



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

**TÍTULO:  
APLICACIÓN DE PRUEBAS DE DESEMPEÑO A MEZCLAS  
ASFÁLTICAS PRODUCIDAS EN DIFERENTES PLANTAS DE  
LA REGIÓN SIERRA**

**AUTOR (A):  
MOROCHO AJOY DANNY GABRIEL**

**Trabajo de grado  
Previo a la obtención del título de:  
Ingeniero Civil**

**TUTOR:  
ING. ROLANDO VILA ROMANÍ, PhD.**

**Guayaquil, Ecuador  
2014**



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

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Danny Gabriel Morocho Ajoy**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

### **TUTOR**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Rolando Vila Romaní, PhD**

### **REVISORES**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Gustavo García Caputi**

\_\_\_\_\_  
**Lcda. Ruth Zambrano Saltos**

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Mario Dueñas Rossi**

**Guayaquil, a los 18 del mes de Marzo del año 2014**



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

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Danny Gabriel Morocho Ajoy**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación **Aplicación de Pruebas de Desempeño a Mezclas Asfálticas Producidas en Diferentes Plantas de la Región Sierra** previa a la obtención del Título **de Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, 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 científico del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 18 del mes de Marzo del año 2014**

**EL AUTOR:**

---

**Danny Gabriel Morocho Ajoy**



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

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Danny Gabriel Morocho Ajoy**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: Aplicación de Pruebas de Desempeño a mezclas Asfálticas producidas en Diferentes Plantas de la Región Sierra, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 18 del mes de Marzo del año 2014**

**EL AUTOR:**

---

**Danny Gabriel Morocho Ajoy**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios primeramente por la fortaleza y sabiduría para culminar mis estudios, a mis padres por su apoyo y comprensión para alcanzar mis metas, a mis hermanos que depositaron su fe y esperanzas en mí.

A mi familia por su apoyo incondicional que me dieron la fuerza para seguir y culminar con éxito este gran pasó en mi vida profesional.

A mi cuñado Patricio Coca, mi cuñada María Lorena Macías y amigos quienes con su entusiasmo y apoyo que me dieron ánimos en momentos duros en mi vida.

De manera especial al Ing. Rolando Vila Romaní por su amistad, apoyo, comprensión, paciencia y confianza durante todo el trabajo de titulación.

**Danny Gabriel Morocho Ajoy**

## **DEDICATORIA**

Este logro se lo dedico a mi madre, Teresa de Jesús Ajoy Orrala, por estar siempre conmigo, por su dedicación y amor.

En memoria de mi padre, Marco Augusto Morocho Duque, de mi hermano Marco Polo Morocho Ajoy y mi abuelo, Carlos Genaro Morocho Palma que nunca dejaron de estar a mi lado.

A mis hermanos Mariuxi Ling, Ileana Teresa y Carlos Andrés Morocho Ajoy, a mis sobrinos Emily Domenica, Camila Andrea, Marco Augusto y Patricio Fernando que son mi fortaleza y más grande orgullo.

**Danny Gabriel Morocho Ajoy**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**  
**(Se colocan los espacios necesarios)**

---

ING. Rolando Vila Romaní, PhD  
TUTOR

---

Ing. Gustavo García Caputi  
PROFESOR DELEGADO



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

**CALIFICACIÓN**

---

**Ing. Rolando Vila Romaní, PhD  
TUTOR**



## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	xvi
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- PRESENTACIÓN DEL TEMA .....	1
1.2.- RAZONES QUE MOTIVARON AL ESTUDIO.....	1
1.3.- JUSTIFICACION DEL TEMA .....	1
1.4.- DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	2
1.5.- ANTECEDENTES.....	3
1.6.- CONTEXTUALIZACIÓN EN TIEMPO Y ESPACIO .....	5
1.7.- OBJETIVO .....	5
1.8.- HIPÓTESIS.....	5
1.9.- METODOLOGÍA .....	6
CAPÍTULO 2 .....	7
MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	7
2.1.- GENERALIDADES .....	7
2.2.- CEMENTO ASFÁLTICO .....	7
2.3.- AGREGADOS MINERALES .....	8
2.4.- PROPIEDADES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	10
2.5.- DETERIOROS FRECUENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	11
CAPÍTULO 3 .....	13
PREPARACIÓN DE LAS BRIQUETAS A ENSAYAR .....	13
3.1.- TOMA DE MUESTRAS .....	13
3.2.- CONFECCIÓN DE BRIQUETAS .....	13
3.2.1.- EQUIPOS.....	13
3.2.2.- PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO .....	16

3.3.- DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES CONVENCIONALES .....	18
3.3.1.- PROCEDIMIENTO DE DENSIDAD POR GRAVEDAD ESPECÍFICA .....	18
3.3.2.- PROCEDIMIENTO DE DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA (PRUEBA RICE O PRUEBA RICE) .....	18
3.3.3.- VACÍOS EN LA MEZCLA .....	20
3.3.4.- PORCENTAJE DE VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VMA) .....	21
3.3.5.- PORCENTAJE DE VACIOS RELLENOS DE ASFALTO (VFA) .....	21
3.4.- MEDICION DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA.....	21
3.5.- PRUEBAS DE DESEMPEÑO O REOLOGICAS.....	22
3.5.1. GENERALIDADES.....	22
3.5.2.- MÓDULO DE RIGIDEZ MEDIANTE DEFORMACIÓN CONTROLADA .....	23
3.5.3.- MÓDULO DE RIGIDEZ MEDIANTE CARGA CONTROLADA .....	23
3.5.4.- ENSAYOS DE FATIGA .....	24
3.5.5.- COMPRESIÓN UNIAXIAL REPETIDA (CREEP DINAMICO) .....	25
CAPÍTULO 4 .....	26
DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	26
4.1.- PLANTAS SELECCIONADA PARA ESTUDIO .....	26
4.2.- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE BRIQUETAS.....	26
4.3.- CARACTERÍSTICAS DE PROPIEDADES CONVENCIONALES .....	29
4.3.1.- EXTRACCIÓN Y PORCENTAJE DE ASFALTO EN BRIQUETAS .....	29
4.3.2.- GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS EXTRAÍDOS.....	32
4.3.3.- DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA (ENSAYO RICE) .....	36
4.3.4.- DENSIDAD O GRAVEDAD ESPECÍFICA “BULK” Y PORCENTAJE DE VACÍOS .....	37
4.4.- CARACTERÍSTICAS DE PRUEBAS DE DESEMPEÑO O REOLÓGICAS .....	46
4.4.1.- MÓDULO DE RIGIDEZ POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA .....	46
4.4.2.- MÓDULO DE RIGIDEZ POR DEFORMACION CONTROLADA.....	61

4.4.3.- DEFORMACIÓN PERMANENTE (CREEP DINAMICO) .....	65
CAPÍTULO 5 .....	67
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	67
5.1.- PORCENTAJE DE ASFALTO EN BRIQUETAS .....	67
5.2.- GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS EXTRAÍDOS.....	67
5.3.- DENSIDAD MAXIMA TEORICA (ENSAYO RICE) .....	68
5.4.- DENSIDAD O GRAVEDAD ESPECÍFICA “BULK” .....	68
5.5.- PORCENTAJE DE VACÍOS .....	69
5.6.- MÓDULO DE RIGIDEZ POR DEFORMACIÓN CONTROLADA .....	69
5.7.- ENSAYO DE FATIGA .....	71
5.8.- DEFORMACIÓN PERMANENTE (CREEP DINÁMICO) .....	71
CONCLUSIONES .....	73
RECOMENDACIONES.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA .....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características del Cemento Asfáltico AC-20.....	8
Tabla 2: Especificaciones granulométricas para las mezclas asfálticas. ....	9
Tabla 3: Pruebas y exigencias para granulometría. ....	10
Tabla 4: Selección de Plantas.....	26
Tabla 5: Características Geométricas Planta A.....	27
Tabla 6: Características Geométricas Planta B.....	28
Tabla 7: Características Geométricas Planta C. ....	28
Tabla 8: Características Geométricas Planta D. ....	29
Tabla 9: Extracción y Porcentaje de de Asfalto Planta A. ....	30
Tabla 10: Extracción y Porcentaje de de Asfalto Planta B.....	30
Tabla 11: Extracción y Porcentaje de de Asfalto Planta C. ....	31
Tabla 12: Extracción y Porcentaje de de Asfalto Planta D. ....	31
Tabla 13: Granulometría en Agregado Extraídos Planta.....	32
Tabla 14: Granulometría en Agregado Extraídos Planta B.....	33
Tabla 15: Granulometría en Agregado Extraídos Planta C. ....	34
Tabla 16: Granulometría en Agregado Extraídos Planta D. ....	35
Tabla 17: Ensayo RICE Planta A. ....	36
Tabla 18: Ensayo RICE Planta B. ....	36
Tabla 19: Ensayo RICE Planta C.....	37
Tabla 20: Ensayo RICE Planta D.....	37
Tabla 21: Parámetros Volumétricos Densidad y Porcentaje de Vacíos Planta A.....	38
Tabla 22: Parámetros Volumétricos Densidad y Porcentaje de Vacíos Planta B.....	40
Tabla 23: Parámetros Volumétricos Densidad y Porcentaje de Vacíos Planta C.....	42

Tabla 24: Parámetros Volumétricos Densidad y Porcentaje de Vacíos Planta D.....	44
Tabla 25: Módulo de Rigidez por Carga Controlada y Fatiga Planta A. ....	47
Tabla 26: Módulo de Rigidez por Carga Controlada y Fatiga Planta B. ....	50
Tabla 27: Módulo de Rigidez por Carga Controlada y Fatiga Planta C. ....	53
Tabla 28: Módulo de Rigidez por Carga Controlada y Fatiga Planta D. ....	56
Tabla 29: Módulo de Rigidez por Deformación Controlada. ....	61
Tabla 30: Módulo de Rigidez Promedio 35 Golpes. ....	62
Tabla 31: Módulo de Rigidez Promedio 50 golpes. ....	63
Tabla 32: Módulo de Rigidez Promedio 75 golpes. ....	64
Tabla 33: Deformación Permanente. ....	65
Tabla 34: Resultados de Porcentaje de Asfalto. ....	67
Tabla 35: Resultados de Densidad Máxima Teórica. ....	68
Tabla 36: Resultados de Gravedad Específica. ....	68
Tabla 37: Resultados de Porcentaje de Vacíos. ....	69
Tabla 38: Resultados de Módulo de Rigidez Promedio.....	69
Tabla 39: Relación porcentaje axial y porcentaje de vacíos.....	71

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1: Relación típica entre deformación y repeticiones. ....	4
Figura 2: Mezcla asfáltica muestreada en planta. ....	13
Figura 3: Compactador automático. ....	14
Figura 4: Martillo Compactador. ....	14
Figura 5: Horno. ....	15
Figura 6: Termómetro Blindado. ....	15
Figura 7: Base, Molde y Collar o Collarín. ....	15
Figura 8: Extractor o Prensa. ....	16
Figura 9: Cuchara, Bandeja Metálica y Espátula. ....	16
Figura 10: Equipo Marshall. ....	22
Figura 11: Módulo de Rigidez. ....	23
Figura 12: Ensayo de Fatiga. ....	24
Figura 13: COMPRESIÓN UNIAXIAL REPETIDA (CREEP DINAMICO). ....	25
Figura 14: Espesor con Calibrador de Vernier. ....	27
Figura 15: Muestra Asfáltica ....	29
Figura 16: Porcentaje de Vacíos Promedio Planta A. ....	39
Figura 17: Gravedad Especifica Promedio Planta A. ....	39
Figura 18: Porcentaje de Vacíos Promedio Planta B. ....	41
Figura 19: Gravedad Especifica Promedio Planta B. ....	41
Figura 20: Porcentaje de Vacíos Promedio Planta C. ....	43
Figura 21: Gravedad Específica Promedio Planta C. ....	43
Figura 22: Porcentaje de Vacíos Promedio Planta D. ....	45
Figura 23: Gravedad Específica Promedio Planta D. ....	45
Figura 24: Nottingham Asphalt Tester (NAT). ....	46

Figura 25: Carga - Repeticiones .....	48
Figura 26: Deformación - Repeticiones.....	49
Figura 27: Carga - Repeticiones. ....	51
Figura 28: Deformación - Repeticiones.....	52
Figura 29: Carga - Repeticiones. ....	54
Figura 30: Deformación – Repeticiones.....	55
Figura 31: Carga - Repeticiones. ....	57
Figura 32: Deformación - Repeticiones.....	58
Figura 33: Relación Carga – Repeticiones (75 Golpes). ....	59
Figura 34: Relación Deformación – Repeticiones (75 golpes).....	60
Figura 35: Módulo de Rigidez Promedio 35 Golpes.....	62
Figura 36: Módulo de Rigidez Promedio 50 golpes.....	63
Figura 37: Módulo de Rigidez Promedio 75 golpes.....	64
Figura 38: % Deformación Axial – Energía De Compactación. ....	66
Figura 39: Módulo de Rigidez Promedio - % Vacíos.....	70
Figura 40: Relación Porcentaje de Deformación Axial y Porcentaje de Vacíos. ....	72

## RESUMEN

En el presente trabajo se comparan las propiedades reológicas, medidas con el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) con las propiedades convencionales de los controles de calidad rutinarios en mezclas asfálticas producidas con diferentes agregados minerales en 4 plantas de la Región Sierra del Ecuador, con energías de compactación variable (35, 50 y 75 golpes por cara). Este estudio está direccionado dentro de un proyecto de investigación que se desarrolla en el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil.

Las pruebas tradicionales para el control de calidad de mezclas asfálticas, que se realizaron fueron: determinación de porcentaje de asfalto, granulometría en agregados extraídos, gravedad específica, densidad máxima teórica y porcentaje de vacíos aplicando las normas ASTM y AASHTO. Los ensayos mediante pruebas de desempeño o reológicas fueron: módulo de rigidez, deformación por compresión cíclica o creep dinámico y fatiga. Los resultados obtenidos en pruebas convencionales estuvieron dentro de las exigencias que establece el estándar de calidad del Ministerio de transporte y Obras Públicas y en ensayos mediante pruebas de desempeño estuvieron dentro de los parámetros establecidos por las normas internacionales.

El objetivo de este estudio es el establecimiento de exigencias a las mezclas asfálticas basadas en pruebas de desempeño, con la finalidad de mejorar la infraestructura vial del país, principalmente la región de la Sierra, construyendo unas vías más durables con un nivel de servicio y funcionamiento, considerando mejores especificaciones de calidad según el clima.

**Palabras Claves:** Reología, Módulos, Rigidez, Fatiga, Deformación, Creep.



# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1.- PRESENTACIÓN DEL TEMA**

En el presente trabajo titulado “APLICACIÓN DE PRUEBAS DE DESEMPEÑO A MEZCLAS ASFÁLTICAS PRODUCIDAS EN DIFERENTES PLANTAS DE LA REGIÓN SIERRA” se comparan las propiedades reológicas medidas con el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) con las propiedades convencionales de los controles de calidad rutinarios en mezclas asfálticas producidas con diferentes agregados minerales en 4 plantas de la Región Sierra del Ecuador con energías de compactación variables.

### **1.2.- RAZONES QUE MOTIVARON AL ESTUDIO**

Este estudio esta direccionado dentro de un proyecto de investigación que se desarrolla en el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil y cuyo objetivo es el establecimiento de exigencias a las mezclas asfálticas basadas en pruebas de desempeño considerando las diferentes regiones climáticas del país.

En nuestro caso particular se estudiarán mezclas asfálticas representativas de la región Sierra considerando diferentes tipos de agregado mineral.

### **1.3.- JUSTIFICACION DEL TEMA**

Tradicionalmente, los procedimientos para el control de la calidad de la mezcla asfáltica que se fabrica en plantas en el Ecuador se limitan a la verificación de la composición de la mezcla y la comprobación de ciertos parámetros volumétricos y resistentes previstos en el diseño Marshall (Asphalt Institute, 1997), cuyo empleo está establecido en el Ecuador (MTOP, 2002).

Los parámetros volumétricos usuales son densidad, porcentajes de vacíos con aire en la mezcla, de vacíos en el agregado mineral y de vacíos de rellenos de asfalto. Los parámetros resistentes, relacionados específicamente con la deformación plástica son la estabilidad Marshall y el flujo. A nivel de obra terminada, el aseguramiento y control se concentra en la verificación de la densidad de campo y en el chequeo de los espesores de capa colocados.

Pese a cumplirse con este tipo de control, es frecuente ver en el país pavimentos agrietados, huecos, ahuellamientos, fisurados o deformados a los pocos años de su construcción o rehabilitación, lo que demuestra la insuficiencia de este sistema que genera para su corrección una amplia inversión anualmente de recursos por parte del gobierno nacional para mantener sus carreteras seguras y funcionales.

Es decir, que existe la necesidad de considerar seriamente la aplicación de nuevas pruebas, para lo cual es importante el estudio teórico – práctico de los parámetros relacionados con estas, así como la posible exigencia a cumplirse en dichas pruebas, al menos de las que particularmente están acorde con los equipamientos existentes.

Con la finalidad de mejorar la infraestructura vial del país, principalmente la región de la Sierra, construyendo unas vías más durables con un nivel de servicio y funcionamiento, considerando mejores especificaciones de calidad según el clima.

#### **1.4.- DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

Las pruebas tradicionales para el control de calidad de mezclas asfálticas se limitan a la verificación de la composición de la mezcla y la comprobación de ciertos parámetros volumétricos y resistentes, que no miden la respuesta dinámica de los materiales y no constituyen parámetros directos de diseño, ya que el desempeño de la mezcla asfáltica depende de sus propiedades

dinámicas de respuesta frente a la fuerza dinámica aplicada por el tráfico vehicular.

De manera particular en cada región, en nuestro caso la región sierra, el estudio implica realizar un conjunto de pruebas de desempeño o reológicas, como los módulos de rigidez, deformación por compresión cíclica y fatiga.

El problema de investigación es la relación entre las diferentes propiedades reológicas evaluadas con el Equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) y las propiedades convencionales evaluadas en los controles de calidad rutinarios en mezclas asfálticas producidas con diferentes agregados minerales en 4 plantas de la Región Sierra del Ecuador con energías de compactación variables.

## **1.5.- ANTECEDENTES**

El deterioro del pavimento está altamente influido por condiciones climáticas severas, alto volumen de tráfico y cargas excesivas en los camiones, así como también por la calidad de su construcción y su mantenimiento.

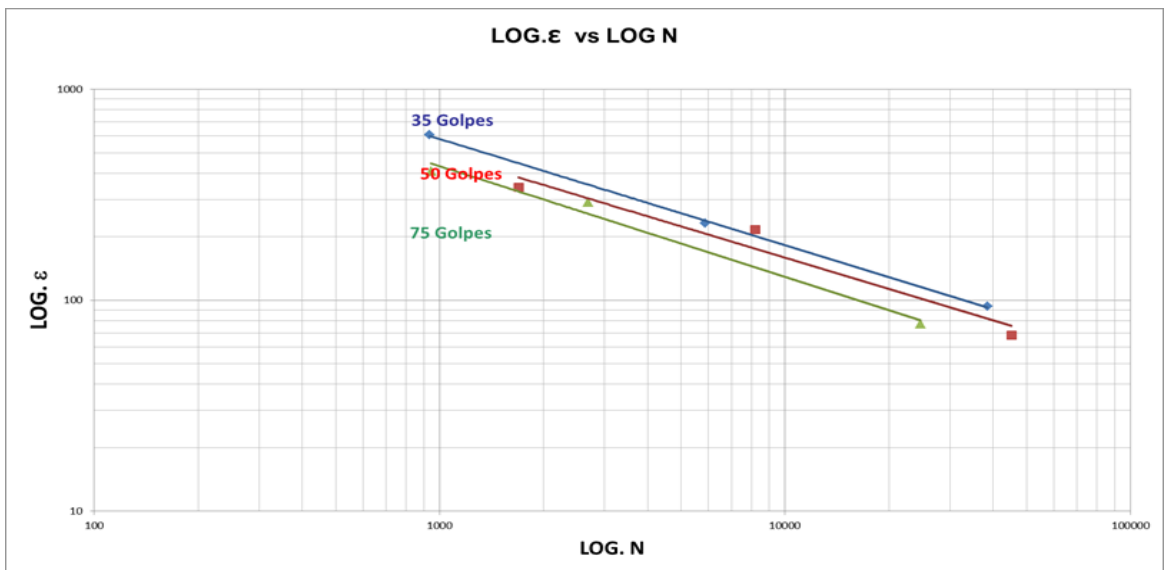
En un estudio similar al propuesto pero ya realizado en la Región Costa (Parrales, 2013), se obtuvieron resultados muy interesantes sobre mezclas producidas en 4 plantas, que se consideran de interés presentar. Una buena mezcla asfáltica debidamente compactada debe originar módulos de rigidez, bajo las condiciones de ensayo empleadas en el NAT superiores a 3000 MPa. Para 50 golpes/cara de compactación, con vacíos que pudieran ser aceptados en obra, solo una planta arroja un módulo aceptable.

Se puede observar en el desarrollo experimental que en todos los ensayos realizados a las diferentes plantas, aquellas mezclas con una mayor rigidez bajo una carga aplicada, tienen un mayor número de repeticiones para llegar al estado de fatiga. En esencia, los módulos determinados bajo las menores cargas aplicadas (100 o 200 KPa), ofrecen los módulos mayores, a los cuales

les corresponderán las menores deformaciones por tracción y las mayores repeticiones para el fallo, es decir, la mejor respuesta a la fatiga.

Analizando la relación de la deformación y el número de repeticiones para llegar al fallo, se tiene:

**Figura 1: Relación típica entre deformación y repeticiones.**



**Fuente: Consideraciones para el Empleo de Pruebas Reológicas en el Control de Calidad de Mezclas Asfálticas Parrales R, 2013**

La rigidez de una capa asfáltica influye en la deformación por tracción (en la parte inferior de dicha capa) de manera opuesta que en la tensión. Es decir, al incrementarse la rigidez (con el aumento del número de golpes a 75) se reduce la deformación y aumenta la tensión en la capa. Consecuentemente, una capa rígida es deseable para prevenir el inicio de las grietas, pero acelerará su subsiguiente propagación.

Por otra parte, en las mezclas de todas las plantas analizadas, de aplicarse un 100% de la energía de compactación (75 golpes/cara) se alcanzan valores de deformación por debajo o igual que 1%, que significa un buen comportamiento a las deformaciones plásticas. En general, ya para 50

golpes/cara de compactación, con vacíos que pudieran ser aceptados en obra, las deformaciones superarían el límite de 1%.

Es importante considerar que mezclas asfálticas colocadas en obra que cumplen con los requisitos de compactación, o sea, porcentaje de huecos menores a 6.5%, no cumplirían con algunas de las pruebas de desempeño. Este detalle implica la necesidad de perfeccionar los diseños para considerar en los mismos la incidencia de una densidad relativa mínima del 97%, valor recomendado en el país.

## **1.6.- CONTEXTUALIZACIÓN EN TIEMPO Y ESPACIO**

Este estudio considerará las mezclas correspondientes 4 plantas de La Región Sierra con diferentes agregados minerales y un mismo tipo de cemento asfáltico AC-20, proveniente de la refinería de Esmeralda.

Las pruebas se realizarán con el Equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) del Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil.

## **1.7.- OBJETIVO**

Determinar los parámetros reológicos: módulo de rigidez, deformación por compresión cíclica y fatiga con el Equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT), a mezclas asfálticas producidas en 4 plantas de la Región Sierra del Ecuador, para proponer recomendaciones que permitan mejorar los controles de calidad con el fin de aumentar la durabilidad de las carreteras que se realizan actualmente en el Ecuador.

## **1.8.- HIPÓTESIS**

El comportamiento estimado de una mezcla asfáltica a partir de sus propiedades dinámicas, es decir, su módulo de rigidez, su ley de fatiga y su

deformación en prueba creep, puede no corresponderse con la calificación otorgada por los controles de calidad convencionales basados en los criterios Marshall.

### **1.9.- METODOLOGÍA**

La investigación tiene un enfoque cuantitativo y pertenece al tipo correlacional, ya que busca relacionar las propiedades de las mezclas asfálticas obtenidas con pruebas reológicas con las obtenidas con las pruebas convencionales, en este caso empleando mezclas producidas en diferentes plantas de la región Sierra con agregados minerales particulares.

## **CAPÍTULO 2**

### **MEZCLAS ASFÁLTICAS**

#### **2.1.- GENERALIDADES**

Las mezclas asfálticas se forman por la combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas pueden ser producidas por un amplio rango de combinaciones de agregados, cada uno con sus características particulares adecuadas al diseño específico y a sus usos en la construcción. (Kraemer, C. 2003).

#### **2.2.- CEMENTO ASFÁLTICO**

Según nuestro organismo de normalización (NTE INEN 2 341, 2010), el cemento asfáltico es un derivado del petróleo que satisface las especificaciones establecidas para los materiales empleados en pavimentación y otros usos industriales.

El cemento asfáltico debe ser homogéneo, libre de agua, y no debe formar espuma cuando se calienta a 175 °C. Es necesario la utilización de equipo especializado de protección personal para el manejo y manipulación de este tipo de productos.

Generalmente, el cemento asfáltico a utilizarse en las mezclas se clasifica por su penetración o por su viscosidad. En el Ecuador actualmente se recomienda el empleo de asfalto tipo AC-20 para todo el país.

**Tabla 1: Características del Cemento Asfáltico AC-20.**

PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	AC 20	
			Mínimo	Máximo
Penetración, 25 °C, 100g., 5s.	ASTM D-5	0.1 mm	60	-
Flash Point, Copa Cleveland	ASTM D-92	°C	232	-
Viscosidad Dinámica 60 °C	ASTM D-4402	cP	160.000	240.000
Viscosidad Cinemática, 135 °C	ASTM D 2170	cSt	300	
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%w	99	-
<b>ENVEJECIMIENTO TFOT, 163 °C, 5h</b>				
Ductilidad, 25°C, 5cm/min	ASTM D 113	cm	50	-
Viscosidad Dinámica 60 °C	ASTM D 4402	cP	-	1.000.000

**Fuente: Viscosity – graded Asphalt Cement for use in Pavement Construction. Standard Specification for D3381-92.**

### **2.3.- AGREGADOS MINERALES**

El porcentaje de los materiales granulares es del 90% y 95% del peso de la composición de la mezcla asfáltica o bien entre 75% y 85% del volumen, por lo que inciden de forma muy directa, en su compacidad, ángulo de rozamiento interno, textura, manejabilidad, resistencia a la acción del agua y en la calidad del mastico asfáltico (Asphalt Institute, 2002).

Los agregados proporcionan gran parte de la característica de su capacidad portante, se selecciona de acuerdo a la función requerida para la capa asfáltica en la estructura del pavimento, esperando que provea una resistencia para las aplicaciones repetidas de las cargas.

Para la mezcla asfáltica en caliente, los agregados que se emplearán estarán compuestos de partículas de material triturado, grava triturada, grava o material natural o arena. La granulometría deberá cumplir los requisitos indicados en la (MTOPTabla 405 5.1, 2002).



**Tabla 2: Especificaciones granulométricas para las mezclas asfálticas.**

Tamiz	PORCENTAJE EN PESO QUE PASA A TRAVES DE LOS TAMICES DE MALLA CUADRADA			
	$\frac{3}{4}$ "	$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{8}$ "	N°4
1" (25.4 mm)	100	---	---	---
$\frac{3}{4}$ " (19.0 mm)	90 - 100	100	---	---
$\frac{1}{2}$ " (12.7 mm)	---	90 - 100	100	---
$\frac{3}{8}$ " (9.50 mm)	56 - 80	---	90 - 100	100
N°4 (4.75 mm)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
N°8 (2.36 mm)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
N°16 (1.18 mm)	---	---	---	40 - 80
N°30 (0.60 mm)	---	---	---	25 - 65
N°50 (0.30 mm)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
N°100 (0.15 mm)	---	---	---	3 - 20
N°200 (0.075 mm)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: MTOP 405 5.1

Además, de acuerdo a esos mismos criterios del MTOP los agregados deberán cumplir con las siguientes pruebas y exigencias correspondientes, dadas entre paréntesis.

**Tabla 3: Pruebas y exigencias para granulometría.**

PRUEBAS	AGREGADO MINERALES	
	GRUESOS	FINOS
FORMA	Caras fracturadas (> 80% -2) Planas y alagadas (< 10%)	Angularidad (> 45%)
DUREZA	Abasión Los Ángeles (< 40%) Sulfatos (12%)	Sulfatos (< 12%)
LIMPIEZA	Deletéreos (< 1%)	Deletéreos (< 1%) Equivalente de arena (>50%) índice de plasticidad (< 4)
ADHERENCIA	Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%)	

Fuente: MTOP

## 2.4.- PROPIEDADES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las propiedades más relevantes de una mezcla asfáltica en caliente son:

*Estabilidad*, es la capacidad de resistir la deformación y el desplazamiento, debido a las cargas que resultan del tránsito vehicular. Depende de la fricción interna y la cohesión.

*Durabilidad*, es la capacidad para resistir los efectos del aire, agua, temperatura y tránsito que pueden provocar envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado.

*Flexibilidad*, es la capacidad para amoldarse, sin sufrir agrietamiento o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante.

*Resistencia a la fatiga*, es la capacidad para resistir cargas repetidas causadas por el paso del tránsito vehicular. Se relaciona con el contenido y la rigidez del asfalto.

*Resistencia al daño por humedad*, es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. Se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada.

*Resistencia al deslizamiento*, es la capacidad para no perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento. Se relaciona generalmente con las características del agregado y el contenido de asfalto.

*Trabajabilidad o manipulación*, es la facilidad de colocar y compactar la mezcla asfáltica in situ. Depende de las características del agregado, la granulometría, el contenido, y la viscosidad del asfalto.

## **2.5.- DETERIOROS FRECUENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

*Deformaciones*, se aprecian en forma de roderas, cordón longitudinal, arrollamientos, ondulaciones transversales próximas, huellas, etc. Son causadas por mezclas inestables con poca o escasa resistencia a las deformaciones plásticas.

*Fisuras*, las fisuras por fatiga en piel de cocodrilo, se producen por falta de capacidad portante del firme, pero es conocido que las mezclas muy rígidas,

fabricadas con betunes duros y en bajos contenidos, proporcionan mezclas con baja resistencia a la fatiga.

Grietas transversales producidas por retracción térmica de las capas tratadas con cemento, en las que las fisuras se transmiten rápidamente a través de estas mezclas rígidas.

Las fisuras transversales por fatiga térmica, no son muy comunes en nuestro país, ya que hay pocas zonas con bajas temperaturas. Son producidas por el empleo de betunes duros con puntos de fragilidad Fraass elevados.

## **CAPÍTULO 3**

### **PREPARACIÓN DE LAS BRIQUETAS A ENSAYAR**

#### **3.1.- TOMA DE MUESTRAS**

Las muestras para nuestro estudio fueron fabricadas en 4 plantas de la región Sierra con diferentes agregados minerales y un mismo tipo de cemento asfáltico AC-20, proveniente de la refinería de Esmeraldas.

**Figura 2: Mezcla asfáltica muestreada en planta.**



#### **3.2.- CONFECCIÓN DE BRIQUETAS**

##### **3.2.1.- EQUIPOS**

*Compactador automático*, diseñado para compactar las briquetas, consta de un anillo o soporte que sirve para sujetar el molde, tiene una base de madera en el cual descansa una placa metálica de acero y un martillo de compactación que se mueve por la acción de un sistema mecánico acoplado a un motor.

**Figura 3: Compactador automático.**



*Martillo de compactación*, conformado por un mazo de acero 4.5 kg, el mazo golpea una pieza circular que se coloca sobre el molde, la cara circular es de  $3\frac{7}{8}$  pulg (9.8 cm) y la altura de caída es de 18 pulg (45.7 cm).

**Figura 4: Martillo Compactador.**



*Horno*, para calentar los materiales o mantener la temperatura óptima de la mezcla (aproximadamente 135 °C).

**Figura 5: Horno.**



*Termómetro blindado*, para lecturas de temperatura de la mezcla.

**Figura 6: Termómetro Blindado.**



*Balanzas*, con aproximación a 0.1 gramo y si es de 5 kg con una aproximación a 1 gramo.

*Molde de Compactación*, tiene un diámetro inferior a 4" y una altura de 3". Conformado de una base, molde encofrado y collar de extensión o collarín.

**Figura 7: Base, Molde y Collar o Collarín.**



Extractor de muestra, sirve para extraer la muestra (briqueta) ya compactada. Para evitar darle golpes adicionales o maltratarla. Evitando así se altere la energía de compactación requerida.

**Figura 8: Extractor o Prensa.**



*Herramientas menores, cuchara, espátulas, bandejas metálicas, guantes*

**Figura 9: Cuchara, Bandeja Metálica y Espátula.**



### **3.2.2.- PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO**

- 1) Con el termómetro blindado procedemos a medir la temperatura de la mezcla obtenida en planta, para verificar si ha disminuido su temperatura o conserva su temperatura de fabricación durante la transportación de la planta hacia el laboratorio. La temperatura para la fabricación de nuestras briquetas será 135 °C.



- 2) Si la mezcla ha disminuido su temperatura por el traslado, procedemos a calentar la mezcla en un recipiente, procurando no exceder de la temperatura de fabricación.
- 3) Obteniendo la temperatura deseada, procedemos al moldeo de la briqueta. Retiramos la base, el molde y el collarín previamente calentados en el horno a una temperatura de 135 °C.
- 4) Colocando sobre el pedestal del compactador, la base, el molde y el collarín, asegurando que estén bien armados, engrasamos el molde para evitar que la muestra se pegue, con una cuchara procedemos a rellenar el molde, emparejando la muestra con una espátula, unas 10 veces alrededor y 15 en el centro, para que el agregado grueso se distribuya por el molde.
- 5) Colocamos el soporte y se da inicio a la compactación, se aplica 75, 50 y 35 golpes de energía de compactación por cara, con el martillo compactador, según lo especificado para nuestro estudio. Terminada la compactación se procede al desmonte y se expone el molde a temperatura ambiente.
- 6) Colocamos el molde en un recipiente con agua fría, para mantener sus dimensiones y evitar su deformación.
- 7) Procedemos a la extracción de la muestra con la ayuda de la prensa, sin alterar la energía de compactación.
- 8) Se realiza la identificación y etiquetado de la muestra para evitar confusión y la mala interpretación de resultados por confusión.

### **3.3.- DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES CONVENCIONALES**

#### **3.3.1.- PROCEDIMIENTO DE DENSIDAD POR GRAVEDAD ESPECÍFICA**

- 1) Se pesa la briqueta utilizando una balanza manual o electrónica, obteniendo el peso seco.
- 2) Se pesa la briqueta sumergida en un reservorio de agua obteniéndose el peso en agua.
- 3) Secando superficialmente la muestra sacada del agua, se pesa en la balanza, obteniendo el peso con superficie seca.

#### **Cálculos:**

Volumen =  $\text{Peso Superficialmente Seco} - \text{Peso en agua}$

Densidad =  $\text{Peso Seco} / \text{Volumen}$

#### **3.3.2.- PROCEDIMIENTO DE DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA (PRUEBA RICE O PRUEBA RICE)**

- 1) Es necesario calibrar correctamente el recipiente volumétrico que vamos a utilizar para este ensayo. Utilizamos el picnómetro para determinar el peso en aire, luego precisamos adecuadamente el peso del agua requerida, con temperatura ambiente (25 °C), se cubre usando una placa de vidrio y pesamos, obteniendo el Peso Picnómetro + Agua.
- 2) Separamos cuidadosamente a mano las partículas, para no fracturar las partículas minerales.

- 3) Se enfría la muestra a temperatura ambiente (25 °C).
- 4) Procedemos a pesar el recipiente con la muestra y designamos el Peso Mezcla Suelta.
- 5) Se vierte agua suficiente hasta cubrir completamente la muestra con una temperatura de 25°C.
- 6) Cubrimos el picnómetro de vacío.
- 7) Colocamos el picnómetro con la muestra y el agua, en el dispositivo de agitación mecánica. En este dispositivo removerá el aire atrapado en la muestra, aumentando gradualmente la presión de vacío hasta que el manómetro de presión marque 4 KPa durante un período de 15 minutos.
- 8) Gradualmente podemos aplicar o disminuir el vacío, mediante el uso de la válvula de vacío.
- 9) Una vez siendo removido el aire atrapado en la muestra, determinamos lo siguiente:
  - Determinamos el peso en el aire, vertiendo lentamente agua dentro del picnómetro, evitando introducir aire a la muestra.
  - Medimos y registramos la temperatura del agua dentro del picnómetro con la ayuda del termómetro.
  - Llenamos completamente el picnómetro y cubrirlo con la placa de vidrio, evitando atrapar por debajo de la placa.
  - Eliminamos cualquier residuo de humedad del exterior del picnómetro y de la placa.

- Determinamos el peso picnómetro + agua + material, se lo realiza sacando la masa del picnómetro + la placa y sus contenidos llenos de agua.

Se utiliza la siguiente fórmula para determinar el RICE:

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

**Dónde:**

A = peso picnómetro + agua (gr)

B = peso picnómetro + agua + material (gr)

C = peso de la mezcla suelta (gr)

**3.3.3.- VACÍOS EN LA MEZCLA**

Los vacíos son pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas del agregado revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan algún porcentaje de vacíos para poder permitir una compactación adicional y proporcionar espacios de tal manera pueda fluir el asfalto durante la compactación adicional. La durabilidad del pavimento asfáltico está en función del contenido de vacíos, cuya razón se debe a que menor cantidad de vacíos tenga, la permeabilidad de la mezcla asfáltica sea menor. Sin embargo, al encontrar un mayor contenido de vacíos puede ser perjudicial, el cual puede entrar agua y aire y sobre todo llegar a deteriorarse (Asphalt Institute, 2002). Se obtiene este valor mediante la fórmula:

$$\%VACIOS = 100 * \left( \frac{RICE - DENCIDAD}{RICE} \right)$$

### 3.3.4.- PORCENTAJE DE VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VMA)

Se obtiene este valor mediante la fórmula:

$$\%VMA = 100 - \frac{G_{mb} - P_s}{G_{sb}}$$

#### **Dónde:**

Gsb: Gravedad específica del total de agregado.

Gmb: Gravedad específica de las briquetas.

Ps: Porcentaje de agregados.

### 3.3.5.- PORCENTAJE DE VACIOS RELLENOS DE ASFALTO (VFA)

Se obtiene este valor mediante la fórmula:

$$VFA = \frac{VMA - \%VACIOS}{VMA}$$

### 3.4.- MEDICION DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA

- 1) Se calienta la muestra en un baño de agua, con temperatura de 60 °C.
- 2) Se remueve las muestras del baño, secamos y colocamos en el equipo Marshall, el mismo que consiste en un dispositivo que se aplica bajo una carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y de deformaciones (fluencia).
- 3) Este equipo aplicara una carga sobre la probeta, con una velocidad constante de 51 mm/min, hasta la muestra llega a fallar.
- 4) Registramos los datos de la falla como el valor de estabilidad Marshall y la lectura que arroje el medidor de deformación, se la registra como fluencia.

**Figura 10: Equipo Marshall.**



### **3.5.- PRUEBAS DE DESEMPEÑO O REOLOGICAS**

#### **3.5.1. GENERALIDADES**

La reología es la ciencia que estudia las relaciones esfuerzo y deformación de un cuerpo, para unas condiciones dadas de presión y temperatura. El objeto de estas pruebas reológicas es determinar ecuaciones para modelar el comportamiento de los materiales.

Para realizar estos ensayos, en el laboratorio de la UCSG se cuenta con el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) modelo NU-10, el cual aplica las cargas mediante un sistema neumático con servo-control, midiendo la fuerza aplicada por el transductor de la celda de carga. Este equipo utiliza una computadora, junto a un conjunto de programas que permiten desarrollar las distintas pruebas y procesar la información a través de ellos.

Se realizarán 4 tipos de pruebas dinámicas:

- Módulo de rigidez, mediante deformación controlada.
- Módulo de rigidez por carga controlada.
- Fatiga.
- Compresión uniaxial repetida (Creep Dinámico).

### 3.5.2.- MÓDULO DE RIGIDEZ MEDIANTE DEFORMACIÓN CONTROLADA

El módulo de rigidez mediante deformación controlada emplea un cabezal de carga de tracción indirecta, se realiza con temperatura de 20 °C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas haversine con intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en que la carga es máxima, el tiempo de aplicación de la carga es de 0,12 segundo.

Figura 11: Módulo de Rigidez.



### 3.5.3.- MÓDULO DE RIGIDEZ MEDIANTE CARGA CONTROLADA

La importancia de este módulo de rigidez, es para dar paso al desarrollo de ensayo de fatiga, ya que ambos ensayos están relacionados entre sí, ya que el ensayo de fatiga se evaluará con la misma carga que se emplee en dicho ensayo.

### 3.5.4.- ENSAYOS DE FATIGA

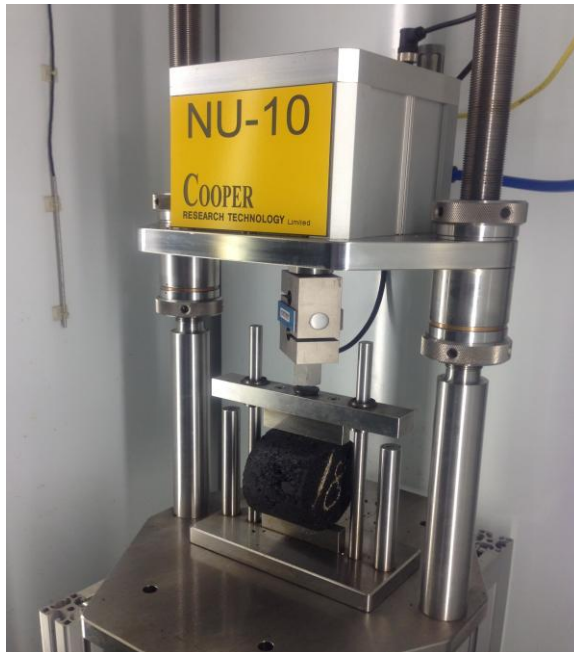
Se desarrolla empleando tensiones controladas, en general entre 100 y 500 KPa, determinándose el número de pulsos o repeticiones, requeridos para alcanzar una deformación vertical máxima de 5 mm.

Condición en la cual la muestra se considera fallada, la aplicación de carga tiene un tiempo de 0,12 segundos. La temperatura para este ensayo es de 20°C.

El procedimiento de este ensayo, comienza con la determinación del módulo de rigidez ( $S_m$ ) bajo carga controlada ( $\sigma$ ). Considerando el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ), con el valor de 0,35., determinamos la deformación por tracción inicial ( $\varepsilon$ ), mediante la fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\sigma \text{ (KPa)} (1+3\mu)}{S_m \text{ (KPa)}}$$

Figura 12: Ensayo de Fatiga.





### 3.5.5.- COMPRESIÓN UNIAXIAL REPETIDA (CREEP DINAMICO)

Este ensayo, se realiza para estimar el comportamiento ante las deformaciones plásticas. Un ciclo de carga consiste en la aplicación de una tensión durante 1 segundo seguido por 1 segundo de descanso, es decir, se emplearon ondas cuadráticas.

Se realiza a una temperatura de 40 °C, midiendo las deformaciones provocadas por 3600 repeticiones de cargas de 100 KPa. Según los criterios manejados en el laboratorio, bajo estas condiciones, una mezcla con un buen comportamiento a la deformación no deberá superar el valor de 1%.

**Figura 13: COMPRESIÓN UNIAXIAL REPETIDA (CREEP DINAMICO).**



## CAPÍTULO 4

### DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS OBTENIDOS

#### 4.1.- PLANTAS SELECCIONADA PARA ESTUDIO

Con el apoyo y disponibilidad de varias empresas constructoras de la región sierra del Ecuador, se obtuvo las muestras para la confección de las briquetas necesarias para este estudio. Las empresas seleccionadas fueron:

**Tabla 4: Selección de Plantas.**

Planta	Nombre	Ubicación	Observaciones
A	EQFALTOS	PICHINCHA	Mezcla de agregados triturados de ¾" de cantera Guangopolo con arena natural de mina San Joaquín (Sector Chasqui).
B	FOPECA	CAÑAR	Mezcla de agregados triturados de ¾" y ½" con arena de río. Todos proceden de materiales aluviales.
C	SANTA ROSA	COTOPAXI	Mezcla de agregados triturados de ½" con arena natural de mina. Todos del sector Mulaló.
D	EQFALTOS	PICHINCHA	Mezcla de agregados triturados de ¾" del sector Sangolquí con arena natural de mina Cutulagua.

#### 4.2.- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE BRIQUETAS

Terminada la confección de las briquetas bajo los procedimientos correspondientes, determinamos la geometría de cada briqueta con la ayuda del calibrador de Vernier.

Figura 14: Espesor con Calibrador de Vernier.



Tabla 5: Características Geométricas Planta A.

PLANTA	No. Muestra	Energía de compactación (Golpes)	Espesor (mm)
PLANTA A	1 - A - 35	35	66
	2 - A - 35	35	70
	3 - A - 35	35	70
	4 - A - 35	35	67
	5 - A - 35	35	72
	6 - A - 35	35	71
	1 - A - 50	50	66
	2 - A - 50	50	67
	3 - A - 50	50	66
	4 - A - 50	50	66
	5 - A - 50	50	66
	6 - A - 50	50	65
	1 - A - 75	75	66
	2 - A - 75	75	67
	3 - A - 75	75	68
	4 - A - 75	75	66
	5 - A - 75	75	66
	6 - A - 75	75	66

Tabla 6: Características Geométricas Planta B.

PLANTA	No. Muestra	Energía de compactación (Golpes)	Espesor (mm)
PLANTA B	1 - B - 35	35	66
	2 - B - 35	35	70
	3 - B - 35	35	70
	4 - B - 35	35	67
	5 - B - 35	35	72
	6 - B - 35	35	71
	1 - B - 50	50	66
	2 - B - 50	50	67
	3 - B - 50	50	66
	4 - B - 50	50	66
	5 - B - 50	50	66
	6 - B - 50	50	65
	1 - B - 75	75	66
	2 - B - 75	75	67
	3 - B - 75	75	68
	4 - B - 75	75	66
	5 - B - 75	75	66
	6 - B - 75	75	66

Tabla 7: Características Geométricas Planta C.

PLANTA	No. Muestra	Energía de compactación (Golpes)	Espesor (mm)
PLANTA C	1 - C - 35	35	67
	2 - C - 35	35	66
	3 - C - 35	35	63
	4 - C - 35	35	65
	5 - C - 35	35	67
	6 - C - 35	35	67
	1 - C - 50	50	65
	2 - C - 50	50	64
	3 - C - 50	50	66
	4 - C - 50	50	67
	5 - C - 50	50	68
	6 - C - 50	50	66
	1 - C - 75	75	66
	2 - C - 75	75	67
	3 - C - 75	75	69
	4 - C - 75	75	68
	5 - C - 75	75	66
	6 - C - 75	75	64

Tabla 8: Características Geométricas Planta D.

PLANTA	No. Muestra	Energía de compactación (Golpes)	Espesor (mm)
PLANTA D	1 - D - 35	35	66
	2 - D - 35	35	67
	3 - D - 35	35	67
	4 - D - 35	35	66
	5 - D - 35	35	66
	6 - D - 35	35	67
	1 - D - 50	50	65
	2 - D - 50	50	66
	3 - D - 50	50	64
	4 - D - 50	50	63
	5 - D - 50	50	66
	6 - D - 50	50	66
	1 - D - 75	75	65
	2 - D - 75	75	65
	3 - D - 75	75	66
	4 - D - 75	75	66
	5 - D - 75	75	67
	6 - D - 75	75	66

### 4.3.- CARACTERÍSTICAS DE PROPIEDADES CONVENCIONALES

#### 4.3.1.- EXTRACCIÓN Y PORCENTAJE DE ASFALTO EN BRIQUETAS

Procedemos a realizar la extracción de asfalto y determinar el porcentaje de asfalto en laboratorio a cada una de las plantas de estudio. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas.

Figura 15: Muestra Asfáltica



**Tabla 9: Extracción y Porcentaje de Asfalto Planta A.**

<b>PLANTA A</b>	
<b>PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO.</b>	
W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000.00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	8.50
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0.00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	928.00
F2. PESO DEL FILTRO DESPUÉS DE LA EXTRACCIÓN (gr):	10.20
W3B = F2 - F1	1.70
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	929.70
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	3.50
<b>% DE ASFALTO = <math>\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100</math></b>	<b>6.68</b>

**Tabla 10: Extracción y Porcentaje de Asfalto Planta B.**

<b>PLANTA B</b>	
<b>PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO.</b>	
W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000.00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	8.50
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0.00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	928.00
F2. PESO DEL FILTRO DESPUÉS DE LA EXTRACCIÓN (gr):	10.30
W3B = F2 - F1	1.80
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	929.80
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	3.50
<b>% DE ASFALTO = <math>\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100</math></b>	<b>6.67</b>

**Tabla 11: Extracción y Porcentaje de Asfalto Planta C.**

<b>PLANTA C</b>	
<b>PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO.</b>	
W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000.00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	8.30
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0.00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	927.00
F2. PESO DEL FILTRO DESPUÉS DE LA EXTRACCIÓN (gr):	10.00
W3B = F2 - F1	1.70
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	928.70
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	3.50
<b>% DE ASFALTO = <math>\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100</math></b>	<b>6.78</b>

**Tabla 12: Extracción y Porcentaje de Asfalto Planta D.**

<b>PLANTA D</b>	
<b>PRUEBA DE EXTRACCIÓN DE ASFALTO.</b>	
W1. PESO DE LA MUESTRA DE MEZCLA ASFÁLTICA (gr):	1000.00
F1. PESO DEL FILTRO ANTES DE LA EXTRACCIÓN (gr):	8.60
W2. CONTENIDO DE HUMEDAD (gr):	0.00
W3A. PESO DE AGREG. LAVADOS EN CENTRÍFUGA (gr):	932.00
F2. PESO DEL FILTRO DESPUÉS DE LA EXTRACCIÓN (gr):	10.00
W3B = F2 - F1	1.40
W3. PESO AGREG. INCLUYENDO FILTRO (gr) (W3A+W3B):	933.40
W4. PESO DE MATERIAL MINERAL EN EXTRACTO (gr):	3.50
<b>% DE ASFALTO = <math>\{[(W1-W2) - (W3+W4)] / (W1-W2)\} * 100</math></b>	<b>6.31</b>

#### 4.3.2.- GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS EXTRAÍDOS

En las siguientes tablas, podemos observar la diferente granulometría de agregados extraídos de cada una de las plantas de estudio acuerdo a la especificación 1/2" MOP – 001 F – 2002. TABLA 405 – 5.1.

Tabla 13: Granulometría en Agregado Extraídos Planta.

GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS EXTRAÍDOS. PLANTA A						
ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19.00	0.0	0.0	100.0	100	100
1/2"	12.70	160.0	17.0	83.0	90	100
# 4	4.75	400.0	43.0	57.0	44	74
# 8	2.36	524.0	56.0	44.0	28	58
# 50	0.30	793.0	85.0	15.0	5	21
# 200	0.10	903.0	97.0	3.0	2	10
FONDO	FONDO	933.2				

ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.

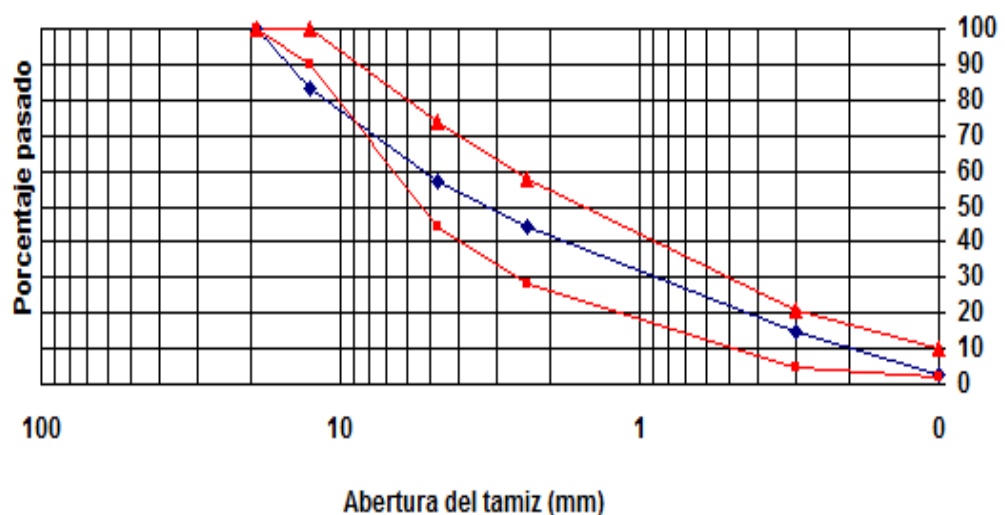




Tabla 14: Granulometría en Agregado Extraídos Planta B.

GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS EXTRAÍDOS. PLANTA B						
ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19.00	0.0	0.0	100.0	100	100
1/2"	12.70	40.0	4.0	96.0	90	100
# 4	4.75	370.0	40.0	60.0	44	74
# 8	2.36	530.0	57.0	43.0	28	58
# 50	0.30	854.0	92.0	8.0	5	21
# 200	0.10	912.0	98.0	2.0	2	10
FONDO	FONDO	933.3				

ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.

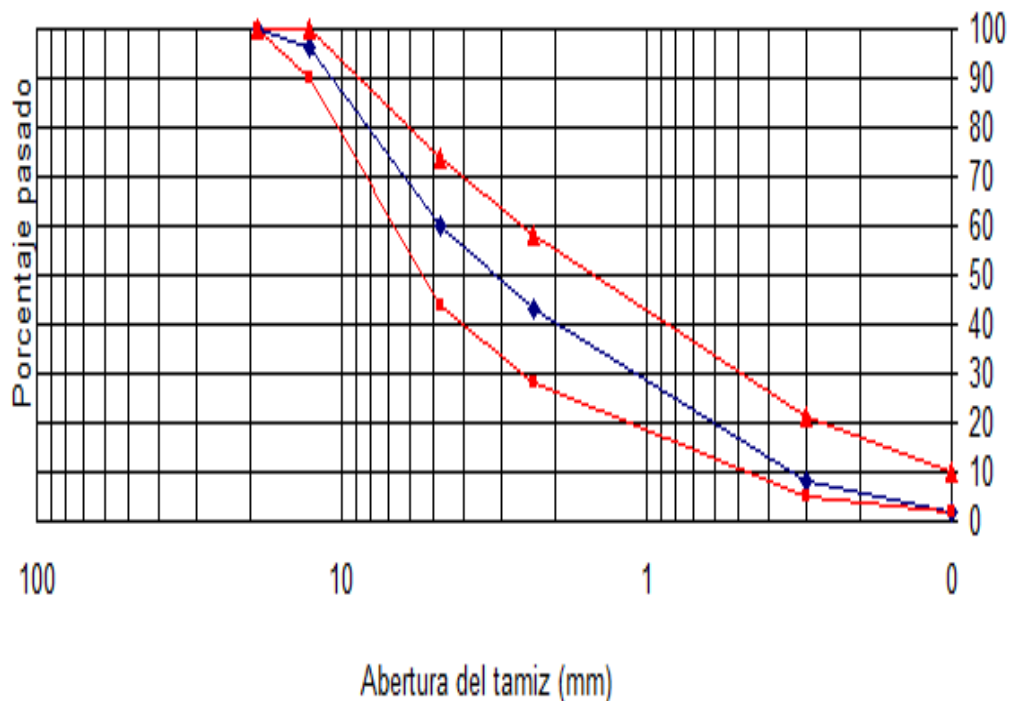


Tabla 15: Granulometría en Agregado Extraídos Planta C.

GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS EXTRAÍDOS. PLANTA C						
ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19.00	0.0	0.0	100.0	100	100
1/2"	12.70	80.0	9.0	91.0	90	100
# 4	4.75	275.0	30.0	70.0	44	74
# 8	2.36	400.0	43.0	57.0	28	58
# 50	0.30	773.0	83.0	17.0	5	21
# 200	0.10	896.0	97.0	3.0	2	10
FONDO	FONDO	932.2				

ESPECIFICACIÓN: 1/2" MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.

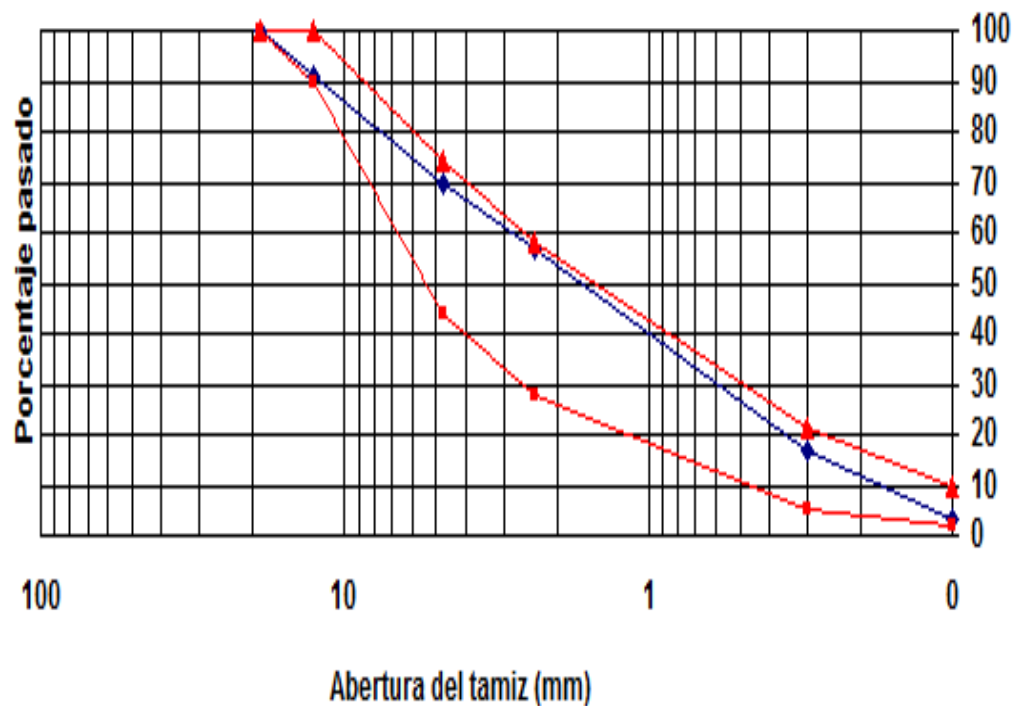
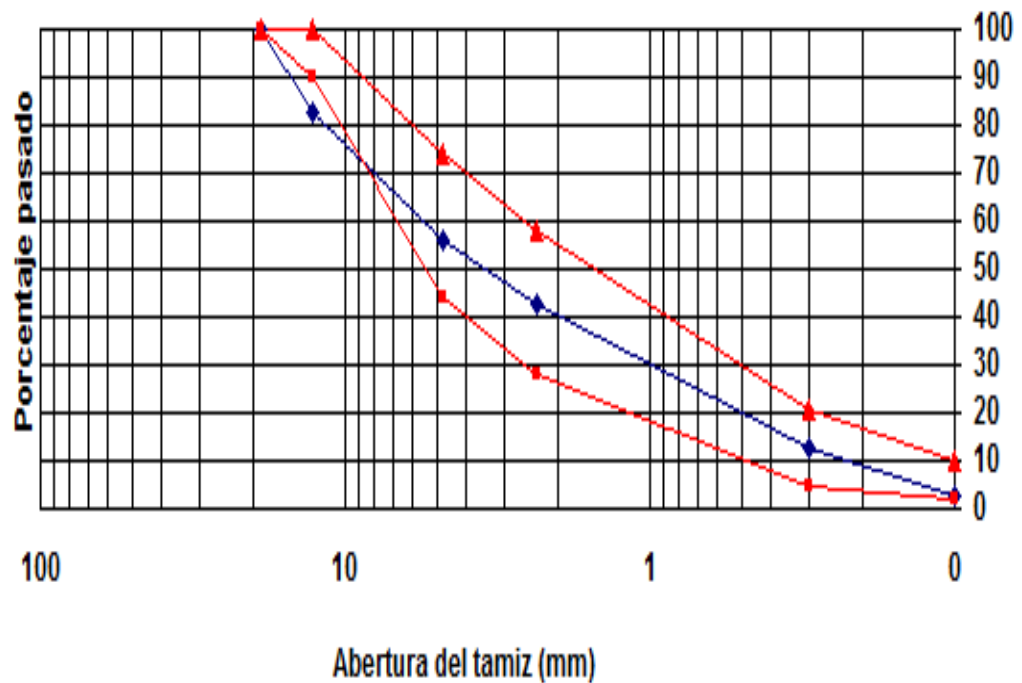


Tabla 16: Granulometría en Agregado Extraídos Planta D.

GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS EXTRAÍDOS. PLANTA D						
ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19.00	0.0	0.0	100.0	100	100
1/2"	12.70	161.0	17.0	83.0	90	100
# 4	4.75	408.0	44.0	56.0	44	74
# 8	2.36	531.0	57.0	43.0	28	58
# 50	0.30	808.0	87.0	13.0	5	21
# 200	0.10	908.0	97.0	3.0	2	10
FONDO	FONDO	936.9				

ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.



#### 4.3.3.- DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA (ENSAYO RICE)

Siguiendo las normas ASTM D 2041 Y AASHTO T 209, determinamos la densidad máxima teórica de las mezclas asfálticas, empleando el ensayo RICE.

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

Tabla 17: Ensayo RICE Planta A.

ENSAYO RICE. PLANTA A		
A: PESO DEL FRASCO + AGUA	3094.0	gr
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL	3672.0	gr
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA	1000.0	gr
<b>RICE = C / [A - (B - C)] =</b>	<b>2.370</b>	

Tabla 18: Ensayo RICE Planta B.

ENSAYO RICE PLANTA B		
A: PESO DEL FRASCO + AGUA	3098.0	gr
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL	3688.0	gr
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA	1000.0	gr
<b>RICE = C / [A - (B - C)] =</b>	<b>2.439</b>	

Tabla 19: Ensayo RICE Planta C.

ENSAYO RICE. PLANTA C		
A: PESO DEL FRASCO + AGUA	3096.0	gr
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL	3664.0	gr
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA	1000.0	gr
<b>RICE = C / [A - (B - C)] =</b>	<b>2.315</b>	

Tabla 20: Ensayo RICE Planta D.

ENSAYO RICE. PLANTA D		
A: PESO DEL FRASCO + AGUA	3095.0	gr
B: PESO DEL FRASCO + AGUA + MATERIAL	3673.0	gr
C: PESO DE LA MEZCLA SUELTA	1000.0	gr
<b>RICE = C / [A - (B - C)] =</b>	<b>2.370</b>	

#### 4.3.4.- DENSIDAD O GRAVEDAD ESPECÍFICA “BULK” Y PORCENTAJE DE VACÍOS

De acuerdo al procedimiento de las normas ASTM D 1188 Y AASHTO T275, determinamos peso en aire, peso en agua y peso superficialmente seco. Registramos y calculamos volumen, gravedad específica y porcentaje de vacíos.

**Tabla 21: Parámetros Volumétricos Densidad y Porcentaje de Vacíos Planta A.**

<b>CONTROL DE PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS EN BRIQUETAS</b>									
<b>PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS: DENSIDAD Y % DE VACÍOS</b>									
<b>PLANTA A</b>									
Energía de Compactación	Briquetas	Pesos			Volumen	Densidad	Vacíos	Promedios	
		Peso en Aire Pa (gr)	Peso en Agua Pag (gr)	Peso Super. Seco Psss (gr)	(cm³)	Gravedad Esp. Bulk	en Mezcla %	Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)
35	1 - A - 35	1164.4	637.4	1166.3	528.9	2.202	7.09	2.203	7.02
	2 - A - 35	1218.5	665.9	1224.0	558.1	2.183	7.86		
	3 - A - 35	1239.7	685.9	1242.2	556.3	2.228	5.96		
	4 - A - 35	1169.9	638.4	1172.6	534.2	2.190	7.58		
	5 - A - 35	1279.9	704.0	1282.6	578.6	2.212	6.65		
	6 - A - 35	1234.1	679.8	1239.5	559.7	2.205	6.95		
50	1 - A - 50	1192.3	662.9	1195.0	532.1	2.241	5.44	2.235	5.67
	2 - A - 50	1187.5	654.4	1190.0	535.6	2.217	6.44		
	3 - A - 50	1189.4	657.4	1191.2	533.8	2.228	5.97		
	4 - A - 50	1196.8	666.0	1198.8	532.8	2.246	5.21		
	5 - A - 50	1208.0	667.4	1209.0	541.6	2.230	5.88		
	6 - A - 50	1189.0	661.4	1190.0	528.6	2.249	5.08		
75	1 - A - 75	1201.0	672.3	1204.0	531.7	2.259	4.68	2.268	4.28
	2 - A - 75	1220.0	678.8	1221.0	542.2	2.250	5.05		
	3 - A - 75	1252.0	699.6	1252.2	552.6	2.266	4.39		
	4 - A - 75	1213.7	680.8	1214.0	533.2	2.276	3.94		
	5 - A - 75	1228.0	691.6	1229.0	537.4	2.285	3.57		
	6 - A - 75	1205.0	676.1	1206.0	529.9	2.274	4.04		

Figura 16: Porcentaje de Vacíos Promedio Planta A.

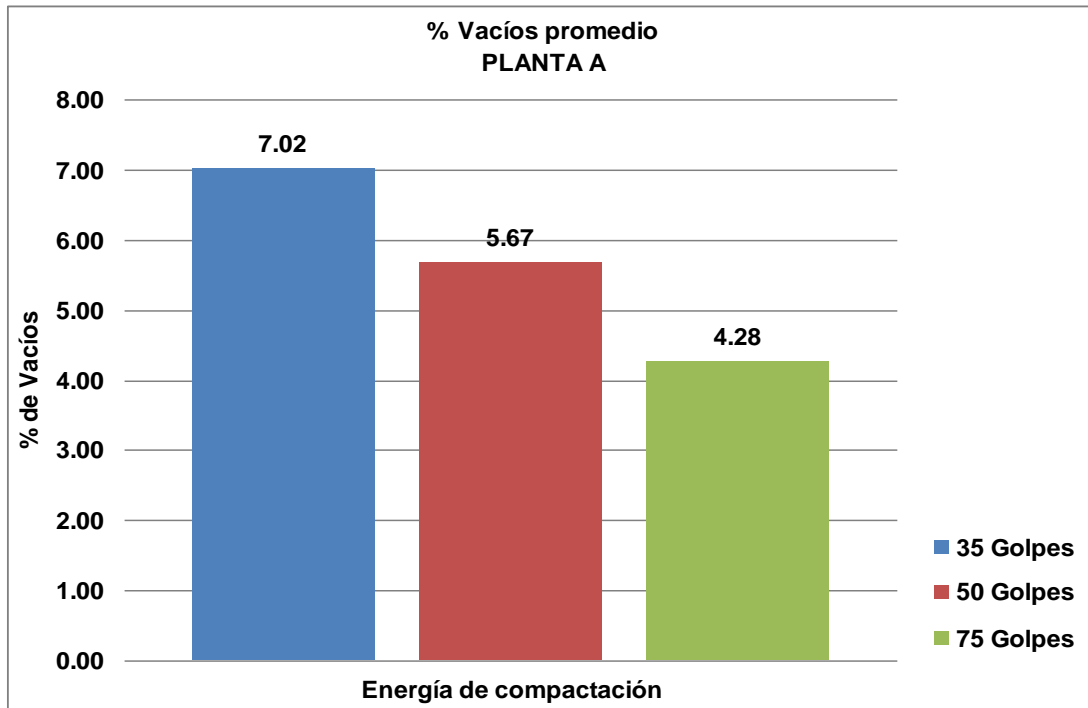
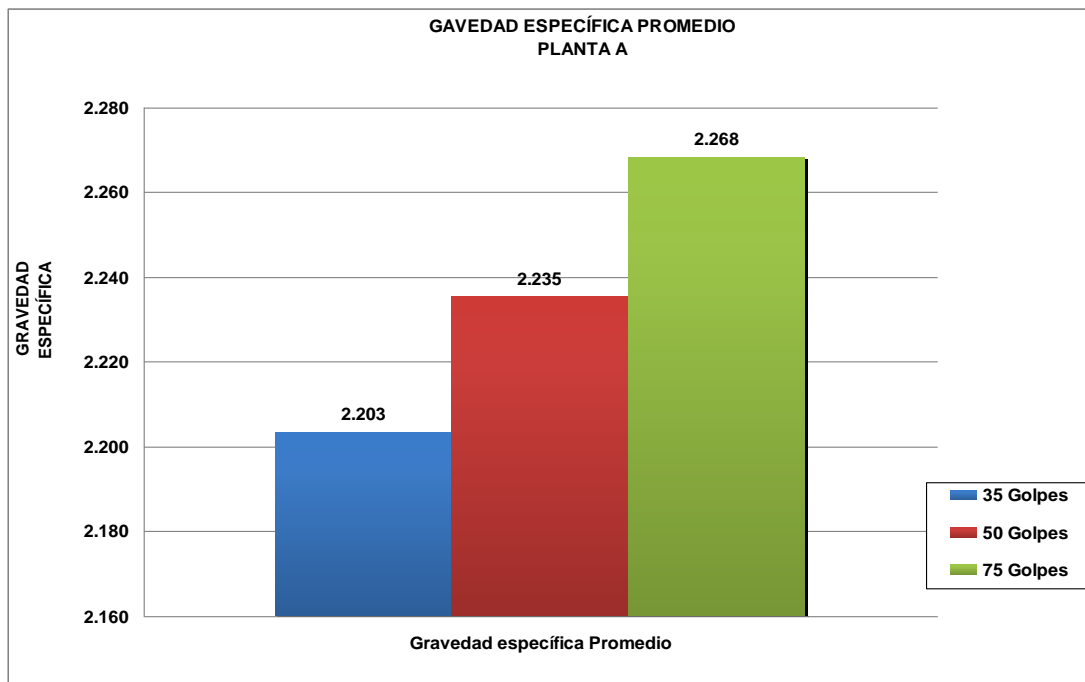


Figura 17: Gravedad Específica Promedio Planta A.



**Tabla 22: Parámetros Volumétricos Densidad y Porcentaje de Vacíos Planta B.**

<b>CONTROL DE PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS EN BROQUETAS</b>									
<b>PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS: DENSIDAD Y % DE VACÍOS</b>									
<b>PLANTA B</b>									
<b>Energía de Compactación</b>	<b>Briquetas</b>	<b>Pesos</b>			<b>Volumen (cm³)</b>	<b>Densidad</b>	<b>Vacios</b>	<b>Promedios</b>	
		<b>Peso en Aire Pa (gr)</b>	<b>Peso en Agua Pag (gr)</b>	<b>Peso Super. Seco Psss (gr)</b>		<b>Gravedad Esp. Bulk</b>	<b>en mezcla (%)</b>	<b>Gravedad Esp. Bulk</b>	<b>Vacios en mezcla (%)</b>
35	1 - B - 35	1200.5	681.4	1207.0	525.6	2.284	6.35	2.288	6.17
	2 - B - 35	1261.0	714.5	1266.8	552.3	2.283	6.39		
	3 - B - 35	1206.4	679.5	1210.0	530.5	2.274	6.76		
	4 - B - 35	1183.6	669.4	1186.2	516.8	2.290	6.10		
	5 - B - 35	1264.6	717.0	1266.2	549.2	2.303	5.59		
	6 - B - 35	1284.2	728.2	1287.4	559.2	2.296	5.84		
50	1 - B - 50	1198.7	682.2	1200.0	517.8	2.315	5.09	2.314	5.13
	2 - B - 50	1200.1	683.4	1201.0	517.6	2.319	4.94		
	3 - B - 50	1202.7	687.4	1205.5	518.1	2.321	4.82		
	4 - B - 50	1310.8	747.0	1314.4	567.4	2.310	5.28		
	5 - B - 50	1223.2	693.5	1223.4	529.9	2.308	5.36		
	6 - B - 50	1342.0	762.0	1343.0	581.0	2.310	5.30		
75	1 - B - 75	1239.0	707.2	1240.0	532.8	2.325	4.66	2.329	4.53
	2 - B - 75	1222.1	697.4	1226.0	528.6	2.312	5.21		
	3 - B - 75	1122.1	642.4	1124.0	481.6	2.330	4.47		
	4 - B - 75	1149.7	657.7	1150.0	492.3	2.335	4.25		
	5 - B - 75	1090.8	627.6	1093.0	465.4	2.344	3.90		
	6 - B - 75	1263.6	723.6	1267.0	543.4	2.325	4.66		



Figura 18: Porcentaje de Vacíos Promedio Planta B.

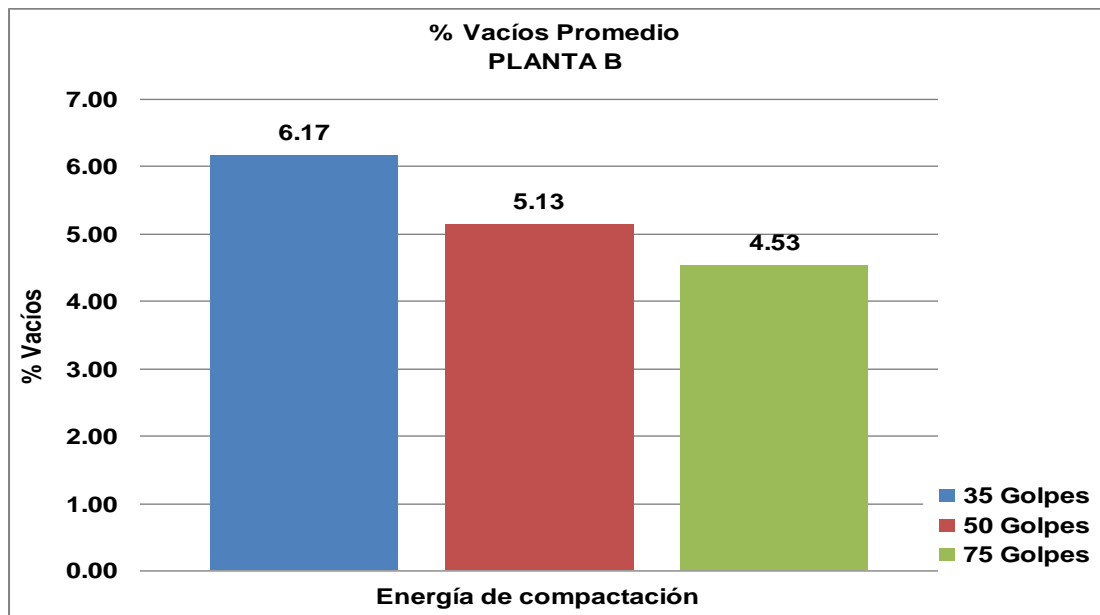
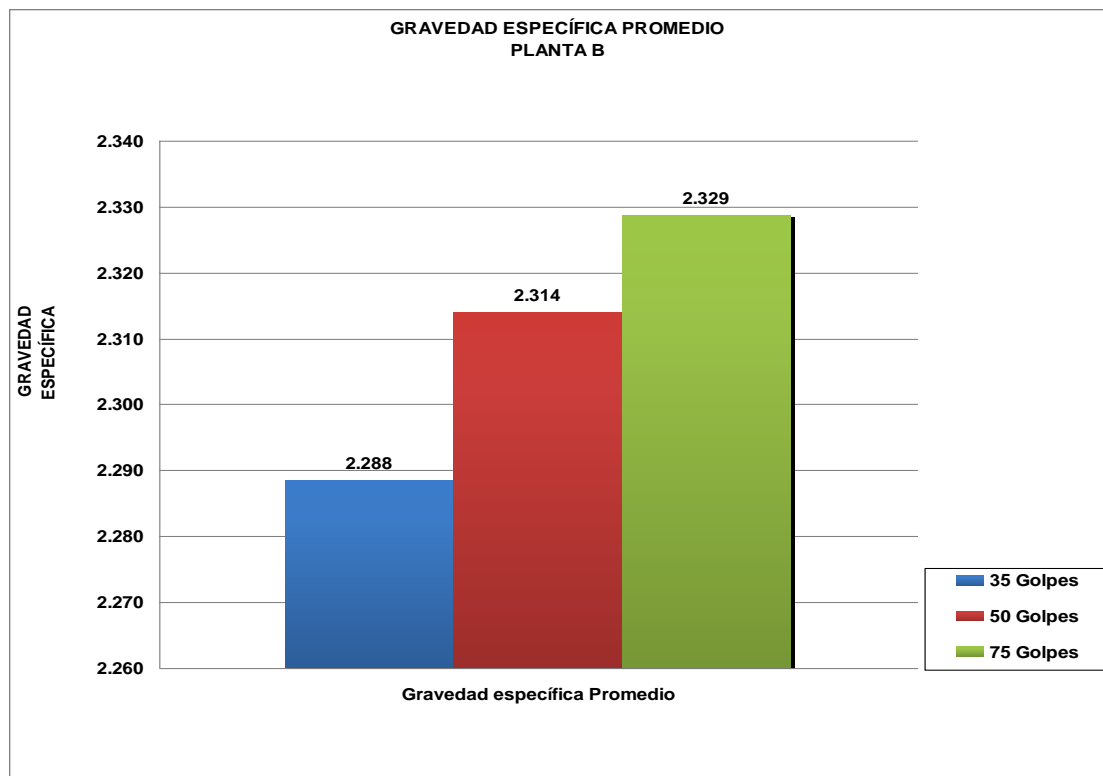


Figura 19: Gravedad Específica Promedio Planta B.



**Tabla 23: Parámetros Volumétricos Densidad y Porcentaje de Vacíos Planta C.**

<b>CONTROL DE PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS EN BRIQUETAS</b>									
<b>PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS: DENSIDAD Y % DE VACÍOS</b>									
<b>PLANTA C</b>									
<b>Energía de Compactación</b>	<b>Briquetas</b>	<b>Pesos</b>			<b>Volumen (cm³)</b>	<b>Densidad</b>	<b>Vacíos</b>	<b>Promedios</b>	
		<b>Peso en Aire Pa (gr)</b>	<b>Peso en Agua Pag (gr)</b>	<b>Peso Super. Seco Psss (gr)</b>		<b>Gravedad Esp. en mezcla</b>	<b>Gravedad Esp. Bulk</b>	<b>en mezcla (%)</b>	<b>Vacíos en mezcla (%)</b>
						<b>Bulk</b>			
35	1 - C - 35	1165.1	634.4	1165.6	531.2	2.193	5.25	2.186	5.56
	2 - C - 35	1148.9	624.1	1149.4	525.3	2.187	5.52		
	3 - C - 35	1096.2	594.3	1096.8	502.5	2.181	5.76		
	4 - C - 35	1127.1	610.7	1127.4	516.7	2.181	5.77		
	5 - C - 35	1181.0	643.7	1181.7	538.0	2.195	5.17		
	6 - C - 35	1148.9	621.8	1149.4	527.6	2.178	5.93		
50	1 - C - 50	1153.1	630.7	1153.4	522.7	2.206	4.70	2.214	4.35
	2 - C - 50	1127.3	619.5	1127.5	508.0	2.219	4.14		
	3 - C - 50	1158.9	634.0	1159.2	525.2	2.207	4.68		
	4 - C - 50	1192.3	656.1	1192.6	536.5	2.222	3.99		
	5 - C - 50	1208.8	663.7	1209.2	545.5	2.216	4.27		
	6 - C - 50	1169.8	641.7	1170.0	528.3	2.214	4.34		
75	1 - C - 75	1186.5	654.1	1186.6	532.5	2.228	3.74	2.222	4.01
	2 - C - 75	1188.0	651.5	1188.1	536.6	2.214	4.36		
	3 - C - 75	1219.1	669.6	1219.3	549.7	2.218	4.19		
	4 - C - 75	1205.1	664.4	1205.3	540.9	2.228	3.75		
	5 - C - 75	1177.3	650.1	1177.4	527.3	2.233	3.55		
	6 - C - 75	1134.2	621.7	1134.5	512.8	2.212	4.45		

Figura 20: Porcentaje de Vacíos Promedio Planta C.

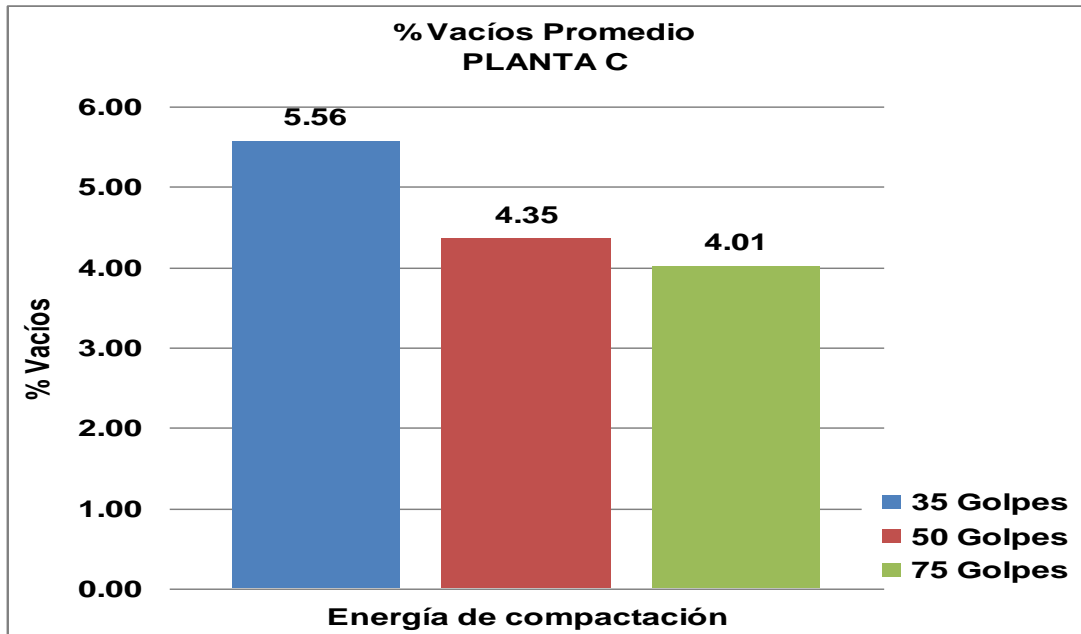
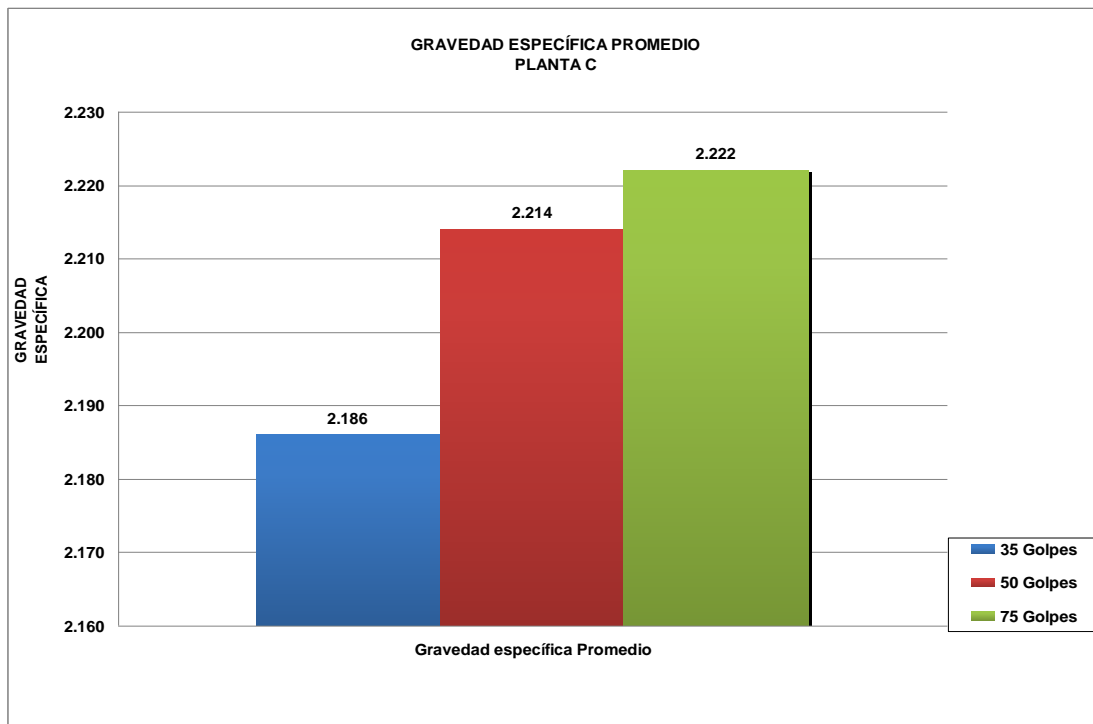


Figura 21: Gravedad Específica Promedio Planta C.



**Tabla 24: Parámetros Volumétricos Densidad y Porcentaje de Vacíos Planta D.**

CONTROL DE PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS EN BRIQUETAS									
PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS: DENSIDAD Y % DE VACÍOS									
PLANTA D									
Energía de Compactación	Briquetas	Pesos			Volumen (cm³)	Densidad	Vacíos	Promedios	
		Peso en Aire Pa (gr)	Peso en Agua Pag (gr)	Peso Super. Seco Psss (gr)		Gravedad Esp. Bulk	en mezcla (%)	Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)
		35	1 - D - 35	1149.0	630.0	1154.8	524.8	2.189	7.61
2 - D - 35	1182.7	658.1	1188.1	530.0	2.232	5.83			
3 - D - 35	1179.9	653.7	1183.9	530.2	2.225	6.09			
4 - D - 35	1153.6	633.4	1158.0	524.6	2.199	7.20			
5 - D - 35	1162.9	644.6	1167.6	523.0	2.224	6.17			
6 - D - 35	1198.5	667.0	1202.1	535.1	2.240	5.48			
50	1 - D - 50	1159.1	643.4	1162.6	519.2	2.232	5.79	2.249	5.11
2 - D - 50	1181.1	656.5	1185.1	528.6	2.234	5.71			
3 - D - 50	1161.8	652.5	1163.9	511.4	2.272	4.13			
4 - D - 50	1138.9	637.9	1140.7	502.8	2.265	4.41			
5 - D - 50	1183.5	659.5	1187.1	527.6	2.243	5.34			
6 - D - 50	1190.8	663.6	1194.1	530.5	2.245	5.27			
75	1 - D - 75	1183.5	661.7	1185.0	523.3	2.262	4.56	2.266	4.38
2 - D - 75	1170.2	656.8	1172.6	515.8	2.269	4.26			
3 - D - 75	1186.5	663.3	1190.2	526.9	2.252	4.97			
4 - D - 75	1185.4	662.6	1187.2	524.6	2.260	4.64			
5 - D - 75	1223.2	688.1	1224.5	536.4	2.280	3.77			
6 - D - 75	1185.8	665.6	1187.4	521.8	2.273	4.10			

Figura 22: Porcentaje de Vacíos Promedio Planta D.

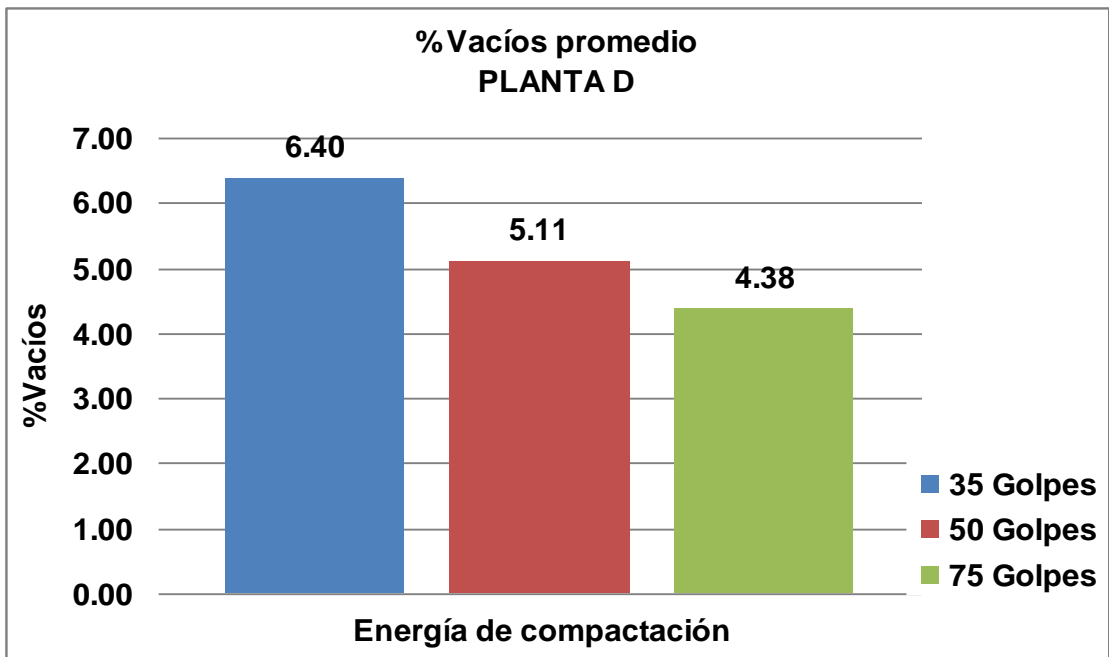
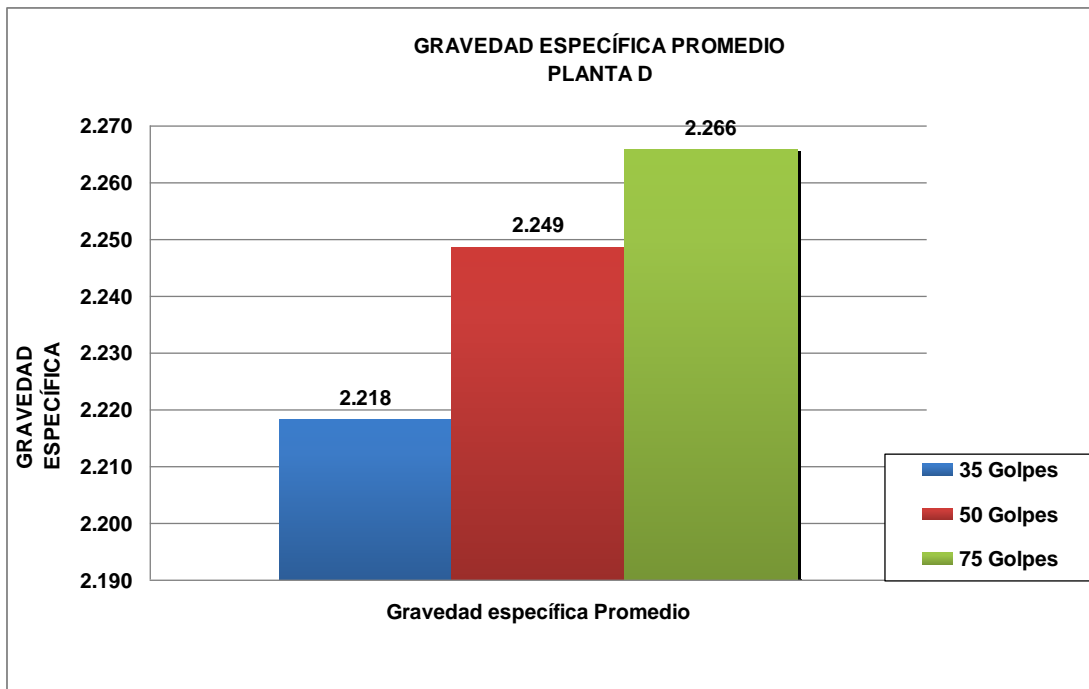


Figura 23: Gravedad Específica Promedio Planta D.



#### **4.4.- CARACTERÍSTICAS DE PRUEBAS DE DESEMPEÑO O REOLÓGICAS**

##### **4.4.1.- MÓDULO DE RIGIDEZ POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA**

Utilizando Nottingham Asphalt Tester (NAT) modelo NU – 10, en el laboratorio de carreteras de la UCSG, procedemos a realizar los ensayos de módulo por carga controlada y fatiga, con los programas correspondientes, con temperatura de 20°C.

**Figura 24: Nottingham Asphalt Tester (NAT).**



**Tabla 25: Módulo de Rigidez por Carga Controlada y Fatiga Planta A.**

MÓDULO POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA						
PLANTA A						
Energía de Compactación No. Golpes	MUESTRA No.	CARGA (Kpa) $\sigma$	MÓDULO (Mpa) M	No. REPETICIONES N	DEFORMACIÓN CALCULADA $\epsilon$	TEMPERATURA (°c) T
35 Golpes	6-A-35	400	2079	885	394	20°
	2-A-35	300	2167	1601	284	20°
	1-A-35	200	3654	19474	112	20°
50 Golpes	6-A-50	400	2491	2167	329	20°
	1-A-50	300	2831	8420	217	20°
	2-A-50	250	2908	23352	176	20°
75 Golpes	6-A-75	500	2961	960	346	20°
	5-A-75	400	3279	4193	250	20°
	1-A-75	300	3066	21352	201	20°

Figura 25: Carga - Repeticiones

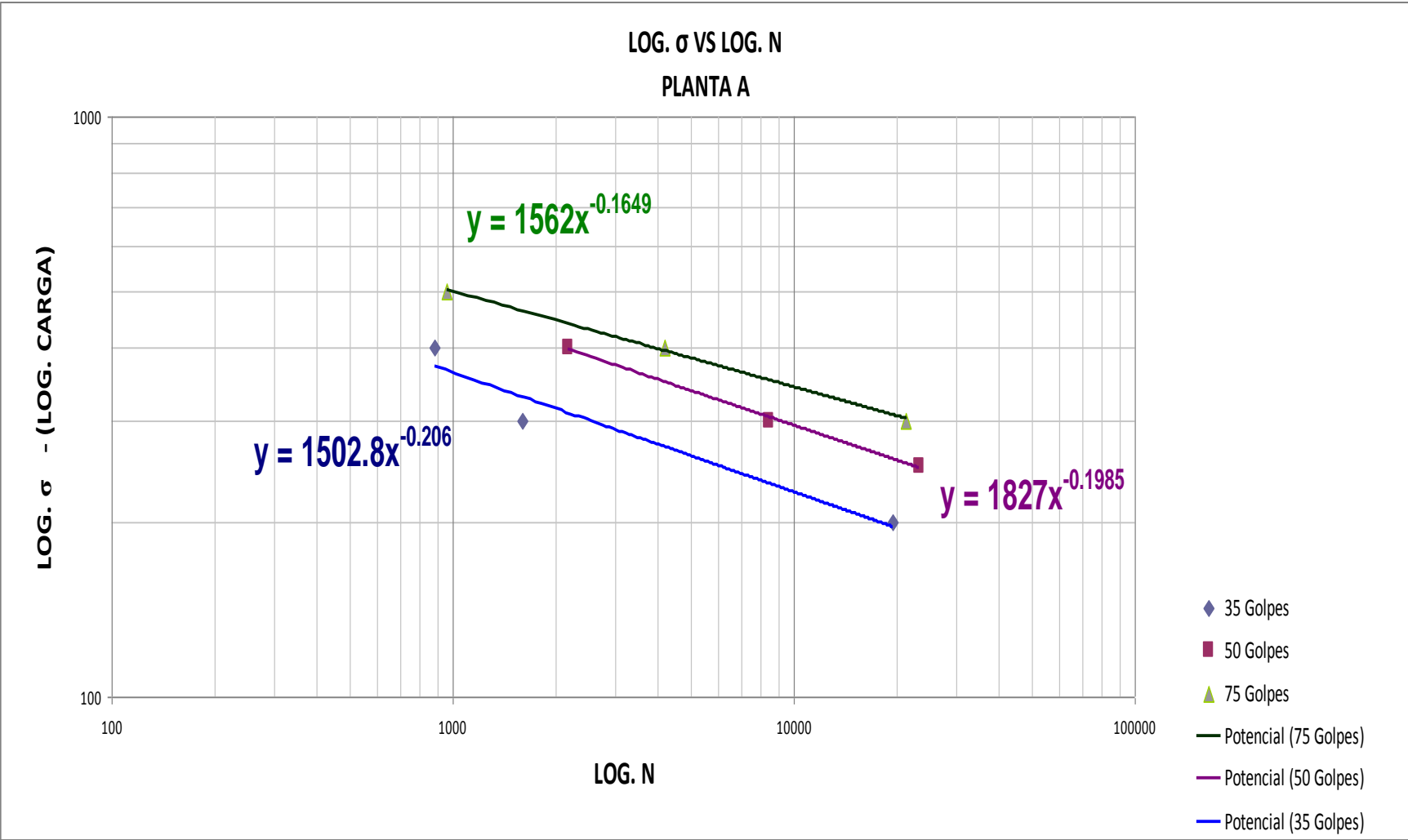
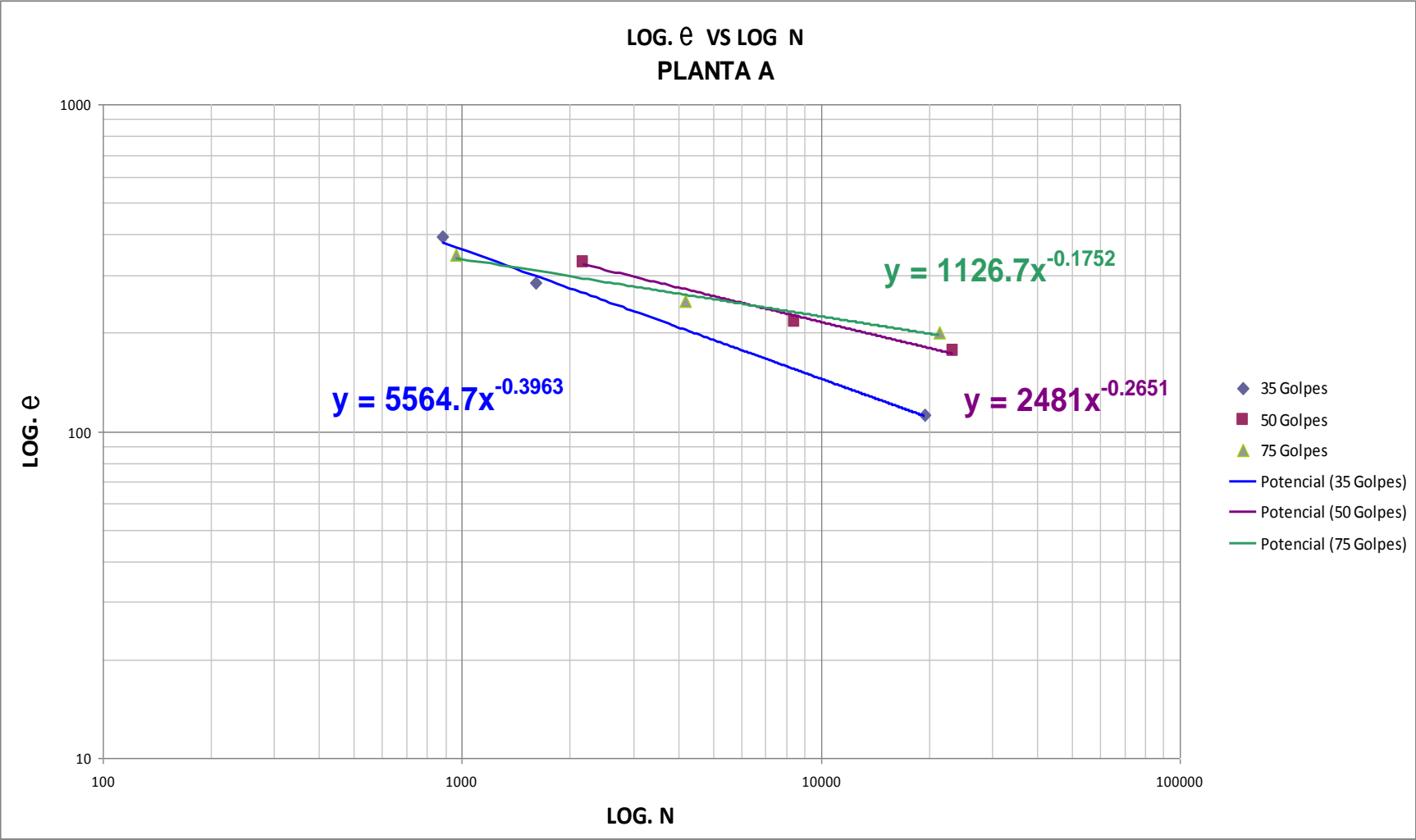




Figura 26: Deformación - Repeticiones.



**Tabla 26: Módulo de Rigidez por Carga Controlada y Fatiga Planta B.**

MÓDULO POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA PLANTA B						
Energía de Compactación No. Golpes	MUESTRA No.	CARGA (Kpa) $\sigma$	MÓDULO (Mpa) M	No. REPETICIONES N	DEFORMACIÓN CALCULADA $\epsilon$	TEMPERATURA (°c) T
35 Golpes	6-B-35	400	1118	326	733	20°
	4-B-35	300	1477	1910	416	20°
	2-B-35	200	1116	5935	367	20°
50 Golpes	5-B-50	400	1475	798	556	20°
	3-B-50	300	1707	2842	360	20°
	1-B-50	200	2304	15421	178	20°
75 Golpes	5-B-75	400	1766	1647	464	20°
	1-B-75	300	1874	4015	328	20°
	2-B-75	200	1783	21120	230	20°

Figura 27: Carga - Repeticiones.

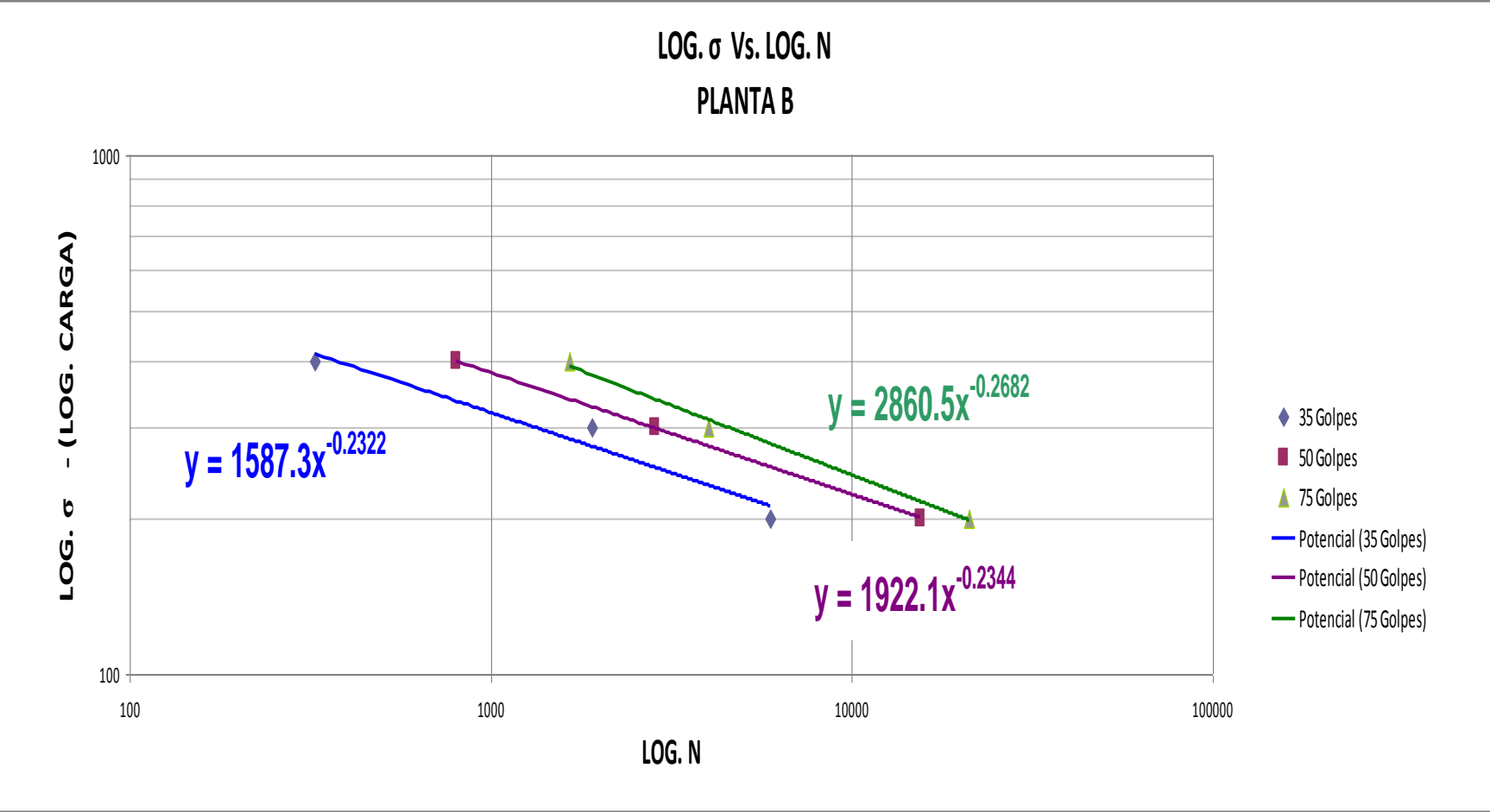
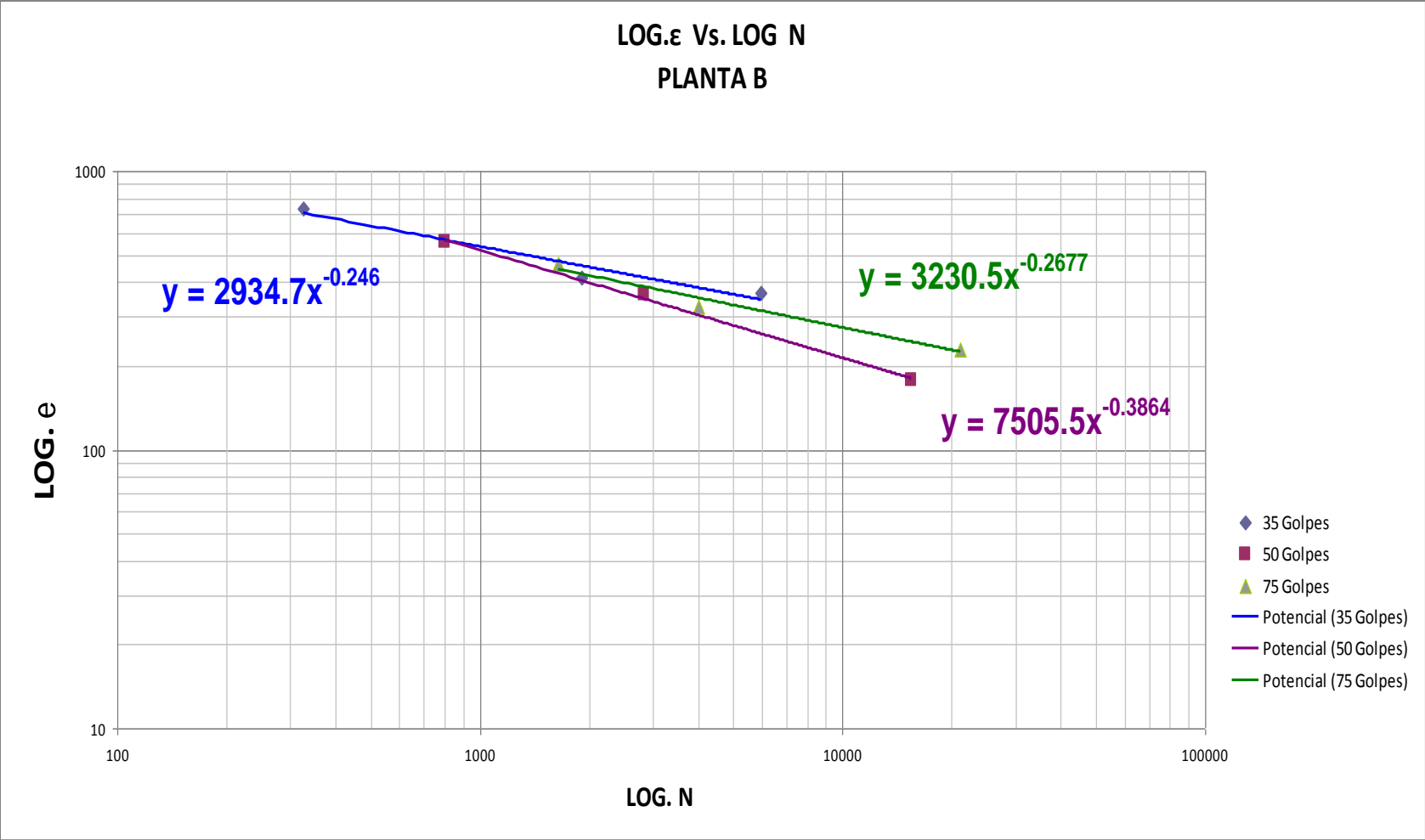


Figura 28: Deformación - Repeticiones.



**Tabla 27: Módulo de Rigidez por Carga Controlada y Fatiga Planta C.**

MÓDULO POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA PLANTA C						
Energía de Compactación No. Golpes	MUESTRA No.	CARGA (Kpa) $\sigma$	MÓDULO (Mpa) M	No. REPETICIONES N	DEFORMACIÓN CALCULADA e	TEMPERATURA (°c) T
35 Golpes	5-C-35	500	1878	612	546	20°
	4-C-35	400	1761	2714	466	20°
	1-C-35	300	2080	10461	296	20°
50 Golpes	5-C-50	500	2367	1748	433	20°
	4-C-50	400	2235	5148	367	20°
	2-C-50	300	1903	13192	323	20°
75 Golpes	5-C-75	500	2289	1835	448	20°
	4-C-75	400	1966	4134	417	20°
	1-C-75	350	2665	10510	269	20°

Figura 29: Carga - Repeticiones.

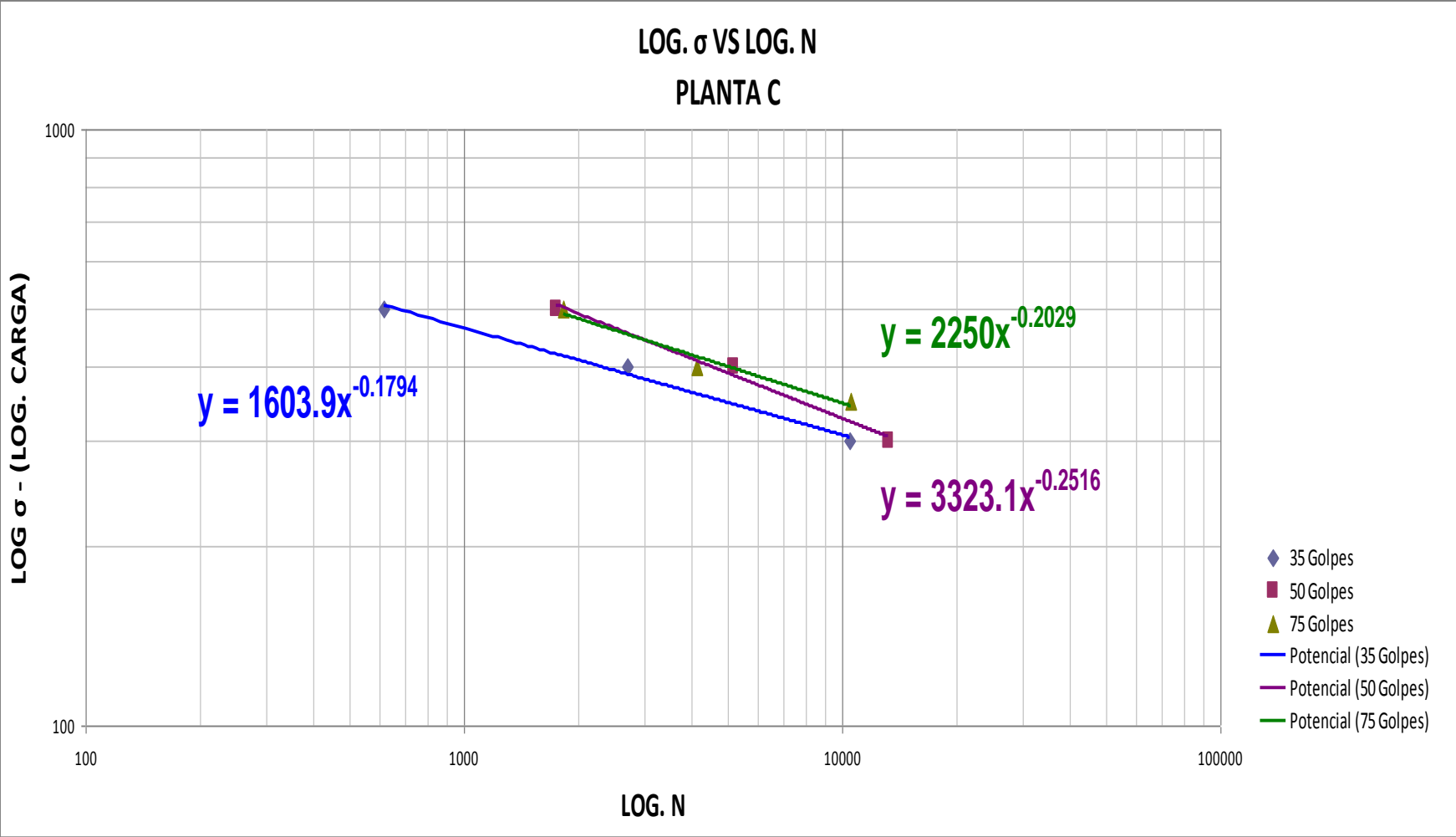
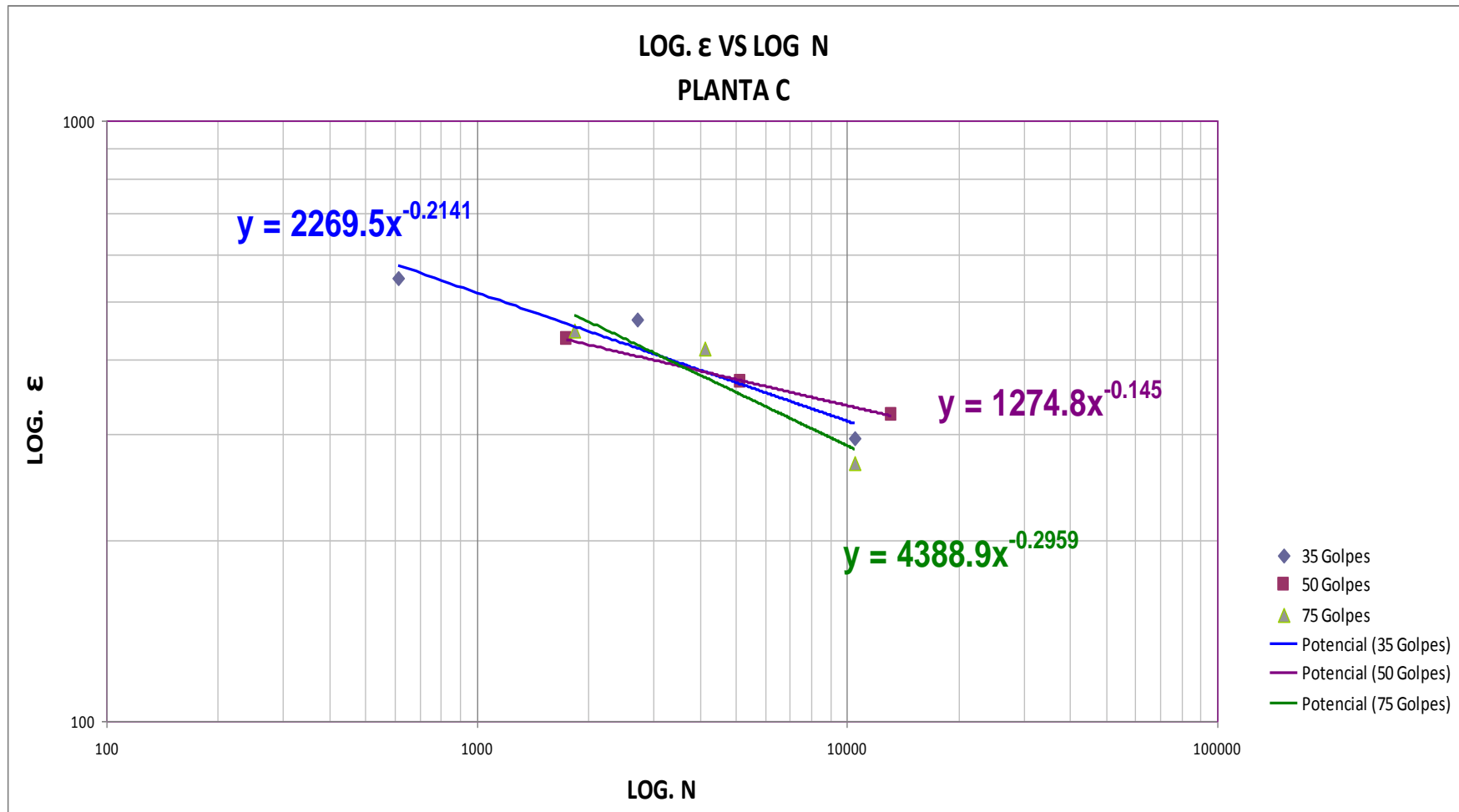


Figura 30: Deformación – Repeticiones.



**Tabla 28: Módulo de Rigidez por Carga Controlada y Fatiga Planta D.**

MÓDULO POR CARGA CONTROLADA Y FATIGA PLANTA D						
Energía de Compactación No. Golpes	MUESTRA No.	CARGA (Kpa) $\sigma$	MÓDULO (Mpa) M	No. REPETICIONES N	DEFORMACIÓN CALCULADA $\epsilon$	TEMPERATURA (°c) T
35 Golpes	3-D-35	400	1870	460	439	20°
	2-D-35	300	2779	3546	221	20°
	6-D-35	200	2726	59450	150	20°
50 Golpes	4-D-50	400	3127	1502	262	20°
	3-D-50	300	2444	5041	252	20°
	2-D-50	200	3391	23670	121	20°
75 Golpes	6-D-75	500	3641	1266	282	20°
	5-D-75	400	5185	6066	158	20°
	1-D-75	300	3736	8541	165	20°



Figura 31: Carga - Repeticiones.

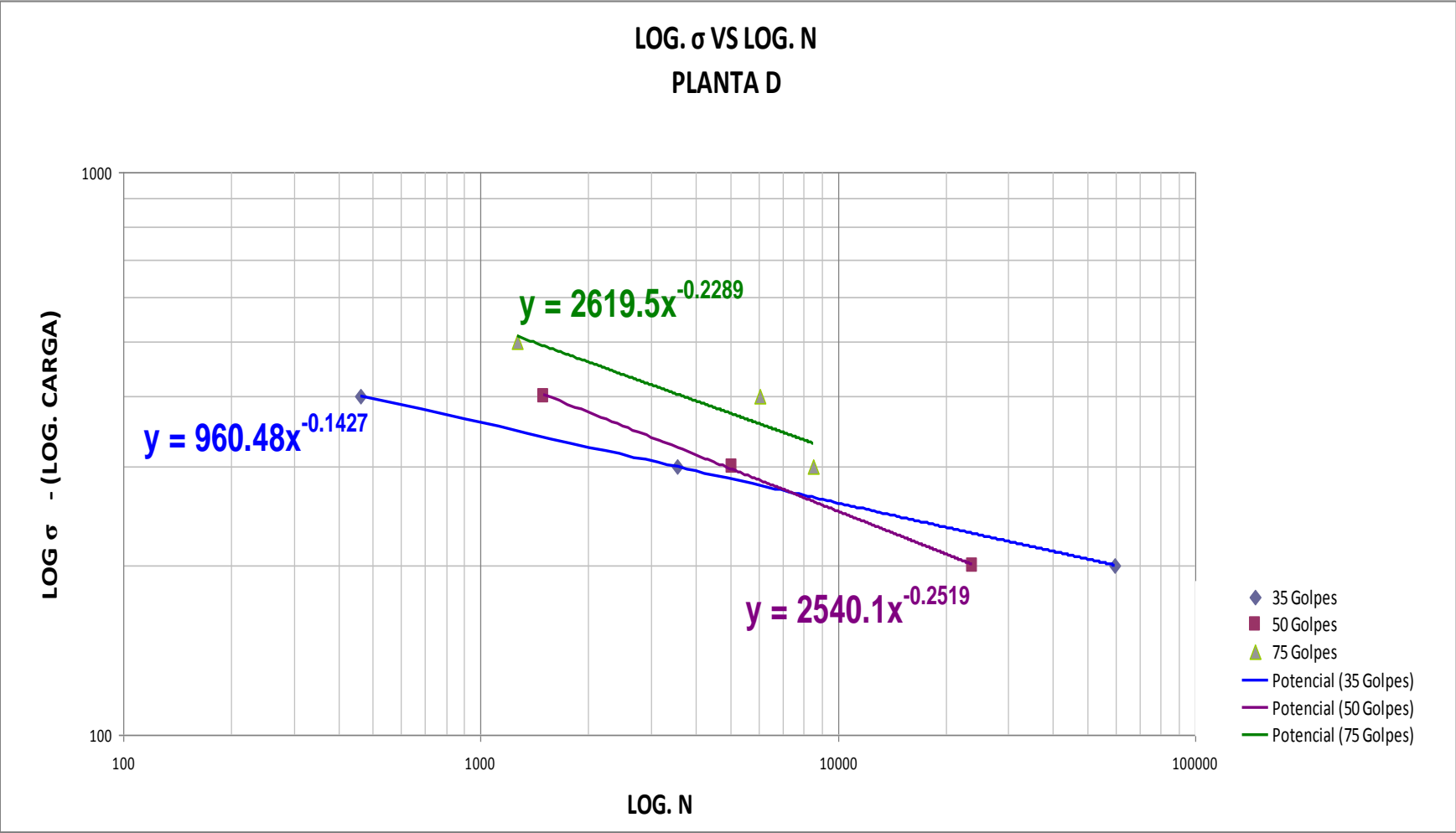


Figura 32: Deformación - Repeticiones.

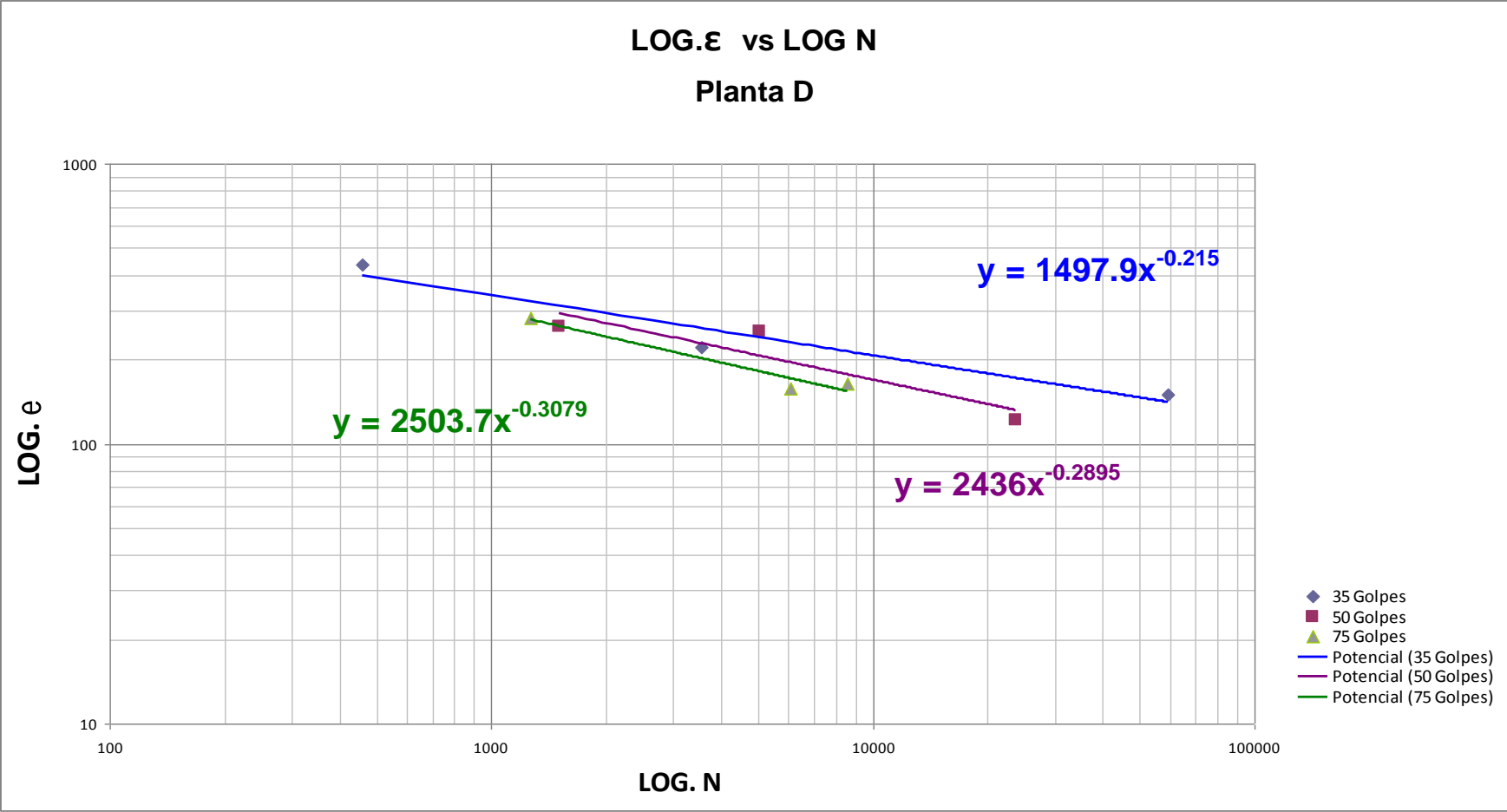


Figura 33: Relación Carga – Repeticiones (75 Golpes).

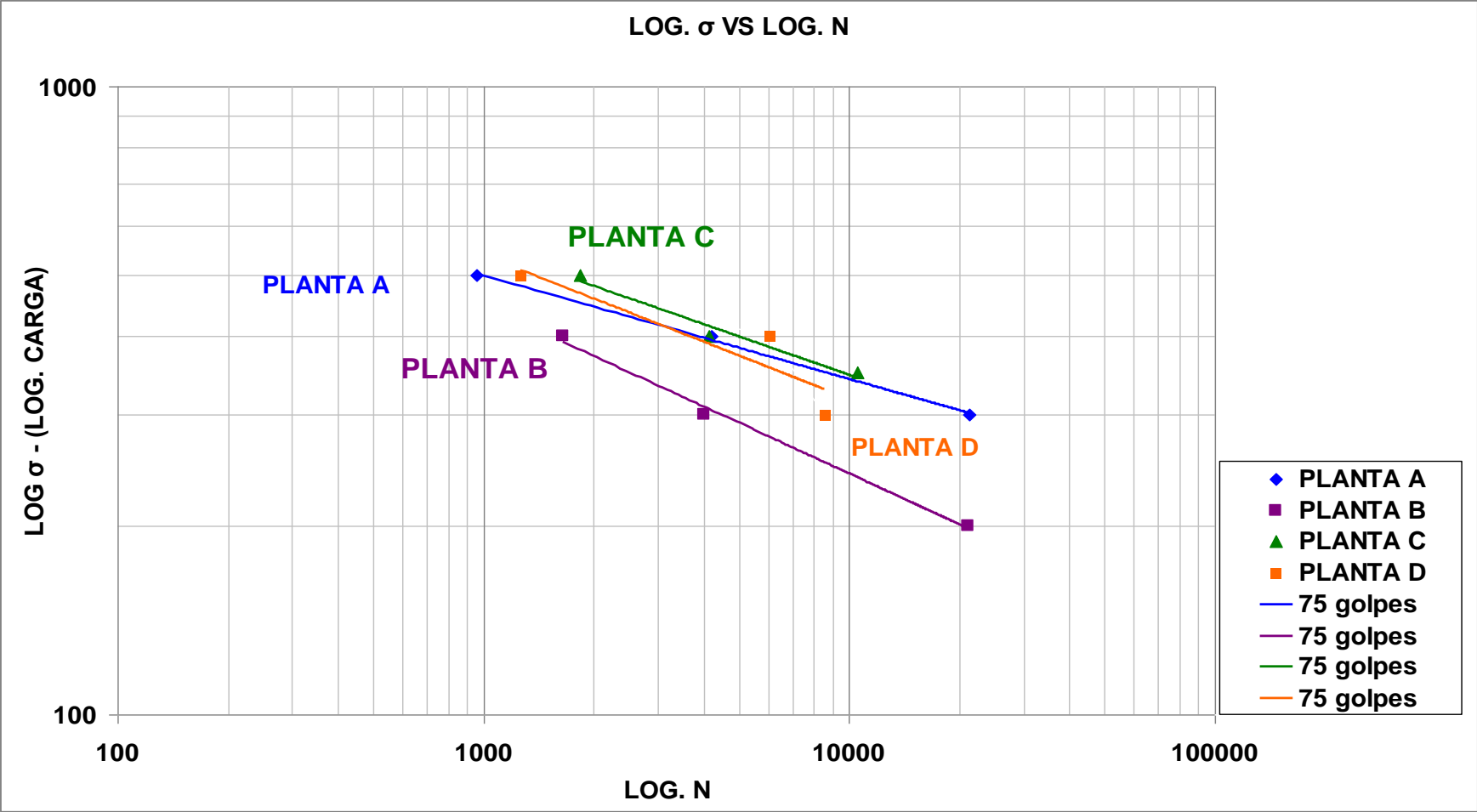
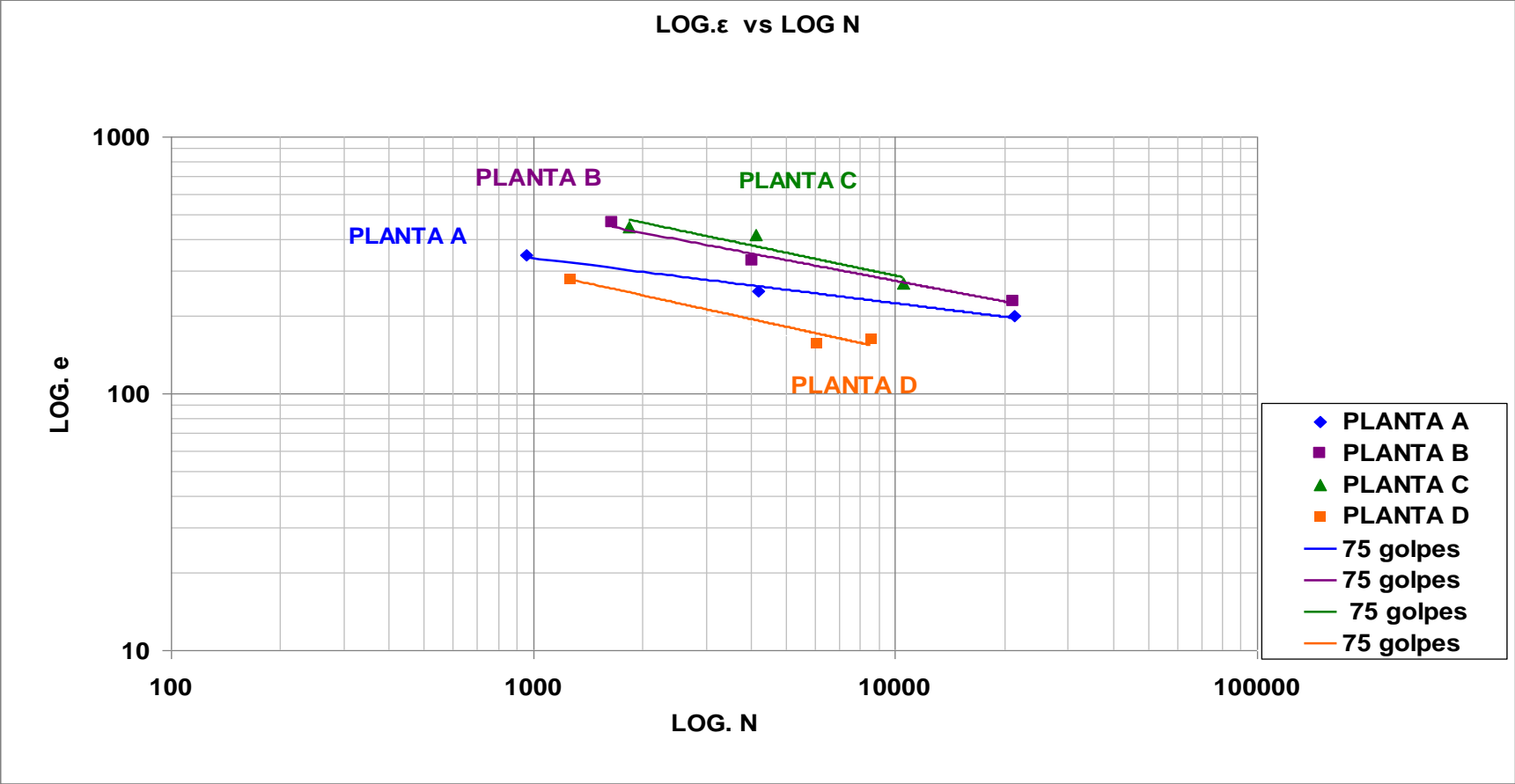


Figura 34: Relación Deformación – Repeticiones (75 golpes).



#### 4.4.2.- MÓDULO DE RIGIDEZ POR DEFORMACION CONTROLADA

Este ensayo se lo realiza a una temperatura de 20°C en el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT). Los resultados obtenidos se los muestra en la tabla siguiente.

Tabla 29: Módulo de Rigidez por Deformación Controlada.

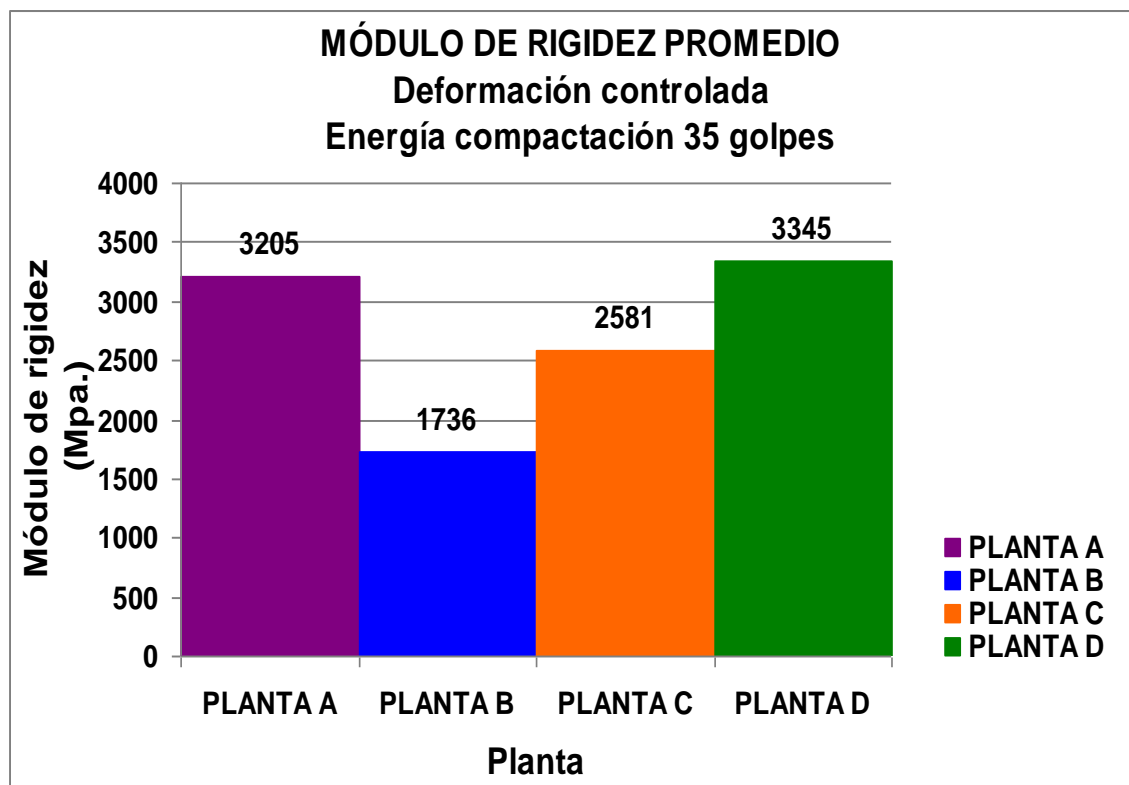
PLANTA	ENERGIA DE COMPACTACION	MODULO RIGIDEZ (MPa)
Planta A	35	3072
		3337
	50	3726
		3880
	75	3921
		4724
Planta B	35	1882
		1590
	50	1904
		1918
	75	2115
		1931
Planta C	35	2505
		2657
	50	2757
		2574
	75	2843
		2695
Planta D	35	3380
		3309
	50	3770
		4221
	75	4209
		4116

Promedio de módulo de rigidez por deformación controlada con energía de compactación de 35 golpes.

Tabla 30: Módulo de Rigidez Promedio 35 Golpes.

Planta	M1-35	M2-35	Promedio 35
PLANTA A	3072	3337	3205
PLANTA B	1882	1590	1736
PLANTA C	2505	2657	2581
PLANTA D	3380	3309	3345

Figura 35: Módulo de Rigidez Promedio 35 Golpes.

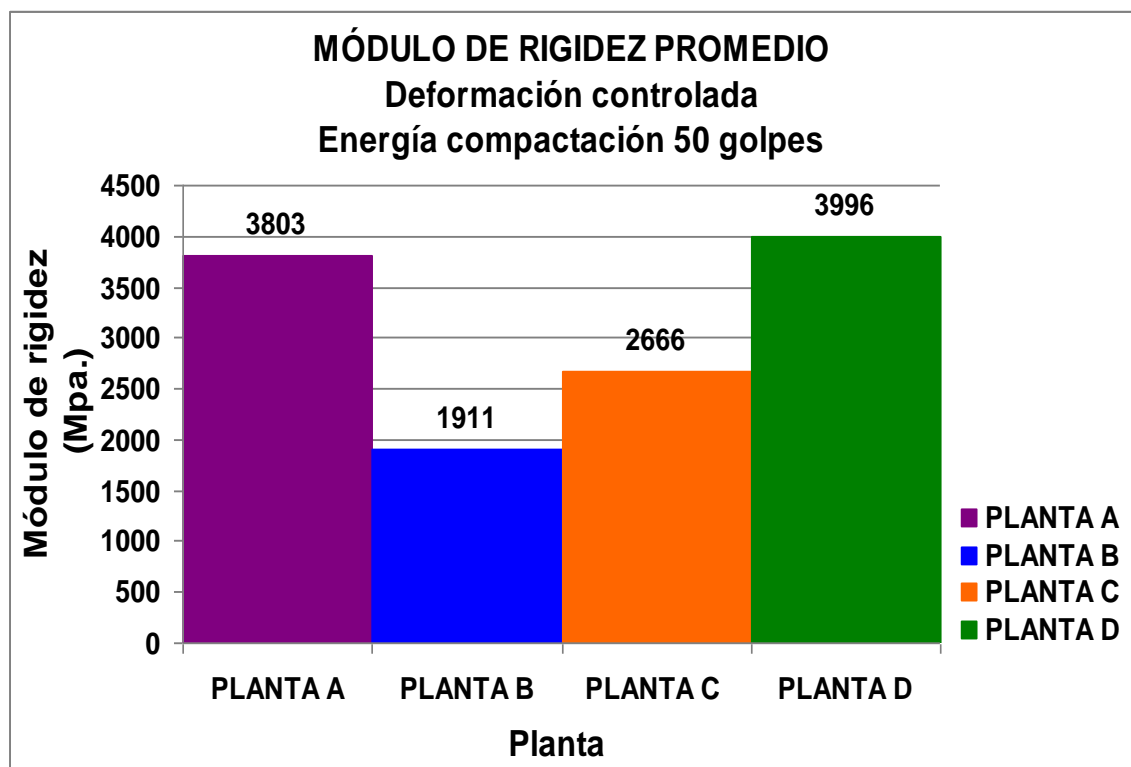


Promedio de módulo de rigidez por deformación controlada con energía de compactación de 50 golpes.

Tabla 31: Módulo de Rigidez Promedio 50 golpes.

Planta	M1-50	M2-50	Promedio 50
PLANTA A	3726	3880	3803
PLANTA B	1904	1918	1911
PLANTA C	2757	2574	2666
PLANTA D	3770	4221	3996

Figura 36: Módulo de Rigidez Promedio 50 golpes.

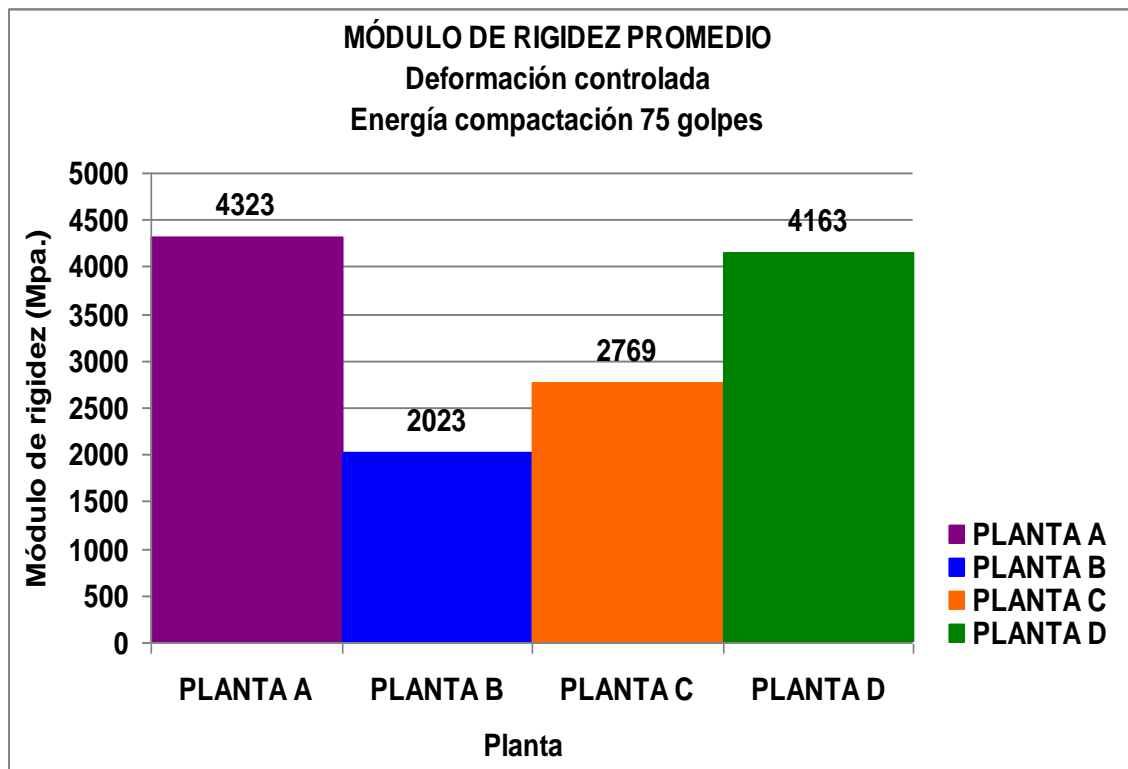


Promedio de módulo de rigidez por deformación controlada con energía de compactación de 75 golpes.

Tabla 32: Módulo de Rigidez Promedio 75 golpes.

Planta	M1-75	M2-75	Promedio 75
PLANTA A	3921	4724	4323
PLANTA B	2115	1931	2023
PLANTA C	2843	2695	2769
PLANTA D	4209	4116	4163

Figura 37: Módulo de Rigidez Promedio 75 golpes.





#### 4.4.3.- DEFORMACIÓN PERMANENTE (CREEP DINAMICO)

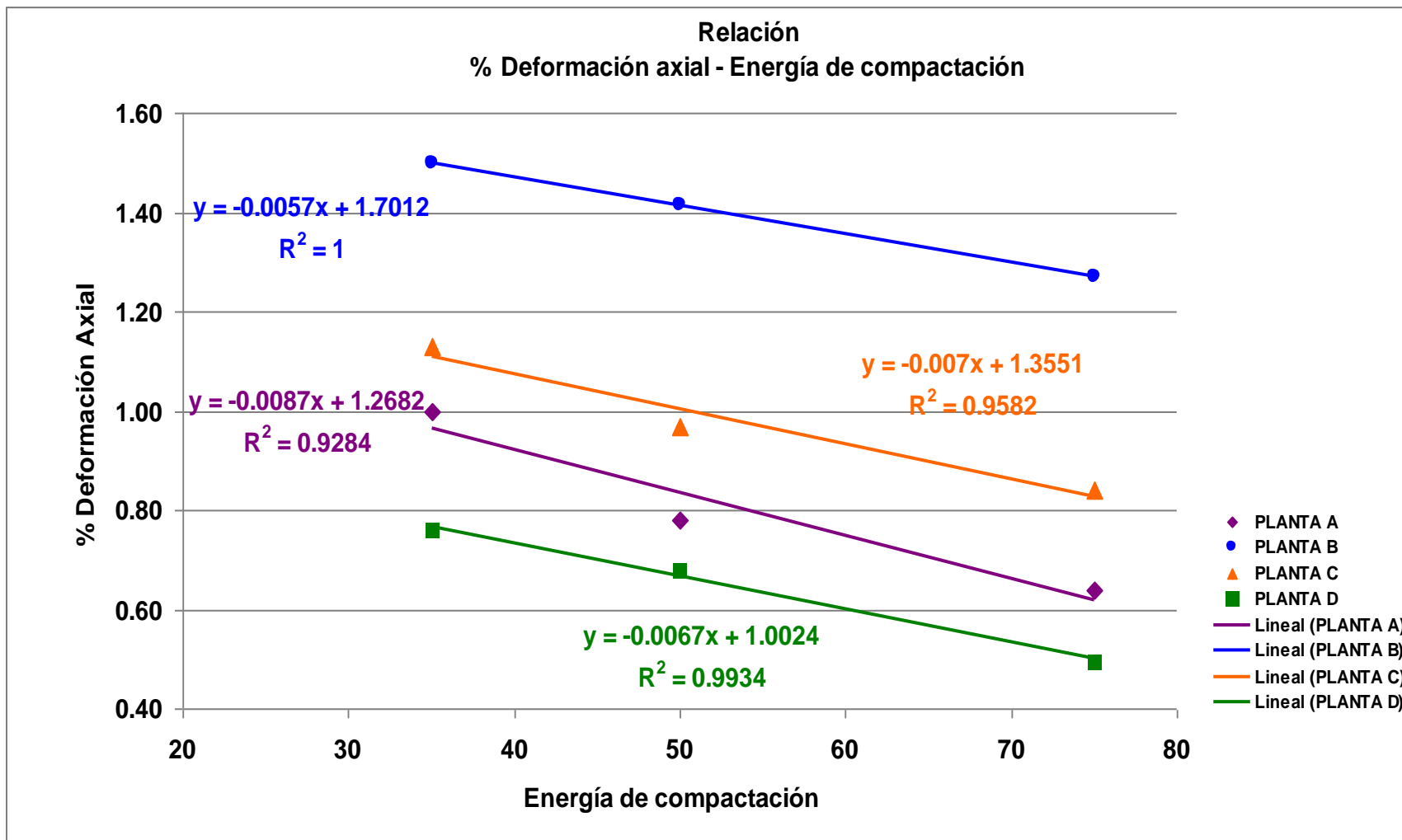
A diferencia del módulo de rigidez por deformación controlada, módulo de rigidez por carga controlada y fatiga, es que este ensayo se lo realiza con una temperatura de 40°C.

Tabla 33: Deformación Permanente.

Ensayo Creep Dinámico			
Porcentaje de deformación axial.			
PLANTA	Energía de Compactación		
	35	50	75
Planta A	1.00	0.78	0.64
Planta B	1.50	1.41	1.27
Planta C	1.13	0.97	0.84
Planta D	0.76	0.68	0.50

\*Todos los valores representan Porcentaje de deformación axial.

Figura 38: % Deformación Axial – Energía De Compactación.



## CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1.- PORCENTAJE DE ASFALTO EN BRIQUETAS

Tabla 34: Resultados de Porcentaje de Asfalto.

<b>Porcentaje de Asfalto</b>		
<b>Planta</b>	<b>% Asfalto Óptimo</b>	<b>% Asfalto experimental</b>
Planta A	6.6%	6.7%
Planta B	6.3%	6.7%
Planta C	6.4%	6.8%
Planta D	6.1%	6.3%

Los porcentajes de asfalto experimental son aproximados a los porcentajes de asfalto óptimos de diseño, dato proporcionado por cada planta de estudio, la diferencia no es mayor a 0.4% entre los porcentajes experimentales de estudio y óptimos de diseño, se acepta los resultados.

### 5.2.- GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS EXTRAÍDOS

Observando en las tablas 13, 14, 15 y 16 correspondientes a las curvas granulométricas de cada planta estudiada, cumplen con los requerimientos establecidos por el MTOP.

### 5.3.- DENSIDAD MAXIMA TEORICA (ENSAYO RICE)

Tabla 35: Resultados de Densidad Máxima Teórica.

<b>Densidad teórica máxima</b>	
<b>Planta</b>	<b>Ensayo RICE</b>
PLANTA A	2.370
PLANTA B	2.439
PLANTA C	2.315
PLANTA D	2.370

Las densidades de cada una de las plantas, están dentro de los rangos 2.2 – 2.6 permisibles para una densidad máxima teórica.

Siendo la planta B una densidad mayor de 2.439 y la planta C una densidad menor de 2.315.

### 5.4.- DENSIDAD O GRAVEDAD ESPECÍFICA “BULK”

Tabla 36: Resultados de Gravedad Específica.

<b>Gravedad específica "Bulk" o Densidad</b>			
<b>Planta</b>	<b>Energía de Compactación</b>		
	<b>35</b>	<b>50</b>	<b>75</b>
PLANTA A	2.203	2.235	2.268
PLANTA B	2.288	2.314	2.329
PLANTA C	2.186	2.214	2.222
PLANTA D	2.218	2.249	2.266

Los resultados obtenidos de gravedad específica a cada una de las plantas de estudio, se observa que a medida que aumenta la energía de compactación, va aumentando la densidad.

## 5.5.- PORCENTAJE DE VACÍOS

Tabla 37: Resultados de Porcentaje de Vacíos.

Porcentaje de vacíos			
Planta	Energía de Compactación		
	35	50	75
PLANTA A	7.02%	5.67%	4.28%
PLANTA B	6.17%	5.13%	4.53%
PLANTA C	5.56%	4.35%	4.01%
PLANTA D	6.40%	5.11%	4.38%

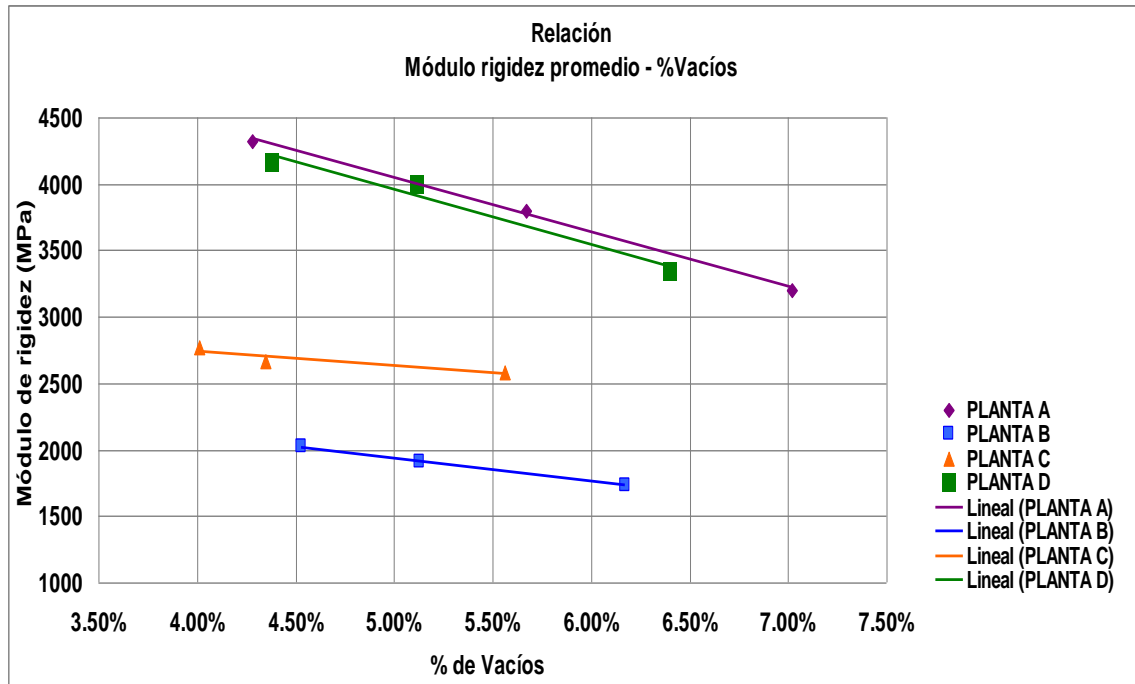
A medida que va aumentando la energía de compactación, el porcentaje de vacíos disminuye como se observa en la tabla 37.

## 5.6.- MÓDULO DE RIGIDEZ POR DEFORMACIÓN CONTROLADA

Tabla 38: Resultados de Módulo de Rigidez Promedio.

Relación Módulo rigidez promedio y porcentaje de vacíos						
Planta	Energía de compactación					
	35		50		75	
	Modulo Rigidez Promedio (MPa)	% Vacíos	Modulo Rigidez Promedio (MPa)	% Vacíos	Modulo Rigidez Promedio (MPa)	% Vacíos
PLANTA A	3205	7.02%	3803	5.67%	4323	4.28%
PLANTA B	1736	6.17%	1911	5.13%	2023	4.53%
PLANTA C	2581	5.56%	2666	4.35%	2769	4.01%
PLANTA D	3345	6.40%	3996	5.11%	4163	4.38%

Figura 39: Módulo de Rigidez Promedio - % Vacíos.



En la tabla 38, observamos que a mayor energía de compactación el módulo de rigidez aumenta y disminuye el porcentaje de vacíos. Este efecto ocurre en las plantas A, B, C y D como se aprecia en la figura 39.

Una buena mezcla asfáltica debidamente compacta debe originar módulos superiores a los 3000 MPa, de acuerdo a la práctica internacional. Entre 3000 y 2000 MPa, el comportamiento es variable y por debajo de los 2000 MPa es inadecuada.

Las Plantas A y D, los resultados son satisfactorios para una buena compactación de 75 golpes, la planta B y C el resultado del comportamiento es variable.

Para una compactación de 50 golpes, las plantas A y D arrojan módulos aceptables mayores de 3000MPa, con %vacíos aceptados en obra, la planta C el comportamiento es variable y la planta B es inadecuada.

## 5.7.- ENSAYO DE FATIGA

En las tablas 25, 26, 27 y 28 observamos los resultados obtenidos a cada una de las plantas de estudio, aquellas mezclas bajo una carga aplicada 200 y 300 KPa, ofrecen módulos mayores, que corresponden menores

deformaciones por tracción, según la formula 
$$\varepsilon = \frac{\sigma (KPa) (1 + 3\mu)}{Sm(KPa)}$$
 y el mayor número de repeticiones para llegar al fallo, es decir la mejor respuesta a la fatiga, mayor a 5mm.

En las figuras 25, 27, 29 y 31 de Carga vs. Repeticiones observamos que todas las muestras con energía de compactación 75 golpes, corresponden a las rectas de ajustes que se encuentran más desplazadas hacia la parte superior.

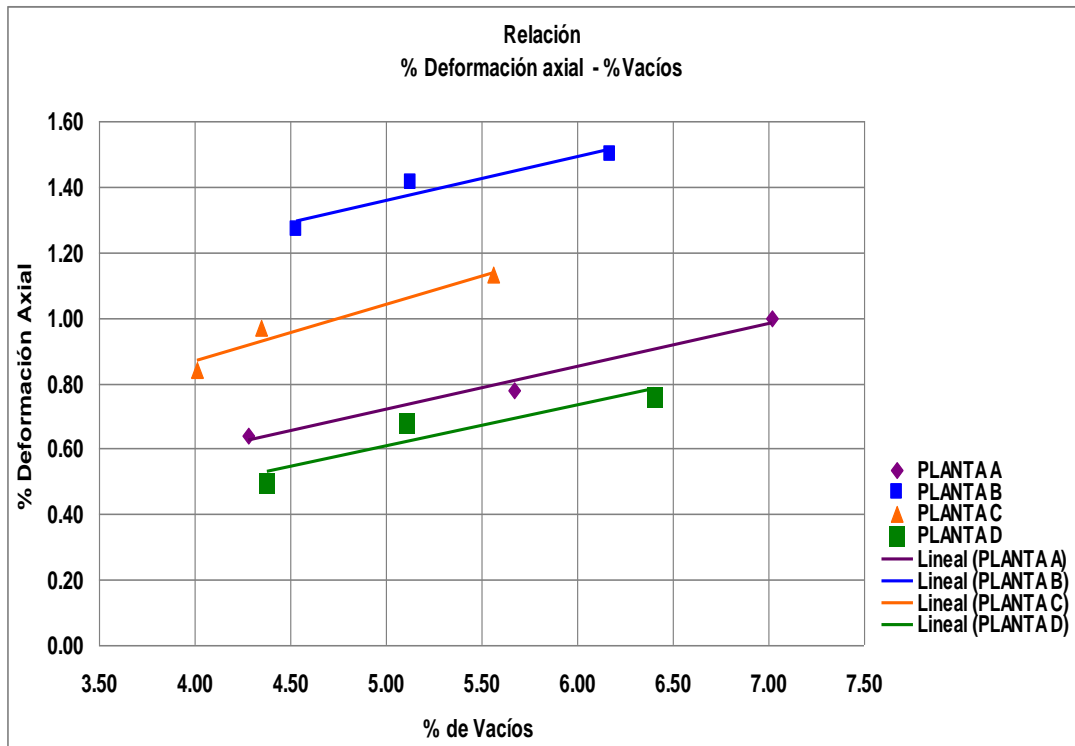
En las figuras 26, 28, 30 y 32 al analizar la relación de Deformación vs. Repeticiones para llegar al fallo, no se encuentra un comportamiento uniforme para las distintas plantas. La mezcla más rígida (75 golpes) no se ubica en todos los casos (solo planta D) en la parte inferior.

## 5.8.- DEFORMACIÓN PERMANENTE (CREEP DINÁMICO)

Tabla 39: Relación porcentaje axial y porcentaje de vacíos.

Relación						
PLANTA	Energía de compactación					
	35		50		75	
	% Deformación axial	% Vacíos	% Deformación axial	% Vacíos	% Deformación axial	% Vacíos
PLANTA A	1.00	7.02	0.78	5.67	0.64	4.28
PLANTA B	1.50	6.17	1.41	5.13	1.27	4.53
PLANTA C	1.13	5.56	0.97	4.35	0.84	4.01
PLANTA D	0.76	6.40	0.68	5.11	0.50	4.38

Figura 40: Relación Porcentaje de Deformación Axial y Porcentaje de Vacíos.



En la tabla 39, se observa que los resultados obtenidos son aceptables, se tienen valores inferiores al 1% de deformación.

Para una energía de compactación de 75 golpes, las plantas A, C y D cumplen, mientras que la planta B se tiene 1.27%, pese que se trabajó con aluviales de ríos, que en general es un buen agregado para esta mezcla, muchas piedras se encontraron sin triturar.

Relacionando el porcentaje de vacíos y el porcentaje de deformación axial, se mantiene la relación, que a mayor energía de compactación, menor es el porcentaje de vacíos y menor la deformación axial.



## CONCLUSIONES

- ❖ La realización de las pruebas de desempeño, son importante para relacionar la calidad evaluada a nivel de laboratorio con el comportamiento real de las mezclas puestas en obra. Las pruebas que se realizaron son: módulo de rigidez, ensayo de fatiga y deformación plástica.
- ❖ El módulo de rigidez obtenido en cada una de las plantas, con energía de compactación de 75 golpes por cara, que corresponde al 100 % de la energía aplicada en el campo en general es satisfactorio. Las plantas A y D arrojan módulos superiores a 3000 MPa, valores adecuados, mientras que las plantas B y C necesitarían ajustes para perfeccionar su capacidad estructural.
- ❖ Los ensayos de fatiga realizados a cada una de las plantas en general con cargas aplicadas entre 200 y 300 KPa, ofrecen el mayor número de repeticiones para llegar al fallo, es decir, la mejor respuesta, que a nivel de obra se puede calificar como buena. Si bien en la relación carga vs. repeticiones se obtiene el comportamiento previsto, en la relación deformación vs. repeticiones el comportamiento fue variable.
- ❖ En los ensayos de compresión cíclica axial los resultados obtenidos de las plantas A, C y D son satisfactorios, mientras que la planta B se pudiera perfeccionar o ajustar para que cumplan las exigencias o especificaciones de dicho ensayo.

## RECOMENDACIONES

- ❖ Es necesaria la exigencia de pruebas de desempeño para perfeccionar o ajustar los diseños de mezclas asfálticas y controles de calidad, sobre todo con mayor intensidad al estudio de fenómenos de fatiga.
- ❖ Debemos seguir correctamente los procedimientos en la elaboración o confección de las briquetas de mezclas asfálticas, un error en la realización de la confección puede generar erróneos resultados.
- ❖ Cuando realicemos las pruebas de desempeño en el equipo NAT debemos tener en cuenta que la temperatura debe ser la ideal para el ensayo, evitando cambios bruscos de temperatura, en lo posible mantener exteriormente una temperatura cercana al interior.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

American Association of State Highway and Transportation

Officials: AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures. U.S.A., 1993.

Committee European of Normalization – CEN 12697.

Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalts – Part 26: Stiffness. Annex C. 2000.

Committee European of Normalization – CEN 12697.

Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalts – Part 25: Cyclic compression test. Part A. 2000.

Cooper Research Technology Limited. NU-10 & NU- 5.

Operation & Maintenance Manual. United Kingdom, 2002.

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones.

Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras y Puentes. MOPT-001-F, Quito - Ecuador, 2002.

Rondón, H.A.; Reyes, F.A.; González; L.A.; Vázquez S. E.

Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas. Bogotá – Colombia: Editorial UD. Primera Edición. 2012.

Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras.

Tomo III. Materiales y mezclas asfálticas. Instituto Nacional de Vías. 1998. Bogotá. Colombia.

ASEFMA. IV Jornada Nacional. Madrid. 2009.

Asphalt Institute. Mix design methods for asphalt concrete. MS-2.

Sixth Edition. 2002.

E.R.Brown, P.S.Kandhal. Performance testing for hot mix asphalt.  
Auburn University. NCAT Report 01-05. 2001.

H. Yang. Pavement analysis and systems. Mc Graw-Hill. 1995.

Tesis: (Parrales, 2013)

“CONSIDERACION PARA PRUEBAS REOLOGICAS EN EL  
CONTROL DE CALIDAD DE MEZCLA ASFALTICA”.

Martínez P. & Navarrete C. (2007).

“Recuperación de asfaltos nacionales envejecidos”.

Asphalt Institute.

Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica  
en Caliente. MS-22. S

Mezclas Asfálticas en Caliente

[http://www.slideshare.net/UCGcertificacionvial/mezclas-  
asfalticas-en-calientesemana-16-1588747](http://www.slideshare.net/UCGcertificacionvial/mezclas-asfalticas-en-calientesemana-16-1588747)  
2013 / diciembre / 9

Mezclas Asfálticas

[http://www.bitumixcvv.cl/productos/mezclas\\_asfalticas/index.php](http://www.bitumixcvv.cl/productos/mezclas_asfalticas/index.php)  
2013 / diciembre / 9

Kraemer et al. Ingeniera de Carreteras. Volumen I. Ed McGraw Hill. 2003

Materiales Asfálticos

[http://issuu.com/rdsantos28/docs/materiales\\_asfalticos\\_maylin\\_  
corros/21](http://issuu.com/rdsantos28/docs/materiales_asfalticos_maylin_corros/21)  
(2013, diciembre 9)

Garnica, P.; Flores, M.; Gómez, J.; Delgado H.

“CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS”. Publicación Técnica No 267. Sanfandila, Qro, 2005

Tesis: (Andaluz, 2013)

“ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOCADAS EN VIAS DE LA REGION COSTA DEL ECUADOR MEDIANTE PRUEBAS DE DESEMPEÑO”

Rubio, B. PATOLOGIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

CALIDAD DE LOS BETUNES. Centro de Estudios del Transporte – CEDEX

Facultad de Ingeniería Civil. ESPE. Sede Sangolquí

<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1573/1/T-ESPE-014933.pdf>

(2013, Septiembre 30)

Norma NTE INEN 696. Áridos.

Análisis Granulométrico en los Áridos, Finos y Grueso. Primero edición. 2011

AASHTO T 11 - MATERIALS FINER THAN NO. 200 (75  $\mu$ m) SIEVE IN MINERAL AGGREGATES BY WASHING

<http://www.dot.nd.gov/manuals/materials/testingmanual/t11.pdf>

(2013, diciembre 9)

AASHTO T 27 – SIEVE ANALYSIS OF FINE AND COARSE AGGREGATES

<http://www.dot.nd.gov/manuals/materials/testingmanual/t27.pdf>

(2013, diciembre 9)