	531	2091	6,5
20	1179	622	1189	567	2078	7,1
21	1062	554	1063	509	2086	6,7
22	983	513	984	471	2087	6,7
23	1067	557	1068	511	2087	6,7
24	1022	532	1023	491	2081	7,0
25	1017	531	1018	487	2089	6,6
26	1137	593	1138	545	2087	6,7
27	1085	567	1086	519	2089	6,6
28	1161	607	1162	555	2091	6,5
29	1190	614	1192	578	2059	8,0
30	1092	571	1094	523	2088	6,7
4% DE VACIOS				# DE GOLPES=	75	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1,0	1064	573	1070	497	2141	4,3
2,0	1065	572	1068	496	2146	4,1
3,0	1068	575	1072	497	2148	4,0
4,0	1044	574	1059	485	2152	3,8
5,0	1082	579	1087	508	2130	4,8
6,0	1037	560	1041	481	2156	3,6



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **GARCÉS ANDRADE, DENNIS XAVIER**, con C.C: # 1722777040 autor del trabajo de titulación **EVALUACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN TRES MEZCLAS ASFÁLTICAS PRODUCIDAS EN LA REGIÓN SIERRA** 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, **20 de septiembre de 2016**

f.   
**Garcés Andrade, Dennis Xavier**

1722777040



## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Evaluación del daño por humedad en tres mezclas asfálticas producidas en la región sierra		
<b>AUTOR(ES)</b>	Dennis Xavier, Garcés Andrade,		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Rolando Vila Romaní		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Ingeniería		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Civil		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Civil		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	<b>20 de septiembre de 2016</b>	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	<b>119</b>
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Ingeniería en Pavimentos, Control y Mantenimiento de Pavimentos Flexibles		
<b>PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:</b>	daño en agua, tracción indirecta, estabilidad Marshall, Equipo NAT, módulo de rigidez, fatiga		
<b>RESUMEN/ABSTRACT</b>			
<p>En este estudio se presenta la ejecución de una evaluación del daño por humedad en tres mezclas asfálticas provenientes de la región Sierra del Ecuador. Las plantas utilizan agregados con diferentes composiciones mineralógicas y diseños aprobados. Con las mezclas obtenidas se elaboraron briquetas con 100% y 97% de densidad relativa de compactación, las cuales se analizaran con y sin inmersión en agua. El objetivo general del estudio es la evaluación del daño en agua empleando pruebas convencionales (agua hirviendo, tracción indirecta y estabilidad Marshall), y pruebas de desempeño con equipo NAT (módulo de rigidez, fatiga y creep).</p> <p>Los resultados principales de este estudio son: en las pruebas de agua hirviendo solo en la planta C se presenta evidencias de peladura. En las pruebas de resistencia a la tracción indirecta retenida solo la planta C no sobrepasa el 80% exigido, aunque la planta A presenta un resultado muy aproximado (79,2%) al exigido. En las pruebas de estabilidad Marshall retenida solo la planta C presenta un resultado inferior al (80%) valor tomado como referencia. Las pruebas de desempeño parecen ser viables para evaluar el daño en agua, el mejor comportamiento empleando la prueba de módulo de rigidez lo obtuvo la planta B y el peor la planta C. Un comportamiento similar se obtiene en la prueba creep. Sin embargo, el mejor comportamiento empleando la prueba de fatiga lo muestra la planta C y el peor la planta A.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-4-2390616	E-mail: javis.garces@hotmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre:</b> Clara Glas Cevallos		
	<b>Teléfono:</b> +593-4-2202763		
	<b>E-mail:</b> clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			



**Presidencia  
de la República  
del Ecuador**



**Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes**



**SENESCYT**

Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación