



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TÍTULO:

**“ESTUDIO DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS
ASFÁLTICAS EMPLEANDO DIFERENTES MÉTODOS”**

AUTORES:

Hidalgo Flores, Alberto José

Riera Cedeño, Joffre Kevin

**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 **Alberto José Hidalgo Flores y Joffre Kevin Riera Cedeño**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR (A)

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, Msc.

Guayaquil, a los 23 días del mes de marzo del año 2016



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Alberto José Hidalgo Flores**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas empleando diferentes métodos** previo a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación, de tipo **experimental e investigativo** referido.

Guayaquil, a los 23 días del mes de marzo del año 2016

EL AUTOR

Alberto José Hidalgo Flores



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Joffre Kevin Riera Cedeño**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas empleando diferentes métodos** previo a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación, de tipo **experimental e investigativo** referido.

Guayaquil, a los 23 días del mes de marzo del año 2016

EL AUTOR

Joffre Kevin Riera Cedeño



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Alberto José Hidalgo Flores**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas empleando diferentes métodos**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 23 días del mes de marzo del año 2016

EL AUTOR:

Alberto José Hidalgo Flores



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Joffre Kevin Riera Cedeño**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas empleando diferentes métodos**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 23 días del mes de marzo del año 2016

EL AUTOR:

Joffre Kevin Riera Cedeño

AGRADECIMIENTO

Primero quisiera agradecerle a Dios por todas las bendiciones que me ha dado; segundo a mi familia por su gran apoyo en todos los momentos, en especial a mis padres Alberto e Ileana, que son los pilares fundamentales en mi vida, los que me han enseñado valores y me han dado la fortaleza para enfrentar todos los retos que me he propuesto. Además agradezco a todas las personas que me han ayudado a lo largo de mi paso por la universidad, y sobre todo a mi tutor el Dr. Rolando Vila, por su tiempo, dedicación y paciencia en el desarrollo de este trabajo de titulación. Además a mi compañero de tesis Joffre Riera por su esfuerzo y dedicación al realizar este trabajo.

Alberto Hidalgo Flores

Agradeciendo primeramente a Dios y a mis padres cuyo apoyo es el reflejo de mis éxitos. A mi tutor el Dr. Rolando Vila Romaní quien con su sabiduría dio luces a este trabajo. Al Ing. José Jaramillo y a mi compañero de tesis Alberto Hidalgo.

Joffre Riera Cedeño

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios, porque sin el nada de esto hubiera sido posible, y a mis padres por todo su apoyo incondicional y comprensión. También a mis hermanos y demás seres queridos por su ayuda y preocupación en todo momento.

Alberto Hidalgo Flores

Dedicado especialmente a mi abuelo, Ramón Riera Rodríguez, quien en vida me inculcó el amor al trabajo honesto y a la superación personal.

Joffre Riera Cedeño

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Estudios previos	2
1.3. Importancia y justificación del tema	3
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Alcance.....	6
CAPÍTULO 2.- INCIDENCIA DE LA HUMEDAD EN LAS MEZCLAS ASFALTICAS	7
2.1. Criterios generales sobre mezclas asfálticas	7
2.1.1. Generalidades	7
2.1.2. Parámetros volumétricos.....	8
2.1.1.1. Gravedad específica bruta “bulk” (Gmb).....	8
2.1.1.2. Densidad máxima teórica (Gmm).....	10
2.1.1.3. Porcentaje de vacíos con aire (Va)	12
2.1.1.4. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)	13
2.1.1.5. Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)	14
2.1.1.6. Granulometría combinada.....	15
2.1.1.7. Porcentaje de asfalto (Pb).....	19
2.1.2. Parámetros resistentes.....	23
2.1.2.1. Estabilidad y Flujo	23
2.2. Daño en agua	26
2.2.1. Generalidades	26
2.2.2. Mecanismos de falla asociados al daño en agua	28
2.2.2.1. Stripping.....	28
2.2.2.3. Presión de poros	32
2.2.2.4. Efectos ambientales	33
2.3. Estudio experimental programado para evaluar daño en agua... 34	34
2.3.1. Metodología de trabajo.....	34
2.3.2. Ensayos a realizarse	41
2.3.2.1. Ensayos convencionales recomendados por el MTOP.....	41

I.	Prueba de agua hirviendo (Boiling Test) – ASTM D 3625.....	41
II.	Pérdida de resistencia por tracción indirecta (TSR) – ASTM D 4867 – AASHTO T 283.....	43
III.	Estabilidad Marshall retenida.....	45
2.3.2.2.	Ensayos propuestos en el laboratorio.....	46
I.	Módulo de rigidez.....	46
II.	Fatiga.....	50
III.	Deformación bajo compresión cíclica (Creep).....	53
CAPÍTULO 3.-	RESULTADOS OBTENIDOS.....	56
3.1.	Resultados de las pruebas convencionales recomendadas por el MTOP.....	56
3.1.1.	Prueba de agua hirviendo (Boiling test).....	56
3.1.2.	Resultados de tracción indirecta.....	60
3.1.3.	Resultados de estabilidad Marshall.....	67
3.2.	Resultados de los ensayos propuestos en el laboratorio.....	74
3.2.1.	Resultados de módulo de rigidez.....	74
3.2.2.	Resultados de las pruebas de fatiga.....	78
3.2.3.	Resultados de la deformación bajo compresión cíclica (Creep).....	90
CAPÍTULO 4.-	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	95
4.1.	Análisis de los resultados de las pruebas convencionales recomendadas por el MTOP.....	95
4.1.1.	Análisis de los resultados de la prueba de Agua Hirviendo (Boiling Test).....	95
4.1.2.	Análisis de los resultados de tracción indirecta.....	96
4.1.3.	Análisis de los resultados de estabilidad Marshall.....	98
4.2.	Análisis de los resultados de los ensayos propuestos en el laboratorio.....	100
4.2.1.	Análisis de los resultados de módulo de rigidez.....	100
4.2.2.	Análisis de los resultados de las pruebas de fatiga.....	103
4.2.3.	Análisis de los resultados de la deformación bajo compresión cíclica (Creep).....	106
CAPÍTULO 5.-	CONCLUSIONES.....	109
CAPÍTULO 6.-	RECOMENDACIONES.....	111
CAPÍTULO 7.-	BIBLIOGRAFÍA.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Baches en Guayaquil.....	4
Figura 1.2. Peladura en Capa Asfáltica	6
Figura 2.1. Ilustración de los parámetros de diseño volumétricos	8
Figura 2.2. Granulometría de la planta A	16
Figura 2.3. Granulometría de la planta B	17
Figura 2.4. Granulometría de la planta C	17
Figura 2.5. Granulometría de la planta D	18
Figura 2.6. Granulometría de la planta E	18
Figura 2.7. Ahuellamiento por falla de la mezcla asfáltica	24
Figura 2.8. Fallas en la adherencia entre el agregado y asfalto	26
Figura 2.9. Pérdida de cohesión del mástico asfáltico	27
Figura 2.10. Degradación del agregado mineral	27
Figura 2.11. Desvestimiento (stripping)	29
Figura 2.12. Desprendimiento en pavimento	30
Figura 2.13. Distribución de briquetas por planta.....	37
Figura 2.14. Distribución de briquetas	38
Figura 2.15. Balanza digital del laboratorio de la UCSG	39
Figura 2.16. Picnómetro y bomba de vacíos.....	39
Figura 2.17. Baño maría del laboratorio de carreteras de la UCSG.....	40
Figura 2.18. Briquetas en baño maría.....	41
Figura 2.19. Ensayo de tracción indirecta	44
Figura 2.20. Ensayo de estabilidad Marshall	45
Figura 2.21. Ensayo de módulo de rigidez con equipo NAT	47
Figura 2.22. Ensayo de módulo de rigidez en equipo NAT con inmersión....	48
Figura 2.23. Resultado de módulo de rigidez bajo deformación controlada. Briqueta C2	49
Figura 2.24. Resultado de módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado. Briqueta C1	50
Figura 2.25. Ensayo de fatiga con equipo NAT.....	51
Figura 2.26. Resultado de fatiga. Briqueta C2	52
Figura 2.27. Ensayo de fatiga en equipo NAT con inmersión	53
Figura 2.28. Resultado de deformación bajo compresión cíclica. Briqueta C4	54
Figura 2.29. Ensayo de deformación bajo compresión cíclica en equipo NAT con inmersión.....	55
Figura 3.1. Daño en agua. Planta A.....	56
Figura 3.2. Daño en agua. Planta B.....	57
Figura 3.3. Daño en agua. Planta C.....	57
Figura 3.4. Daño en agua. Planta D.....	58
Figura 3.5. Daño en agua. Planta E.....	58
Figura 3.6. Diagrama de carga versus deformación horizontal de prueba de tracción indirecta sin inmersión.....	61

Figura 3.7. Diagrama de carga versus deformación horizontal de prueba de tracción indirecta con inmersión.....	63
Figura 3.8. Diagrama de carga versus deformación de prueba de estabilidad Marshall sin inmersión.	68
Figura 3.9. Diagrama de carga versus deformación de prueba de estabilidad Marshall con inmersión.	70
Figura 3.10. Resultados Smix. Planta A	75
Figura 3.11. Resultados Smix. Planta B	75
Figura 3.12. Resultados Smix. Planta C	76
Figura 3.13. Resultados Smix. Planta C	76
Figura 3.14. Resultados Smix. Planta E	77
Figura 3.15. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta A.	79
Figura 3.16. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta A.	79
Figura 3.17. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta B.	81
Figura 3.18. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta B.	81
Figura 3.19. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta C.	83
Figura 3.20. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta C.	83
Figura 3.21. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta D.	85
Figura 3.22. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta D.	85
Figura 3.23. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta E.	87
Figura 3.24. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta E.	87
Figura 3.25. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Briquetas con 100% de energía – sin inmersión.....	88
Figura 3.26. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Briquetas con 97% de energía – con inmersión.	89
Figura 3.27. Resultados Creep. Planta A.....	91
Figura 3.28. Resultados Creep. Planta B.....	91
Figura 3.29. Resultados Creep. Planta C	92
Figura 3.30. Resultados Creep. Planta D	92
Figura 3.31. Resultados Creep. Planta E.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores RICE por planta	10
Tabla 2.2. Porcentaje de pasantes para capas de rodadura en los pavimentos asfálticos del Ecuador.....	16
Tabla 2.3. Contenido de asfalto. Planta A.....	21
Tabla 2.4. Contenido de asfalto. Planta B.....	22
Tabla 2.5. Contenido de asfalto. Planta C	22
Tabla 2.6. Contenido de asfalto. Planta D	22
Tabla 2.7. Contenido de asfalto. Planta E.....	23
Tabla 2.8. Clasificación del agregado mineral por planta	35
Tabla 3.1. Resultados de la prueba de agua hirviendo.....	59
Tabla 3.2. Resultados de ensayo de tracción indirecta de la planta B; 97% de energía de compactación; sin inmersión.....	60
Tabla 3.3. Resultados de ensayo de tracción indirecta de la planta C; 97% de energía de compactación; con inmersión.	62
Tabla 3.4. Resultados de ensayos de tracción indirecta de todas las plantas, 97% de energía de compactación; sin inmersión.....	64
Tabla 3.5. Resultados de ensayos de tracción indirecta de todas las plantas, 97% de energía de compactación; con inmersión.	65
Tabla 3.6. Resultados de porcentaje de resistencia retenida (TSR) por planta	66
Tabla 3.7. Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de la planta C; 97% de energía de compactación; sin inmersión.....	67
Tabla 3.8. Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de la planta C; 97% de energía de compactación; con inmersión.	69
Tabla 3.9. Resultados de ensayos de estabilidad Marshall de todas las plantas, 97% de energía de compactación; sin inmersión.	71
Tabla 3.10. Resultados de ensayos de estabilidad Marshall de todas las plantas, 97% de energía de compactación; con inmersión.....	72
Tabla 3.11. Resultados de porcentaje de estabilidad Marshall retenida por planta	73
Tabla 3.12. Resultados de los ensayos de módulo de rigidez	74
Tabla 3.13. Resumen de las afectaciones al módulo de acuerdo a la compactación y a la inmersión.....	77
Tabla 3.14. Resultados de ensayo de fatiga planta A.....	78
Tabla 3.15. Resultados de ensayo de fatiga planta B.....	80
Tabla 3.16. Resultados de ensayo de fatiga planta C.....	82
Tabla 3.17. Resultados de ensayo de fatiga planta D.....	84
Tabla 3.18. Resultados de ensayo de fatiga planta E.....	86
Tabla 3.19. Resultados de los ensayos de deformación bajo compresión cíclica	90
Tabla 3.20. Resumen de las afectaciones al Creep de acuerdo a la compactación y a la inmersión.....	93

Tabla 3.21. Resumen de todos los resultados obtenidos en los ensayos.... 94

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tablas de densidades y porcentaje de vacíos por planta	115
Anexo 2. Figuras con la relación carga vs deformación en la condición sin inmersión en agua para todas las briquetas ensayadas por tracción indirecta	120
Anexo 3. Figuras con la relación carga vs deformación en la condición con inmersión en agua para todas las briquetas ensayadas por tracción indirecta	127
Anexo 4. Figuras con la relación carga vs deformación en la condición sin inmersión en agua para todas las briquetas ensayadas por estabilidad Marshall	135
Anexo 5. Figuras con la relación carga vs deformación en la condición con inmersión en agua para todas las briquetas ensayadas por estabilidad Marshall	142

RESUMEN

En este trabajo se presenta la realización de un estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas provenientes de 5 plantas de la región Costa del Ecuador. Estas plantas contienen agregados con distintas composiciones mineralógicas y cuentan con diseños aprobados. Con cada una de las mezclas se prepararon briquetas con 100% y 97% de energía de compactación, para ensayar en condiciones sin y con inmersión en agua. El objetivo general del trabajo 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 compresión cíclica).

En el estudio se obtuvo que: en la prueba de agua hirviendo solo 2 plantas, la D y E, no cumplieron con la exigencia. En las pruebas de tracción indirecta se obtuvieron resultados muy bajos, algo llamativo y que requiere estudios posteriores. En la prueba Marshall los resultados fueron muy particulares para cada una de las plantas. El valor más bajo lo ofrece la planta E con 58%. Las pruebas de desempeño para evaluar el daño en agua se lo considera posible. Los módulos de rigidez retenidos tuvieron poca variación entre las plantas B, C, D y E con valores en el orden del 76% al 79%. Las pruebas de fatiga en condiciones óptimas ofrecen comportamientos similares, pero al final del procedimiento tienen una variación significativa, teniendo los peores resultados las plantas E y D. En la prueba creep los resultados obtenidos indican que las plantas con mayores afectaciones fueron la E, B y D.

Palabras Claves: daño en agua, tracción indirecta, estabilidad Marshall, módulo de rigidez, fatiga, creep, desvestimiento.

ABSTRACT

In this thesis is presented a study of moisture damage in asphalt mixtures from 5 plants of the coastal region of Ecuador. These plants contain aggregates with different mineralogical compositions and have approved designs. With each of the mixtures were prepared briquettes with 100% and 97% of compaction energy, for testing in conditions with and without immersion in water. The overall objective of this work is the assessment of damages in water using conventional tests (boiling water test, indirect tensile and Marshall stability), and performance tests with NAT equipment (stiffness modulus, fatigue and cyclic compression).

In the study it was found that: in the boiling water test only 2 plants, D and E, did not comply with the requirement. In the indirect tensile test, the results were very low, something flashy and that requires further studies. In the Marshall stability test, the results were very specific to each plant. The lowest value is offered by plant E with 58%. Performance tests to assess water damage are considered possible. The retained stiffness modules had little variation between plants B, C, D and E with values in the order of 76% to 79%. Fatigue tests under optimal conditions, offer similar behaviors, but at the end of the procedure they have a significant variation, presenting the worst results, the plants E and D. In the creep test, the obtained results indicate that the most affected plants were E, B and D.

Keywords: damage in water, indirect tensile, Marshall stability, stiffness modulus, stripping, fatigue, creep, stripping.

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes

Las plantas de asfalto en el Ecuador se rigen bajo los criterios del método de diseño Marshall (Asphalt Institute, 1997), lo cual además de contribuir a la realización de diseños, es el punto de partida para los controles de calidad a las mezclas producidas en las diversas plantas, dichos procedimientos se encuentran estipulados en las especificaciones técnicas vigentes en el país (MTO, 2002).

La estabilidad Marshall y el flujo, son los parámetros resistentes usuales en los procedimientos antes mencionados y ambos se relacionan con el control de las deformaciones plásticas. En cuanto a las pruebas para el control de fisuras y del efecto producido por el agua se considera que nuestras exigencias aún no son suficientes. A pesar de que se elaboran los diseños y se realizan los controles respectivos en las mezclas asfálticas, es muy habitual observar en el Ecuador pavimentos dañados al poco tiempo de su construcción, lo que se refleja en la escasa durabilidad de las vías del país. Durante el período de invierno la concurrencia de los daños suele sufrir un aceleramiento, intensificándose con la presencia de fenómenos como El Niño.

En las especificaciones del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) la evaluación del daño por humedad puede hacerse de dos maneras posibles: la primera una evaluación visual de los desprendimientos

superficiales del asfalto observados en una mezcla colocada en agua hirviendo (procedimiento de poca precisión y anticuado); y la segunda determinando la resistencia a la tracción indirecta retenida en briquetas luego de un proceso de inmersión en agua (procedimiento válido pero enfocado a un solo tipo de fallo).

1.2. Estudios previos

En el Ecuador no se evidencian trabajos o investigaciones previas respecto al tema de daño por humedad en mezclas asfálticas, pese a que este debería ser un tema prioritario e importante, ya que está demostrado en estudios internacionales que gran parte de los pavimentos asfálticos se deterioran por el efecto del agua.

Cabe mencionar, que este tema está muy relacionado con la calidad de los agregados provenientes de las fuentes de aprovisionamiento y cuyas características inciden en la mayor o menor adherencia con el asfalto. De hecho no existe en el Ecuador una prueba estandarizada para la evaluación de la adherencia agregado-asfalto, y solo se determina el daño en agua por alguna de las pruebas antes mencionada. No se considera además que exista un control riguroso y sistemático a los agregados que componen la mezcla asfáltica.

En el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, actualmente se están realizando estudios respecto al tema en mención, y justamente éste trabajo

de titulación tiene como finalidad aportar datos relevantes a la investigación en mención que se está llevando a cabo en dicho laboratorio.

Según estudios internacionales, en el tema de daño por humedad en mezclas asfálticas, confluyen varios mecanismos de falla diferentes que pueden interactuar simultáneamente o por sí mismos. El mecanismo de falla más importante es el “desvestimiento” (stripping) que involucra entre otros a: efectos de separación, desplazamiento, socavación hidráulica y emulsificación espontánea. 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 (Tarrer & Wagh, 1991).

1.3. Importancia y justificación del tema

En nuestras vías es común presenciar una aceleración del deterioro en los pavimentos flexibles de carreteras y calles durante la época lluviosa. Este hecho es más significativo en la región costa en la cual la época de lluvia tiene una duración aproximada de cuatro meses de manera continua, por lo que la magnitud de los daños es significativa. Esto repercute en que los trabajos de mantenimiento y rehabilitación sean considerables, generando un gasto importante para las distintas entidades responsables cada año. El daño de calzadas afecta también a los distintos usuarios que las transitan, provocando daños en los vehículos y afectación en los tiempos de viaje, como se puede apreciar en la Figura 1.1.

En las mezclas asfálticas se debe analizar la mecánica del sistema ligante asfáltico – agregado mineral. Si bien existen estándares de calidad para el asfalto y para el agregado mineral, independientes entre sí, es conveniente analizar los diferentes comportamientos de una mezcla (fatiga, deformaciones) variando la calidad del agregado mineral y empleando distintas condiciones (con inmersión y sin inmersión).

Se considera de gran importancia tener pavimentos flexibles de mayor durabilidad, es decir, donde el deterioro generado por el agua sea reducido. A ello puede contribuir un estudio empleando pruebas con tecnologías distintas a las usadas en la actualidad y teniendo como un aspecto principal el manejo de agregados minerales de las diferentes canteras principales del país, empleadas comúnmente en mezclas asfálticas. Esto permitiría obtener como resultado nuevos conocimientos sobre las fallas mecánicas generadas en las mezclas.



Figura 1.1. Baches en Guayaquil

Fuente: (Barros, 2012)

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el daño en agua mediante pruebas convencionales de agua hirviendo, tracción indirecta y estabilidad Marshall, más pruebas de desempeño: módulo de rigidez, compresión cíclica y fatiga, a mezclas asfálticas densas provenientes de cinco plantas de la región Costa del Ecuador.

1.4.2. Objetivos específicos

- Preparar las briquetas correspondientes a cada una de las 5 plantas asfálticas.
- Determinar los parámetros volumétricos en dichas briquetas de acuerdo a las normativas vigentes.
- Determinar la resistencia retenida bajo la acción del agua empleando pruebas convencionales.
- Realizar pruebas de desempeño en briquetas con y sin inmersión en agua utilizando un equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT).
- Analizar los resultados obtenidos de acuerdo a criterios estadísticos.

1.5. Alcance

Este trabajo pretende ampliar la visión que nos ofrecen las pruebas convencionales que exigen las normativas del MTOP respecto al daño por humedad, y contrastarlas con los resultados obtenidos de pruebas de desempeño con equipo NAT aplicadas a briquetas sometidas a los mismos procedimientos de saturación.

Este estudio se relaciona con uno de los problemas más importantes en las mezclas. Si el agua penetra en una capa asfáltica podrá actuar como un efectivo agente destructor de las delgadas películas de asfalto que recubren los agregados, siguiendo mecanismos químicos y físicos. De esta forma ocurre una pérdida de adherencia y en último caso una pérdida de la resistencia interna de la mezcla, que implicará destrucciones prematuras como fisuras, deformación permanente y desmoronamientos (peladuras) como se observa en la Figura 1.2, los cuales suelen presentarse en las temporadas de lluvia de la costa ecuatoriana.



Figura 1.2. Peladura en Capa Asfáltica

Fuente: (Vila & García, 2016)

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

2.1. Criterios generales sobre mezclas asfálticas

2.1.1. Generalidades

De acuerdo a algunos autores (Kraemer & Del Val, 1993), las mezclas asfálticas, también conocidas como aglomerados, se encuentran conformadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado, de tal manera que resultan envueltos por una capa continua (de asfalto). Estas mezclas son elaboradas en centrales fijas o móviles, y son trasladadas después a obra en donde se extienden y se compactan.

Una mezcla asfáltica en general se encuentra compuesta por agregado grueso, agregado fino y asfalto, y la proporción en que se distribuyen estos elementos depende de un diseño de mezcla, el cual puede ser realizado por el método Marshall, método SUPERPAVE, método Hveem, entre otros. El método de diseño de mezclas asfálticas más utilizado en el Ecuador, es el método Marshall, razón por la cual el presente trabajo se basa en briquetas elaboradas a través de dicho método.

Cabe mencionar que el asfalto empleado en nuestras plantas es del tipo AC-20, y el porcentaje de asfalto que se utiliza en las mezclas se encuentran usualmente entre el 5,5 y el 6,5%.

Se debe recalcar que para el presente trabajo no se realizó ningún diseño de mezcla, puesto que este estudio se basa en mezclas con diseños ya aprobados y producidas casi a diario por importantes plantas.

2.1.2. Parámetros volumétricos

Un aspecto importante a considerar al estudiar el comportamiento de una mezcla asfáltica es la determinación de los parámetros volumétricos, ya que son mediciones relacionadas con la constitución de la mezcla, su compactación y su posible funcionamiento. Por ello se expone a continuación la determinación de dichos parámetros y se lo ilustra en la Figura 2.1.

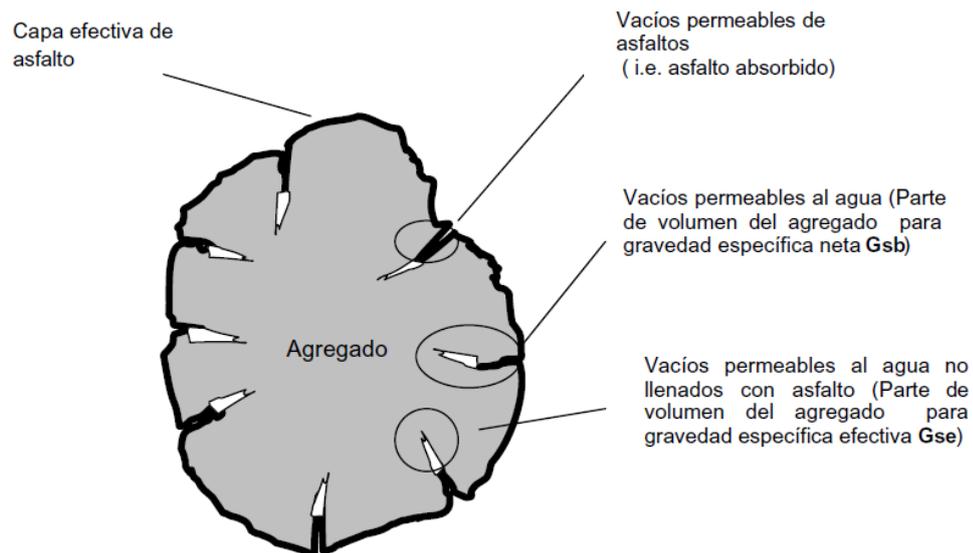


Figura 2.1. Ilustración de los parámetros de diseño volumétricos

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

2.1.1.1. Gravedad específica bruta “bulk” (G_{mb})

La misma se la puede definir como la relación entre el peso de una unidad de volumen de mezcla asfáltica caliente compactada y el peso de un volumen igual de agua (incluyendo vacíos permeables como parte de dicho volumen). (Haddock, 2011)

Es importante conseguir un elevado G_{mb} en las mezclas compactadas en un pavimento terminado, puesto que se pretende alcanzar un desempeño óptimo que perdure. El G_{mb} de una mezcla se determina mediante el procedimiento ASTM D1188 ó ASTM D2726. 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) ; (Salado Martínez & Estrada, 2013)

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

- 1) Se procede a pesar la briqueta empleando una balanza, que se encuentre calibrada, para determinar el peso seco o peso en aire.
- 2) Luego, se pesa la briqueta mientras se encuentra sumergida en un reservorio que contiene agua a 25°C para obtener el peso en agua.
- 3) A continuación, se seca superficialmente la briqueta a penas ésta se retirada del reservorio con agua, para que la misma pueda ser pesada en la balanza, y posteriormente 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)

2.1.1.2. Densidad máxima teórica (Gmm)

La densidad máxima teórica es la relación entre la masa de una unidad de volumen de mezcla asfáltica sin compactar, y la masa de un volumen de agua (incluyendo vacíos permeables como parte del volumen). Este valor es comúnmente conocido como gravedad "RICE". (Haddock, 2011)

El ensayo RICE es utilizado para encontrar la densidad o gravedad específica máxima teórica, empleando las normas ASTM D 2041, y AASHTO T 209. Dichas normas establecen el procedimiento necesario para obtener la gravedad o densidad teórica máxima de mezclas asfálticas que no hayan sido compactadas, y que se encuentren a 25°C de temperatura. (Parrales, 2013). A continuación se muestran los valores obtenidos por cada planta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores RICE por planta

PLANTA	RICE
A	2,362
B	2,488
C	2,568
D	2,179
E	2,400

Fuente: Autores

❖ **Resumen del procedimiento para su determinación según AASHTO**

T 209:

- 1) Se separan las partículas de la muestra de mezcla a mano, pero siendo muy cautos para no fracturar las partículas minerales.
- 2) 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.
- 3) Se traslada el picnómetro que contiene al agua y a la muestra, hacia el aparato de vibración mecánica. Ya que en este mecanismo se eliminará el aire que se encuentra dentro de la muestra, incrementando paulatinamente la presión de vacíos hasta que el manómetro digite 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)

2.1.1.3. Porcentaje de vacíos con aire (Va)

Los vacíos con aire corresponden al volumen total de las pequeñas bolsas de aire entre las partículas de agregado revestidos que conforman la mezcla de pavimentación. El Va es el porcentaje de vacíos respecto al volumen total de la muestra compactada. (Asphalt Institute, 1997)

En una mezcla es preciso que algún porcentaje de vacíos esté contenido dentro de las mezclas densamente graduadas, para que el asfalto pueda expandirse. Usualmente en los diseños Marshall los porcentajes de vacíos autorizados (en mezclas asfálticas de laboratorio) pueden variar entre 3 y 5 por ciento para capas superficiales (Asphalt Institute, 1992).

La vida útil de un pavimento asfáltico está condicionada por el porcentaje de vacíos que el mismo posea. A medida que la cantidad de vacíos baja, la filtración del agua en la mezcla también resultará pequeña. Mientras que un pavimento asfáltico con un contenido de huecos bastante elevado (como es el caso de mezclas mal compactadas) contribuye a la aparición de conductos en las mezclas a través de los cuales puede ingresar agua que causarían deterioros en las mezclas. No obstante, un pavimento asfáltico con un escaso porcentaje de vacíos podría causar exudación de asfalto, una situación en donde la alta cantidad de asfalto es presionada hacia el exterior de mezcla, es decir a la superficie.

Resultan claramente afines la densidad y el contenido de vacíos. Cuanto más elevada resulte la densidad el porcentaje de vacíos en la mezcla será inferior e inversamente. Por lo general en las exigencias de compactación en obra se solicita alcanzar el 97% de la densidad de laboratorio correspondiente a la mezcla diseñada con 4% de vacíos. (Asphalt Institute, 1992)

❖ **Fórmula empleada para el cálculo:**

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

En donde:

Va= vacíos de aire en la mezcla compactada, en porcentaje del volumen total.

Gmm = Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.

Gmb = Gravedad específica de una mezcla compactada.

2.1.1.4. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios intergranulares de aire entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación que incluye los huecos de aire y el contenido efectivo de asfalto, expresado como un porcentaje del volumen total. (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)

Se debe mencionar que a medida que el VMA sea más elevado, el espacio libre para las capas de asfalto será mayor. Los valores mínimos para VMA, se fundamentan en la situación de que mientras mayor espesor tenga la capa de asfalto que recubre las partículas de agregado, la mezcla se hará más duradera.

❖ **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.

2.1.1.5. Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto (VFA)

Los vacíos rellenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de espacios intergranulares vacíos entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran ocupados por asfalto, es decir es el porcentaje de los VMA que están llenos de asfalto efectivo. (Asphalt Institute, 1997)

El VMA incluye asfalto y aire, y por ende, el VFA se obtiene de la resta de los vacíos de aire con el VMA, y de la posterior división para el

VMA, teniendo un valor final expresado como un porcentaje. (Asphalt Institute, 1992)

❖ **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.

2.1.1.6. Granulometría combinada

Su objetivo principal es conseguir la clasificación por tamaño de los agregados que conforman una muestra, a través de su distribución en una serie de tamices de aberturas decrecientes.

La granulometría más común corresponde a la especificación: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1., que es la que se utiliza generalmente para capas de rodadura en los pavimentos asfálticos del Ecuador, como se muestra en la Tabla 2.2. En dicha especificación se pueden encontrar los porcentajes de pasantes acumulados. (Nuñez, 2014)

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)

Se pueden observar desde la Figura 2.2 hasta la Figura 2.6 la granulometría correspondiente a cada planta analizada en el presente trabajo.

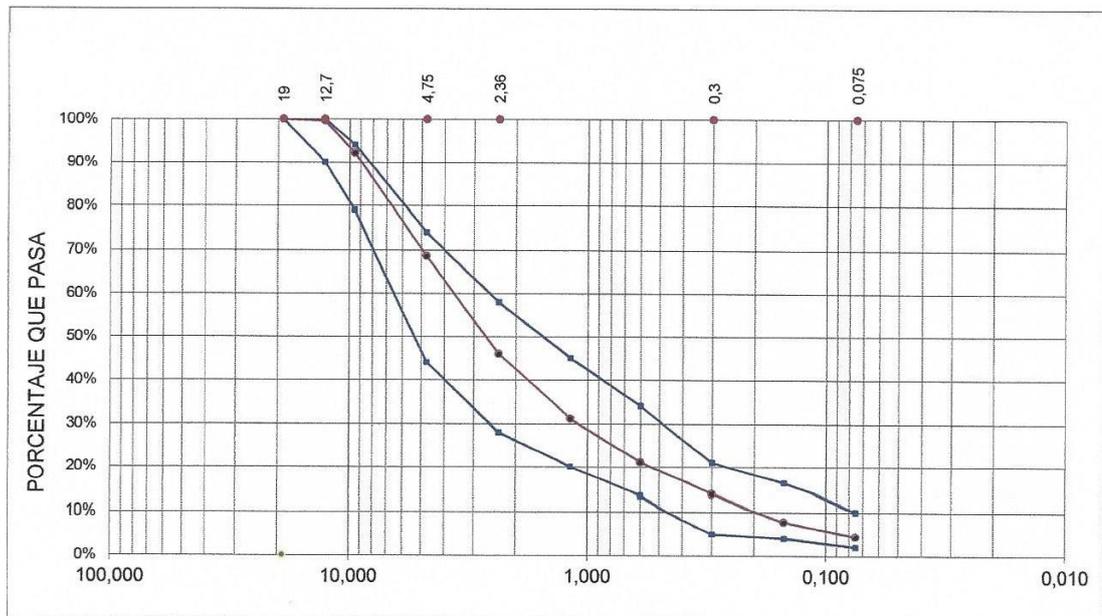


Figura 2.2. Granulometría de la planta A

Fuente: Autores

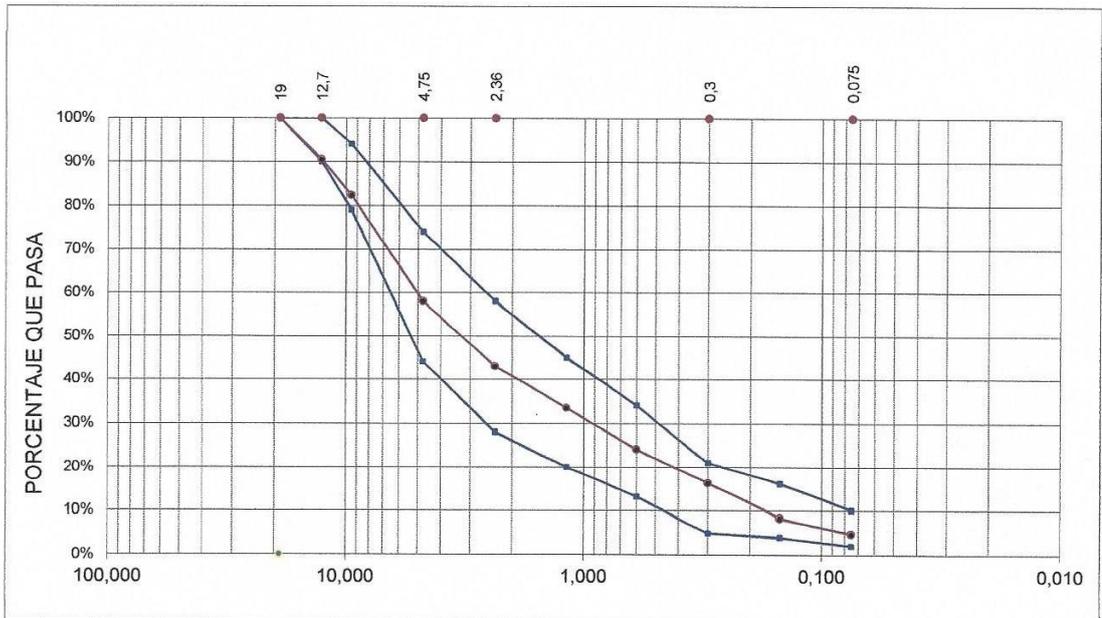


Figura 2.3. Granulometría de la planta B

Fuente: Autores

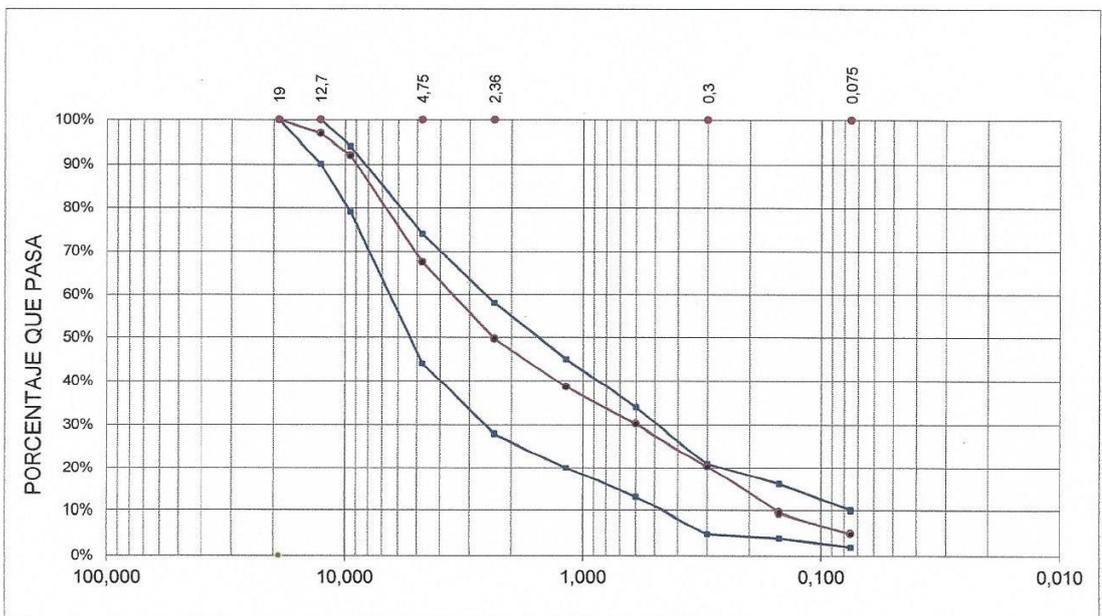


Figura 2.4. Granulometría de la planta C

Fuente: Autores

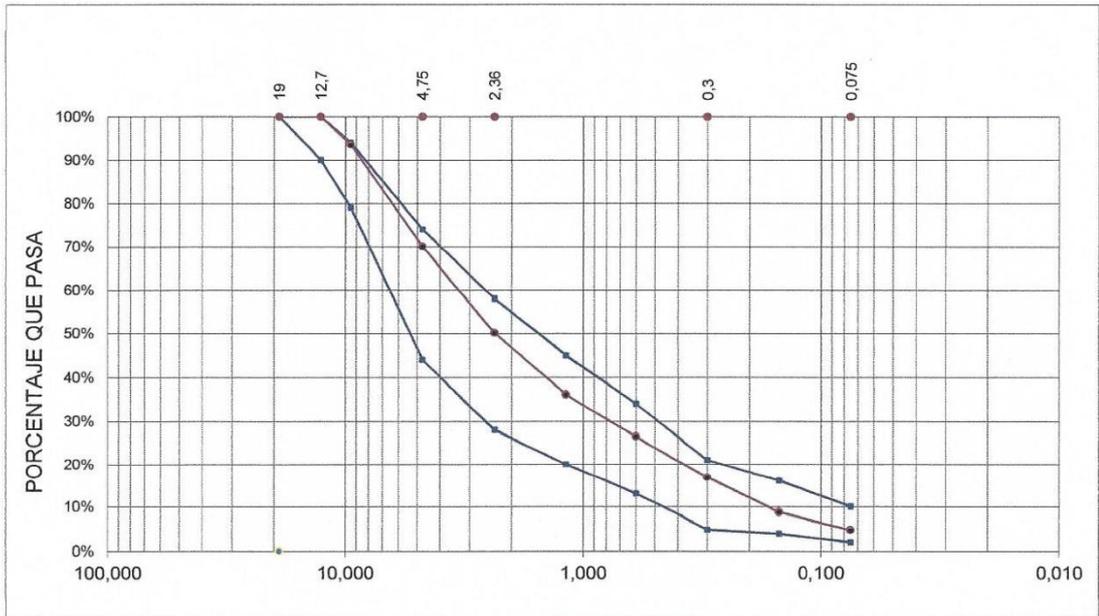


Figura 2.5. Granulometría de la planta D

Fuente: Autores

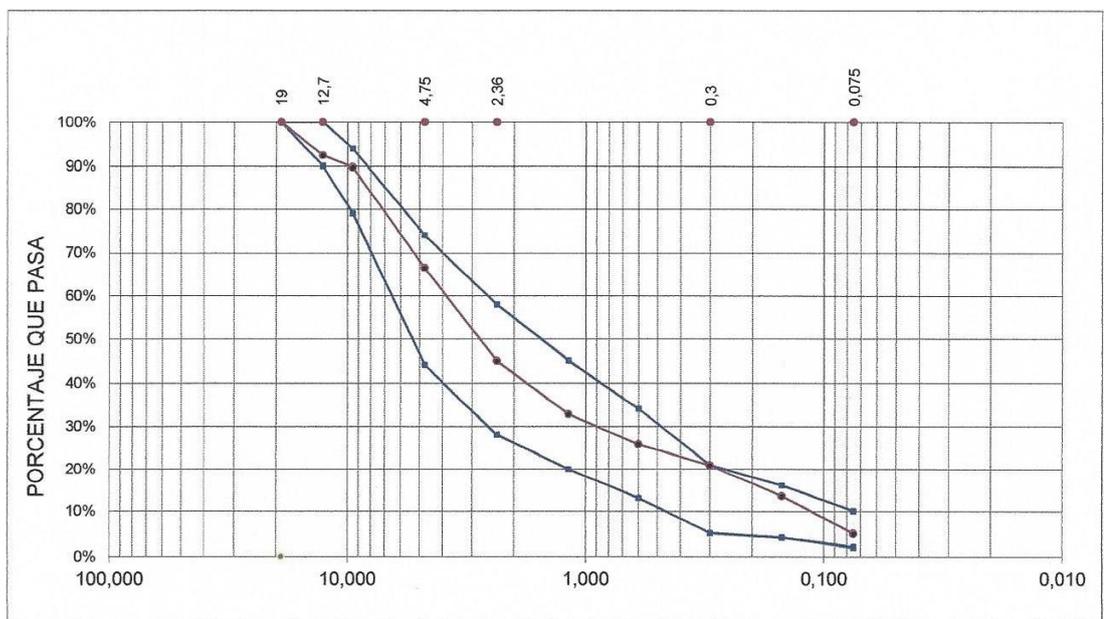


Figura 2.6. Granulometría de la planta E

Fuente: Autores

2.1.1.7. Porcentaje de asfalto (Pb)

El porcentaje o contenido de asfalto es 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)

La cantidad de asfalto presente en una mezcla es fundamental y tiene que ser precisada debidamente en un laboratorio de asfaltos o carreteras, y posteriormente debe ser inspeccionada con rigurosidad en obra.

El porcentaje idóneo de asfalto en una mezcla obedece, en su mayoría, a las particularidades y características del agregado, como son: la granulometría y la capacidad de absorción del agregado. Hablando de la granulometría de los agregados, se puede destacar que la misma se encuentra claramente relacionada con el contenido de asfalto idóneo, puesto que mientras más cantidad de finos tenga la graduación de la mezcla, se tendrá superior área superficial total, además de, necesitarse más cantidad de asfalto para poder recubrir, de igual forma a todas las partículas. En cambio, las mezclas con agregados gruesos requieren menos porcentaje de asfalto puesto que tienen menor área superficial total.

Otro aspecto importante a considerar para tener el contenido de asfalto ideal, es la capacidad de absorción del agregado, es decir cuánto asfalto puede absorber o retener dicho agregado mineral que compone la mezcla. Los expertos dicen que hay 2 clases de asfalto al hacer referencia al

asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

Se puede diferenciar que el contenido total de asfalto es el porcentaje de asfalto que necesita ser añadido a la mezcla para llegar a las condiciones requeridas por el diseño. En cambio, el contenido efectivo de asfalto se lo considera como el volumen de asfalto que no ha sido absorbido por el agregado, o también se lo conoce como la cuantía de asfalto que forma la capa que recubre la superficie de los agregados. Cabe mencionar que se logra obtener el contenido efectivo de asfalto al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. (Asphalt Institute, 1992)

Es importante resaltar 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 a nivel de laboratorio se suele determinar por el método de la centrífuga, es decir en este método se coloca una muestra de mezcla dentro del equipo de centrifugado y esta muestra se cubre usualmente con tricloro de tileno y se tapa el equipo. Posteriormente 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 tricloro de tileno. Esta secuencia se repite hasta que el líquido salga de color claro.

❖ **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)

A continuación se muestran desde la Tabla 2.3 hasta la Tabla 2.7 el contenido de asfalto de cada planta estudiada en este trabajo.

Tabla 2.3. Contenido de asfalto. Planta A

EXTRACCION DE ASFALTO		
PESO MAT. ANTES	1.097	
PESO MAT. DESPUES	1.025	
PESO FILTRO ANTES	21,07	
PESO FILTRO DESPUES	23,52	
DIFERENCIA FILTRO	2,45	
SOLVENTE USADO	2500	
PESO DE CENIZA	4,95	
% C.A	6,1	

Fuente: Autores

Tabla 2.4. Contenido de asfalto. Planta B

EXTRACCION DE ASFALTO		
PESO MAT. ANTES	1.217	
PESO MAT. DESPUES	1.144	
PESO FILTRO ANTES	18,46	
PESO FILTRO DESPUES	19,96	
DIFERENCIA FILTRO	1,50	
SOLVENTE USADO	2500	
PESO DE CENIZA	4,00	
% C.A	5,7	

Fuente: Autores

Tabla 2.5. Contenido de asfalto. Planta C

EXTRACCION DE ASFALTO		
PESO MAT. ANTES	1.023	
PESO MAT. DESPUES	960	
PESO FILTRO ANTES	18,41	
PESO FILTRO DESPUES	19,99	
DIFERENCIA FILTRO	1,58	
SOLVENTE USADO	2500	
PESO DE CENIZA	4,08	
% C.A	5,8	

Fuente: Autores

Tabla 2.6. Contenido de asfalto. Planta D

EXTRACCION DE ASFALTO		
PESO MAT. ANTES	1.248	
PESO MAT. DESPUES	1.153	
PESO FILTRO ANTES	19,97	
PESO FILTRO DESPUES	22,59	
DIFERENCIA FILTRO	2,62	
SOLVENTE USADO	4000	
PESO DE CENIZA	6,62	
% C.A	7,1	

Fuente: Autores

Tabla 2.7. Contenido de asfalto. Planta E

EXTRACCION DE ASFALTO		
PESO MAT. ANTES	1.040	
PESO MAT. DESPUES	978	
PESO FILTRO ANTES	20,02	
PESO FILTRO DESPUES	21,73	
DIFERENCIA FILTRO	1,71	
SOLVENTE USADO	3500	
PESO DE CENIZA	5,21	
% C.A	5,5	

Fuente: Autores

2.1.2. Parámetros resistentes

2.1.2.1. Estabilidad y Flujo

➤ Estabilidad Marshall

La estabilidad de una mezcla asfáltica representa su habilidad para soportar desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito vehicular. Para que un pavimento pueda considerarse como estable debe estar capacitado para conservar su forma y lisura bajo cargas repetidas, por otro lado, un pavimento se considera como inestable cuando muestra signos de ahuellamientos, ondulaciones y otras señales que muestran variaciones en la mezcla, como se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.7. Ahuellamiento por falla de la mezcla asfáltica

Fuente: (Reyes & Camacho, 2008)

Los requisitos de estabilidad únicamente logran instituirse luego de un estudio del tránsito, puesto que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Si se alcanzan valores muy elevados de estabilidad, se obtiene un pavimento bastante rígido y, por ende, con menor duración de la que se requiere.

Cabe destacar que la estabilidad de una mezcla asfáltica está íntimamente relacionada con la fricción y la cohesión interna. De manera general, se puede decir que mientras más angular sea la configuración de los agregados y más rugosa sea la superficie del mismo, se tendrá una mayor estabilidad de mezcla. De igual forma el empleo de asfaltos más duros (de menor penetración) implicaría estabilidades más altas.

Durante un ensayo para la obtención del valor de la estabilidad, al momento de aplicar la carga lentamente (5 cm/min), los cabezales situados en la parte superior e inferior del aparato se juntan, provocando el incremento de la carga ejercida sobre la briqueta previamente calentada a 60°C en baño de María, la cual se acrecienta de la misma manera que la

lectura del indicador. 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).

➤ **Fluencia o flujo Marshall**

La fluencia Marshall, expresada en centésimas de pulgada, constituye la deformación que se produce en la briqueta entre la carga cero y la carga de rotura. Dicha deformación se muestra como la reducción en el diámetro vertical de la briqueta.

Las mezclas asfálticas que poseen valores bajos de fluencia y a su vez valores altos de estabilidad Marshall son consideradas como excesivamente frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Además aquellas que tienen valores elevados de fluencia tienen facilidad para deformarse bajo las cargas de tráfico y son bastante plásticas. (Asphalt Institute, 1992)

La prueba de estabilidad y fluencia se recoge en la normativa ASTM D6927 que es la que se tendrá en cuenta en este estudio.

2.2. Daño en agua

2.2.1. Generalidades

El daño por agua en mezclas asfálticas es la pérdida de rigidez y resistencia debido a la aplicación de fuerzas mecánicas en condiciones de humedad. El deterioro de las mezclas asfálticas debido a presencia de agua se da por tres mecanismos diferentes (Velasquez, Moraes, & Bahia, 2011):

a) *Fallas de adherencia*

Fallo adhesivo sucede debido a una ruptura de enlaces entre moléculas de diferentes fases, como se observa en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Fallas en la adherencia entre el agregado y asfalto

Fuente: (Gutierrez & Ramirez, 2008)

b) *Pérdida de cohesión (rotura de la película de asfalto)*

Fallo de cohesión sucede debido a una ruptura de enlaces entre moléculas en la película de asfalto, como se evidencia en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Pérdida de cohesión del mástico asfáltico

Fuente: (Gutierrez & Ramirez, 2008)

c) Degradación del agregado mineral

Es la afectación a la resistencia de los agregados minerales debido a procesos químicos y mecánicos. Los procesos químicos comprende la descomposición de ciertos minerales propios que conforman los agregados, mientras que los mecánicos se generan por la desintegración del agregado, como se muestra en la Figura 2.10. (Tamayo, Gutierrez , & Cabrera, 1983)



Figura 2.10. Degradación del agregado mineral

Fuente: (Gutierrez & Ramirez, 2008)

El efecto de la humedad sobre el rendimiento del pavimento puede ser el resultado de una combinación de más de un mecanismo.

Existen factores independientemente del agua que aportan al daño de las mezclas asfálticas como la temperatura y el aire. Se considera que el causante principal del daño es la carga vehicular cuando hay condiciones ambientales moderadas y una buena calidad en los materiales. Las cargas vehiculares tienen como efecto negativo la provocación de desmoronamiento, ahuellamiento y fatiga en los pavimentos. Tanto el tráfico como la presencia de agua generan degradación en las mezclas, sin embargo es el agua el principal causante de la pérdida de adherencia, lo que provoca una pérdida de resistencia en el pavimento. La falta de adherencia provoca que la fuerza cohesiva de la capa asfáltica se pierda. (Gorkem & Sengoz, 2009)

2.2.2. Mecanismos de falla asociados al daño en agua

2.2.2.1. Stripping

Stripping o desvestimiento es un mecanismo de falla que produce la separación física del cemento asfáltico y el agregado mineral por la pérdida de adherencia entre ellos, debido principalmente a la acción del agua o vapor de agua, como se evidencia en la Figura 2.11. La separación se acentúa por la presencia de superficies lisas de agregados y de suave textura. (McGennis, Kennedy, & Machemehl, 1984)

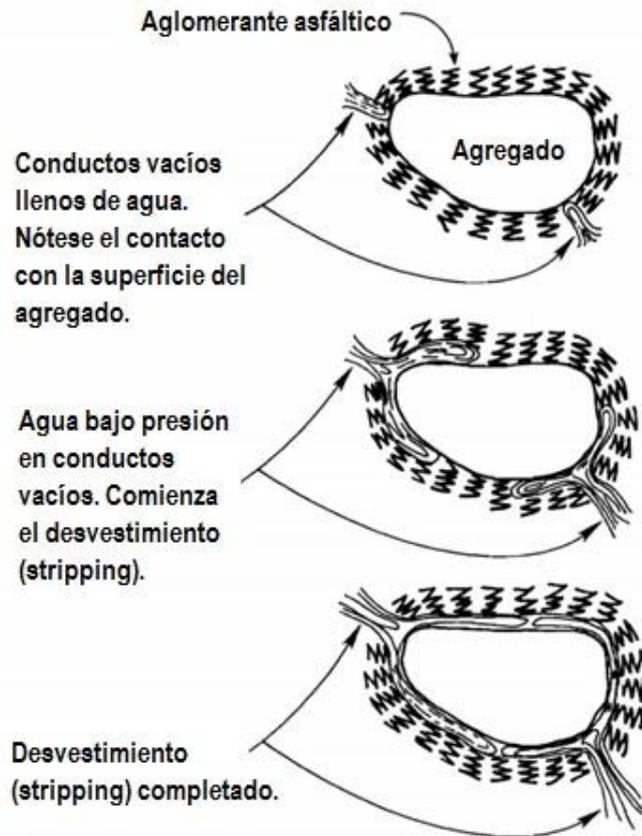


Figura 2.11. Desvestimiento (stripping)

Fuente: Anónimo

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

➤ **Desprendimiento**

Se produce una separación entre la película de asfalto y la superficie del agregado, mediante una capa delgada de agua, sin tener ruptura de la película de asfalto, como se observa en la Figura 2.12. Se produce una pérdida total de la adherencia ya que la separación entre asfalto y agregado

es limpia. Una manera de explicar este mecanismo es mediante la teoría de la energía interfacial. 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).

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 2.12. Desprendimiento en pavimento

Fuente: (Ingeniería civil en el Salvador, 2009)

➤ **Desplazamiento**

Este mecanismo resulta de la penetración de agua en la superficie del agregado a través de una ruptura en la película de asfalto. Esta ruptura se puede dar de dos formas, primero debido a un incompleto recubrimiento del agregado mineral y segundo mediante una ruptura de la película de asfalto. Como resultado de la carga de tráfico la rotura de película de asfalto se da generalmente 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).

Al recubrir un agregado mineral con polvo, se forman poros en la película de asfalto, lo que da inicio al mecanismo de desplazamiento. Otro factor que interviene 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. Debido a esta condición el agregado mineral atraerá más agua que asfalto para poder equilibrar las cargas, dando lugar a la separación entre agregado y asfalto (Tarrer & Wagh, 1991).

➤ **Emulsificación espontánea**

Es la combinación del agua y asfalto, formando una emulsión invertida. El agua representa la fase discontinua y el asfalto la fase continua. La presencia de emulsificadores como lo son aditivos para el asfalto y las arcillas minerales intensifican el stripping.

La emulsificación espontánea ocurre cuando las películas de asfalto se sumergen en agua, pero depende de la presencia de aditivos y de la naturaleza del asfalto para que se dé la emulsión (Fromm, 1974).

➤ **Abrasión hidráulica**

Este mecanismo ocurre únicamente en la superficie del pavimento. Es el resultado de la acción ejercida por las llantas sobre el pavimento saturado. Las llantas con la zona frontal ejercen presión dentro del pavimento y con la zona posterior se extrae agua hacia afuera del pavimento. Este proceso genera una aceleración en el proceso de abrasión (Tarrer & Wagh, 1991)

2.2.2.3. Presión de poros

Esta propiedad puede relacionarse tanto al fenómeno de “stripping” o desvestimiento, como directamente con el daño mecánico en las mezclas. La presión de poros puede generar daño por la presencia de agua en mezclas asfálticas con un contenido de vacíos alto. El daño se intensifica cuando se trata de vacíos impermeables donde el agua está atrapada.

Existen dos formas para que se genere presión de poros en los vacíos de las mezclas asfálticas:

- *Bombeo generado por tráfico*

El tráfico vehicular genera presión sobre los vacíos con agua 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”.

2.2.2.4. Efectos ambientales

El daño en 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*

Es un método empleado 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 de 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

Se refiere a la cantidad de agua que podría afectar los pavimentos flexibles debido a precipitaciones en un año.

c) Humedad Relativa

La humedad relativa es 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 en agua

2.3.1. Metodología de trabajo

Se realizará el estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas por distintos métodos de ensayo. Para realizar el estudio se seleccionaron 5 plantas de asfalto de la Costa ecuatoriana. Las plantas serán denominadas por las letras A, B, C, D y E. La principal diferencia entre las plantas de asfalto se basa en el agregado mineral empleado en la producción, como se muestra en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Clasificación del agregado mineral por planta

Plantas	Clasificación del agregado mineral
A	Caliza
B	Canto rodado (aluviales)
C	Basalto
D	Argilitas y pizarras tobáceas
E	Basalto (Zona Uruzca / Manabí)

Fuente: Autores

Otro aspecto en consideración es el porcentaje de asfalto según el diseño. El asfalto usado en las mezclas es el mismo en todos los casos, el AC-20, siendo este el asfalto provisto por la refinería de Esmeraldas. Las mezclas asfálticas tomadas para las pruebas tienen diseños aprobados.

Se realizará una comparación de tres condiciones distintas que pueden presentarse en la capa asfáltica. La primera se considera como una condición ideal, en el cuál se aplica a una mezcla asfáltica el 100% de la energía de compactación, en esta condición las muestras deben tener un porcentaje de vacíos aproximado del 4% (con una aceptación de $\pm 0.5\%$). La segunda condición será la mezcla asfáltica con el 97% de la energía de compactación. Con esta energía el porcentaje de vacíos se eleva a un 7% (con una aceptación de $\pm 0.5\%$). La tercera condición es similar a la anterior, es decir con 97% de energía de compactación, pero con un proceso de inmersión en agua de acuerdo a la normativa ASTM 4867M-96. Se

elaborarán briquetas con las tres condiciones para todas las plantas seleccionadas.

Nuestro estudio se basa en pruebas convencionales y de desempeño. Entre los ensayos están el Boiling Test (prueba de agua hirviendo) y el TSR (pérdida de resistencia por tracción indirecta) que son los empleados para determinar la calidad de una mezcla asfáltica en el Ecuador. Además, se decidió incluir la estabilidad Marshall retenida. Se usará el equipo NAT modelo NU-10 para realizar también pruebas de desempeño: módulo de rigidez, fatiga, y deformación plástica bajo compresión cíclica.

➤ **Distribución de briquetas**

Las mezclas asfálticas fueron tomadas directamente de las distintas plantas. 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 biqueta es de 2 ½" (64 mm), aunque en la práctica las alturas tuvieron alguna variación.

Para las briquetas con el 100% de energía de compactación se aplican 75 golpes con el martillo Marshall por cada cara de la biqueta. En el caso de 97% de energía 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 confeccionaran 30 briquetas por cada planta las mismas que serán distribuidas de la siguiente manera, como se observa en la Figura 2.13:

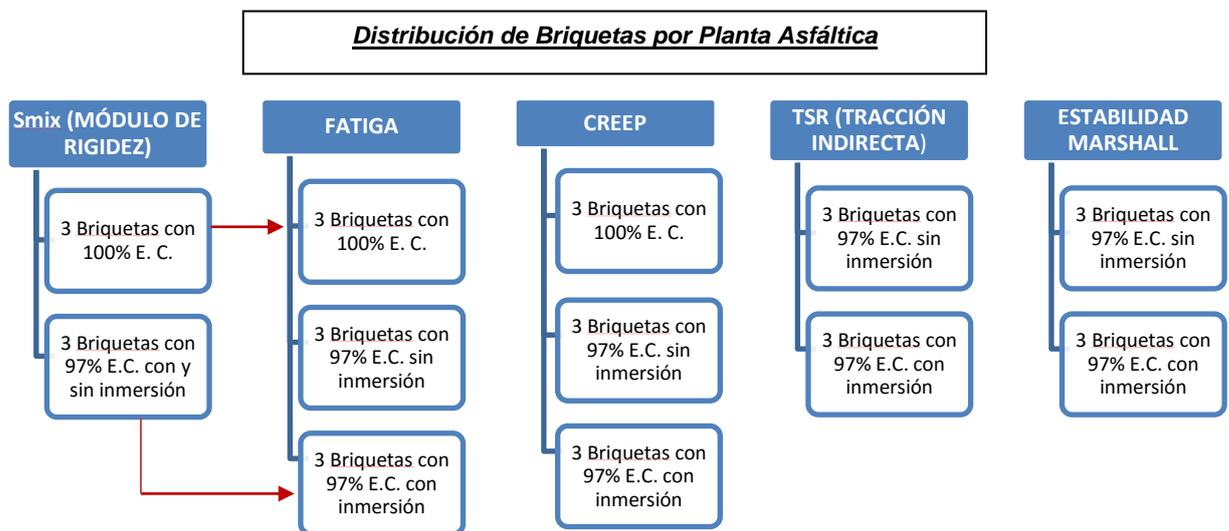


Figura 2.13. Distribución de briquetas por planta

Fuente: Autores

Es importante resaltar que las flechas en rojo indican las briquetas que pudieron emplearse en dos pruebas diferentes. Se pueden observar algunas de estas briquetas en la Figura 2.14.

Sumando todas las briquetas se obtienen 30 briquetas en total, de las cuales 24 se confeccionaron con el 97% de la energía de compactación y 6 briquetas con 100% de la energía por cada planta. Considerando el trabajo con mezclas de 5 plantas se tendrá como resultado 150 briquetas en total. Cabe recalcar que se elaboraron briquetas adicionales por cualquier eventualidad (como fallas eléctricas) en caso que fuera necesario.



Figura 2.14. Distribución de briquetas

Fuente: Autores

➤ **Metodología de saturación**

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

Se debe obtener las características generales de cada briqueta teniendo como herramienta de medición una balanza, como se muestra en la Figura 2.15. Las características se basan en masa seca en aire, masa superficialmente seca y masa sumergida en agua. Mediante los datos anteriores se calcula el volumen, la gravedad específica de masa. Con el RICE obtenido como un dato de la mezcla se hace el cálculo del porcentaje de vacíos. Para este estudio se tendrán porcentajes del 7% (+- 0.5%).



Figura 2.15. Balanza digital del laboratorio de la UCSG

Fuente: Autores

Mediante una bomba de vacíos, como se observa en la Figura 2.16, se semisatura las briquetas. Esta se logra con una presión de vacío de aproximadamente 20 pulgadas de mercurio. El tiempo en que se aplica la presión varía de acuerdo a la mezcla ya que algunas pueden ser más cerradas que otras. El porcentaje de saturación de las briquetas según la norma ASTM 4867M-96 debe encontrarse entre 55 – 80%.



Figura 2.16. Picnómetro y bomba de vacíos

Fuente: Autores

Obtenido el porcentaje de saturación dentro del rango se colocan las briquetas en baño María por 24 horas a una temperatura de 60°C, como se evidencia en la Figura 2.17 y en la Figura 2.18.

Antes de realizar los distintos ensayos se deben mantener las briquetas a la temperatura de prueba durante una hora. En el caso de módulo de rigidez y fatiga la temperatura es de 20°C, mientras que para el ensayo de deformación plástica 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 adicionales de temperatura al salir del baño María.



Figura 2.17. Baño maría del laboratorio de carreteras de la UCSG

Fuente: Autores

Durante todo el proceso, incluido el momento de ensayar, las briquetas deben estar inmersas en agua de tal forma que no pierdan parte de su porcentaje de saturación.

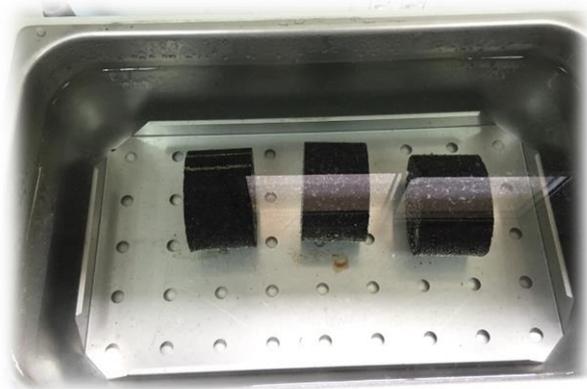


Figura 2.18. Briquetas en baño maría

Fuente: Autores

2.3.2. Ensayos a realizarse

2.3.2.1. Ensayos convencionales recomendados por el MTOP

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

Esta prueba se la realiza con la finalidad de evaluar la susceptibilidad a la humedad de un pavimento asfáltico, apreciando mediante la observación el nivel de desvestimiento que se produce en la muestra luego de ser sometida a un procedimiento en donde se hierve la mezcla 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).

La prueba en mención consiste en medir visualmente la pérdida de la película de asfalto de la mezcla al someterla a agua en ebullición durante 10 minutos. En este examen visual que evalúa el desvestimiento, se dará como

resultado el porcentaje de área total del agregado que retiene la cobertura original del ligante y se clasifica como superior al 95% o inferior a este valor. (Gamba & Mercado, 2004)

❖ **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 de pérdida de resistencia ante el agua por tracción indirecta, más conocido como TSR, conlleva el uso de una carga a compresión que se distribuye en toda la extensión de los ejes diametrales de una muestra. En el mencionado ensayo, se produce un estado de tensiones de tracción aproximadamente homogéneas a lo largo de los ejes diametrales, debido a los mecanismos empleados en el mismo.

El comportamiento de los especímenes al estar sometido a los mencionados esfuerzos, es capturado por medio de deformímetros, para posteriormente ser registrados y 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/cm²)

P_{max} = carga máxima o carga de rotura (Kg)

t = espesor de la briqueta (cm)

d = diámetro de la briqueta (cm)

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

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

En la Figura 2.19 se muestra un ensayo de tracción indirecta realizado para el presente trabajo.



Figura 2.19. Ensayo de tracción indirecta

Fuente: Autores

III. Estabilidad Marshall retenida

Se realizará esta prueba de acuerdo al procedimiento mencionado en la sección 2.1.2.1 con vistas a evaluar el daño en agua en el comportamiento de la mezcla ante la deformación plástica. Si bien este no es un ensayo convencional para evaluar el daño en agua en el Ecuador, aún es bastante popular su empleo en algunos países latinoamericanos por lo que se decidió incluirlo. Se puede observar en la Figura 2.20 la prensa Marshall y diales empleados para las pruebas realizadas en este trabajo.



Figura 2.20. Ensayo de estabilidad Marshall

Fuente: Autores

Para esto se emplearán también juegos de briquetas secas y semisaturadas, utilizando para esto último un procedimiento similar al de tracción indirecta (ASTM D4867).

2.3.2.2. Ensayos propuestos en el laboratorio

Tomando como referencia el mecanismo de saturación de la prueba ASTM 4867M-96 para TSR, se aplicará este procedimiento sobre briquetas para una serie de pruebas dinámicas de desempeño asociadas al equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester modelo NU-10), equipo que se posee en nuestro laboratorio. Estas pruebas son:

I. Módulo de rigidez

Con el equipo NAT, 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 junto a una serie de programas que permiten desarrollar las distintas pruebas y procesar la información a través de ellos. En la Figura 2.21 se muestra un ensayo de módulo de rigidez efectuado en este trabajo.



Figura 2.21. Ensayo de módulo de rigidez con equipo NAT

Fuente: Autores

❖ *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.

Como medida de protección del equipo se empleó una bandeja para evitar la caída de gotas de agua durante las pruebas realizadas con las muestras inmersas en agua, como se ve en la Figura 2.22.



Figura 2.22. Ensayo de módulo de rigidez en equipo NAT con inmersión

Fuente: Autores

La salida de resultados de pantalla es como la que se muestra en la Figura 2.23 correspondiente a briqueta No. 2 de la planta C.

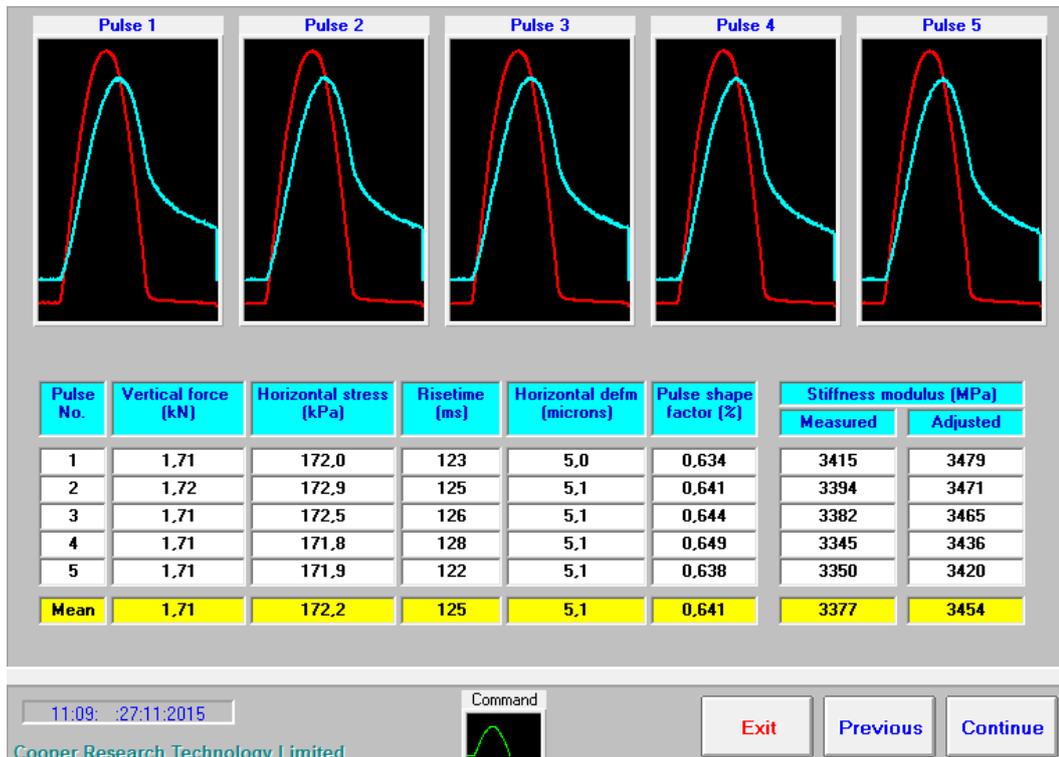


Figura 2.23. Resultado de módulo de rigidez bajo deformación controlada. Briqueta C2

Fuente: Autores

❖ *Módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado*

Este ensayo está directamente relacionado con el de fatiga. Esto se debe a que la deformación producida en la muestra se obtiene mediante una fórmula en la que se tiene como dato ésta rigidez. 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 2.24 un resultado obtenido al efectuar estos ensayos.

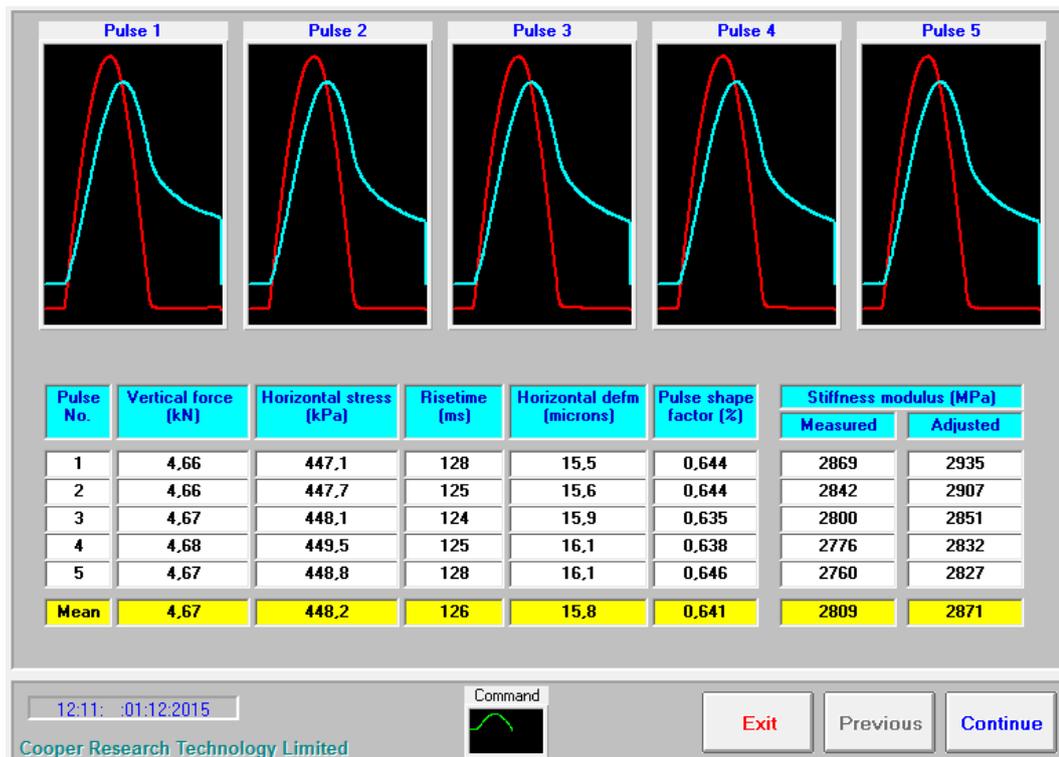


Figura 2.24. Resultado de módulo de rigidez bajo esfuerzo controlado. Briqueta C1

Fuente: Autores

II. Fatiga

El ensayo de fatiga se realiza empleando tensiones controladas en general entre 100 y 500 kPa, determinándose el número de pulsos requeridos para que la muestra falle por agrietamientos o en su defecto alcance 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 2.25 un ensayo de fatiga realizado para la obtención de datos del presente trabajo.



Figura 2.25. Ensayo de fatiga con equipo NAT

Fuente: Autores

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

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

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

Mediante los datos obtenidos se realiza una gráfica logarítmica de Deformación contra número de repeticiones, como se presenta en la Figura 2.26.

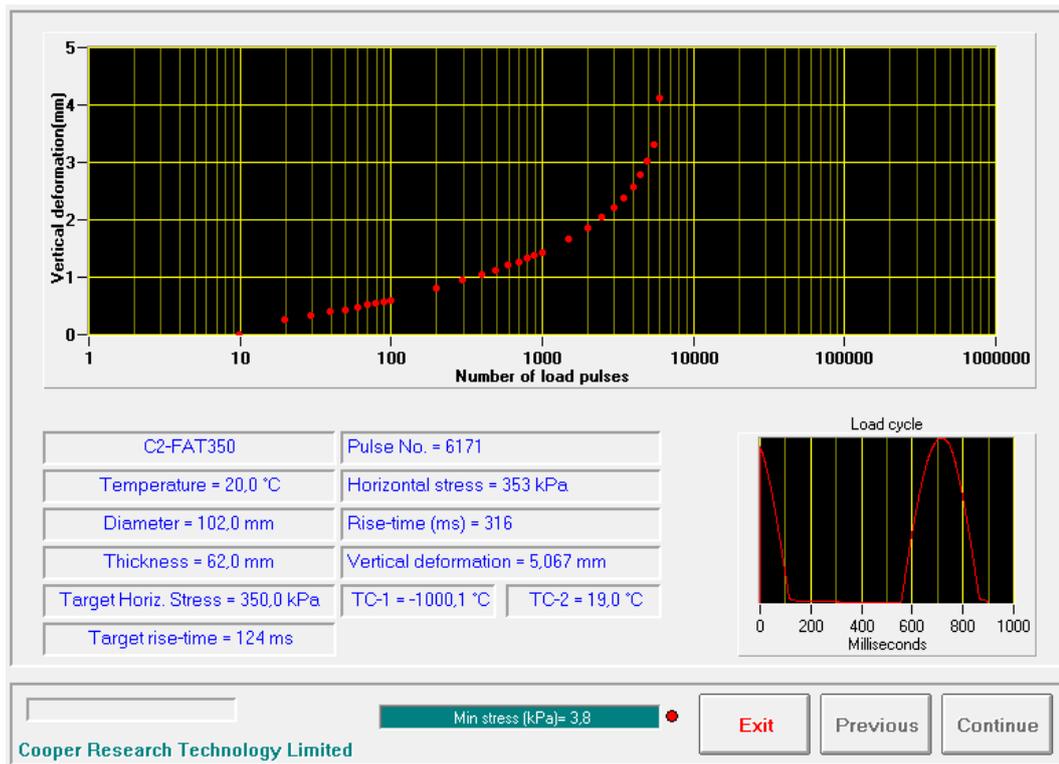


Figura 2.26. Resultado de fatiga. Briqueta C2

Fuente: Autores

Cabe mencionar que se empleó una bandeja en la cual se mantienen las briquetas inmersas durante toda la prueba para evitar pérdida de agua, puesto que las pruebas de fatiga suelen durar varias horas, como se muestra en la Figura 2.27.



Figura 2.27. Ensayo de fatiga en equipo NAT con inmersión

Fuente: Autores

III. Deformación bajo compresión cíclica (Creep)

La prueba de compresión permanente o 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%. En la Figura 2.28 se muestra un resultado luego de efectuarse un ensayo de deformación bajo compresión cíclica.

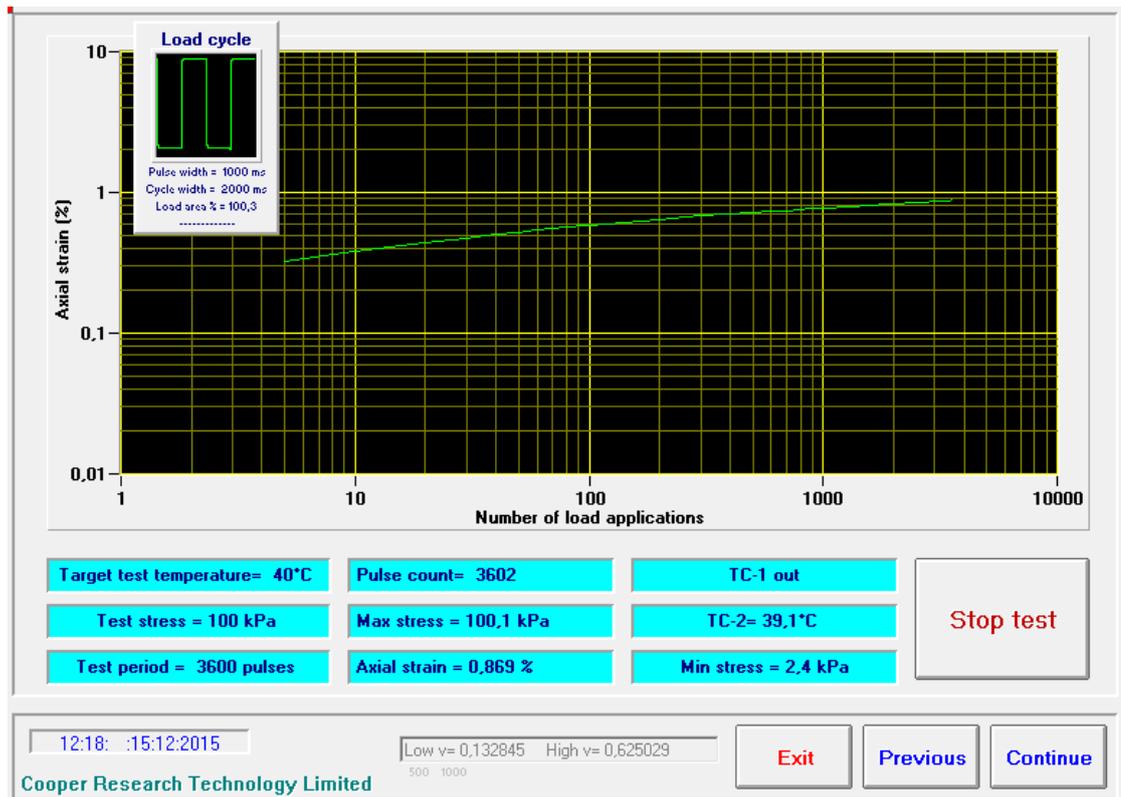


Figura 2.28. Resultado de deformación bajo compresión cíclica. Briquea C4

Fuente: Autores

En la realización de las pruebas con inmersión, se utilizó una bandeja metálica mostrada en la Figura 2.29 para mantener las briquetas sumergidas en agua al momento de ser ensayadas y así evitar la pérdida de agua en las mismas, puesto que este ensayo tiene una duración aproximada de dos horas.



Figura 2.29. Ensayo de deformación bajo compresión cíclica en equipo NAT con inmersión

Fuente: Autores

CAPÍTULO 3.- RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. Resultados de las pruebas convencionales recomendadas por el MTOP

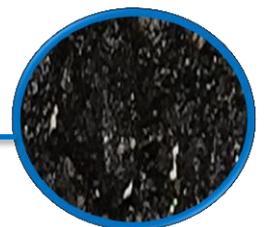
3.1.1. Prueba de agua hirviendo (Boiling test)

A continuación se muestran desde la Figura 3.1 hasta la Figura 3.5 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: Autores



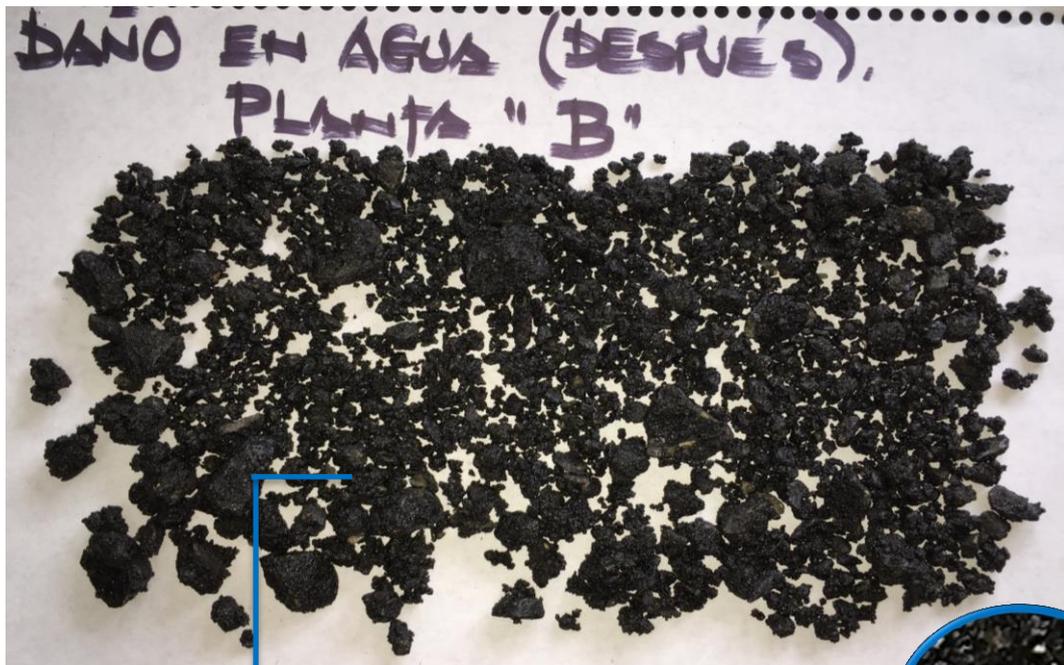


Figura 3.2. Daño en agua. Planta B

Fuente: Autores

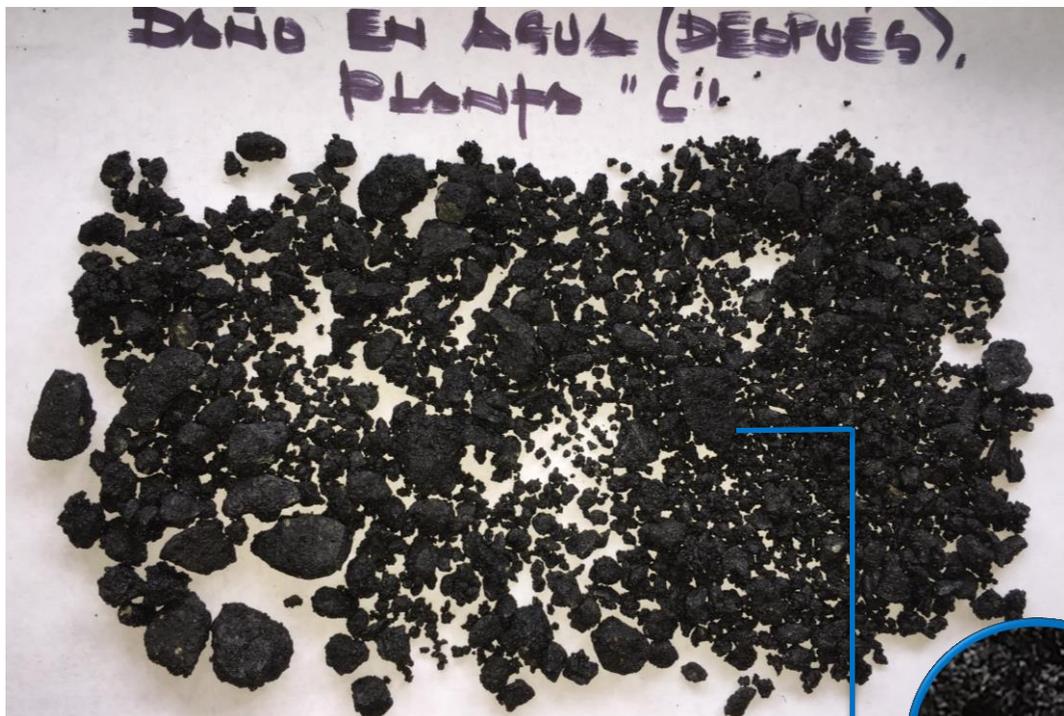


Figura 3.3. Daño en agua. Planta C

Fuente: Autores

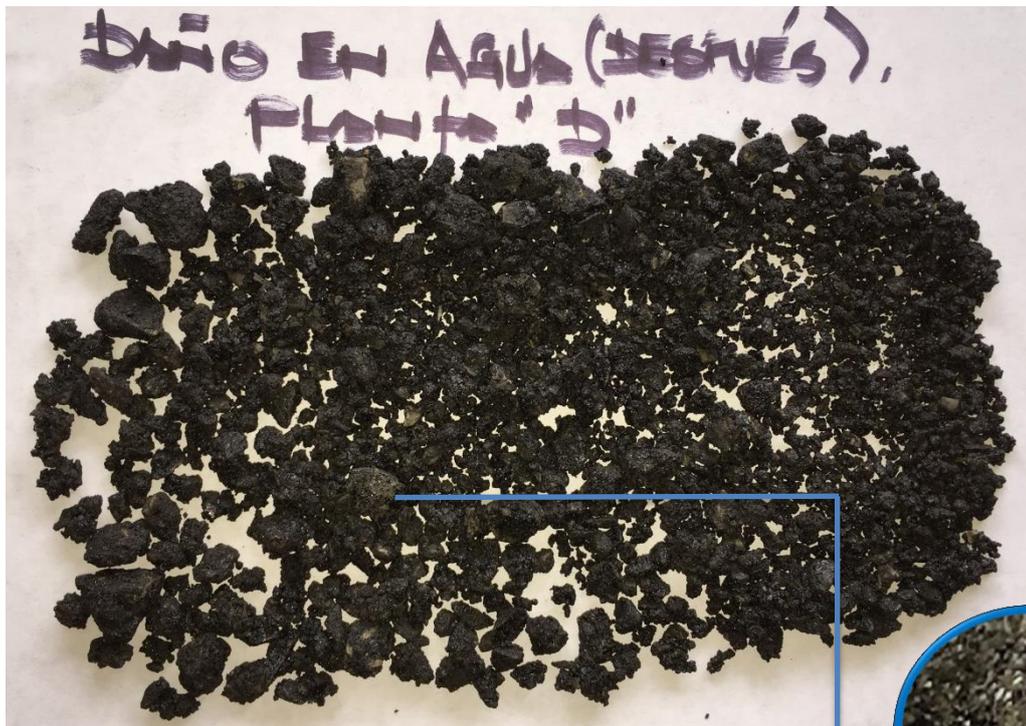


Figura 3.4. Daño en agua. Planta D

Fuente: Autores

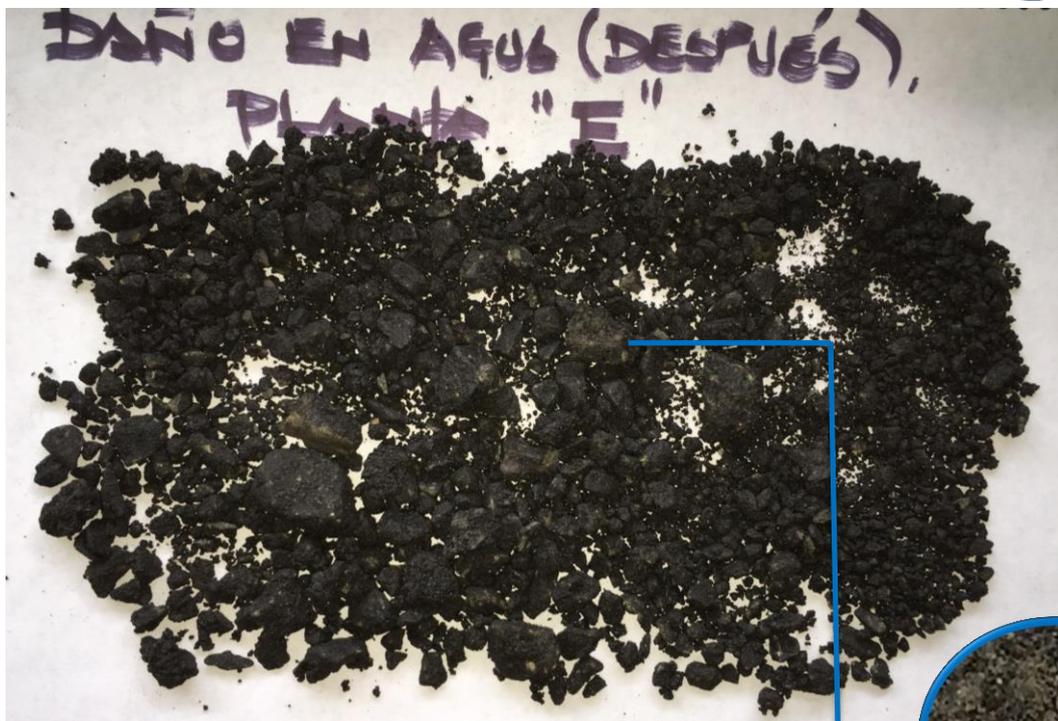


Figura 3.5. Daño en agua. Planta E

Fuente: Autores

El resumen de resultados obtenidos, se lo muestra en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1. Resultados de la prueba de agua hirviendo

<i>ENSAYO DE DAÑO EN AGUA</i>	
Planta A	Si cumple, 100% retenido
Planta B	Si cumple, 100% retenido
Planta C	Si cumple, 100% retenido
Planta D	No cumple, menos del 95% retenido
Planta E	No cumple, menos del 95% retenido

Fuente: Autores

Cabe mencionar que se puede observar en todas o en casi todas las muestras, rastros de aditivos que se han adicionado con la finalidad de mejorar la adhesividad agregado-asfalto en las mezclas.

3.1.2. Resultados de tracción indirecta

A continuación se muestra un ejemplo del tratamiento matemático empleado en cada una de las pruebas de tracción indirecta realizadas, donde se relacionan las deformaciones horizontales versus las cargas que las generan. Ver Tabla 3.2 y Tabla 3.3. En las tablas 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. Ver Figura 3.6 y Figura 3.7.

PLANTA B

BRIQUETA 7: 97% DE COMPACTACIÓN SIN INMERSIÓN

ESPESOR: 63 mm

Tabla 3.2. Resultados de ensayo de tracción indirecta de la planta B; 97% de energía de compactación; sin inmersión.

DEFORMACIÓN HORIZONTAL	CARGA
mm	N
0,00	0
0,16	245
0,22	673
0,26	1101
0,32	1529
0,39	1999
0,46	2554
0,48	3024
0,68	1956
1,35	1529
2,21	1101
3,66	502
5,98	0
St (kPa)=	301

Fuente: Autores

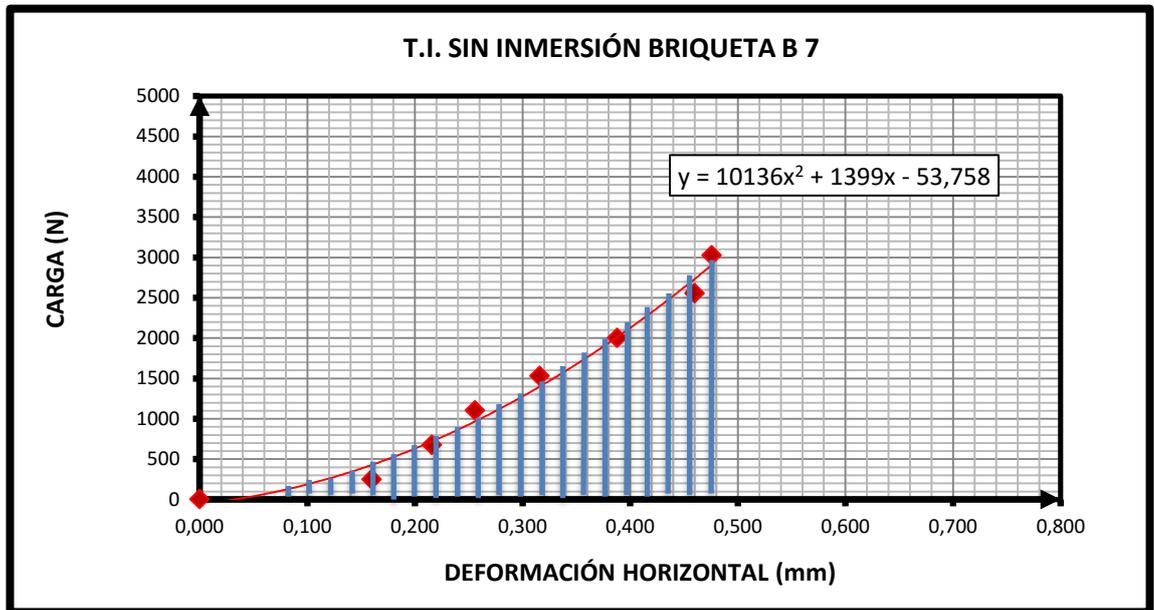


Figura 3.6. Diagrama de carga versus deformación horizontal de prueba de tracción indirecta sin inmersión

Fuente: Autores

Se midieron las deformaciones horizontales a través de diales. Estos datos se obtuvieron mediante la grabación en video de las pruebas y mediante una hoja de Excel se graficaron los diagramas de carga versus deformación horizontal, junto a la línea de tendencia correspondiente y su ecuación.

El área bajo la curva es la energía empleada durante el ensayo. Se calculará el área a través de la integración de dicha ecuación tomando como límite máximo la deformación indicada por la carga máxima.

$$\text{ÁREA} = \int_0^{0,476} (10136x^2 + 1399x - 53,758) dx$$

$$\text{ÁREA} = 108,88 \text{ N m}$$

Para la condición con inmersión el proceso de ensayo y cálculo es similar al mostrado anteriormente, aunque en todos los casos la configuración de las curvas fueron distintas a las briquetas sin inmersión.

PLANTA C

BRIQUETA 21: 97% DE COMPACTACIÓN **CON INMERSIÓN**

ESPESOR: 66 mm

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

DEFORMACIÓN HORIZONTAL	CARGA
mm	N
0,00	0
0,12	502
0,19	887
0,26	1315
0,42	1742
0,76	1956
1,95	1357
3,08	973
3,87	459
4,98	0
St (kPa)=	185,83

Fuente: Autores

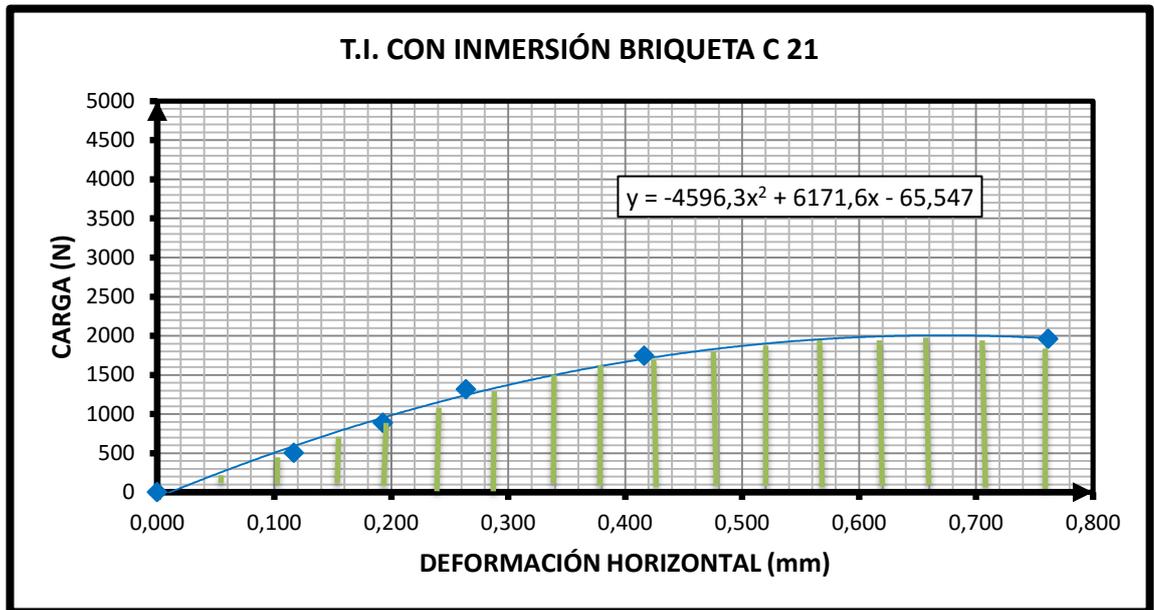


Figura 3.7. Diagrama de carga versus deformación horizontal de prueba de tracción indirecta con inmersión.

Fuente: Autores

$$\text{ÁREA} = \int_0^{0,762} (-4596,3x^2 + 6171,6x - 65,547) dx$$

$$\text{ÁREA} = 1063,93 \text{ N mm}$$

Luego de aplicar este procedimiento a todas las briquetas correspondientes a 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 energía de compactación; sin inmersión.

PLANTA A	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	14	362	168
	17	396	307
	18	368	386
PROMEDIO		376	287
DESVIACIÓN ESTANDAR		18,4	110,7
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		4,91	38,55

PLANTA B	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	5	271	497
	7	301	109
	8	285	112
PROMEDIO		286	239
DESVIACIÓN ESTANDAR		14,8	223,4
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		5,20	93,36

PLANTA C	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	1	416	139
	2	338	54
	3	394	264
PROMEDIO		383	152
DESVIACIÓN ESTANDAR		40,1	105,7
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		10,48	69,33

PLANTA D	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	3	416	560
	5	483	251
	22	409	752
PROMEDIO		436	521
DESVIACIÓN ESTANDAR		40,7	252,9
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		9,35	48,56

PLANTA E	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	8	299	317
	9	314	151
	21	406	90
PROMEDIO		340	186
DESVIACIÓN ESTANDAR		57,8	117,3
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		17,03	63,19

Fuente: Autores

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

PLANTA A	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	2	190	1926
	6	202	410
	11	224	768
PROMEDIO		205	1035
DESVIACIÓN ESTANDAR		16,9	792,4
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		8,23	76,59

PLANTA B	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	1	139	723
	2	145	729
	6	145	1306
PROMEDIO		143	919
DESVIACIÓN ESTANDAR		3,4	334,9
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		2,36	36,43

PLANTA C	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	4	219	2488
	10	245	1568
	21	186	1032
PROMEDIO		217	1696
DESVIACIÓN ESTANDAR		29,5	736,4
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		13,61	43,42

PLANTA D	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	10	258	668
	15	309	211
	25	213	1680
PROMEDIO		260	853
DESVIACIÓN ESTANDAR		48,1	751,7
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		18,52	88,11

PLANTA E	No. BRIQUETA	St (KPa)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	6	149	500
	7	149	544
	19	187	269
PROMEDIO		162	438
DESVIACIÓN ESTANDAR		21,5	148,1
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		13,29	33,83

Fuente: Autores

A continuación 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	54,70%
B	50,15%
C	56,57%
D	59,63%
E	47,62%

Fuente: Autores

Llama la atención que estos valores han sido extremadamente bajos en todas las plantas.

3.1.3. Resultados de estabilidad Marshall

A continuación se muestra un ejemplo del tratamiento matemático empleado en cada una de las pruebas 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 y el flujo, ambas a partir de la carga máxima. Además observar la Figura 3.8 y la Figura 3.9.

PLANTA C

BRIQUETA 15: 97% DE COMPACTACIÓN **SIN INMERSIÓN**

ESPESOR: 66 mm

FACTOR DE CORRECCIÓN: 0,94.

Tabla 3.7. Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de la planta C; 97% de energía de compactación; sin inmersión.

DESPLAZAMIENTO	CARGA
mm	N
0,00	0,00
0,17	459,08
0,31	886,98
0,42	1314,71
0,54	1827,79
0,71	2255,17
0,84	2596,97
0,94	3024,07
1,17	3451,02
1,39	3877,80
1,74	4347,09
2,21	4773,55
2,83	5157,22
4,66	5370,32
ESTABILIDAD (N)	5065
FLUJO (mm)	4,66

Fuente: Autores

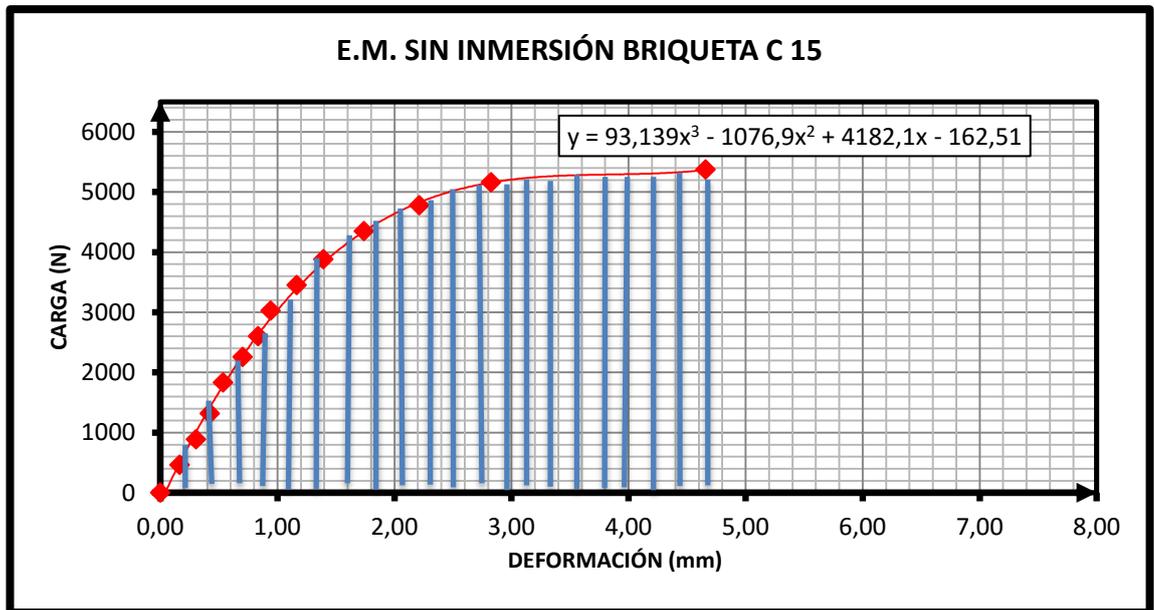


Figura 3.8. Diagrama de carga versus deformación de prueba de estabilidad Marshall sin inmersión.

Fuente: Autores

Se midieron las deformaciones a través de diales. Estos datos se obtuvieron mediante la grabación en video de las pruebas y mediante una hoja de Excel se graficaron los diagramas de carga versus deformación horizontal, con su línea de tendencia y ecuación.

Mediante un diagrama en Excel se graficó la línea de tendencia a través de los puntos, la misma que muestra su ecuación. Se calculará el área a través de la integración de dicha ecuación tomando como límite máximo la deformación indicada por la carga máxima.

$$\text{ÁREA} = \int_0^{4,66} (93,139x^3 - 1076,9x^2 + 4182,1x - 162,51) dx$$

$$\text{ÁREA} = 19305,91 \text{ N mm}$$

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

PLANTA B

BRIQUETA 27: 97% DE COMPACTACIÓN CON INMERSIÓN

ESPESOR: 65 mm

FACTOR DE CORRECCIÓN: 0,96.

Tabla 3.8. Resultados de ensayo de estabilidad Marshall de la planta C; 97% de energía de compactación; con inmersión.

DESPLAZAMIENTO	CARGA
mm	N
0,00	0
0,84	502
1,27	930
1,67	1315
2,05	1742
2,68	2170
3,51	2597
6,70	2896
ESTABILIDAD (N)	2787
FLUJO (mm)	6,70

Fuente: Autores

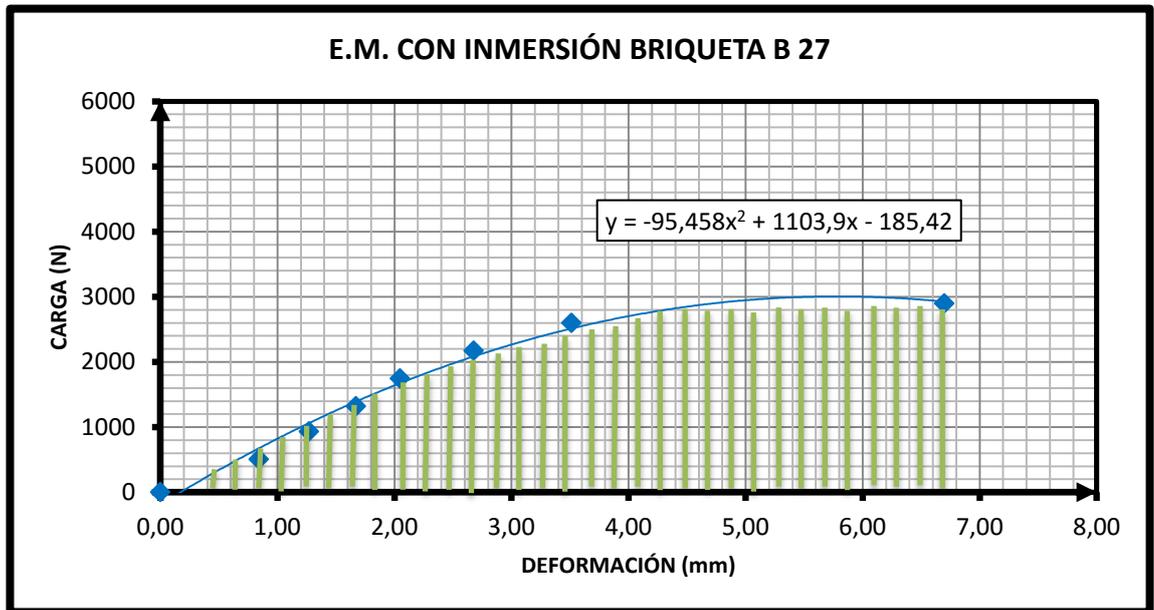


Figura 3.9. Diagrama de carga versus deformación de prueba de estabilidad Marshall con inmersión.

Fuente: Autores

$$\text{ÁREA} = \int_0^{6,70} (95,458x^2 + 1103,9x - 185,42) dx$$

$$\text{ÁREA} = 13964,64 \text{ N mm}$$

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 la Tabla 3.10.

Tabla 3.9. Resultados de ensayos de estabilidad Marshall de todas las plantas, 97% de energía de compactación; sin inmersión.

PLANTA A	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	3	3568	6,69	18485
	4	3376	5,24	14452
	5	2947	6,64	16553
PROMEDIO		3297	6,19	16497
DESVIACIÓN ESTANDAR		317,8	0,8	2017,0
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		9,64	13,31	12,23

PLANTA B	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	19	3856	5,51	16343
	25	3235	5,04	11428
	26	3657	5,16	13533
PROMEDIO		3583	5,24	13768
DESVIACIÓN ESTANDAR		317,1	0,2	2466,0
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		8,85	4,73	17,91

PLANTA C	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	15	5065	4,66	19306
	28	4488	4,27	11516
	30	4878	5,00	15768
PROMEDIO		4810	4,64	15530
DESVIACIÓN ESTANDAR		294,5	0,4	3900,2
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		6,12	7,88	25,11

PLANTA D	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	6	6500	6,38	23038
	18	5743	6,34	23646
	24	5425	7,80	24745
PROMEDIO		5889	6,84	23810
DESVIACIÓN ESTANDAR		552,2	0,8	865,2
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		9,38	12,16	3,63

PLANTA E	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN	16	3105	4,53	10201
	13	3403	4,80	11500
	14	4358	5,54	17656
PROMEDIO		3622	4,95	13119
DESVIACIÓN ESTANDAR		654,6	0,5	3982,3
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		18,07	10,52	30,36

Fuente: Autores

Tabla 3.10. Resultados de ensayos de estabilidad Marshall de todas las plantas, 97% de energía de compactación; con inmersión.

PLANTA A	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	12	3315	8,85	21455
	13	3250	6,05	11664
	16	3301	6,13	12440
PROMEDIO		3289	7,01	15186
DESVIACIÓN ESTANDAR		34,3	1,6	5442,6
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		1,04	22,77	35,84

PLANTA B	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	20	2759	3,77	5834
	27	2787	6,70	13965
	28	3198	5,45	12547
PROMEDIO		2915	5,31	10782
DESVIACIÓN ESTANDAR		245,8	1,5	4343,1
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		8,43	27,72	40,28

PLANTA C	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	20	3296	6,71	13017
	24	3773	6,41	17302
	25	3105	5,62	10414
PROMEDIO		3392	6,25	13578
DESVIACIÓN ESTANDAR		344,2	0,6	3478,0
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		10,15	9,07	25,62

PLANTA D	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	7	4752	6,70	21443
	12	5483	8,64	28798
	17	5610	8,67	28359
PROMEDIO		5282	8,00	26200
DESVIACIÓN ESTANDAR		463,2	1,1	4125,2
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		8,77	14,12	15,74

PLANTA E	No. BRIQUETA	E.M. (N)	FLUJO (mm)	ÁREA (N *mm)
97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN	23	2739	8,21	13717
	24	1985	7,92	10365
	25	1595	10,38	13666
PROMEDIO		2106	8,84	12583
DESVIACIÓN ESTANDAR		581,5	1,3	1920,6
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		27,61	15,17	15,26

Fuente: Autores

A continuación 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	99,7%
B	81,4%
C	70,5%
D	89,7%
E	58,1%

Fuente: Autores

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 LA ENERGÍA SIN INMERSIÓN EN AGUA					EL 97% DE LA ENERGÍA SIN INMERSIÓN EN AGUA					EL 97% DE LA ENERGÍA 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	3443	3275	146	4,5	A19	1957	1976	18	0,9	A19	1682	1799	102	5,7
	A3	3194				A20	1993				A20	1865			
	A4	3187				A22	1977				A22	1851			
B	B1	2860	2705	135	5,0	B10	1877	1682	192	11,4	B10	1511	1324	162	12,2
	B2	2612				B12	1674				B12	1243			
	B3	2643				B14	1494				B14	1219			
C	C1	3817	3706	219	5,9	C8	2622	2610	20	0,8	C8	2008	2052	39	1,9
	C2	3454				C9	2622				C9	2066			
	C3	3847				C11	2587				C11	2083			
D	D1	3432	3274	159	4,8	D19	2996	2767	204	7,4	D19	2175	2106	248	11,8
	D3	3276				D1	2703				D1	2313			
	D4	3115				D2	2603				D2	1831			
E	E3	2603	2497	99	4,0	E1	1642	1598	123	7,7	E1	1355	1259	190	15,1
	E5	2406				E2	1692				E2	1040			
	E6	2482				E5	1459				E5	1382			

Fuente: Autores

Todos los resultados anteriores aparecen graficados por planta desde la Figura 3.10 hasta la Figura 3.14.

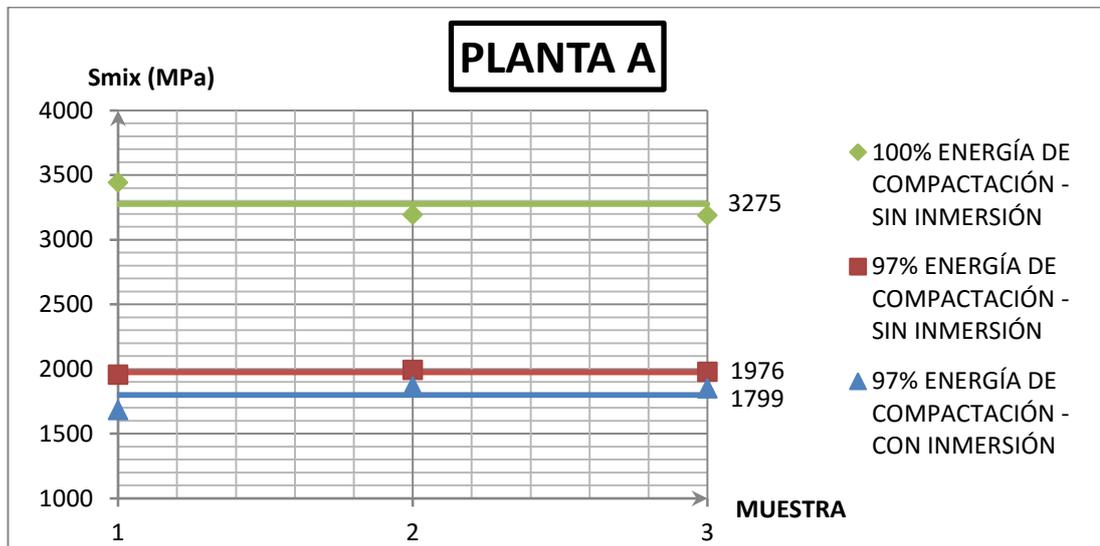


Figura 3.10. Resultados Smix. Planta A

Fuente: Autores

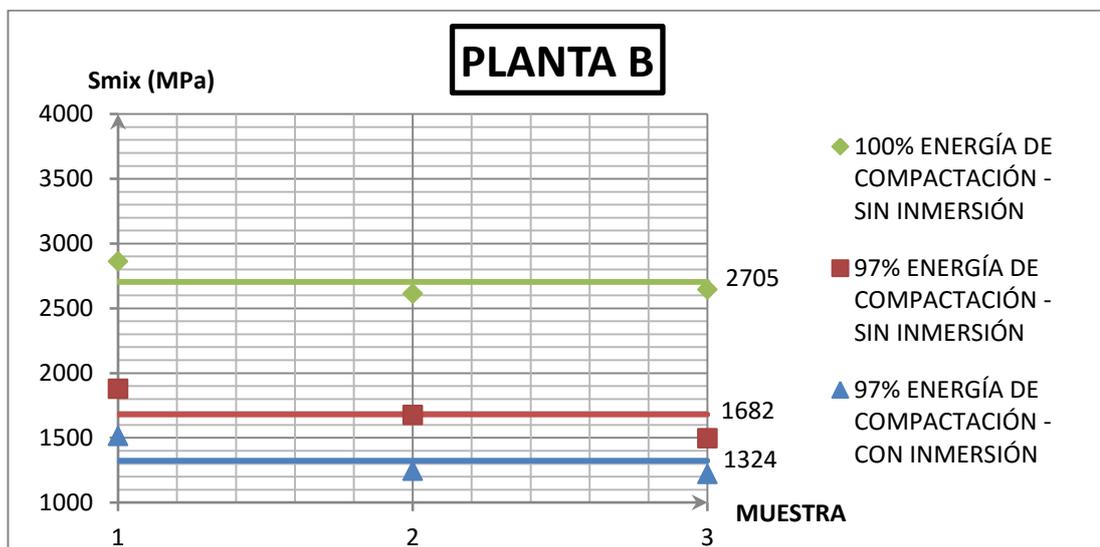


Figura 3.11. Resultados Smix. Planta B

Fuente: Autores

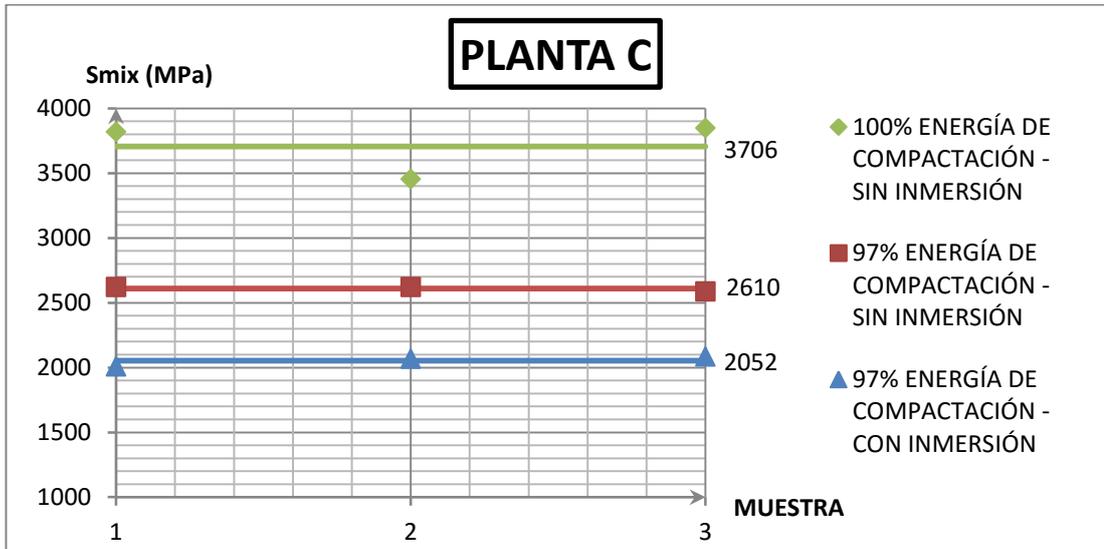


Figura 3.12. Resultados Smix. Planta C

Fuente: Autores

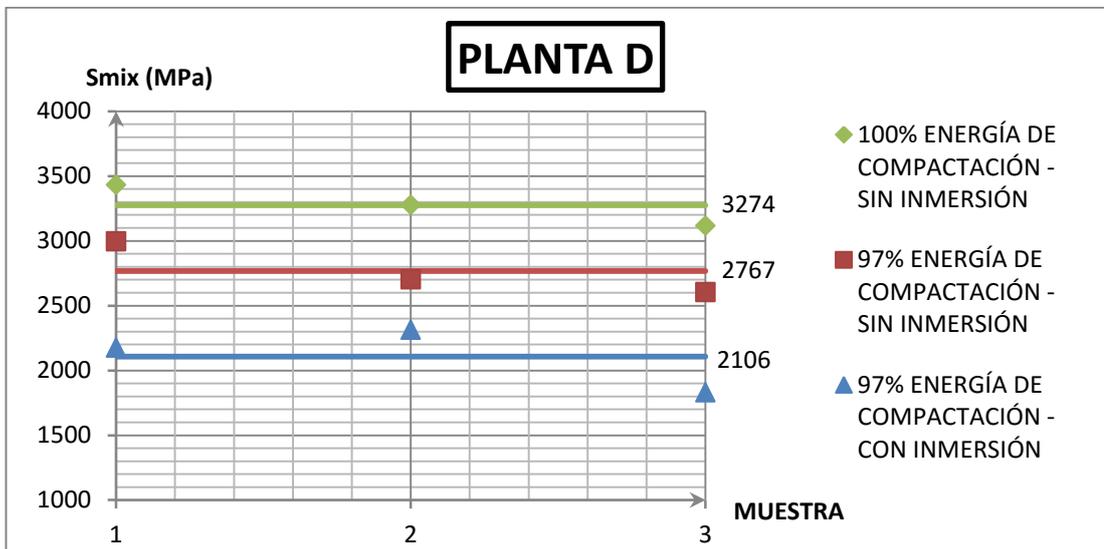


Figura 3.13. Resultados Smix. Planta C

Fuente: Autores

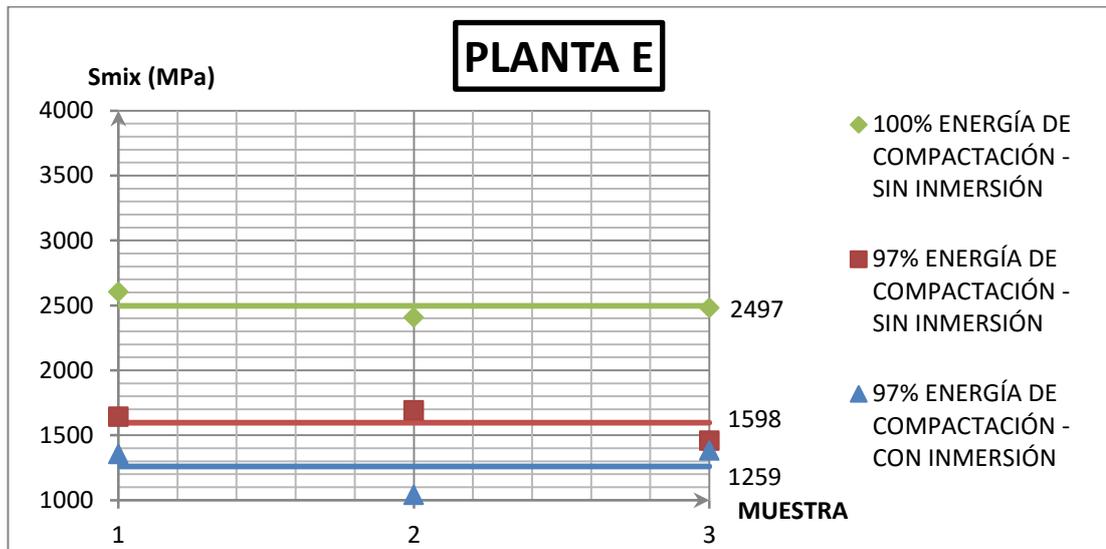


Figura 3.14. Resultados Smix. Planta E

Fuente: Autores

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% E. C. SIN INMERSIÓN	97% E. C. SIN INMERSIÓN	97% E. C. CON INMERSIÓN	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	%
A	3275	1976	1799	1299	39,7	176	8,9	1475	45,1
B	2705	1682	1324	1023	37,8	357	21,2	1381	51,0
C	3706	2610	2052	1096	29,6	558	21,4	1654	44,6
D	3274	2767	2106	507	15,5	661	23,9	1168	35,7
E	2497	1598	1259	899	36,0	339	21,2	1238	49,6

Fuente: Autores

3.2.2. Resultados de las pruebas de fatiga

A continuación se detallan los resultados de las distintas plantas del ensayo de fatiga para las tres condiciones de estudio, como se muestra desde la Tabla 3.14 hasta la Tabla 3.18, y desde la Figura 3.15 hasta la Figura 3.24:

Tabla 3.14. Resultados de ensayo de fatiga planta A.

FATIGA PLANTA "A"			
COMPACTACIÓN CON 100% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 ⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200			
250	20921	181	2838
300	6141	252	2438
350			
400			
450	1371	366	2519
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 ⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200	18451	234	1753
250			
300	5921	319	1929
350			
400	571	746	1099
450			
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 ⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
150	8191	202	1524
200	1111	266	1540
250			
300	181	469	1310
350			
400			
450			
500			

Fuente: Autores

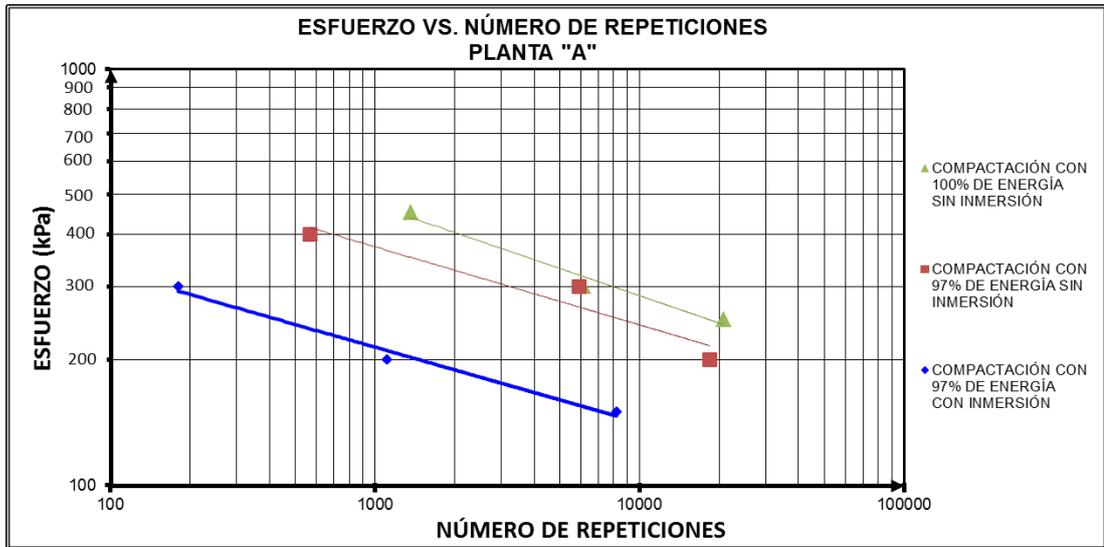


Figura 3.15. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta A.

Fuente: Autores

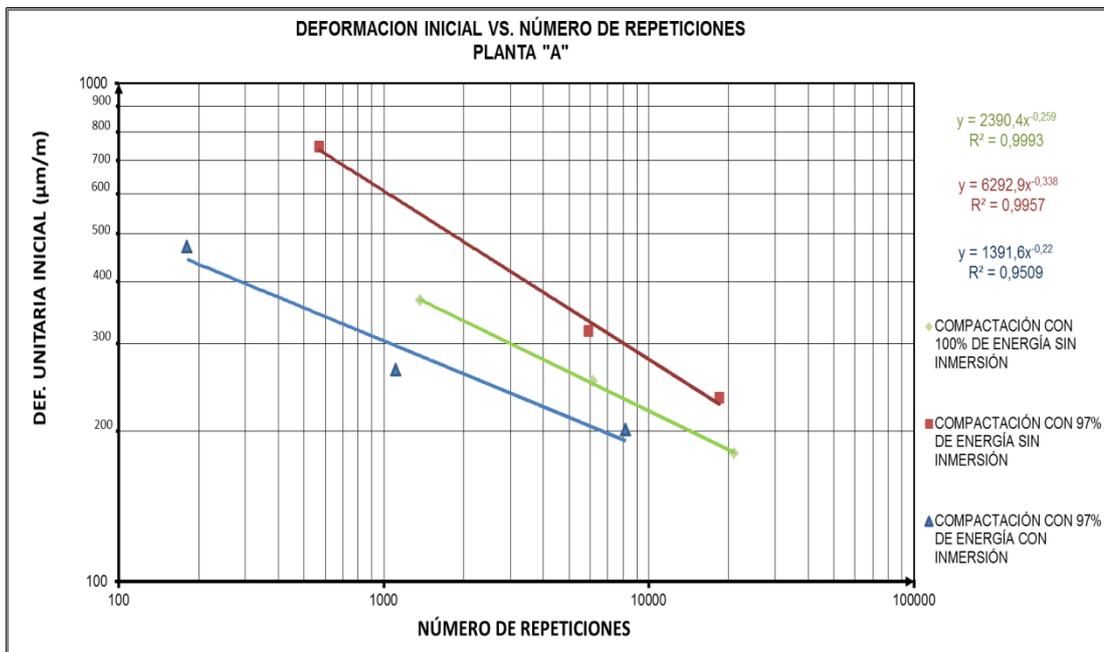


Figura 3.16. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta A.

Fuente: Autores

Tabla 3.15. Resultados de ensayo de fatiga planta B.

FATIGA PLANTA "B"			
COMPACTACIÓN CON 100% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200			
250	6441	207	2471
300	2941	280	2199
350			
400			
450	501	527	1751
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200	4331	294	1395
250	1321	380	1349
300	551	600	1025
350			
400			
450			
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
150	2811	298	1032
200	1281	341	1201
250			
300	141	761	808
350			
400			
450			
500			

Fuente: Autores

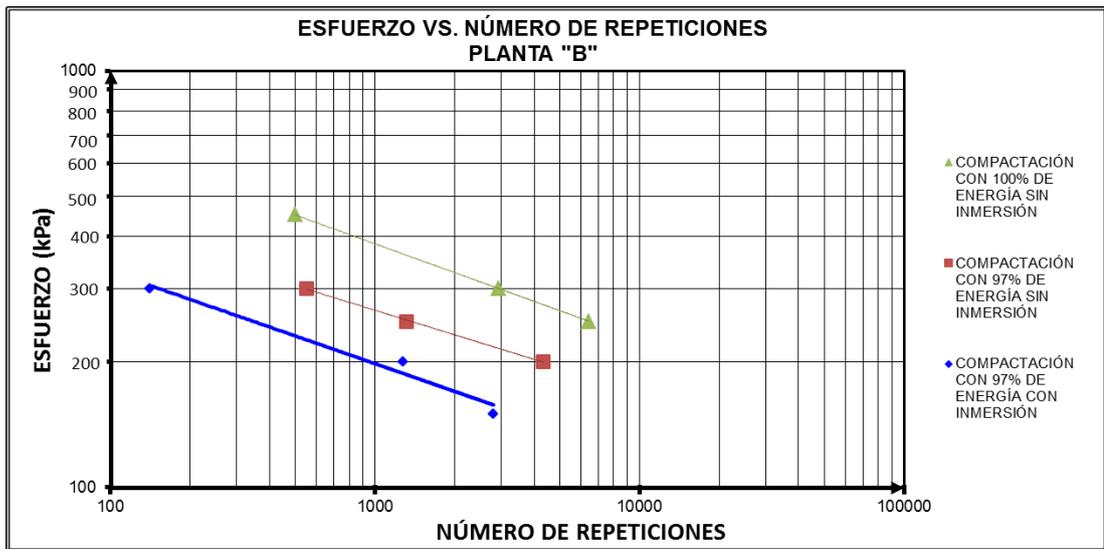


Figura 3.17. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta B.

Fuente: Autores

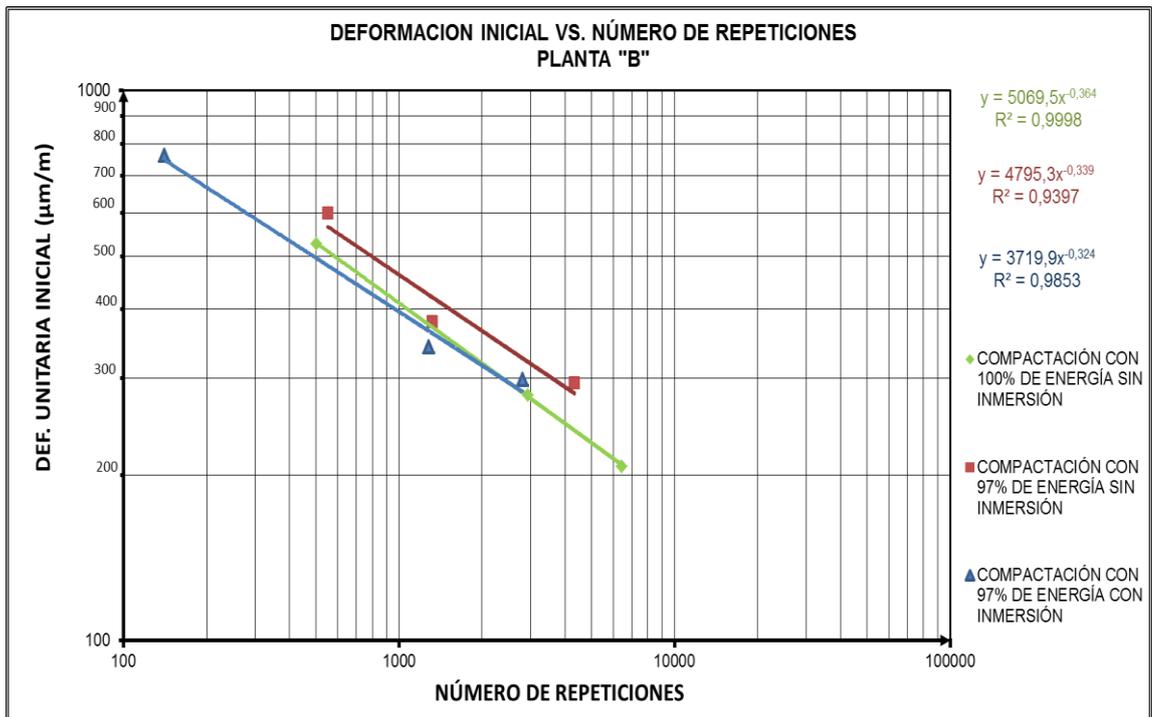


Figura 3.18. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta B.

Fuente: Autores

Tabla 3.16. Resultados de ensayo de fatiga planta C.

FATIGA PLANTA "C"			
COMPACTACIÓN CON 100% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 ⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200			
250			
300	8951	256	2407
350	6171	309	2321
400			
450	2221	432	2136
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 ⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200			
250	13741	255	2013
300	3351	363	1694
350			
400	1741	506	1620
450			
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10 ⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
150			
200			
250			
300	2941	383	1604
350	1741	468	1534
400	821	582	1409
450			
500			

Fuente: Autores

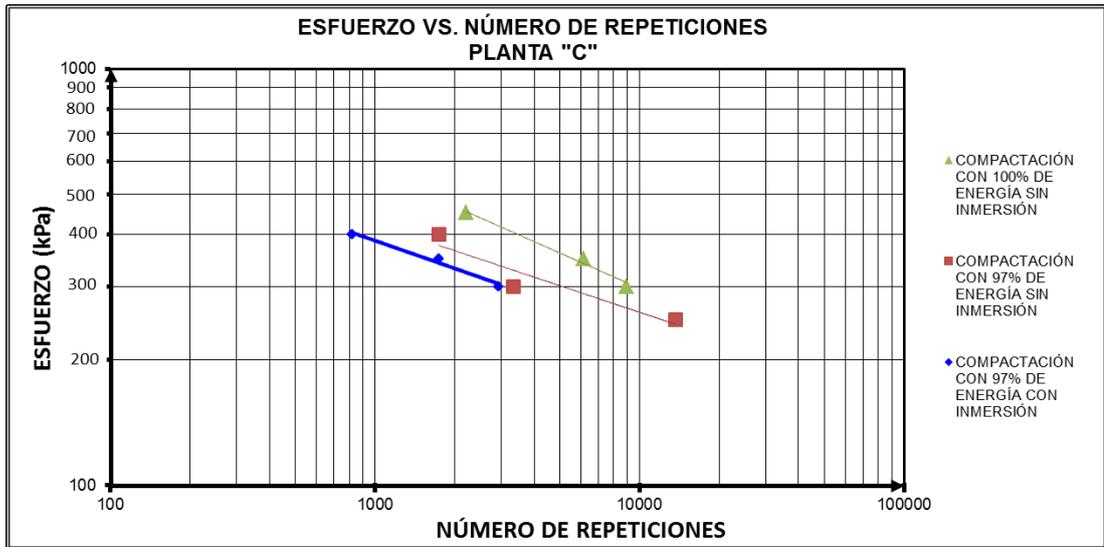


Figura 3.19. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta C.

Fuente: Autores

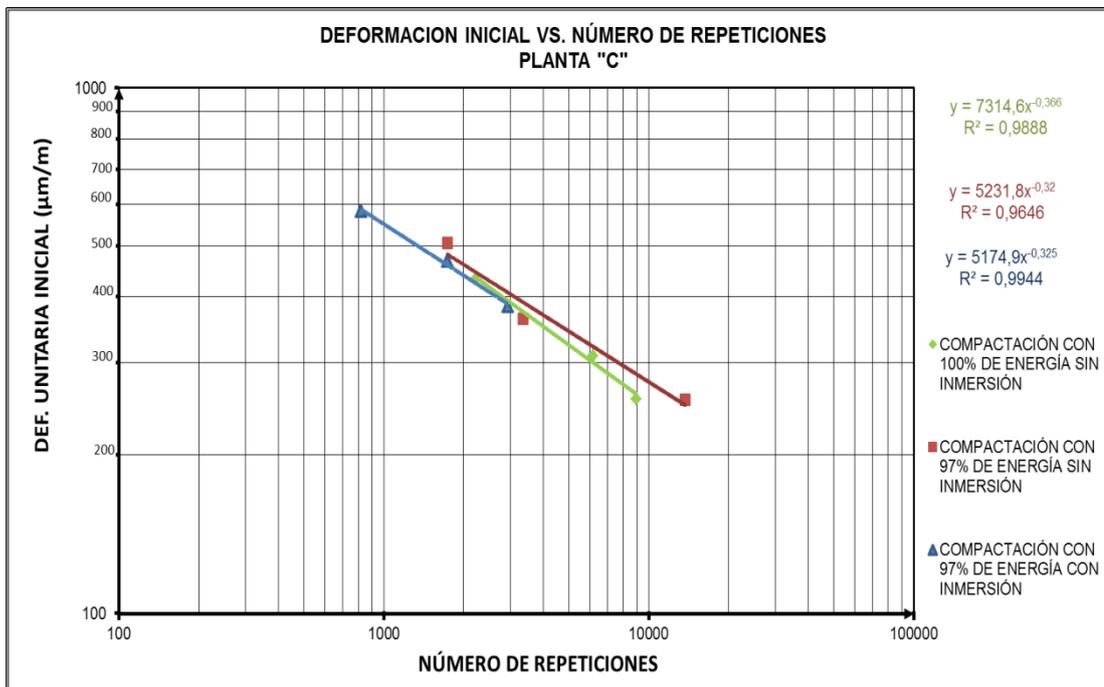


Figura 3.20. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta C.

Tabla 3.17. Resultados de ensayo de fatiga planta D.

FATIGA PLANTA "D"			
COMPACTACIÓN CON 100% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200			
250			
300			
350	7111	218	3294
400	4141	289	2836
450	3011	363	2543
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200			
250	14321	161	3182
300	2881	235	2622
350			
400	721	376	2178
450			
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
150			
200	14981	147	2794
250	591	348	1474
300	641	355	1734
350			
400			
450			
500			

Fuente: Autores

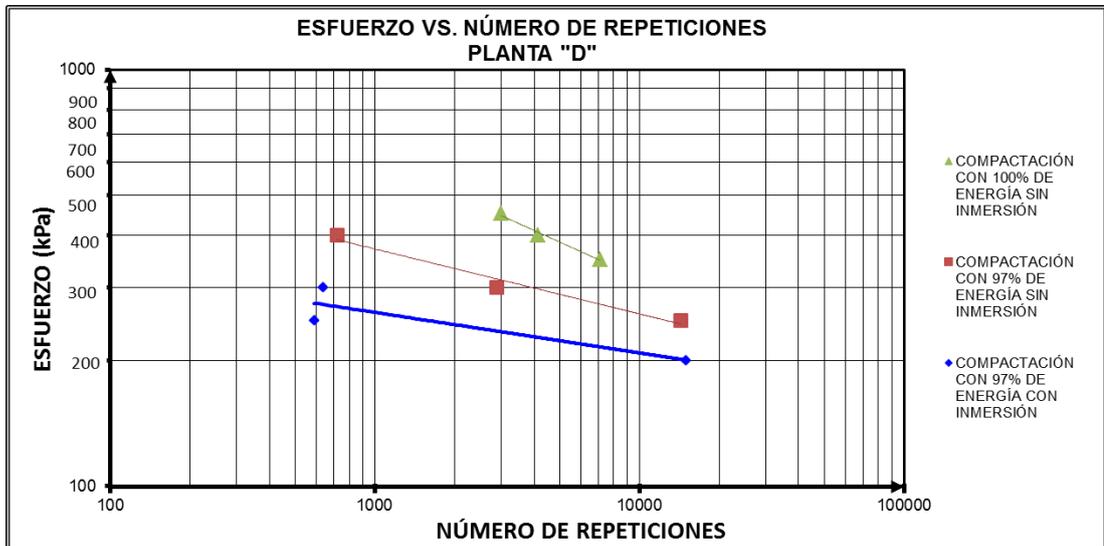


Figura 3.21. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta D.

Fuente: Autores

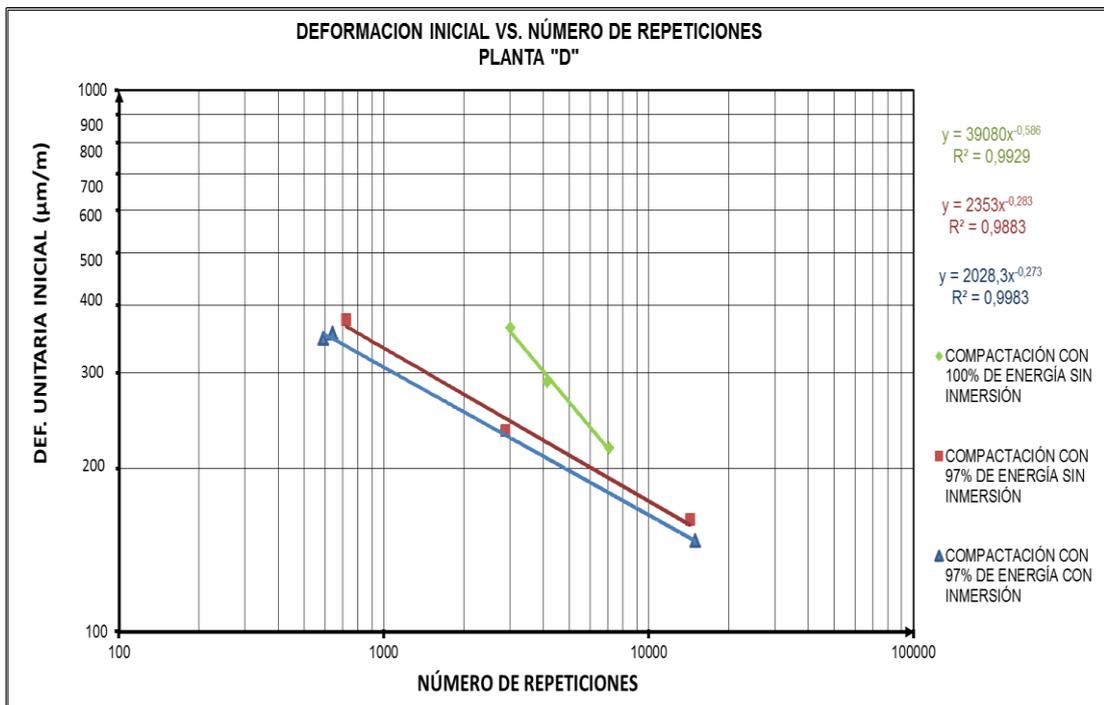


Figura 3.22. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta D.

Fuente: Autores

Tabla 3.18. Resultados de ensayo de fatiga planta E.

FATIGA PLANTA "E"			
COMPACTACIÓN CON 100% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
200	11771	187	2188
250			
300			
350	371	551	1301
400			
450	261	572	1614
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA SIN INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
150	18071	201	1529
200	2681	359	1142
250			
300	521	594	1035
350			
400			
450			
500			
COMPACTACIÓN CON 97% DE ENERGÍA CON INMERSIÓN			
COEF. POISSON = 0,35			
ESFUERZO (kPa)	REPETICIONES	DEFORMACIÓN (x 10⁻⁶)	MÓDULO RIGIDEZ (MPa)
100	22731	134	1531
150	751	263	1168
200	311	369	1112
250			
300			
350			
400			
450			

Fuente: Autores

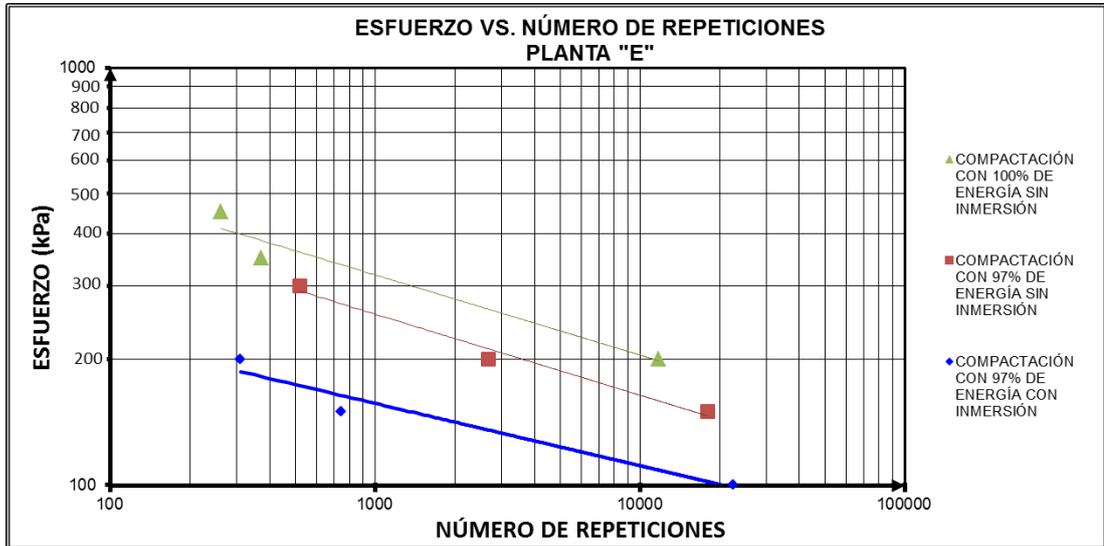


Figura 3.23. Relación de esfuerzos versus número de repeticiones. Planta E.

Fuente: Autores

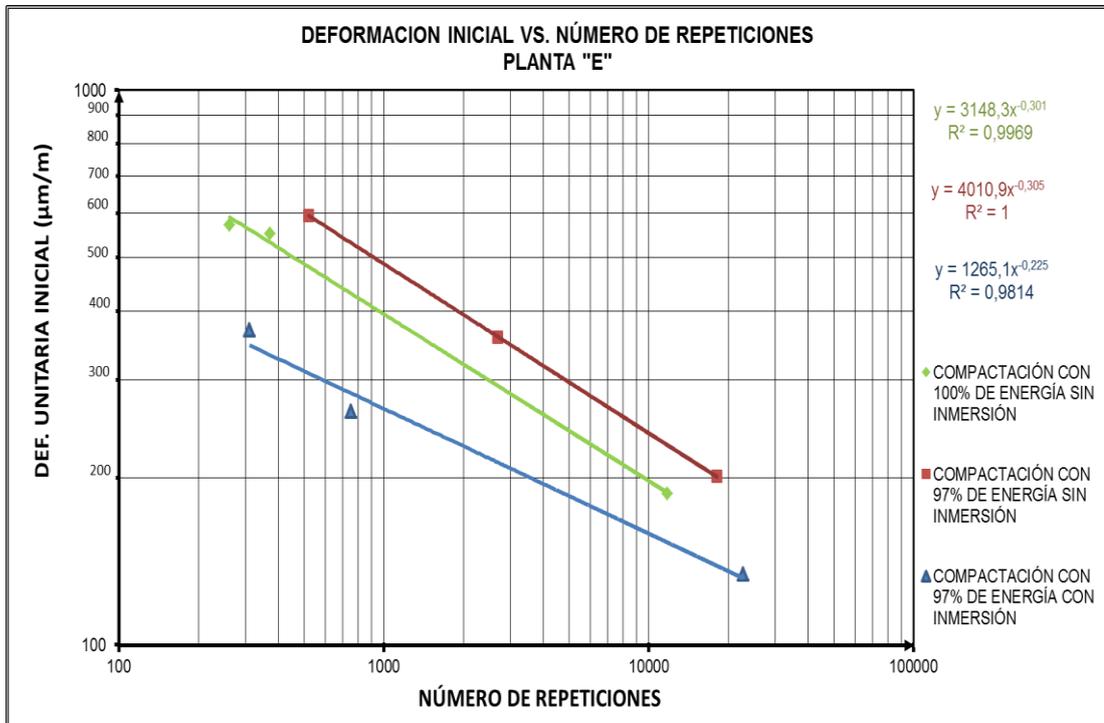


Figura 3.24. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Planta E.

Fuente: Autores

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 3.25 y la Figura 3.26.

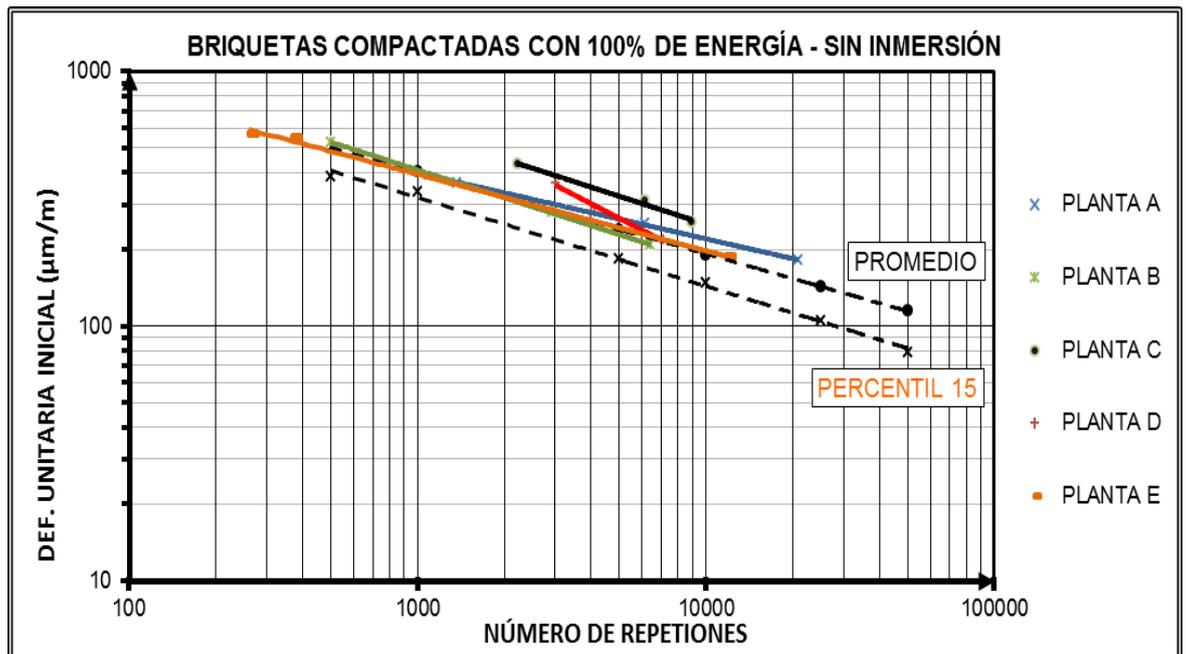


Figura 3.25. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Briquetas con 100% de energía – sin inmersión.

Fuente: Autores

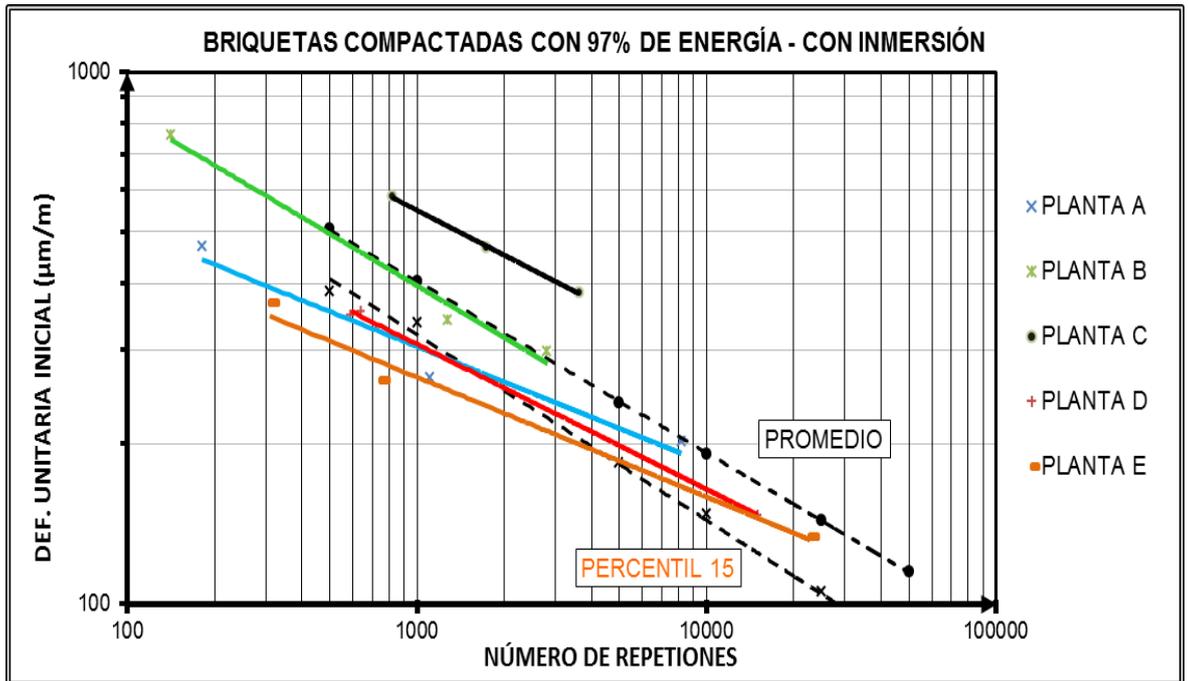


Figura 3.26. Relación de deformación unitaria inicial versus número de repeticiones. Briquetas con 97% de energía – con inmersión.

Fuente: Autores

3.2.3. Resultados de la deformación bajo compresión cíclica (Creep)

En la Tabla 3.19 se puede observar el procesamiento estadístico de los resultados.

Tabla 3.19. Resultados de los ensayos de deformación bajo compresión cíclica

PLANTA	100% DE LA ENERGÍA SIN INMERSIÓN EN AGUA				97% DE LA ENERGÍA SIN INMERSIÓN EN AGUA				97% DE LA ENERGÍA CON INMERSIÓN EN AGUA						
	#	CREEP DINAMICO (%)	PROMEDIOS (%)	DESV. EST.	COEF. VARIACION	#	CREEP DINAMICO (%)	PROMEDIOS (%)	DESV. EST.	COEF. VARIACIÓN	#	CREEP DINAMICO (%)	PROMEDIOS (%)	DESV. EST.	COEF. VARIACIÓN
A	A2	1,07%	1,01%	0,001	8,6	A8	1,29%	1,46%	0,002	17,1	A1	2,00%	2,40%	0,006	23,3
	A5	0,94%				A21	1,64%				A25	2,79%			
						A23	ERROR					FALLA ENERGÉTICA			
B	B4	0,97%	0,98%	0,000	1,3	B4	1,33%	1,40%	0,001	7,0	B13	2,59%	2,46%	0,001	4,4
	B5	0,98%				B11	ERROR				B17	2,40%			
						B16	1,47%				B18	2,40%			
C	C4	0,87%	0,85%	0,000	3,2	C26	0,78%	1,19%	0,004	29,8	C12	1,52%	1,68%	0,002	13,1
	C5	0,83%				C27	1,40%				C22	1,93%			
						C29	1,39%				C23	1,60%			
D	D2	1,04%	0,94%	0,001	13,9	D4	1,13%	0,98%	0,002	22,3	D20	1,72%	1,99%	0,006	27,9
	D5	0,85%				D9	1,09%				D21	2,63%			
						D13	0,73%				D26	1,62%			
E	E2	0,73%	0,79%	0,001	10,2	E3	1,15%	1,22%	0,001	11,4	E4	2,32%	2,46%	0,002	7,6
	E5	0,84%				E12	1,38%				E11	2,38%			
						E18	1,13%				E20	2,67%			

Fuente: Autores

Todos los resultados anteriores aparecen graficados por planta desde la Figura 3.27 hasta la Figura 3.31.

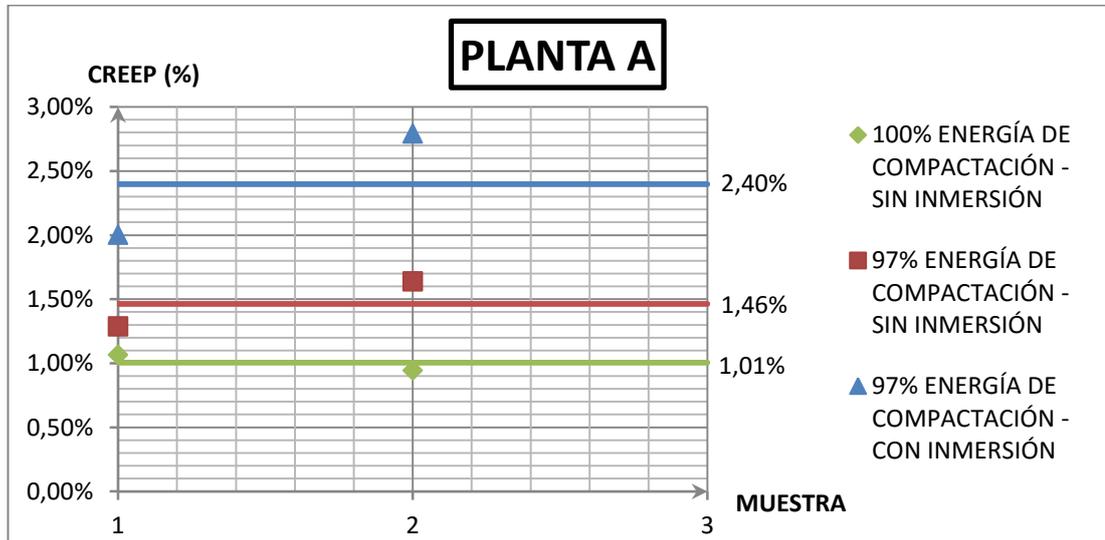


Figura 3.27. Resultados Creep. Planta A

Fuente: Autores

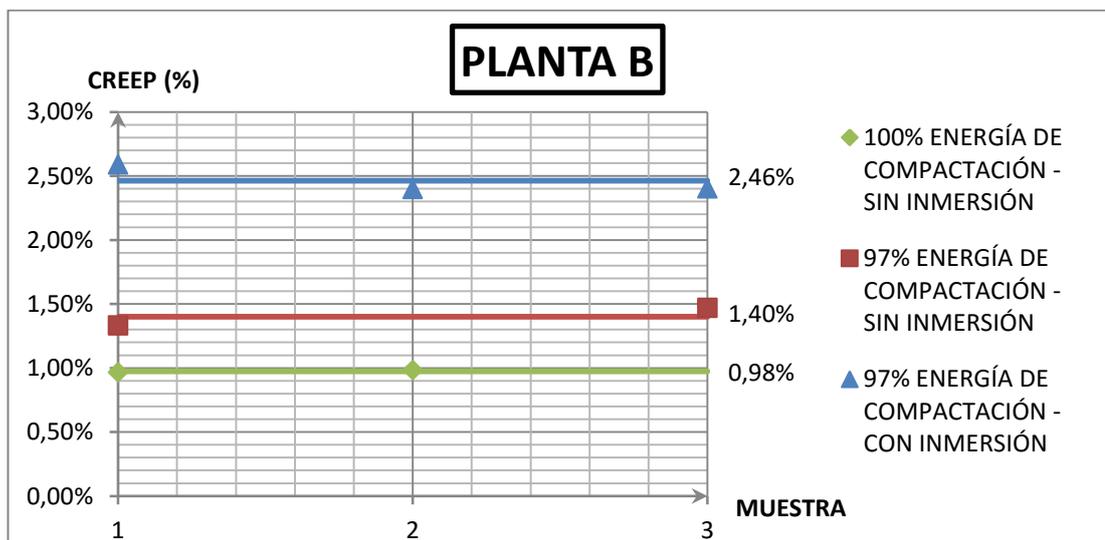


Figura 3.28. Resultados Creep. Planta B

Fuente: Autores

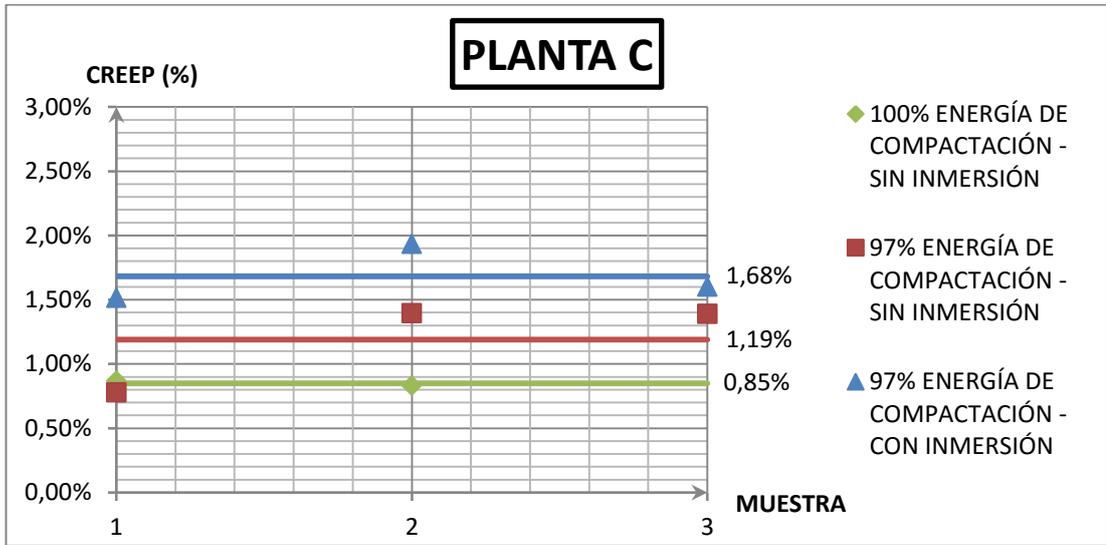


Figura 3.29. Resultados Creep. Planta C

Fuente: Autores

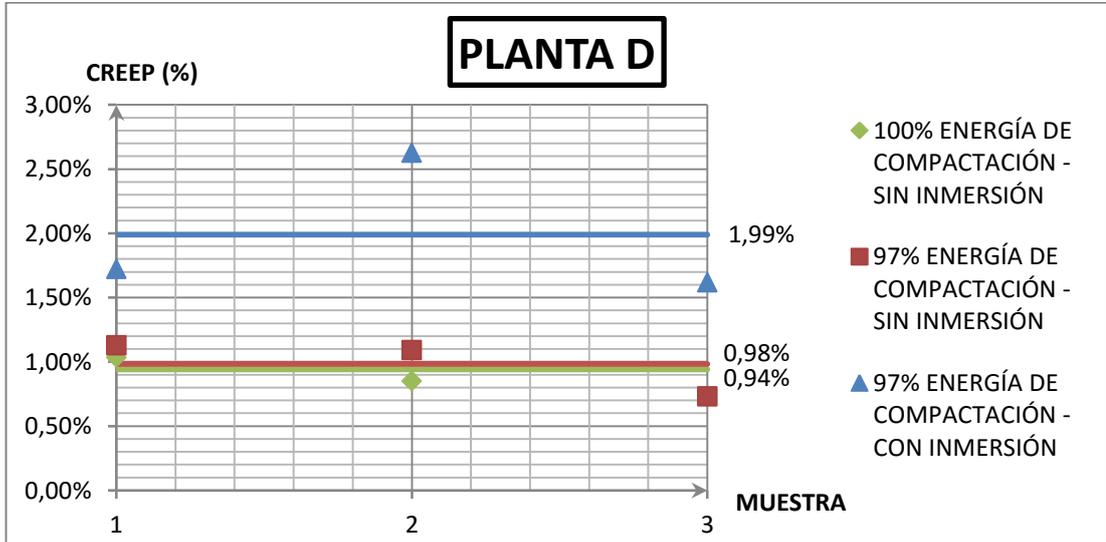


Figura 3.30. Resultados Creep. Planta D

Fuente: Autores

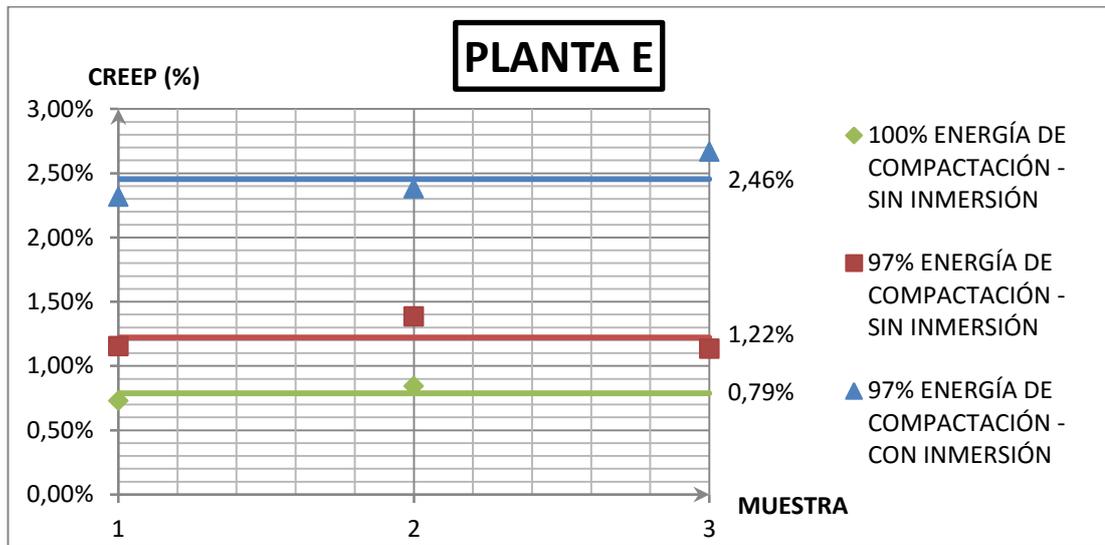


Figura 3.31. Resultados Creep. Planta E

Fuente: Autores

Se puede apreciar en la Tabla 3.20 un resumen de las afectaciones a la deformación bajo compresión cíclica al aplicar estos procedimientos.

Tabla 3.20. Resumen de las afectaciones al Creep de acuerdo a la compactación y a la inmersión

PLANTA	100% E. C. SIN INMERSIÓN	97% E. C. SIN INMERSIÓN	97% E. C. CON INMERSIÓN	AUMENTO DE LA DEFORMACIÓN POR MENOR COMPACTACIÓN	AUMENTO DE LA DEFORMACIÓN POR INMERSIÓN EN AGUA	AUMENTO DE LA DEFORMACIÓN POR AMBOS FACTORES
A	1,01%	1,46%	2,40%	0,46%	0,93%	1,39%
B	0,98%	1,40%	2,46%	0,43%	1,06%	1,49%
C	0,85%	1,19%	1,68%	0,34%	0,49%	0,83%
D	0,94%	0,98%	1,99%	0,04%	1,01%	1,05%
E	0,79%	1,22%	2,46%	0,44%	1,23%	1,67%

Fuente: Autores

A continuación se muestra una tabla de resumen de resultados, todos los cuales han sido obtenidos considerando solamente mezclas con 97% de compactación sin y con inmersión en agua. Ver Tabla 3.21

Tabla 3.21. 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	54,70%	99,75%	91,07%	3	0,93%
B	Cumple	50,15%	81,37%	78,75%	2	1,06%
C	Cumple	56,57%	70,51%	78,62%	1	0,49%
D	No cumple	59,63%	89,68%	76,11%	4	1,01%
E	No cumple	47,62%	58,14%	78,80%	5	1,23%

Fuente: Autores

(*) Se observa en la Tabla 3.21 que en el caso de fatiga se enumera de 1 a 5, en donde 1 es el mejor comportamiento y 5 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 3.5, 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, B y C cumplen con el 100% de asfalto retenido en los agregados de la mezcla, y las mezclas de las plantas D y E tienen menos del 95% del asfalto retenido en los agregados de dichas mezclas, razón por la cual las mezclas de estas dos plantas no cumplen con los requisitos necesarios según la normativa vigente.

Es importante resaltar que esta prueba es muy 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 mencionar 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.

Un resultado muy interesante a considerar, es que la mezcla de la planta D a pesar de tener un contenido de asfalto bastante elevado, como se evidencia en la Tabla 2.6, no cumple con esta prueba. Como era de esperarse, la planta E con un porcentaje de asfalto bastante bajo (ver Tabla 2.7), tampoco cumple con la 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 compactación y sin inmersión el valor de tracción indirecta mayor es el de la planta D, con un promedio de 436 kPa. Mientras que el menor valor lo tiene la planta B, con un promedio de 286 kPa. Las otras tres plantas mantienen valores cercanos.

El coeficiente de variación se encuentra en general por debajo del 10%, con la excepción de la planta E que presenta 17,03%.

Se puede observar en la Tabla 3.4 los valores del área bajo la curva de todas las plantas con la condición del 97% de compactación y sin inmersión. Esta área es la energía empleada para llegar al punto de ruptura de las muestras. La planta que tuvo que emplear mayor energía es la planta D, con un promedio de 521 N*mm. La planta con menor energía promedio utilizada es la C con un valor de 152 N*mm.

Los coeficientes de variación para el área son elevados en todas las plantas. La planta con mayor coeficiente de variación es la B con 93,33%. Y la de menor coeficiente es la planta A con un valor de 38,55%.

2.- Observando la Tabla 3.5 correspondiente a mezclas compactadas con el 97% de la energía y con inmersión en agua, se puede apreciar una reducción considerable de la tracción indirecta promedio con respecto a la Tabla 3.4 (sin inmersión). Esta reducción tiene una magnitud considerable, entre el 50% y el 60% en todas las plantas.

El valor de mayor tracción indirecta promedio se origina en mezclas de la planta D, siendo 260 kPa. En las dos condiciones analizadas se mantuvo una tendencia. Por otra parte el menor valor promedio de tracción indirecta fue el de la planta B, con 143 kPa. De igual manera ésta planta origina los valores menores para las dos condiciones.

El mayor coeficiente de variación corresponde a la planta B, siendo de 18,52%.

Analizando las áreas bajo la curva de la Tabla 3.5, estas aumentan considerablemente en comparación a los datos de la Tabla 3.4. El valor de mayor energía en esta condición con inmersión es de 1696 N mm, perteneciente a la mezclas de la planta C. La planta cuya mezcla posee menor energía para la rotura es la E con 483 N*mm. La reducción de tracción indirecta y el aumento del área para la condición con inmersión pudieran originarse debido a grandes aumentos en la deformación de las briquetas antes de su punto de falla en condiciones con inmersión, es decir, las briquetas aumentan su ductilidad.

Los coeficientes de variación son muy elevados en todas las plantas, siendo el más elevado el evaluado en la planta D con 88,11%. El menor coeficiente es de 33,83% perteneciente a la planta E.

3.- Observando la Tabla 3.6 los valores del porcentaje de resistencia retenida en todas las plantas se encuentran por debajo del 80% que es el valor mínimo aceptable según la normativa vigente. La mezcla de la planta D tiene un porcentaje retenido por tracción indirecta de 59,63%, que es el valor más alto, aunque lejano de la exigencia (mínimo 80%). La mezcla proveniente de la planta E tiene un porcentaje de 47,62%, siendo el valor más bajo de todas las mezclas evaluadas. Se presume que estos resultados son consecuencia de un asfalto de baja calidad producido justo en el tiempo en que se confeccionaron las briquetas y provisto a las plantas estudiadas.

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 energía de compactación y sin inmersión. Se puede observar que el valor mayor de estabilidad Marshall promedio es de la planta D, que es de 5889 N y un flujo promedio de 6,84 mm. La planta A tiene el menor valor promedio que es de 3297 N y el flujo promedio es de 6,19 mm.

La planta con mayor coeficiente de variación es la E, con 18,07%. La planta C presenta el menor valor, que es de 6,12%. Las plantas A, B y D tiene valores muy cercanos.

La planta cuya mezcla tiene una mayor área promedio es la D, con 23810 N*mm, siendo la menor la correspondiente a la planta E con 13119 N*mm.

En todas las plantas el coeficiente de variación es elevado, a excepción de la planta D, cuyo porcentaje es de 3,63%. La planta con mayor coeficiente de variación es la E con 30,36%. Las otras plantas tienen coeficientes de variación intermedios.

2.- Mediante la Tabla 3.10 se aprecia una reducción de la estabilidad Marshall al ensayar briquetas con 97% de compactación y con inmersión en agua, respecto a los resultados de la Tabla 3.9, con la excepción de la mezcla de la planta A cuya diferencia es mínima. Las mezclas de las plantas B, C, D y E tienen una reducción que va desde el 10% al 30%.

La mezcla de la planta con el valor más alto de estabilidad es la D, con 5282 N y un flujo de 8 mm. El valor más bajo corresponde a la mezcla de la planta E que tiene una estabilidad de 2106 N y un flujo de 8,84 mm.

La planta con el coeficiente de variación más alto es la E con 27,61%. Por otra parte el valor más bajo es el de la planta A con un coeficiente de variación de 1,04%.

Evaluando las áreas promedio mostradas en la Tabla 3.10, es evidente una reducción en comparación a los resultados de la Tabla 3.9 en todas las plantas a excepción de la planta D que aumenta. En la condición con inmersión el área promedio más baja es de 10782 N*mm, correspondiente a

la mezcla de la planta B. El valor más elevado es el de la planta D, cuya área promedio es 26200 N*mm.

Se presentan altos coeficientes de variación de áreas promedio en todas las plantas. El valor mayor es el de la mezcla de la planta B con 40,28%. Mientras el valor más bajo es el de la planta E el cual es de 15,26%.

3.- 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 A prácticamente no tuvo mucha afectación ya que el porcentaje de estabilidad Marshall retenida es de 99,7%. La mezcla con el porcentaje inferior pertenece a la planta E, con 58,1%.

4.2. Análisis de los resultados de los ensayos propuestos en el laboratorio

4.2.1. Análisis de los resultados de módulo de rigidez

Se puede observar desde la Figura 3.10 hasta la Figura 3.14, los gráficos en donde se relacionan los resultados de cada una de las 3 briquetas ensayadas por planta respecto a su módulo de rigidez (Smix).

Cabe mencionar que en dichos gráficos se encuentran ploteados en verde, rojo y azul los resultados para las diferentes alternativas de trabajo, en color verde están los correspondientes a briquetas con 100% de la energía de compactación, en color rojo las briquetas con 97% de la energía de compactación sin inmersión en agua, y en color azul las briquetas con

97% de la energía 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.

Analizando los valores promedios de las briquetas compactadas al 100% de la energía y sin inmersión se observa que las plantas A, C y D tienen valores por encima de 3000 MPa, la planta B por encima de 2500 MPa y la planta E es la que ofrece el promedio más bajo, de solo 2497 MPa, aunque este valor está muy próximo a 2500 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)

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 diferente. Por ejemplo:

En general en las mezclas de las plantas A, B, C y E la incidencia o caída de rigidez por efecto de la compactación es aproximadamente la misma. Éste no es el caso de la planta D donde el efecto fue más atenuado.

Respecto a la incidencia del agua en la rigidez, el efecto mayor aparece en la mezcla de la planta D, seguido por las plantas B, C y E, pero siendo el efecto mucho más reducido en la planta A.

Vale señalar que los módulos de rigidez en las plantas B y E son en magnitud más bajos en comparación con las restantes plantas, incluso para el 100% de la energía de compactación. La magnitud de todos los efectos antes mencionados se encuentran tabulados y resumidos en la Tabla 3.13.

Puede apreciarse que la disminución del módulo por menor compactación indica que las plantas cuyas mezclas más se afectan por dicho efecto son: A, B y E, mientras que la que menos se afecta por compactación es la D.

Al analizar la disminución del módulo netamente por inmersión en agua, se puede apreciar que la planta A es la menos afectada con un valor de 8,9%. Las mezclas de las plantas restantes (B, C y D y E) tienen un comportamiento parecido, con un rango de disminución entre 21% y 24%.

Al examinar los resultados de la disminución del módulo por ambos factores o efectos trabajando simultáneamente, se observa que la reducción en el módulo afecta en mayor medida a la planta B y E, mientras que la

mezcla de la planta D es la que se afecta en menor porcentaje. Las plantas A y C presentan disminuciones muy parecidas.

4.2.2. Análisis de los resultados de las pruebas de fatiga

Para el análisis del ensayo de fatiga se elaboró una tabla por planta (ver desde Tabla 3.14 hasta Tabla 3.18) 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 3.15 hasta la Figura 3.24).

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 energía de compactación sin inmersión, rojo para 97% de energía de compactación sin inmersión y azul para 97% de energía con inmersión en agua.

Observaciones sobre las gráficas de repeticiones versus esfuerzos

Puede apreciarse en las figuras Figura 3.15, Figura 3.17, Figura 3.19, Figura 3.21 y Figura 3.23 que para todas las plantas los comportamientos obtenidos en las mezclas con el 100% de energía sin inmersión se ubican en la posición correspondiente a las mezclas más rígidas (superior derecha), mientras que las mezclas con 97% de compactación y con inmersión en agua se sitúan en la posición de las menos rígidas (inferior izquierda).

Observaciones sobre las gráficas de repeticiones versus deformaciones unitarias

En general en este tipo de gráficas la ubicación de las líneas de ajuste para diferentes rigideces se presenta en sentido inverso a las gráficas anteriores. Es decir que 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 y por ende el mayor daño por fatiga. Sin embargo, el comportamiento obtenido en las figuras Figura 3.16, Figura 3.18, Figura 3.20, Figura 3.22 y Figura 3.24 muestra que dicha posición ha sido ocupada en realidad por la mezcla con 97% de compactación e 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 3.25 se muestra el comportamiento a la fatiga de todas las plantas con el 100% de energía 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 en general todas las plantas en esta condición se encuentran ubicadas por encima de la línea promedio, lo que indica un comportamiento adecuado. Solo las plantas B y D entrecruzan ligeramente dicha línea promedio. No obstante es conveniente aclarar que entre la línea promedio y la del percentil 15 el comportamiento estimado puede considerarse tolerable hasta nuevos afinamientos a futuro.

Al graficar las curvas de todas las plantas con menor compactación y con inmersión (Figura 3.26) puede observarse que existe en esta condición extrema un mejor comportamiento a la fatiga en las plantas C y B, teniendo las 3 restantes plantas (A, D y E) líneas de ajuste más próximas y con peor desempeño a la fatiga. La línea más crítica corresponde a la planta E.

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

Se puede ver desde la Figura 3.27 hasta la Figura 3.31, 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 destacar que en estos gráficos se pueden observar ploteados en verde, rojo y azul los resultados para las diferentes alternativas de trabajo, en color verde están los correspondientes a briquetas con 100% de la energía de compactación, en color rojo las briquetas con 97% de la energía de compactación sin inmersión en agua, y en color azul las briquetas con 97% de la energía 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 mencionar 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.

Analizando los valores promedios de las briquetas compactadas al 100% de la energía y sin inmersión se observa que las plantas B, C, D y E tienen valores por debajo de 1% de deformación, solo la planta A con un valor de 1,01%, se encuentra ligeramente por encima del 1% de

deformación. Es importante destacar 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)

La variación en cada una de las plantas por los efectos de la compactación de las mezclas o de su inmersión en agua ha tenido un comportamiento interesante. Por ejemplo:

Se puede apreciar que en las mezclas de las plantas A, B, C y E, se dan comportamientos muy similares con respecto al incremento de la deformación por efecto de la menor compactación. Lo cual no sucede con la mezcla de la planta D puesto que el efecto en esta mezcla es prácticamente inexistente.

Al analizar la incidencia del agua en la deformación bajo compresión cíclica, el menor efecto se presenta en la mezcla de la planta C, pero en general en las mezclas de las plantas A, B, D y E el aumento de la deformación por efecto del daño en agua es aproximadamente igual, ya que afecta negativamente a estas mezclas de manera considerable.

Todos estos resultados se encuentran resumidos y citados en la Tabla 3.20. Puede observarse que el incremento de la deformación por menor

compactación revela que las plantas cuyas mezclas más se afectan por este efecto son: A, B y E, mientras que se afecta en menor medida la mezcla de la planta C y prácticamente no sufre ningún daño la mezcla proveniente de la planta D.

Al analizar el aumento de la deformación solamente por efecto de la inmersión en agua, se puede notar que la planta C es la menos afectada con el 0,49%. Mientras que las mezclas de las plantas restantes (A, B, D y E) tienen un comportamiento muy bastante parecido con valores que están entre el 0,93% y 1,23%.

Al evaluar los resultados del aumento de la deformación por ambos factores trabajando en conjunto, se puede ver que el incremento en la deformación afecta en mayor medida a las mezclas de las plantas A, B y E, seguida por la mezcla proveniente de la planta D y de manera más reducida a la planta C.

CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES

1.- En el estudio realizado al evaluar el daño empleando las pruebas convencionales recomendadas por el MTOP puede apreciarse que en la prueba de agua hirviendo de las mezclas asfálticas de las plantas D y E no cumplirían la exigencia, teniendo porcentaje de despegue inferior al 95%.

Por razones que necesitan estudiarse con mayor profundidad las pruebas de resistencia retenida mediante el empleo de tracción indirecta (cabezal Lottman), arrojaron valores extremadamente bajos, todos por debajo del 60%, algo inesperado. No obstante, el valor más bajo corresponde a la planta E.

2.- Al emplear 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. Los resultados obtenidos son interesantes y muy particulares para cada una de las plantas. Al respecto, el valor más bajo obtenido lo ofrece la planta E con 58% y el más elevado la planta A con casi el 100% retenido.

3.- La aplicación de pruebas de desempeño con el equipo NAT para evaluar el daño en agua se las considera posibles y tienen un gran potencial.

Los valores de rigidez retenida tuvieron poca variación entre las plantas B, C, D y E con módulos retenidos en el orden del 76% al 79% siendo el mejor comportamiento el de la planta A con el 91% retenido.

4.- La prueba de fatiga se considera la más interesante de las realizadas en el estudio, 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), valorados en los gráficos de repeticiones versus esfuerzo y repeticiones versus deformación unitaria, demuestra que existe una gran incidencia del agua en el comportamiento a la fatiga, como se explica en el análisis de resultados correspondiente.

Llama la atención como el comportamiento de las mezclas en condiciones óptimas fue muy similar, pero al final del procedimiento de daño en agua tiene una variación significativa, teniendo los peores comportamientos las plantas E y D.

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 las plantas con mayores afectaciones en esta prueba son la E, B y D.

CAPÍTULO 6.- RECOMENDACIONES

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

2.- El porcentaje de saturación en las briquetas es de gran importancia para que se dé el daño por agua. Para una extensión de esta investigación se recomienda en lo posible mantener porcentajes de saturación más próximos, 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 y confiables.

3.- Valorar y repetir en algunas plantas el procedimiento del TSR (ASTM 4867) para investigar lo que ha sucedido en este trabajo y contrastar estos resultados.

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

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

Barros, C. (29 de Abril de 2012). *Diario El Universo*. Obtenido de <http://www.eluniverso.com/2012/04/29/1/1445/conductores-quejan-baches-puentes-guayaquil.html>

Carrasco Flores, D. O. (2004). Estudio comparativo entre mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas con emulsiones tibias . Piura, Perú: Universidad de Piura.

Fromm, H. (1974). *The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surfaces*. Research and Development Division, Ontario Ministry of Transportation and Communications.

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.

Gutiérrez, A., & Ramírez, 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%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>

Hicks, R. (1991). *Moisture Damage in Asphalt Concrete*. Washington: Transportaton Research Board.

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.

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.

Morocho, D. (2014). Trabajo de Titulación. *Aplicación de pruebas de desempeño a mezclas asfálticas producidas en diferentes Plantas de la Región Sierra*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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.

- Parrales, R. (2013). Trabajo de Grado. *Consideraciones para el Empleo de Pruebas Reológicas en el Control de Calidad de Mezclas Asfálticas*. Guayaquil, 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.
- Vila, R., & García, G. (2016). *Resistencia de las mezclas asfálticas calientes producidas en el Ecuador ante la acción del agua*. Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

ANEXOS

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

PLANTA A						
7% DE VACIOS			# DE GOLPES=	40	GOLPES	
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1125	615	1128	513,1	2193	7,17
2	1085	598	1088	490,1	2214	6,26
3	1118	607	1121	514	2175	7,91
4	1146	622	1149	527	2175	7,94
5	1137	617	1140	523	2174	7,96
6	1077	590	1080	490,4	2197	6,99
7	1029	564	1032	468	2199	6,91
8	1070	588	1073	485	2206	6,60
9	1123	609	1126	517	2172	8,04
10	1124	615	1127	511,7	2196	7,03
11	1082	593	1085	491,5	2200	6,84
12	1081	588	1084	496,2	2179	7,75
13	1062	581	1065	484,2	2194	7,12
14	1134	618	1137	519	2185	7,49
15	1094	594	1097	503	2175	7,92
16	1021	552	1024	472	2163	8,42
17	1116	612	1119	507	2201	6,81
18	1160	633	1163	530	2189	7,34
19	1102	606	1105	499	2208	6,50
20	1060	579	1063	484	2190	7,28
21	1026	562	1029	467	2197	6,99
22	1124	618	1127	509	2208	6,51
23	1041	568	1044	476	2187	7,41
24	1052	572	1055	483	2178	7,79
25	1082	591	1085	494,2	2190	7,29

4% DE VACIOS			# DE GOLPES=	75	GOLPES	
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1084	609	1087	478	2268	3,99
2	1093	614	1096	482	2268	4,00
3	1100	618	1103	485	2268	3,98
4	1010	567	1013	446	2265	4,12
5	1000	560	1003	443	2257	4,43

PLANTA B						
7% DE VACIOS				# DE GOLPES=	35	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1157	661	1159	498	2324	6,59
2	1222	696	1224	528	2314	7,01
3	1245	714	1247	533	2336	6,12
4	1172	670	1175	505	2321	6,72
5	1128	642	1131	489	2307	7,29
6	1236	705	1239	534	2315	6,96
7	1175	672	1178	506	2322	6,67
8	1122	638	1124	486	2309	7,21
9	1230	705	1232	527	2334	6,19
10	1159	662	1163	501	2313	7,02
11	1151	657	1154	497	2316	6,92
12	1161	662	1164	502	2313	7,04
13	1108	630	1109	479	2313	7,05
14	1228	700	1231	531	2313	7,05
15	1193	684	1195	511	2335	6,16
16	1213	693	1215	522	2324	6,60
17	1178	669	1179	510	2310	7,17
18	1127	637	1129	491,8	2291	7,91
19	1204	685	1209	524	2298	6,40
20	1178	665	1181	516	2282	7,02
21	1100	619	1103	484	2273	7,41
22	1149	648	1153	505	2275	7,31
23	1181	669	1185	516	2289	6,76
24	1188	673	1192	519	2289	6,75
25	1166	659	1169	510	2286	6,86
26	1206	681	1209	528	2284	6,95
27	1196	674	1198	524	2283	7,01
28	1189	671	1191	520	2287	6,84
4% DE VACIOS				# DE GOLPES=	75	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1218	710	1218	508	2398	3,63
2	1247	726	1248	522	2389	3,98
3	1253	729	1254	525	2387	4,07
4	1195	694	1196	502	2380	4,32
5	1242	722	1243	521	2384	4,19

PLANTA C						
7% DE VACIOS				# DE GOLPES=	40	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1165	679	1166	487	2392	6,85
2	1144	664	1145	481	2378	7,38
3	1167	678	1168	490	2382	7,26
4	1211	702	1213	511	2370	7,70
5	1248	721	1249	528	2364	7,96
6	1159	678	1161	483	2400	6,56
7	1280	751	1282	531	2411	6,13
8	1281	746	1282	536	2390	6,93
9	1217	708	1217	509	2390	6,92
10	1161	673	1163	490	2369	7,73
11	1244	724	1244	520	2392	6,86
12	1242	720	1243	522,7	2376	7,49
13	1236	715	1238	523	2363	7,97
14	1194	690	1195	505	2364	7,93
15	1247	722	1248	526	2371	7,68
16	1158	680	1159	479	2418	5,86
17	1247	720	1248	528	2362	8,03
18	1188	695	1189	494	2405	6,35
19	1234	723	1235	512	2410	6,15
20	1148	664	1150	485,8	2363	7,99
21	1279	744	1281	537	2382	7,25
22	1301	755	1302	547	2378	7,40
23	1242	720	1243	523	2375	7,51
24	1243	719	1245	526	2363	7,98
25	1188	688	1190	502	2367	7,85
26	1251	728	1252	524	2387	7,03
27	1249	726	1250	524	2384	7,18
28	1222	705	1222	517	2364	7,96
29	1220	707	1220	513	2378	7,39
30	1237	715	1237	522	2370	7,72

4% DE VACIOS				# DE GOLPES=	75	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1271	760	1272	512	2482	3,33
2	1260	752	1260	508	2480	3,41
3	1306	777	1306	529	2469	3,86
4	1300	770	1302	532	2444	4,84
5	1270	753	1272	519	2447	4,71

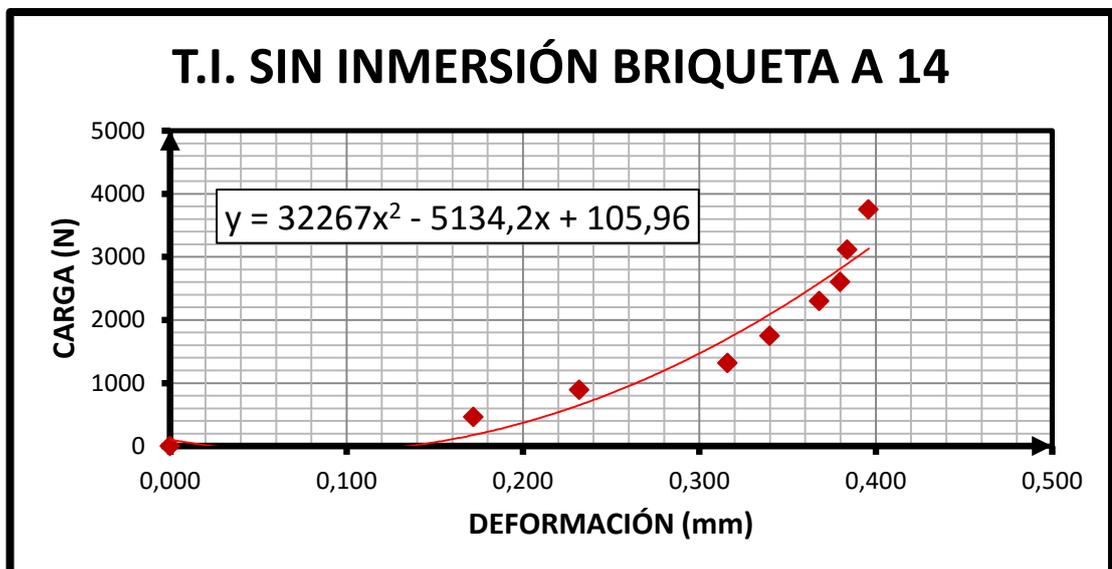
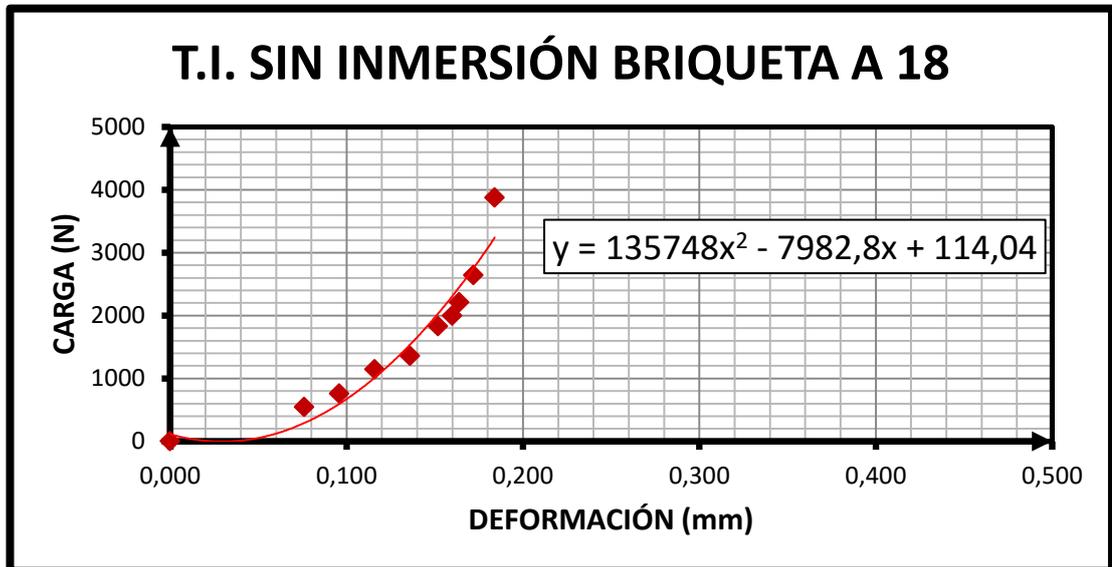
PLANTA D						
7% DE VACIOS				# DE GOLPES=	40	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1088	558	1092	534	2037	6,50
2	1095	563	1104	541	2024	7,10
3	1074	545	1077	532	2019	7,35
4	1075	551	1079	528	2036	6,56
5	1070	548	1075	527	2030	6,82
6	1074	552	1077	525	2046	6,12
7	1058	535	1060	525,2	2015	7,53
8	1048	529	1052	523	2004	8,04
9	1088	558	1092	534	2037	6,50
10	1043	531	1047	516	2022	7,21
11	1049	533	1053	520	2017	7,42
12	1050	529	1052	523,1	2007	7,87
13	1070	550	1075	525	2038	6,47
14	1060	544	1064	520	2038	6,45
15	1077	553	1085	532	2025	7,08
16	1123	577	1128	551	2038	6,47
17	1066	538	1068	529,5	2012	7,65
18	1072	542	1077	535	2004	8,04
19	1067	547	1074	527	2024	7,12
20	1096	563	1101	538	2038	6,48
21	1103	560	1106	546	2020	7,29
22	1065	543	1071	528	2017	7,43
23	1107	561	1111	550	2013	7,63
24	1072	545	1078	533	2011	7,70
25	1080	546	1082	536	2015	7,53
26	1133	572	1134	562	2016	7,46

4% DE VACIOS				# DE GOLPES=	75	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1045	553	1050	497	2103	3,51
2	1060	562	1067	505	2099	3,67
3	1068	570	1078	508	2102	3,52
4	1075	572	1083	511	2104	3,45
5	1085	576	1092	516	2103	3,50

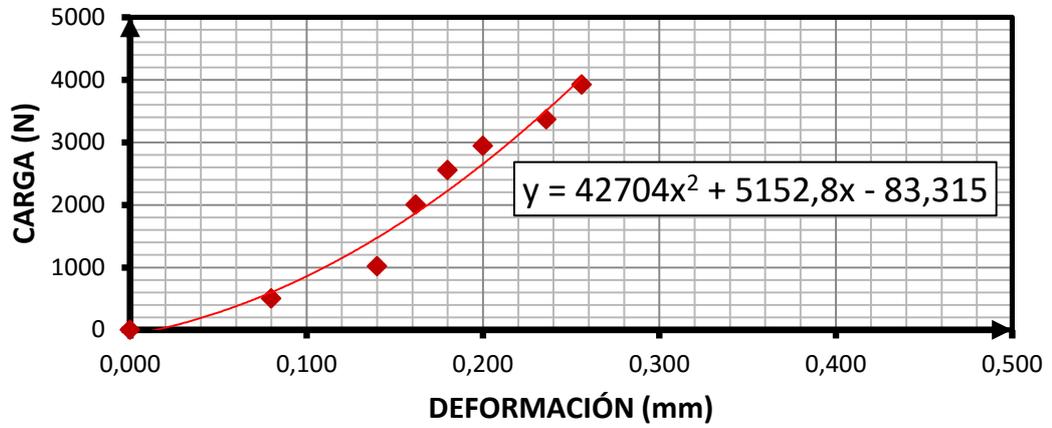
PLANTA E						
7% DE VACIOS				# DE GOLPES=	35	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1174	652,7	1176	523,3	2243	6,52
2	1161	647,1	1163	515,4	2252	6,18
3	1067	595,4	1069	473,8	2252	6,15
4	1086	600,9	1088	487,5	2229	7,15
5	1092	603,9	1094	490,2	2228	7,17
6	1015	558,8	1017	458,2	2215	7,70
7	1008	555,3	1010	455	2216	7,66
8	1045	575,1	1047	471,4	2216	7,68
9	1111	611,3	1113	501,8	2214	7,74
10	1065	584,9	1067	482,1	2209	7,95
11	1102	606,1	1104	497,6	2214	7,75
12	1071	588,1	1073	484,9	2209	7,97
13	1059	581,6	1061	479,4	2209	7,96
14	1099	603,4	1101	497,6	2209	7,97
15	1100	603,8	1102	498,2	2208	8,00
16	1044	573,5	1046	472,5	2210	7,94
17	1097	602,3	1099	496,7	2209	7,98
18	1029	565,4	1031	465,6	2210	7,91
19	1087	602,9	1089	486,3	2236	6,85
20	1152	634,8	1154	519,3	2219	7,56
21	945	526,9	947	420,4	2249	6,31
22	1110	609,6	1112	502,4	2209	7,94
23	1078	592	1080	488	2209	7,96
24	1053	578,5	1055	476,5	2210	7,92
25	1105	606,6	1107	500,4	2208	7,99

4% DE VACIOS				# DE GOLPES=	75	GOLPES
N°	PESO AIRE	PESO AGUA	SSS	VOLUMEN	DENSIDAD	% DE VACIOS
1	1175	665,0	1177	512	2295	4,38
2	1177	668,0	1179	511	2303	4,03
3	1182	670,0	1184	514	2300	4,18
4	1180	671,0	1182	511	2309	3,78
5	1181	669,0	1183	514	2298	4,26

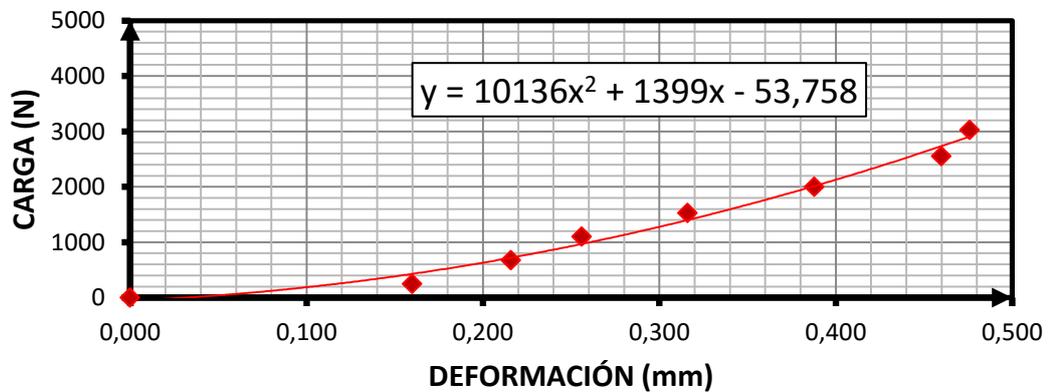
Anexo 2. Figuras con la relación carga vs deformación en la condición sin inmersión en agua para todas las briquetas ensayadas por tracción indirecta



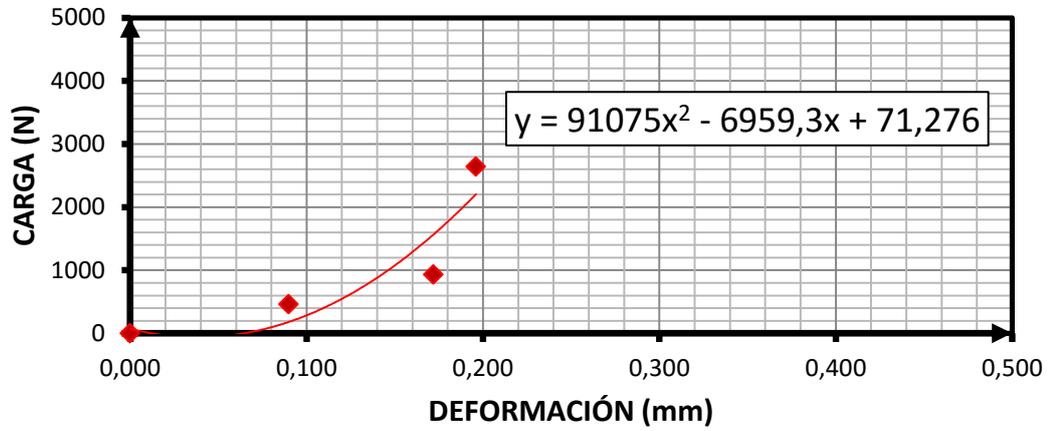
T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA A 17



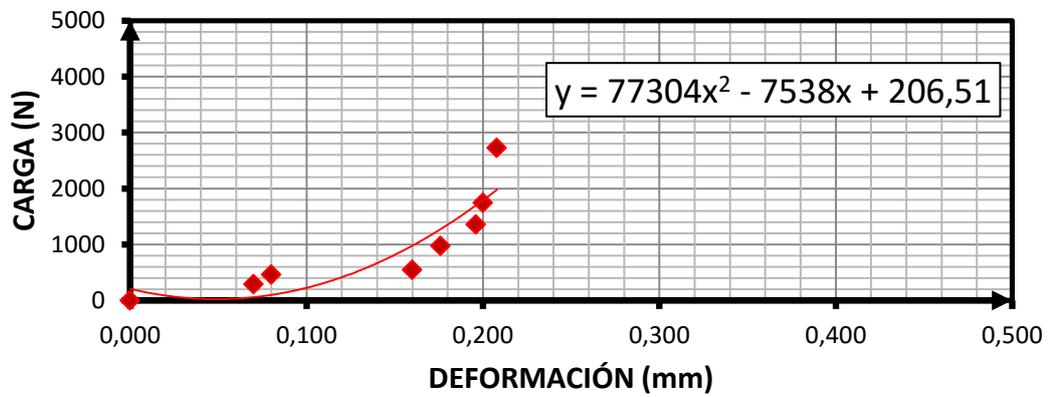
T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA B 7



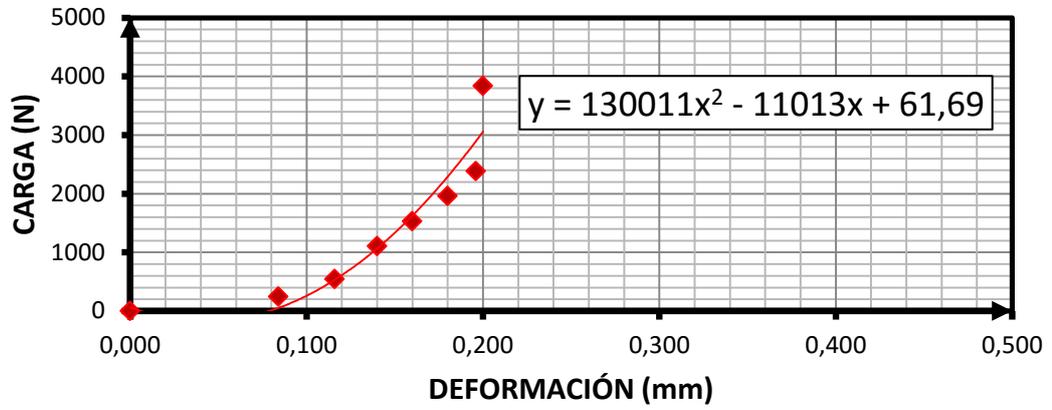
T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA B 5



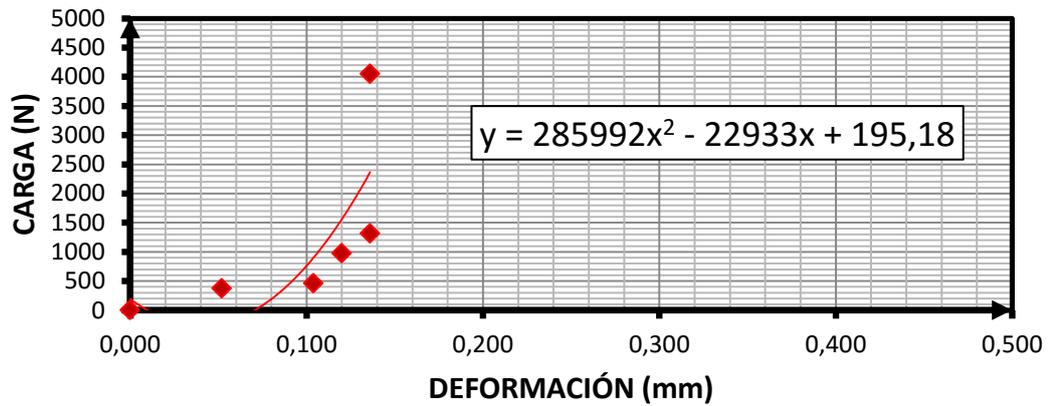
T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA B 8

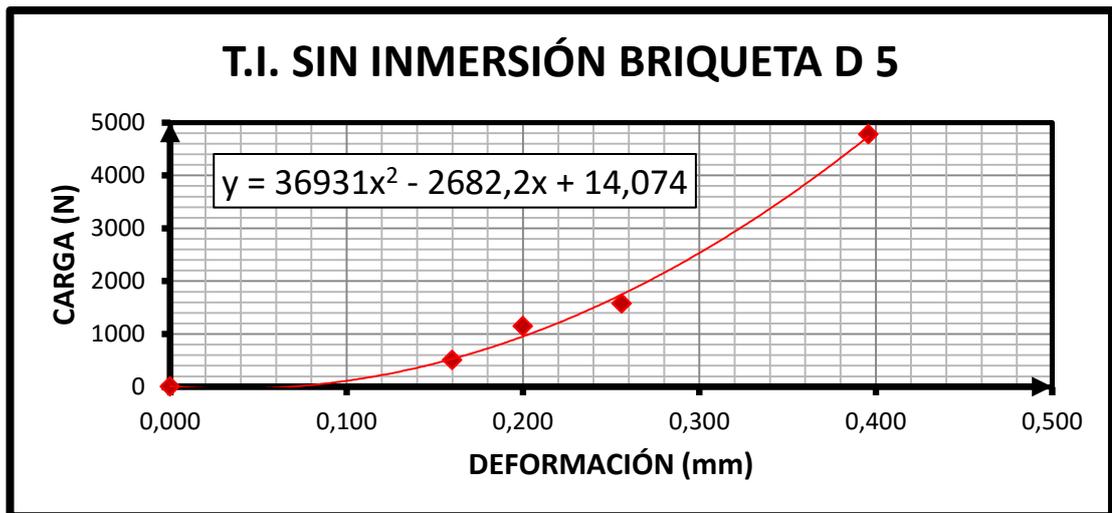
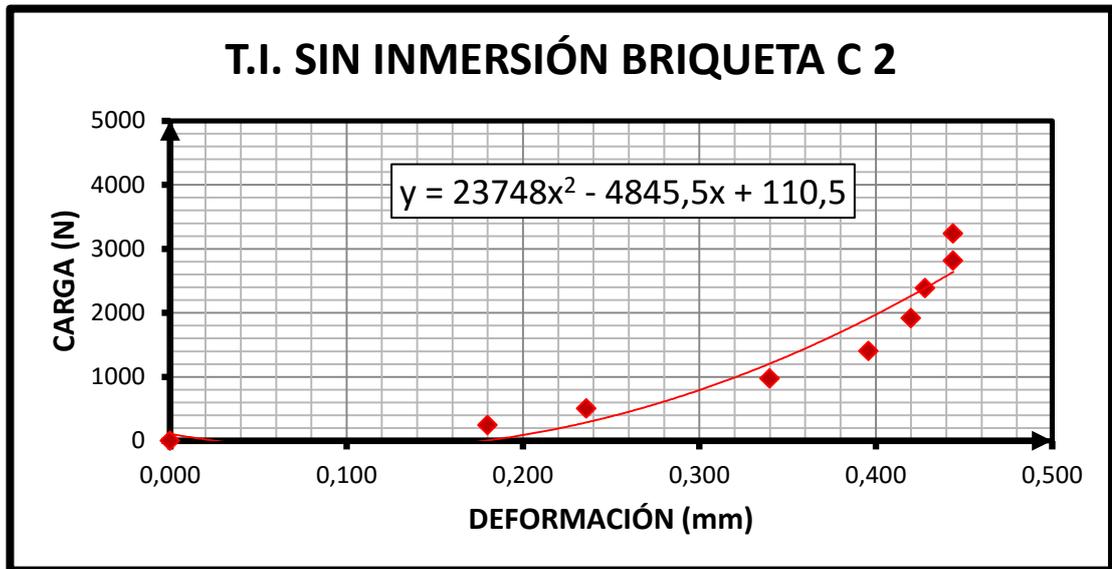


T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA C 3

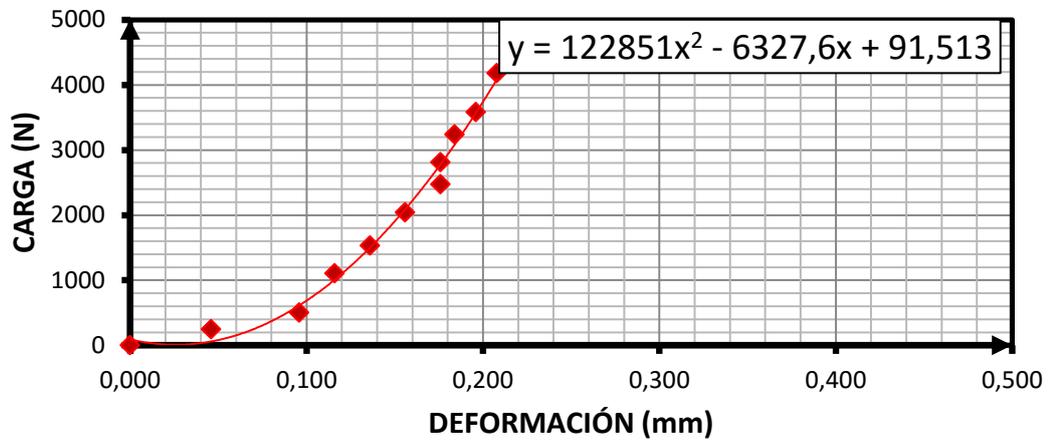


T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA C 1

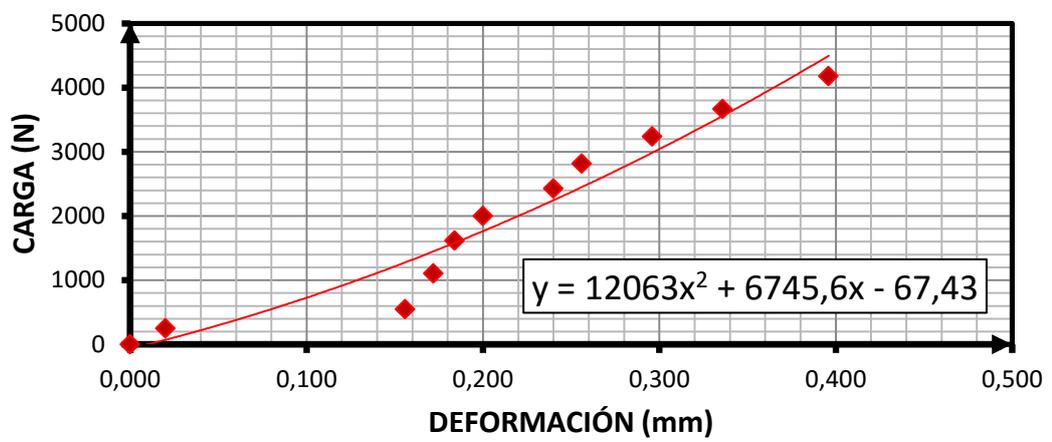




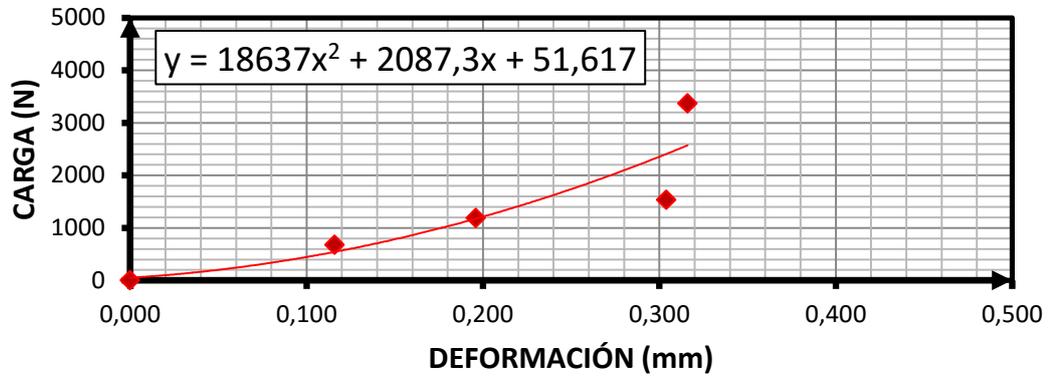
T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA D 3



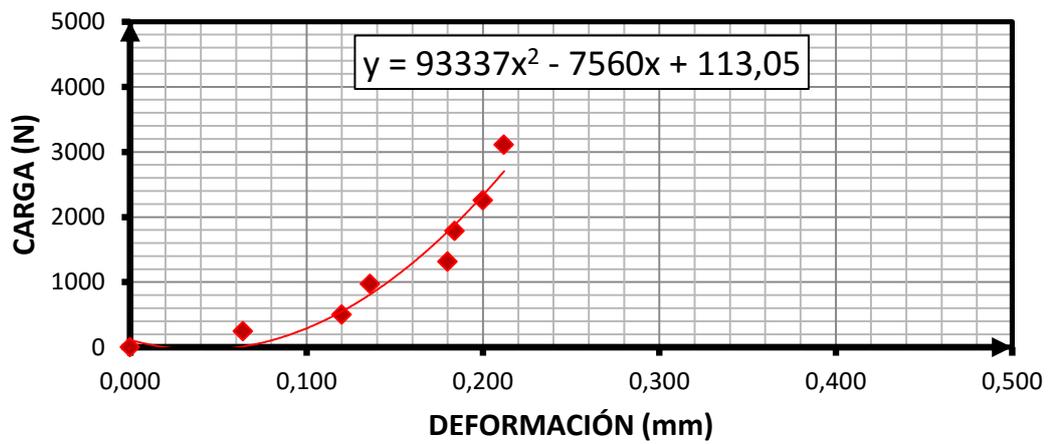
T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA D 22



T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA E 21

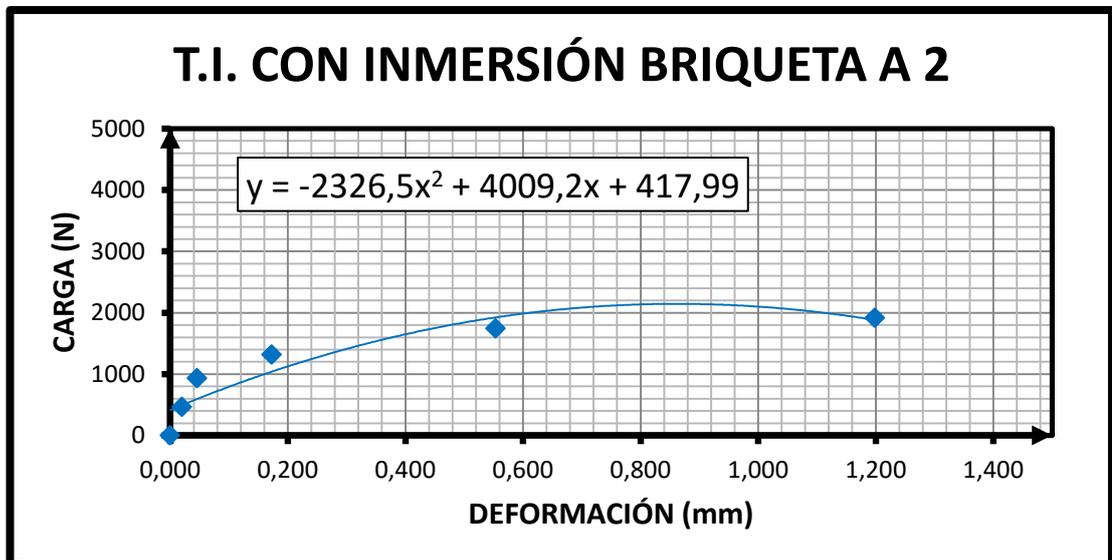


T.I. SIN INMERSIÓN BRIQUETA E 9

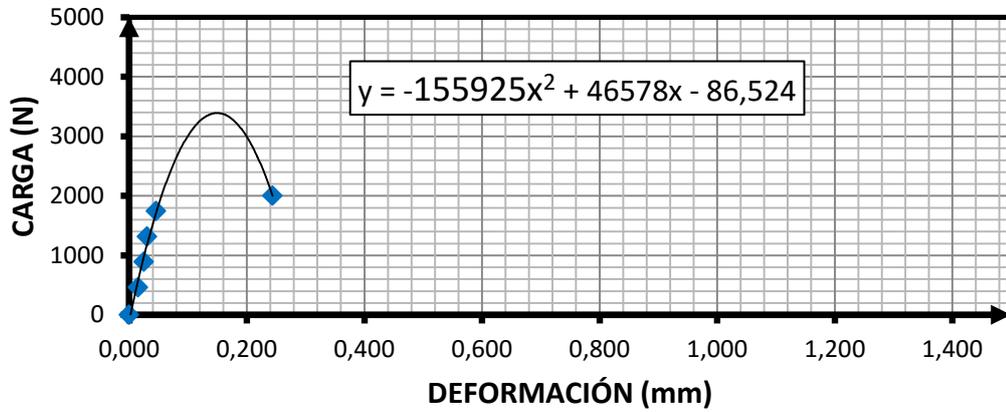




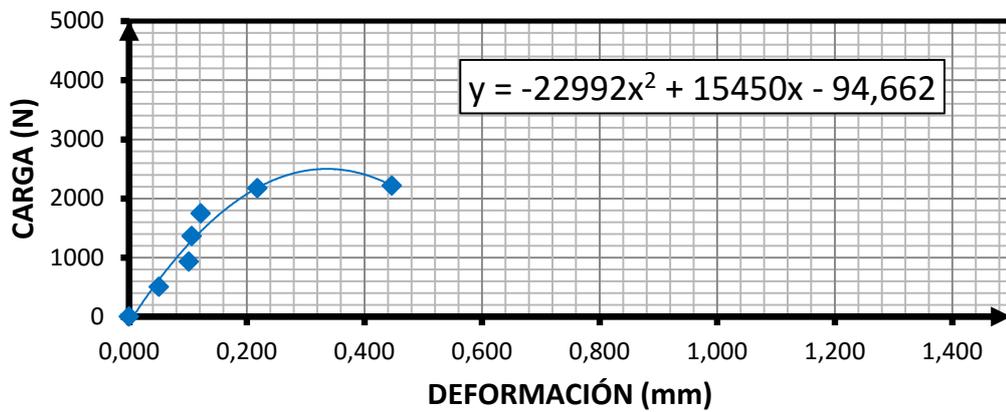
Anexo 3. Figuras con la relación carga vs deformación en la condición con inmersión en agua para todas las briquetas ensayadas por tracción indirecta



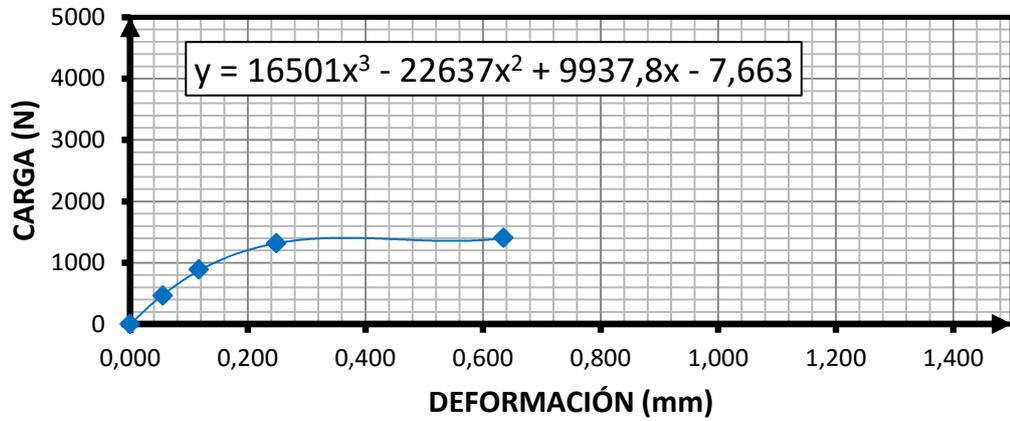
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA A 6



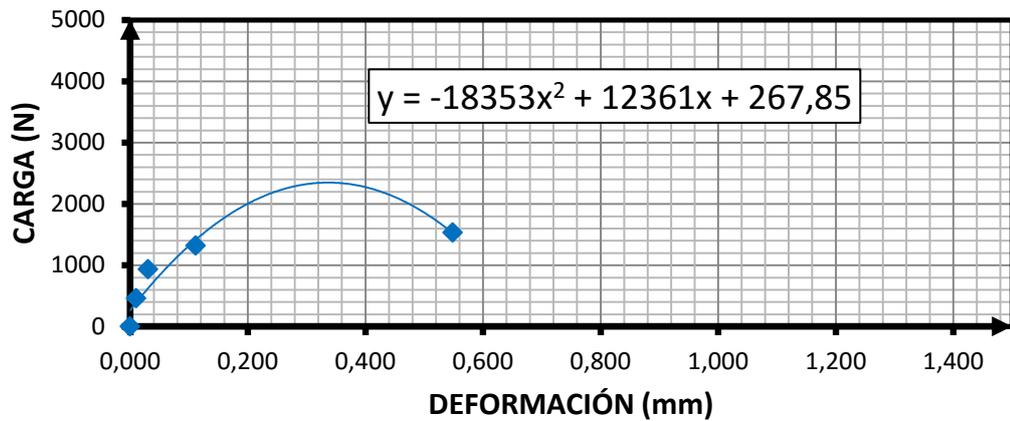
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA A 11



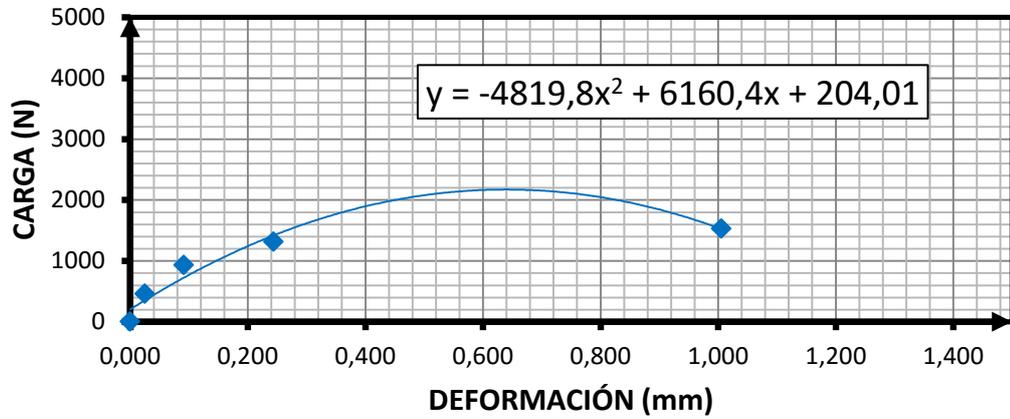
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA B1



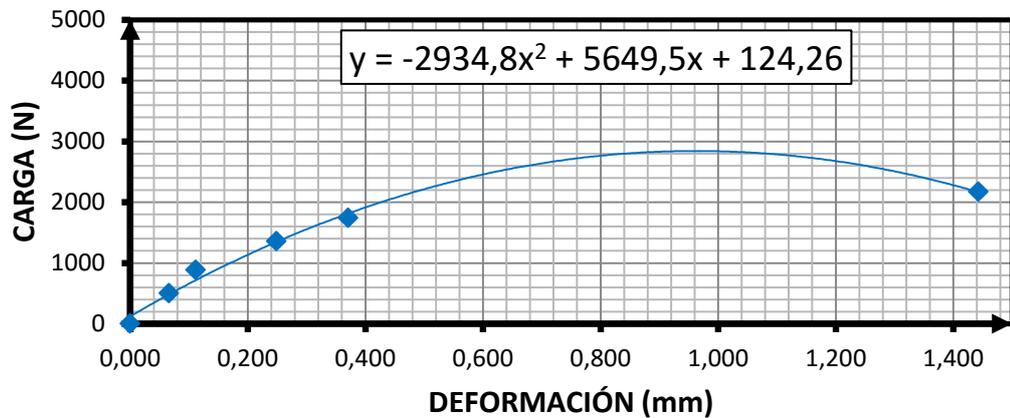
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA B2



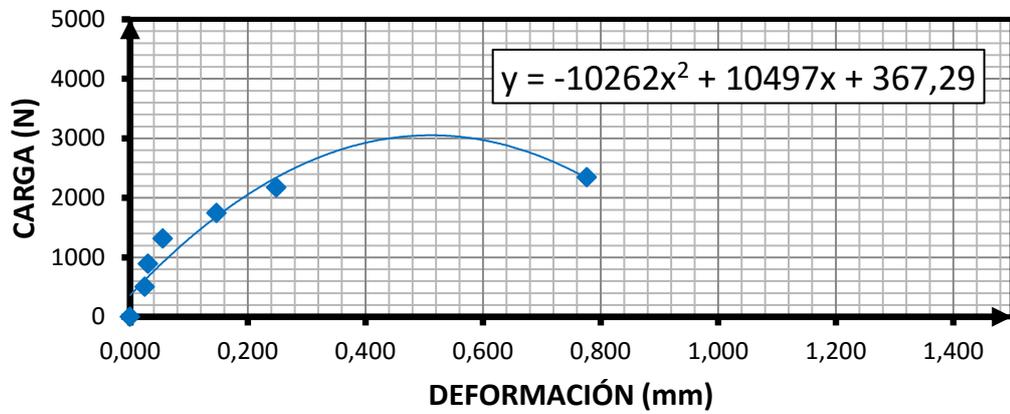
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA B6



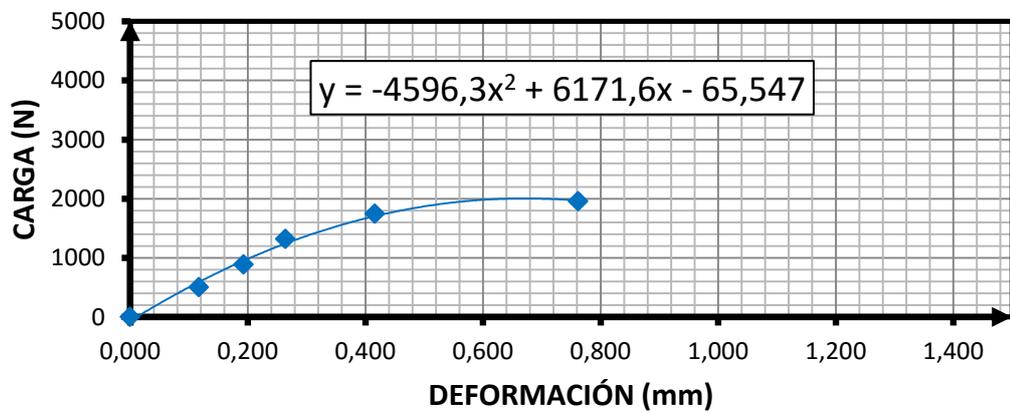
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA C 4



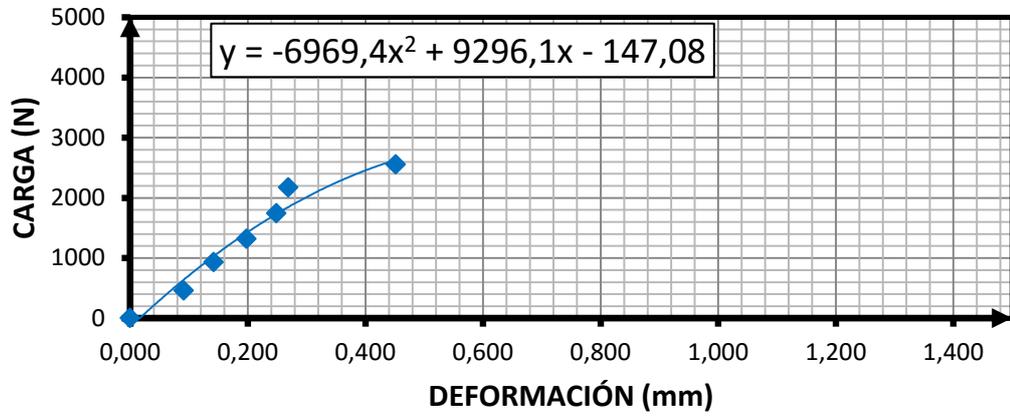
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA C 10



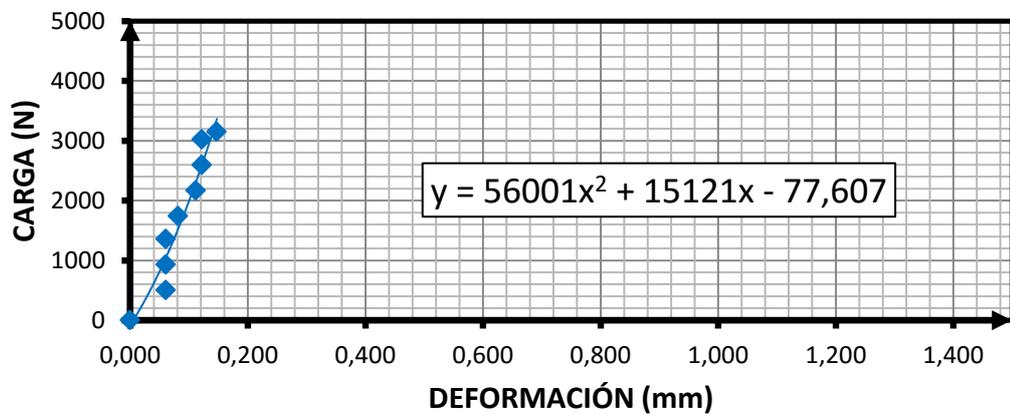
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA C 21



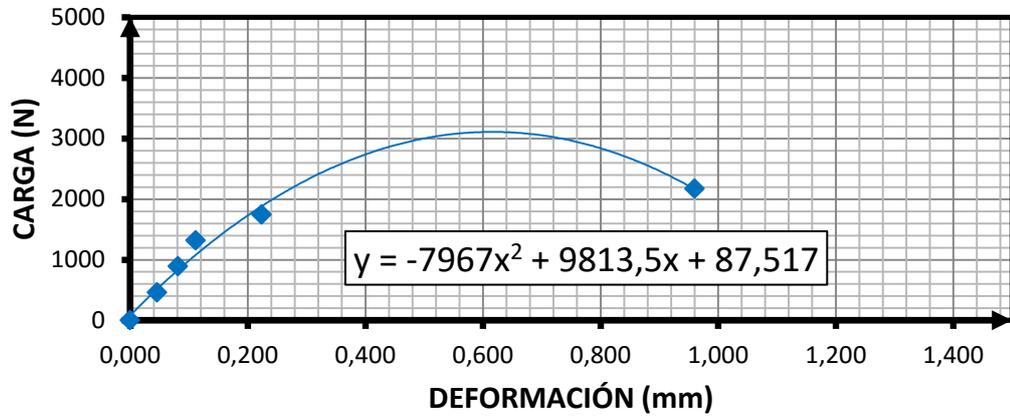
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA D 10



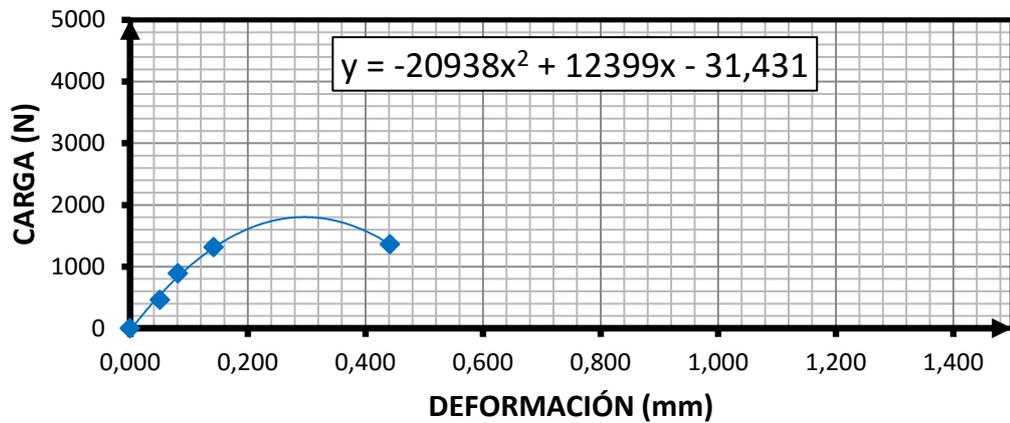
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA D 15



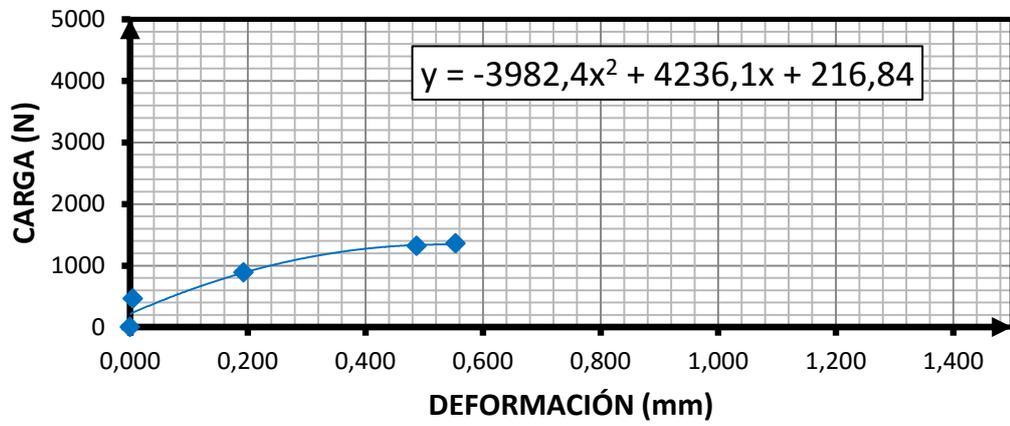
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA D 25



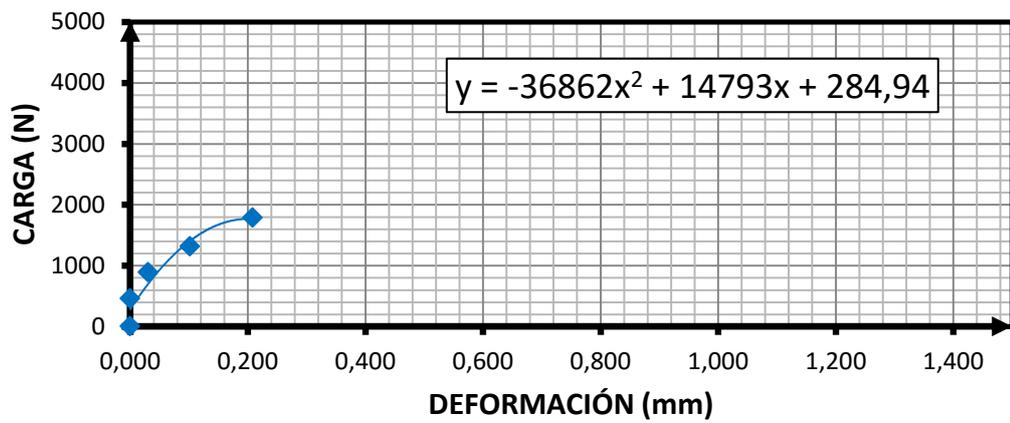
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA E 6



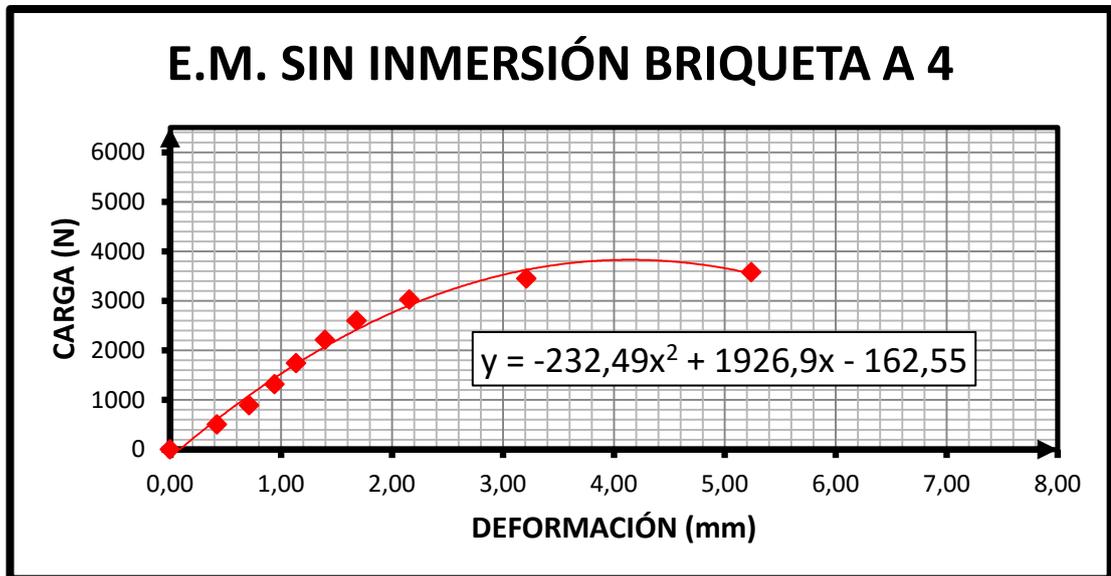
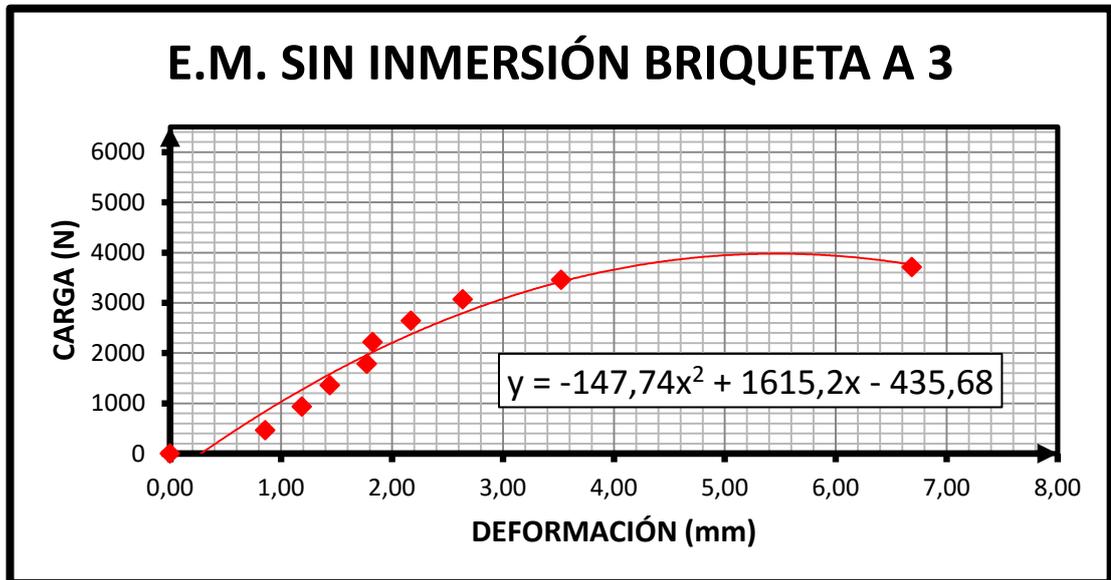
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA E 7



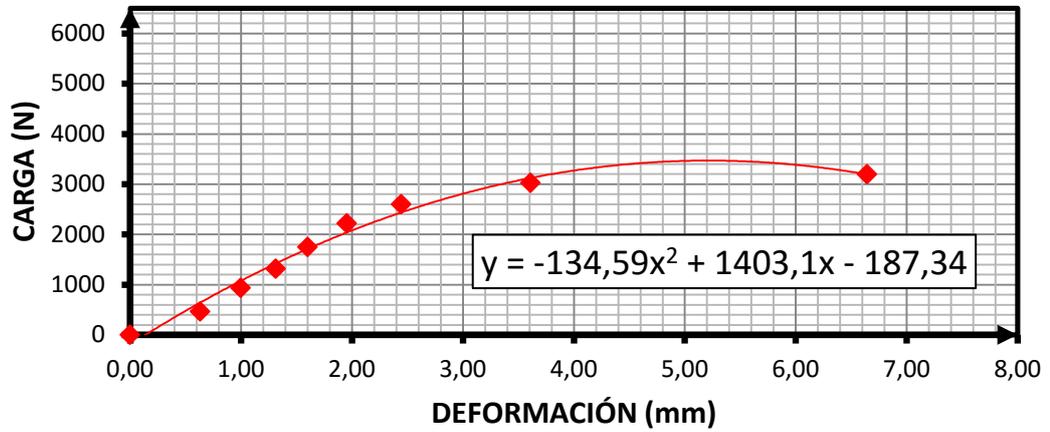
T.I. CON INMERSIÓN BRIQUETA E 19



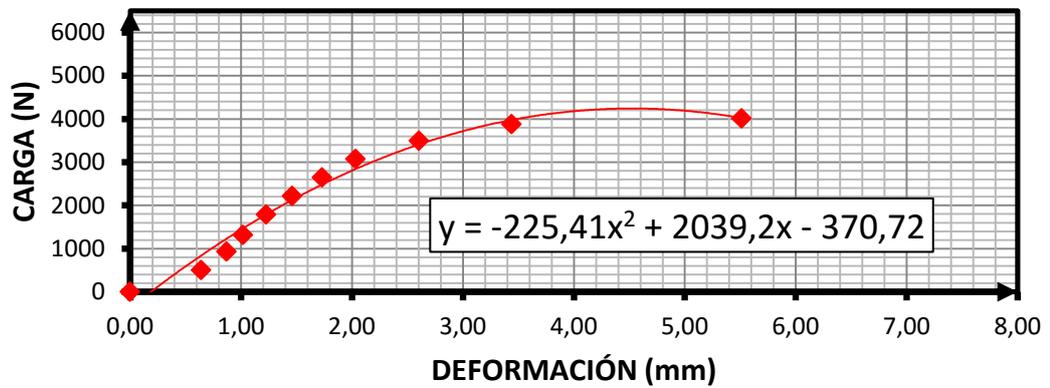
Anexo 4. Figuras con la relación carga vs deformación en la condición sin inmersión en agua para todas las briquetas ensayadas por estabilidad Marshall



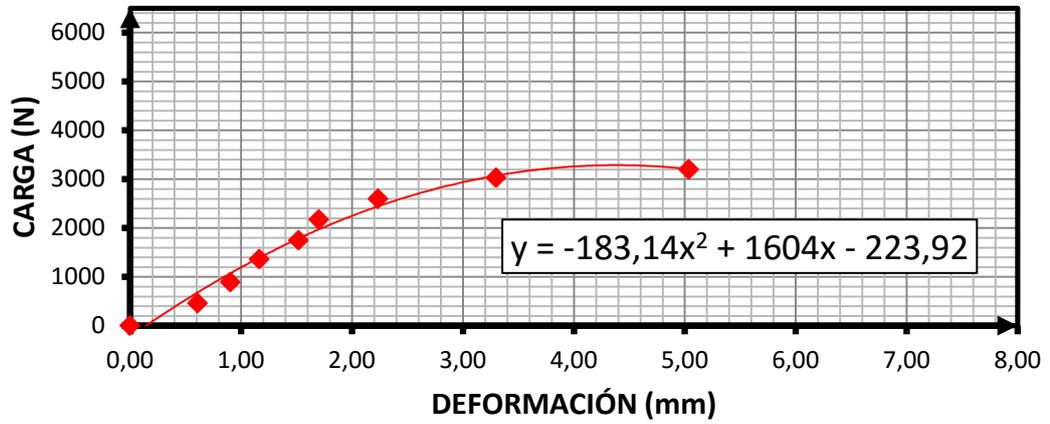
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA A 5



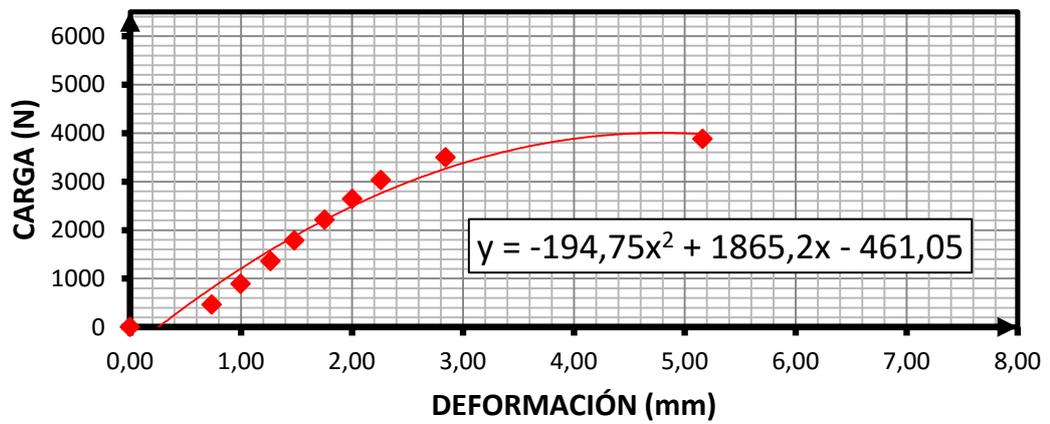
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA B 19



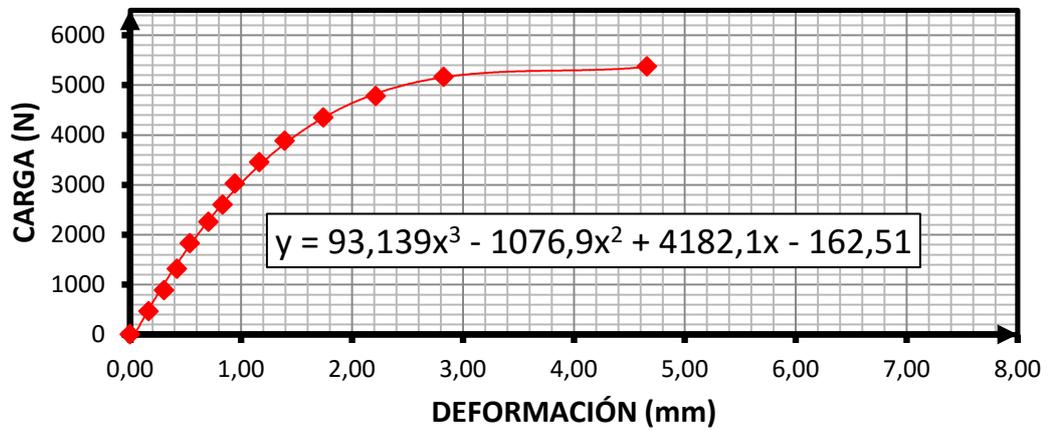
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA B 25



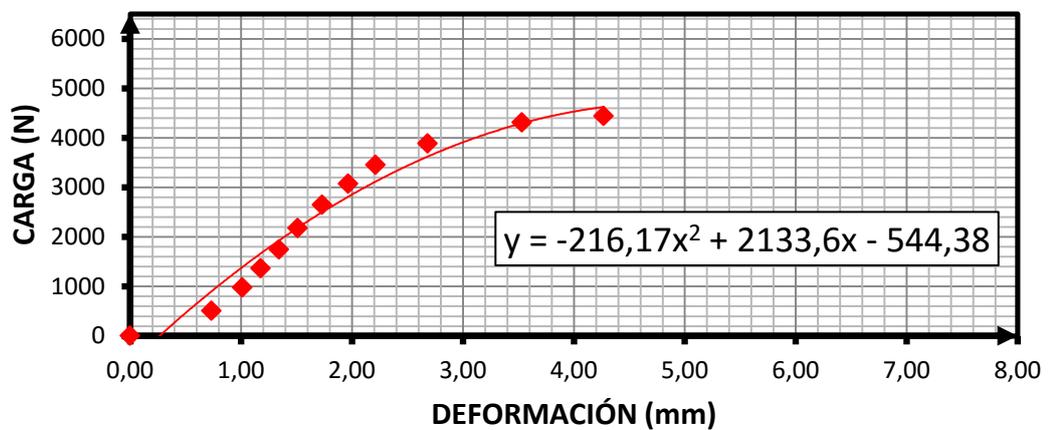
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA B 26



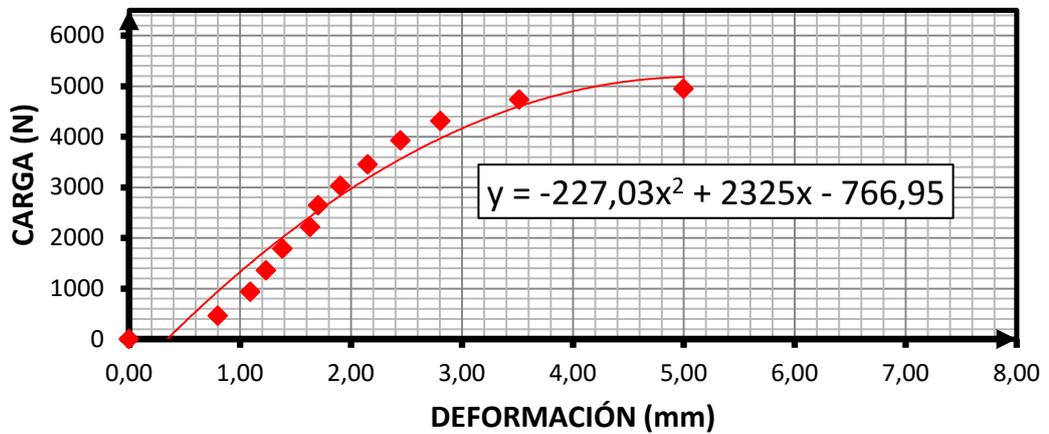
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA C 15



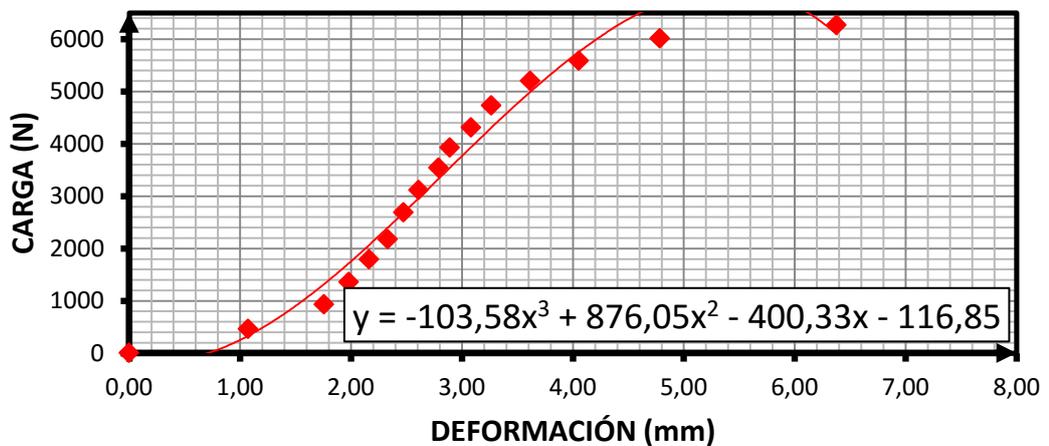
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA C 28



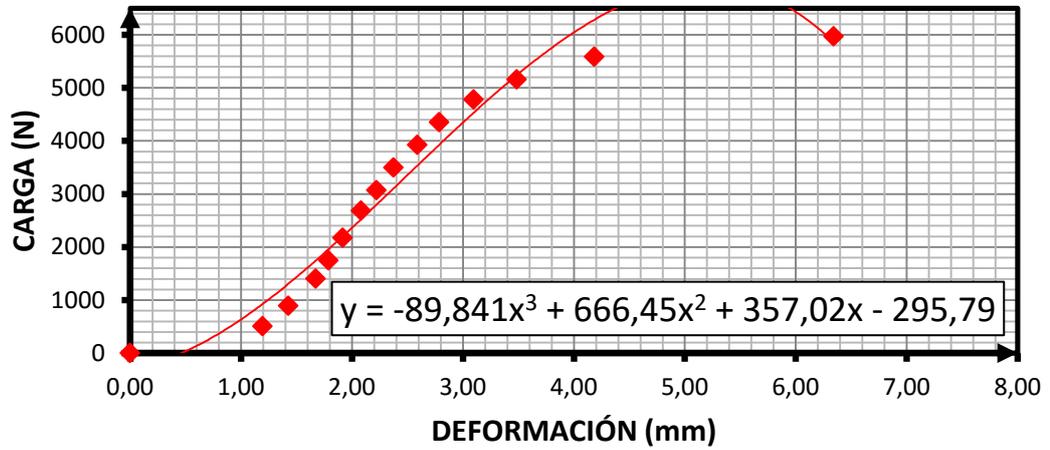
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA C 30



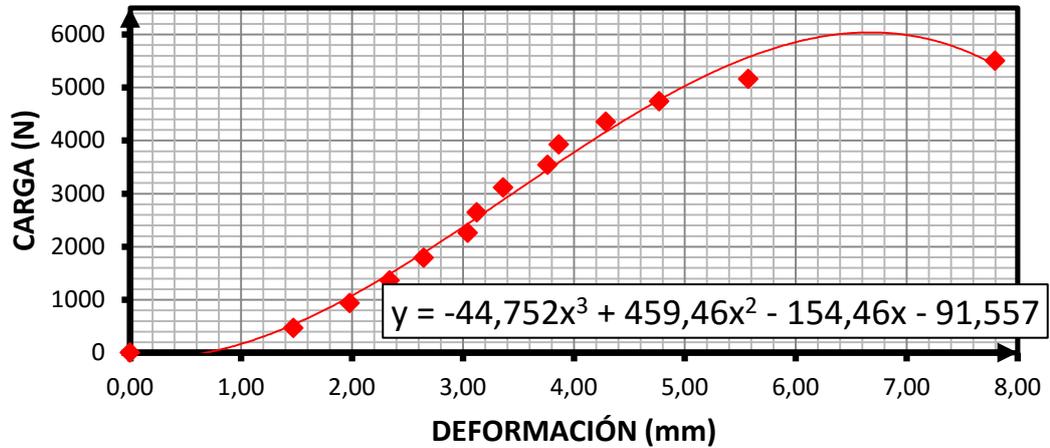
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA D 6



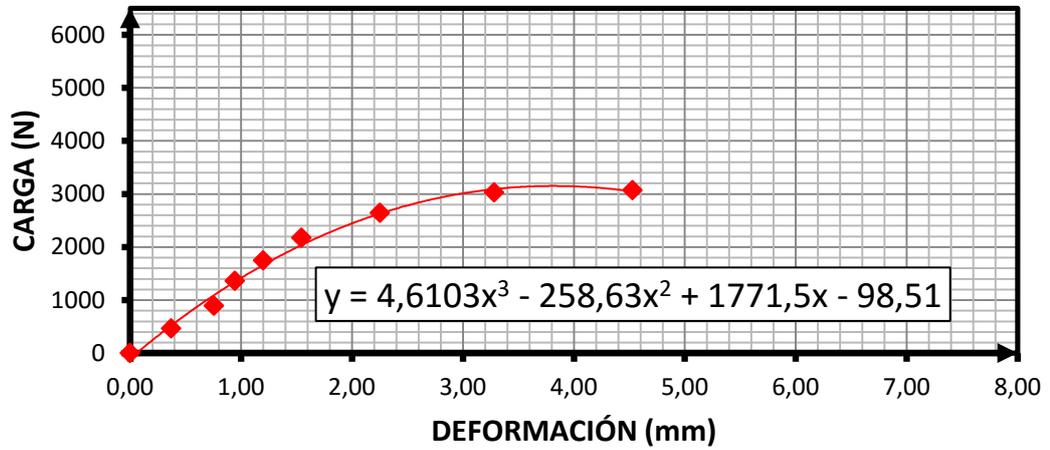
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA D 18



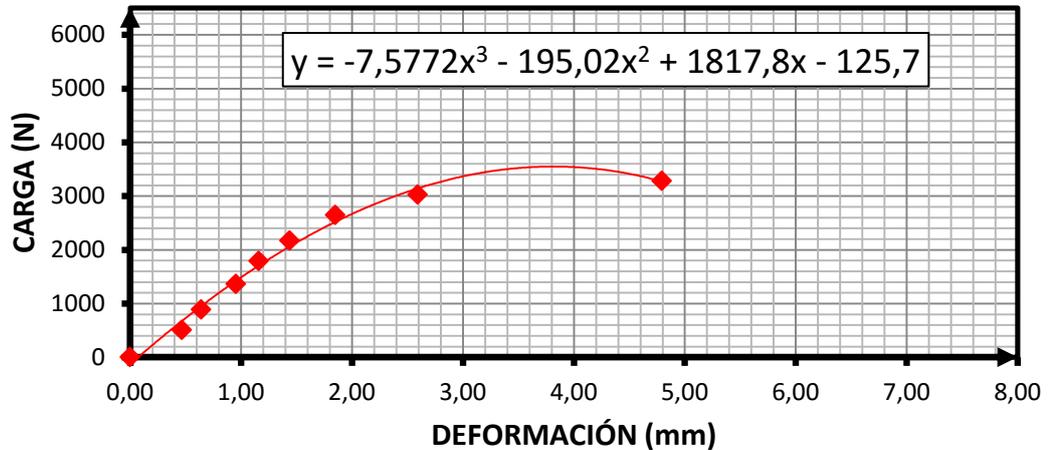
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA D 24



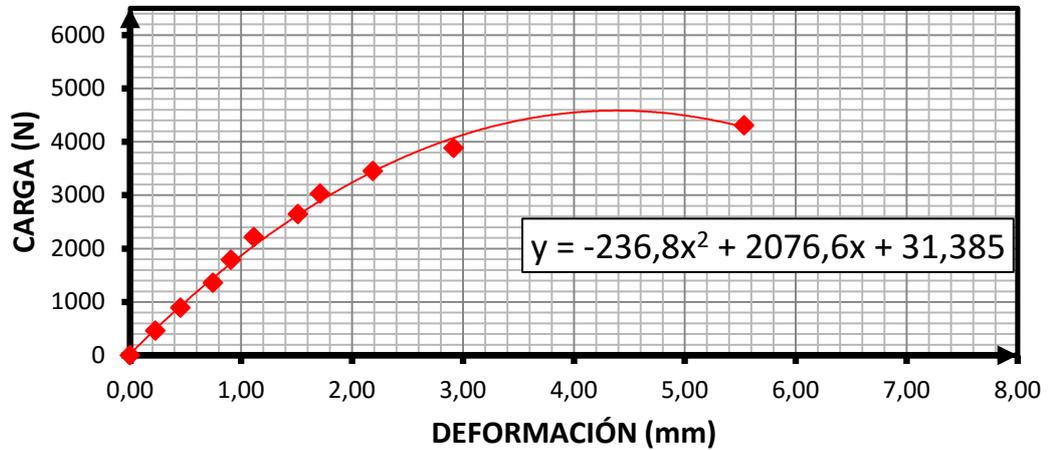
E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA E 16



E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA E 13

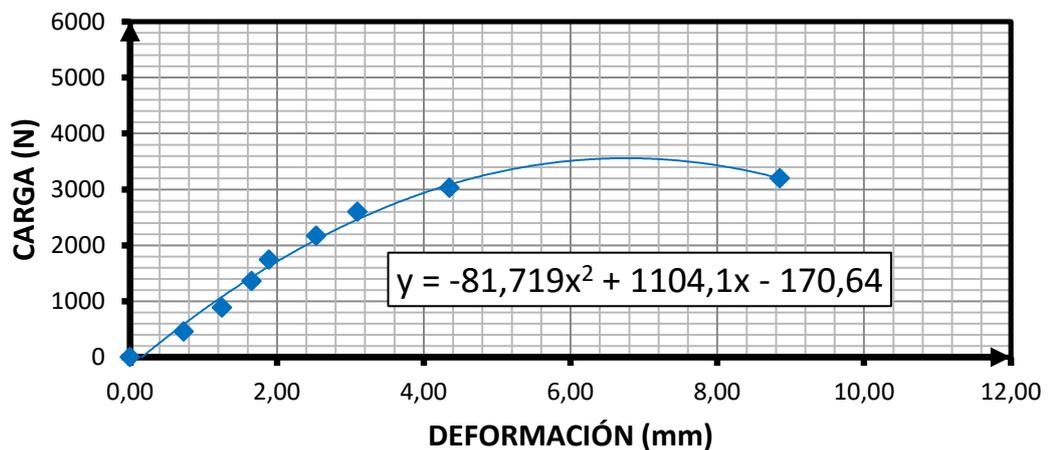


E.M. SIN INMERSIÓN BRIQUETA E 14

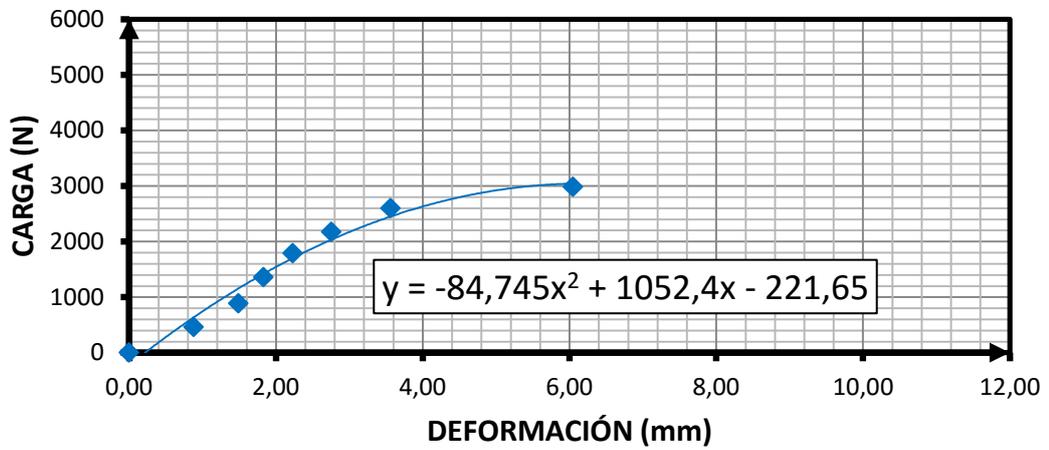


Anexo 5. Figuras con la relación carga vs deformación en la condición con inmersión en agua para todas las briquetas ensayadas por estabilidad Marshall

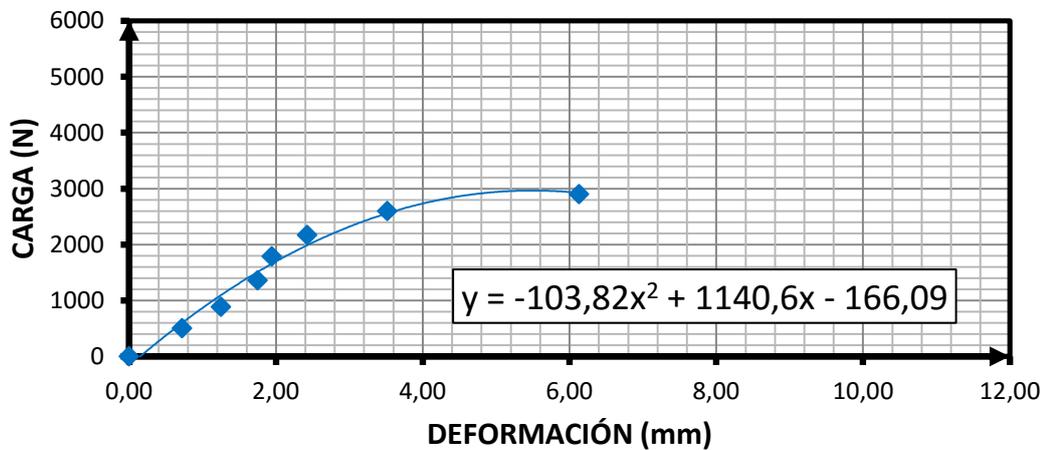
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA A 12



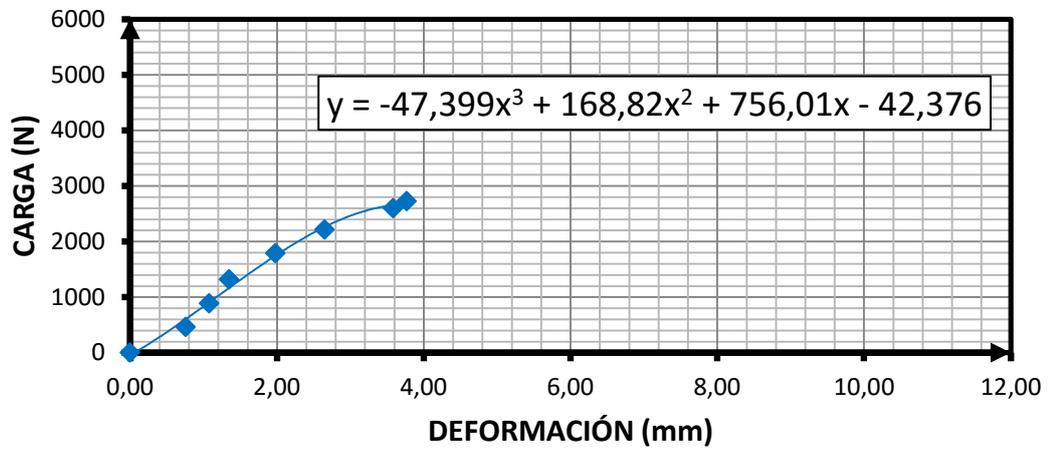
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA A 13



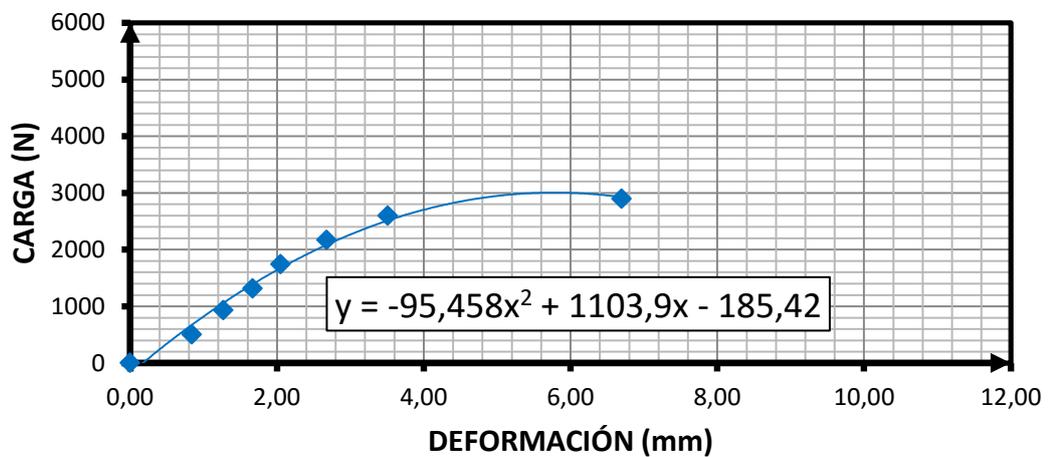
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA A 16



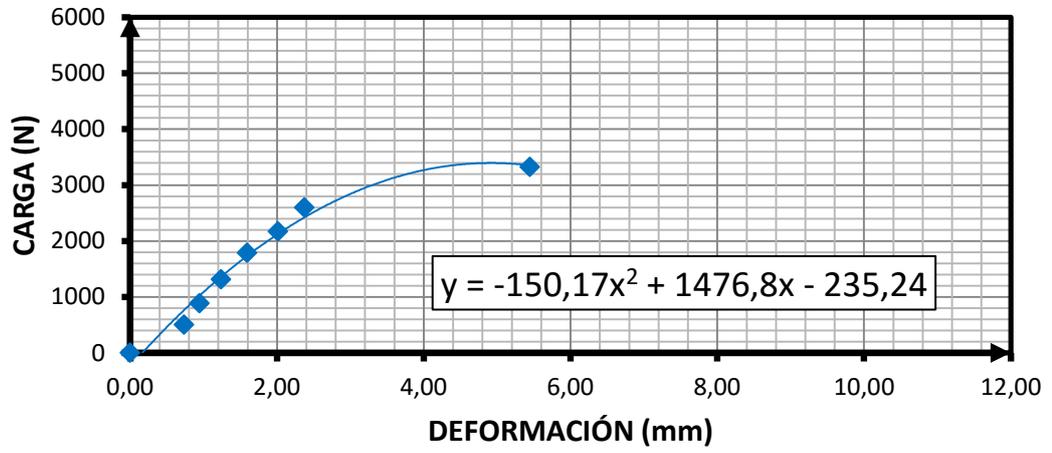
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA B 20



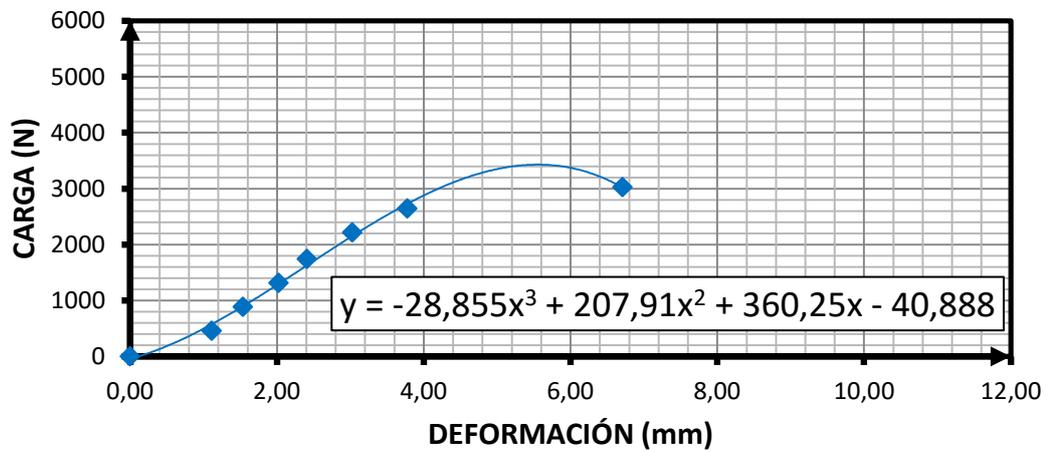
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA B 27



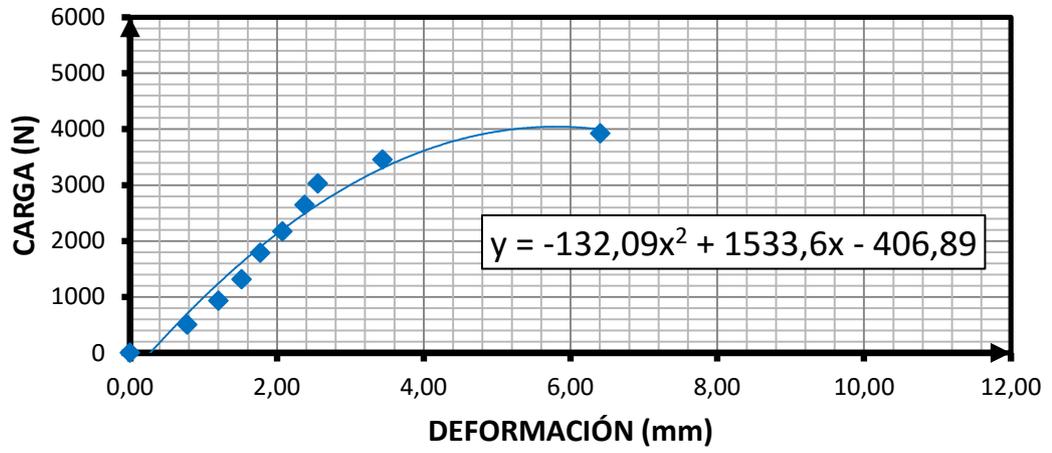
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA B 28



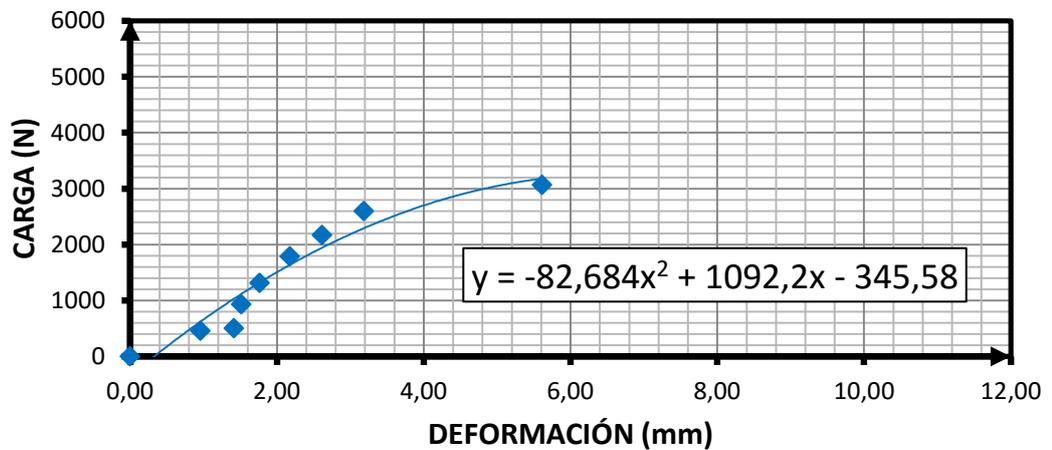
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA C 20



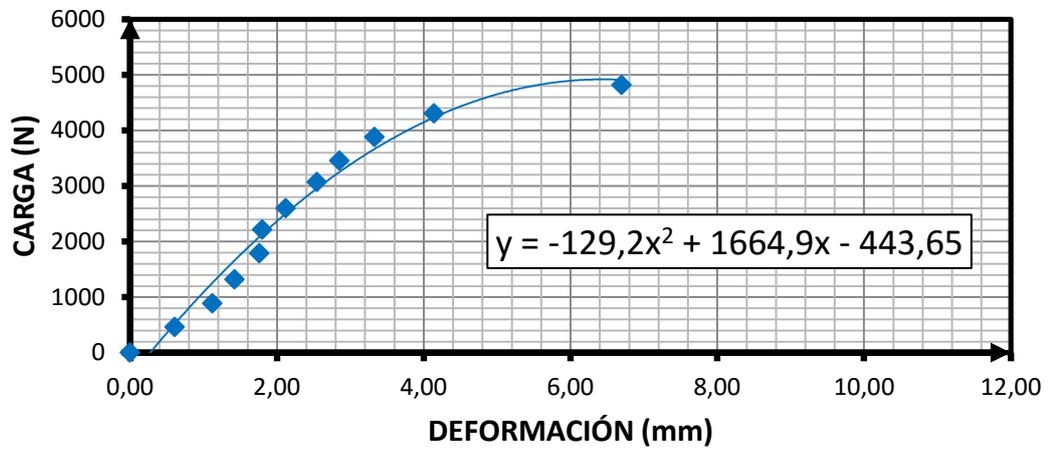
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA C 24



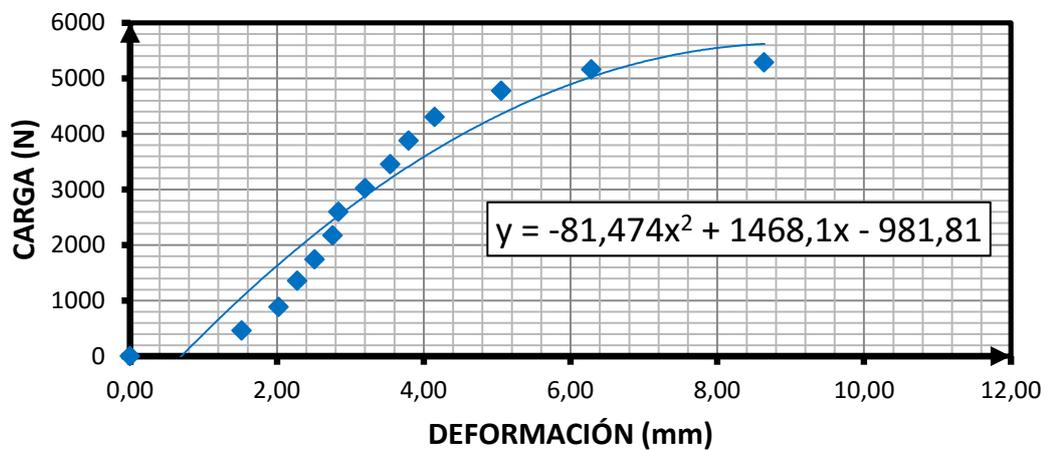
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA C 25



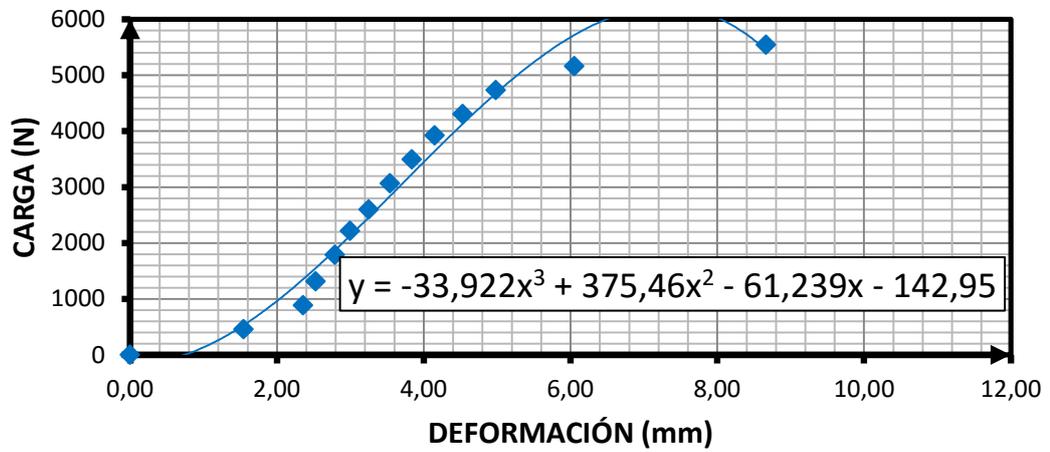
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA D 7



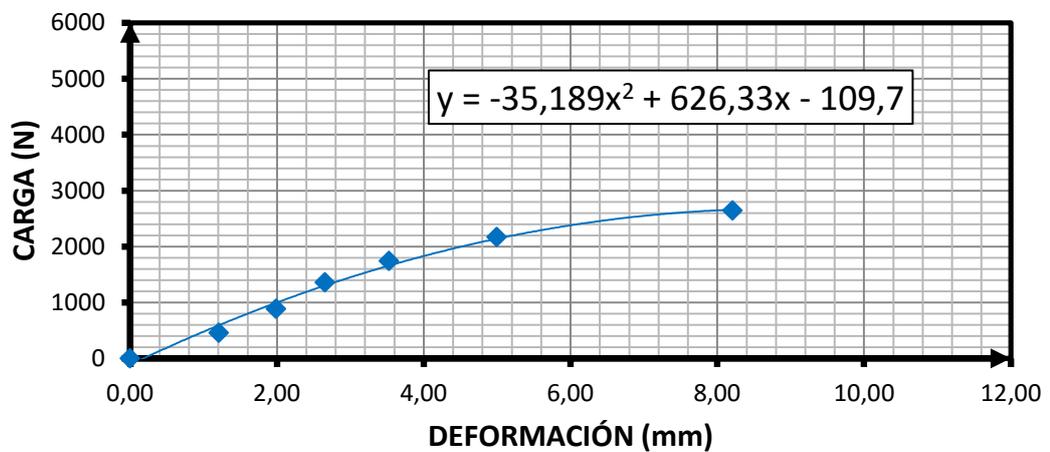
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA D 12



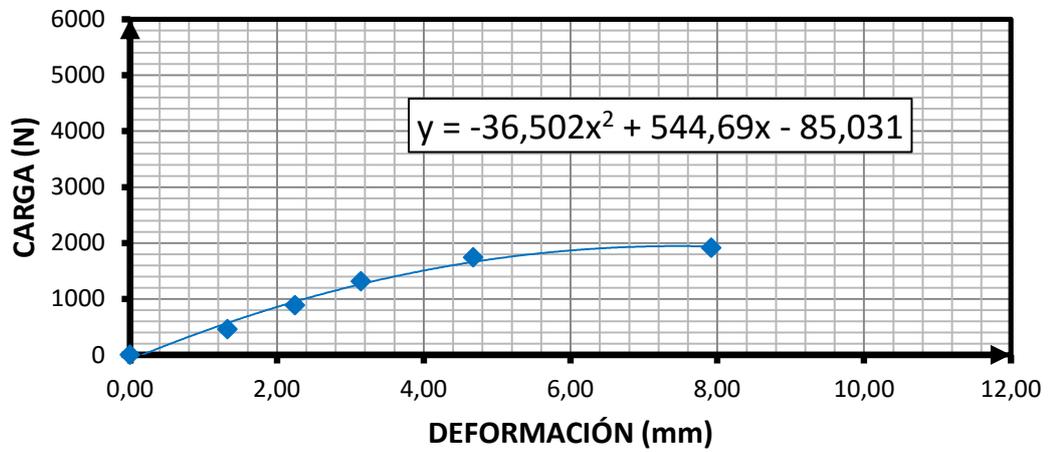
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA D 17



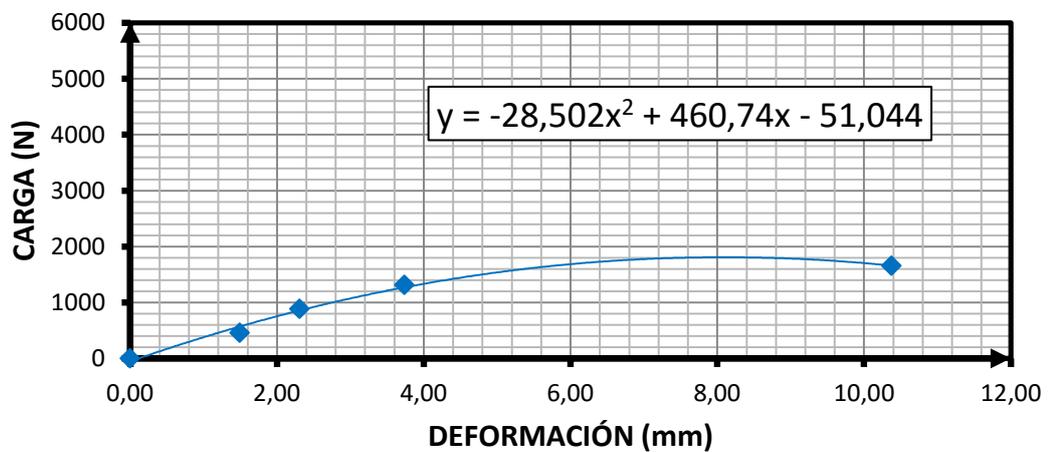
E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA E 23



E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA E 24



E.M. CON INMERSIÓN BRIQUETA E 25





**Presidencia
de la República
del Ecuador**



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



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, Hidalgo Flores, Alberto José, con C.C: # 0916258775 y Riera Cedeño, Joffre Kevin, con C.C: # 0926111667 autores del trabajo de titulación: **Estudio del daño por humedad en mezclas asfálticas empleando diferentes métodos**, 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, 23 de marzo de 2016

f. _____

Nombre: Hidalgo Flores Alberto José

C.C: 0916258775

f. _____

Nombre: Riera Cedeño Joffre Kevin

C.C: 0926111667

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	ESTUDIO DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EMPLEANDO DIFERENTES MÉTODOS		
AUTOR(ES)	HIDALGO FLORES ALBERTO JOSÉ Y RIERA CEDEÑO JOFFRE KEVIN		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	VILA ROMANÍ ROLANDO		
INSTITUCIÓN:	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL		
FACULTAD:	FACULTAD DE INGENIERÍA		
CARRERA:	INGENIERÍA CIVIL		
TÍTULO OBTENIDO:	INGENIERO CIVIL		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	23 DE MARZO DEL 2016	NO. DE PÁGINAS:	167
ÁREAS TEMÁTICAS:	PAVIMENTOS		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	DAÑO EN AGUA, TRACCIÓN INDIRECTA, ESTABILIDAD MARSHALL, MÓDULO DE RIGIDEZ, FATIGA, CREEP, DESVESTIMIENTO.		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>EN ESTE TRABAJO SE PRESENTA LA REALIZACIÓN DE UN ESTUDIO DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS PROVENIENTES DE 5 PLANTAS DE LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR. ESTAS PLANTAS CONTIENEN AGREGADOS CON DISTINTAS COMPOSICIONES MINERALÓGICAS Y CUENTAN CON DISEÑOS APROBADOS. CON CADA UNA DE LAS MEZCLAS SE PREPARARON BRIQUETAS CON 100% Y 97% DE ENERGÍA DE COMPACTACIÓN, PARA ENSAYAR EN CONDICIONES SIN Y CON INMERSIÓN EN AGUA. EL OBJETIVO GENERAL DEL TRABAJO 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 COMPRESIÓN CÍCLICA).</p> <p>EN EL ESTUDIO SE OBTUVO QUE: EN LA PRUEBA DE AGUA HIRVIENDO SOLO 2 PLANTAS, LA D Y E, NO CUMPLIERON CON LA EXIGENCIA. EN LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN INDIRECTA SE OBTUVIERON RESULTADOS MUY BAJOS, ALGO LLAMATIVO Y QUE REQUIERE ESTUDIOS POSTERIORES. EN LA PRUEBA MARSHALL LOS RESULTADOS FUERON MUY PARTICULARES PARA CADA UNA DE LAS PLANTAS. EL VALOR MÁS BAJO LO OFRECE LA PLANTA E CON 58%. LAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO PARA EVALUAR EL DAÑO EN AGUA SE LO CONSIDERA POSIBLE. LOS MÓDULOS DE RIGIDEZ RETENIDOS TUVIERON Poca VARIACIÓN ENTRE LAS PLANTAS B, C, D Y E CON VALORES EN EL ORDEN DEL 76% AL 79%. LAS PRUEBAS DE FATIGA EN CONDICIONES ÓPTIMAS OFRECEN COMPORTAMIENTOS SIMILARES, PERO AL FINAL DEL PROCEDIMIENTO TIENEN UNA VARIACIÓN SIGNIFICATIVA, TENIENDO LOS PEORES RESULTADOS LAS PLANTAS E Y D. EN LA PRUEBA CREEP LOS RESULTADOS OBTENIDOS INDICAN QUE LAS PLANTAS CON MAYORES AFECTACIONES FUERON LA E, B Y D.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-994504333, 0987213531	E-mail: ahf_r9@hotmail.com , joffrerc@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: ING. ROLANDO VILA ROMANÍ, PHD		
	Teléfono: +593-4-206951		
	E-mail: vilarolando@hotmail.com		

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA

Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	