

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE CIVIL**

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE**

**INGENIERO CIVIL**

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÓDULO RESILIENTE Y ENSAYOS DE  
DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CON  
BRIQUETAS COMPACTADAS EMPLEANDO MARTILLO MARSHALL Y  
COMPACTADOR GIRATORIO DE LAS PLANTAS: EQFALTO UBICADA EN  
QUITO Y TEA S.A. UBICADA EN GUAYLLABAMBA”**

**NOMBRES:**

**BECERRA LÓPEZ DORIS CECILIA**

**BALSECA VILLACÍS BRYAN LEONARDO**

**DIRECTOR: ING. GUSTAVO YÁNEZ**

**QUITO, 2017**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios y a la Santísima Virgen por la vida, la salud y todas sus bendiciones que me han regalado para alcanzar esta meta.

A mis padres, Martha y Raúl, por brindarme su apoyo incondicional en cada instante de esta etapa.

A mis hermanos, María José y Edison, por sus palabras de aliento en situaciones complicadas.

A mis amigos por todos los momentos que hemos compartido y por ser para mí como una segunda familia.

Al Ing. Gustavo Yáñez, tutor de tesis, por su tiempo, paciencia y ayuda constante para desarrollar este trabajo de disertación.

Al Ing. Jorge Buchelli y al Ing. Wilson Cando, correctores de tesis, por su tiempo y contribución para culminar este trabajo.

A todos mis profesores de la carrera por los conocimientos proporcionados para contribuir en mi formación profesional.

A las plantas asfálticas, EQFALTO y TEA S.A., por su colaboración y accesibilidad al proporcionarnos sus materiales para desarrollar la presente investigación.

Cecilia Becerra.

A Dios y a la Madre Dolorosa por la vida, la salud y todas las bendiciones recibidas a lo largo de mi vida.

A mis padres, Alfonso y Silvia, por su amor, esfuerzo, lucha diaria y apoyo incondicional que me brindan cada día.

A mis hermanos, Natalia y José Francisco, por su apoyo y comprensión.

A mis amigas y amigos por ese apoyo mutuo y experiencias compartidas en toda la carrera.

A la Compañía de Jesús por su apoyo tanto en mi formación personal como espiritual.

Al Voluntariado Universitario Ignaciano de la PUCE, por todas esas amistades y experiencias gratificantes vividas.

Al Ing. Gustavo Yáñez, tutor de tesis, por su tiempo, motivación, paciencia y ayuda constante para el desarrollo de este trabajo de disertación.

Al Ing. Jorge Bucheli y al Ing. Wilson Cando, correctores de tesis, por su tiempo y aportes para realizar este trabajo.

A todos mis profesores de la carrera por contribuir con sus conocimientos en mi formación profesional.

A las plantas asfálticas, EQFALTO y TEA S.A., por su colaboración y facilidad al momento de proveer de sus materiales para desarrollar la presente investigación.

Leonardo Balseca.

## DEDICATORIA

A mis padres, Martha y Raúl, quienes son mi mayor motivación en cada paso que doy y mi gran inspiración para dar todo de mí siempre.

A mis hermanos, María José y Edison, quienes son mi ejemplo a seguir como excelentes personas y grandes profesionales.

A mi sobrino, Joseph, quien siempre logrará hacerme sonreír sin importar las circunstancias.

A mis abuelitos, Beatriz y Manuel, quienes me guían y protegen desde el cielo.

Cecilia Becerra.

A la Madre Dolorosa, donde he depositado toda mi Fe y mi vida, para que siga iluminando el camino de más personas y profesionales.

A mis padres Alfonso y Silvia, quienes son mi vívido ejemplo de no rendirse jamás pese a las adversidades que la vida nos presente, por todo ese gran amor y fortaleza que sembraron en mi persona, por ser ejemplo de vida y fuente de inspiración de muchas personas.

A mis hermanos, Natalia y José Francisco, por ese apoyo incondicional y que sirva de ejemplo para su formación tanto académica como personal.

Leonardo Balseca.

# TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iv
TABLA DE CONTENIDO .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
JUSTIFICACIÓN.....	xix
OBJETIVOS .....	xxi
Objetivo general.....	xxi
Objetivos específicos .....	xxi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.    Materiales pétreos .....	1
1.1.1.    Generalidades de los materiales pétreos.....	1
1.1.2.    Fuentes de material pétreo.....	2
1.2.    Materiales bituminosos .....	4
1.2.1.    Antecedentes históricos .....	4
1.2.1.1.    Asfalto de fuentes naturales .....	4
1.2.1.2.    Asfalto derivado del petróleo .....	5
1.2.2.    Tipos de asfaltos .....	6
1.2.2.1.    Asfaltos líquidos o cut back .....	6
1.2.2.2.    Emulsiones asfálticas .....	7
1.2.2.3.    Cemento de asfaltos.....	8
1.3.    Mezclas asfálticas .....	8

1.3.1.	Propiedades de las mezclas asfálticas .....	9
1.3.2.	Clasificación de las mezclas asfálticas .....	10
1.3.2.1.	Mezclas asfálticas en caliente .....	11
1.3.2.2.	Mezclas asfálticas en frío .....	12
1.4.	Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente .....	12
1.4.1.	Método Marshall .....	13
1.4.1.1.	Procedimiento de diseño .....	14
1.4.1.2.	Martillo Marshall .....	15
1.4.2.	Método SUPERPAVE .....	15
1.4.2.1.	Procedimiento de diseño .....	16
1.4.2.2.	Compactador giratorio SUPERPAVE .....	17
CAPÍTULO II .....		19
2.	DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	19
2.1.	Materiales pétreos .....	19
2.1.1.	Mezclas asfálticas en planta .....	19
2.1.2.	Mezclas asfálticas en sitio .....	22
2.2.	Materiales bituminosos .....	23
2.3.	Mezclas asfálticas .....	25
2.4.	Martillo Marshall .....	25
2.5.	Compactador giratorio SUPERPAVE .....	26
2.5.1.	Número de giros .....	28
CAPÍTULO III .....		29
3.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	29
3.1.	Materiales pétreos .....	29
3.1.1.	Granulometría .....	29
3.1.2.	Gravedad específica .....	29
3.1.3.	Durabilidad de los agregados a la acción del sulfato de sodio .....	30

3.1.4.	Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de Los Ángeles	31
3.1.5.	Equivalente de arena en agregados finos.....	32
3.2.	Materiales bituminosos .....	32
3.2.1.	Penetración de materiales bituminosos .....	32
3.2.2.	Densidad de materiales bituminosos semisólidos.....	33
3.2.3.	Viscosidad cinemática de asfaltos .....	34
3.2.4.	Punto de chispa y llama con el equipo de copa abierta de Cleveland 34	
3.2.5.	Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío .....	35
3.2.6.	Punto de ablandamiento de bitumen .....	36
3.2.7.	Horno de película delgada rodante (RTFO).....	37
3.2.8.	Ductilidad de materiales bituminosos .....	38
3.3.	Mezclas bituminosas y briquetas compactadas .....	39
3.3.1.	Gravedad específica máxima teórica de mezclas bituminosas de pavimentación	39
3.3.2.	Contenido de ligante asfáltico por el método de ignición .....	39
3.3.3.	Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas bituminosas compactadas no absorbentes .....	40
3.3.4.	Efecto del agua en mezclas bituminosas empleando agua hirviendo (peladura)	41
3.3.5.	Porcentaje de vacíos de aire en mezclas bituminosas compactadas	41
3.3.6.	Estabilidad y flujo Marshall de mezclas bituminosas compactadas...	42
3.3.7.	Módulo resiliente de mezclas bituminosas compactadas.....	42
CAPÍTULO IV .....		44
4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CORRELACIÓN ESTADÍSTICA .....	44
4.1.	Resultados de la caracterización de materiales pétreos .....	44
4.2.	Resultados de la caracterización de materiales bituminoso .....	47
4.3.	Resultados de la caracterización de mezclas bituminosas y briquetas compactadas .....	49

4.4.	Correlación estadística entre el módulo resiliente y la deformación permanente (flujo).....	51
4.4.1.	Planta asfáltica EQFALTO.....	52
4.4.1.1.	Punto de balance o equilibrio de los métodos.....	55
4.4.1.2.	Ajuste de correlación lineal a polinómica .....	56
4.4.2.	Planta asfáltica TEA S.A. ....	57
4.4.2.1.	Punto de balance o equilibrio de los métodos.....	60
4.4.2.2.	Ajuste de correlación lineal a polinómica .....	61
CAPÍTULO V .....		63
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	63
5.1.	Conclusiones.....	63
5.2.	Recomendaciones.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....		67
ANEXOS.....		70
Anexo 1: Planta asfáltica EQFALTO .....		70
Anexo 1.1: Caracterización de materiales pétreos .....		70
Anexo 1.1.1: Granulometría de los agregados .....		70
Anexo 1.1.2: Granulometría de la mezcla de agregados .....		73
Anexo 1.1.3: Gravedad específica.....		75
Anexo 1.1.4: Durabilidad de los agregados a la acción del sulfato de sodio .....		76
Anexo 1.1.5: Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de Los Ángeles .....		77
Anexo 1.1.6: Equivalente de arena en agregados finos.....		77
Anexo 1.2: Caracterización de material bituminoso.....		77
Anexo 1.2.1: Penetración de materiales bituminosos .....		77
Anexo 1.2.2: Densidad de materiales bituminosos semisólidos.....		78
Anexo 1.2.3: Viscosidad cinemática de asfaltos .....		78

Anexo 1.2.4: Punto de chispa y llama con el equipo de copa abierta de Cleveland .....	78
Anexo 1.2.5: Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío.....	79
Anexo 1.2.6: Punto de ablandamiento de bitumen (aparato anillo y bola) .....	79
Anexo 1.2.7: Índice de penetración .....	79
Anexo 1.2.8: Horno de película delgada rodante (RTFO).....	79
Anexo 1.2.9: Ductilidad de materiales bituminosos (RTFO).....	80
Anexo 1.2.10: Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío (RTFO)...	80
Anexo 1.3: Caracterización de mezcla bituminosa y briquetas compactadas.....	80
Anexo 1.3.1: Contenido de ligante asfáltico por el método de ignición .....	80
Anexo 1.3.2: Gravedad específica máxima teórica de mezclas bituminosas de pavimentación .....	81
Anexo 1.3.3: Efecto del agua en mezclas bituminosas empleando agua hirviendo (peladura).....	81
Anexo 1.3.4: Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas bituminosas compactadas no absorbentes .....	81
Anexo 1.3.5: Porcentaje de vacíos de aire en mezclas bituminosas compactadas .....	82
Anexo 1.3.6: Estabilidad y flujo Marshall de mezclas bituminosas compactadas (factor de corrección de estabilidad en Anexo 3) .....	82
Anexo 1.3.7: Módulo resiliente de mezclas bituminosas compactadas.....	83
Anexo 2: Planta asfáltica TEA S.A. ....	83
Anexo 2.1: Caracterización de materiales pétreos .....	83
Anexo 2.1.1: Granulometría de los agregados .....	83
Anexo 2.1.2: Granulometría de la mezcla de agregados .....	86
Anexo 2.1.3: Gravedad específica.....	88
Anexo 2.1.4: Durabilidad de los agregados a la acción del sulfato de sodio.....	89
Anexo 2.1.5: Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de Los Ángeles .....	90

Anexo 2.1.6: Equivalente de arena en agregados finos.....	91
Anexo 2.2: Caracterización de material bituminoso.....	91
Anexo 2.2.1: Penetración de materiales bituminosos .....	91
Anexo 2.2.2: Densidad de materiales bituminosos semisólidos.....	91
Anexo 2.2.3: Viscosidad cinemática de asfaltos .....	92
Anexo 2.2.4: Punto de chispa y llama con el equipo de copa abierta de Cleveland .....	92
Anexo 2.2.5: Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío.....	92
Anexo 2.2.6: Punto de ablandamiento de bitumen (aparato anillo y bola) .....	93
Anexo 2.2.7: Índice de penetración .....	93
Anexo 2.2.8: Horno de película delgada rodante (RTFO).....	93
Anexo 2.2.9: Ductilidad de materiales bituminosos (RTFO).....	93
Anexo 2.2.10: Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío (RTFO)...	94
Anexo 2.3: Caracterización de mezcla bituminosa y briquetas compactadas.....	94
Anexo 2.3.1: Contenido de ligante asfáltico por el método de ignición .....	94
Anexo 2.3.2: Gravedad específica máxima teórica de mezclas bituminosas de pavimentación .....	94
Anexo 2.3.3: Efecto del agua en mezclas bituminosas empleando agua hirviendo (peladura).....	95
Anexo 2.3.4: Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas bituminosas compactadas no absorbentes .....	95
Anexo 2.3.5: Porcentaje de vacíos de aire en mezclas bituminosas compactadas .....	96
Anexo 2.3.6: Estabilidad y flujo Marshall de mezclas bituminosas compactadas (factores de corrección de estabilidad en Anexo 3) .....	96
Anexo 2.3.7: Módulo resiliente de mezclas bituminosas compactadas.....	97
Anexo 3: Factores de corrección de estabilidad Marshall (ASTM, 2015, p.6).....	97
Anexo 4: Resultados de las granulometrías de mezclas de agregados.....	98
Anexo 5: Resultados de la caracterización de los materiales pétreos .....	99

Anexo 6: Resultados de la caracterización de los materiales bituminoso.....	101
Anexo 7: Resultados de la caracterización las mezclas bituminosas y briquetas compactadas .....	103
Anexo 8: Modelos del coeficiente de correlación, r. ....	104
Anexo 9: Gráficas de Estabilidad y Flujo Marshall obtenidas en laboratorio.....	105
Anexo 9.1: Gráficas de Estabilidad y Flujo Marshall planta EQFALTO.....	106
Anexo 9.2: Gráficas de Estabilidad y Flujo Marshall planta TEA S.A.....	110
Anexo 10: Resultados de la máquina Universal del ensayo de Módulo Resiliente .....	114
Anexo 10.1: Planta EQFALTO. Briquetas compactadas con martillo Marshall .....	115
Anexo 10.2: Planta EQFALTO. Briquetas compactadas con Compactador Giratorio.....	125
Anexo 10.3: Planta TEA S.A. Briquetas compactadas con martillo Marshall .....	135
Anexo 10.4: Planta TEA S.A. Briquetas compactadas con Compactador Giratorio .	145

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación planta EQFALTO .....	2
Figura 1.2: Planta asfáltica EQFALTO .....	3
Figura 1.3: Ubicación planta TEA S.A. ....	3
Figura 1.4: Planta asfáltica TEA S.A. ....	4
Figura 1.5: Martillo automático Marshall.....	15
Figura 1.6: Compactador giratorio SUPERPAVE .....	18
Figura 2.1: Briquetas compactadas con martillo Marshall .....	26
Figura 2.2: Molde de compactador giratorio SUPERPAVE .....	27
Figura 3.1: Series de tamices para agregado grueso y fino .....	29
Figura 3.2: Muestra de agregado fino en matraz.....	30
Figura 3.3: Muestras sumergidas en sulfato de sodio .....	31
Figura 3.4: Máquina de los Ángeles.....	31
Figura 3.5: Probetas graduadas con agregado fino .....	32
Figura 3.6: Ensayo de penetración .....	33
Figura 3.7: Picnómetro lleno con asfalto .....	33
Figura 3.8: Equipo para determinar la viscosidad cinemática.....	34
Figura 3.9: Equipo copa abierta de Cleveland .....	35
Figura 3.10: Equipo para determinar la viscosidad al vacío .....	36
Figura 3.11: Ensayo de punto de ablandamiento .....	37
Figura 3.12: Botellas RTFO .....	38
Figura 3.13: Ensayo de ductilidad .....	38
Figura 3.14: Equipo para determinar la gravedad específica Rice .....	39
Figura 3.15: Horno de ignición .....	40
Figura 3.16: Briqueta sumergida en agua a 25 °C .....	40
Figura 3.17: Ensayo de peladura .....	41

Figura 3.18: Ensayo de estabilidad y flujo Marshall .....	42
Figura 3.19: Máquina universal .....	43
Figura 4.1: Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño Marshall para la planta asfáltica EQFALTO .....	53
Figura 4.2: Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño SUPERPAVE para la planta asfáltica EQFALTO .....	55
Figura 4.3: Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño Marshall para la planta asfáltica EQFALTO .....	56
Figura 4.4: Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño SUPERPAVE para la planta asfáltica EQFALTO .....	57
Figura 4.5: Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño Marshall para la planta asfáltica TEA S.A. ....	58
Figura 4.6: Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño SUPERPAVE para la planta asfáltica TEA S.A. ....	60
Figura 4.7: Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño Marshall para la planta asfáltica TEA S.A. ....	61
Figura 4.8: Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño SUPERPAVE para la planta asfáltica TEA S.A. ....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Rocas para agregados utilizados en mezclas asfálticas en caliente.....	1
Tabla 1.2: Tipos de asfaltos de curado rápido .....	7
Tabla 1.3: Tipos de asfaltos de curado medio.....	7
Tabla 1.4: Clasificación de mezclas asfálticas .....	11
Tabla 2.1: Criterios Marshall .....	20
Tabla 2.2: Vacíos en los agregados.....	20
Tabla 2.3: Requisitos granulométricos para mezclas en planta.....	21
Tabla 2.4: Requisitos granulométricos para mezclas en planta.....	21
Tabla 2.5: Requisitos granulométricos para mezclas en sitio .....	22
Tabla 2.6: Requisitos granulométricos para mezclas en sitio .....	22
Tabla 2.7: Equivalente de arena .....	23
Tabla 2.8: Equivalencias entre grado de penetración y de viscosidad .....	24
Tabla 2.9: Esfuerzo de compactación giratoria SUPERPAVE .....	28
Tabla 4.1: Resultados de la granulometría de mezcla de agregados .....	45
Tabla 4.2: Resultados de la caracterización de materiales pétreos de la planta EQFALTO .....	46
Tabla 4.3: Resultados de la caracterización de materiales pétreos de la planta TEA S.A. ....	47
Tabla 4.4: Resultados de la calificación por viscosidad de los materiales bituminosos ....	48
Tabla 4.5: Resultados de la calificación por penetración de los materiales bituminosos ..	49
Tabla 4.6: Resultados de la caracterización de mezclas bituminosas y briquetas compactadas .....	50
Tabla 4.7: Cálculos para correlación entre módulo resiliente y deformación permanente (flujo) para la planta asfáltica EQFALTO.....	52
Tabla 4.8: Análisis estadístico del método Marshall para la planta EQFALTO .....	53
Tabla 4.9: Análisis estadístico del método SUPERPAVE para la planta EQFALTO.....	54

Tabla 4.10: Cálculos para correlación entre módulo resiliente y deformación permanente (flujo) para la planta asfáltica TEA S.A.....	57
Tabla 4.11: Análisis estadístico del método Marshall para la planta TEA S.A. ....	58
Tabla 4.12: Análisis estadístico del método SUPERPAVE para la planta TEA S.A. ....	59

## RESUMEN

En el presente trabajo de disertación de grado se realizó la investigación de mezclas asfálticas en caliente de dos plantas localizadas en la provincia de Pichincha: EQFALTO ubicada en Quito y TEA S.A. ubicada en Guayllabamba, con el fin de elaborar un análisis comparativo entre el módulo resiliente y ensayos de deformación permanente, mediante briquetas compactadas empleando martillo Marshall y compactador giratorio SUPERPAVE.

Esta investigación está conformada por varias etapas, en las cuales se establecen las características de los materiales pétreos, materiales bituminosos y sus respectivas mezclas; finalizando el estudio con la obtención de una correlación estadística entre el módulo resiliente, obtenido mediante ensayos de tracción indirecta y la deformación permanente obtenida mediante ensayos de flujo Marshall. Los procedimientos de laboratorio se encuentran sustentados en las normativas nacionales e internacionales vigentes.

En la primera etapa se realizó la caracterización de los materiales pétreos mediante los siguientes ensayos: granulometría, gravedad específica, durabilidad de los agregados a la acción del sulfato de sodio, desgaste de los agregados gruesos en la máquina de Los Ángeles y equivalente de arena en agregados finos.

En la segunda etapa se realizó la caracterización de los materiales bituminosos mediante los siguientes ensayos: penetración, densidad, viscosidad cinemática, punto de chispa y llama, viscosidad absoluta, punto de ablandamiento, horno de película delgada rodante (RTFO), ductilidad (RTFO) y viscosidad absoluta (RTFO).

En la tercera etapa se realizó la caracterización de las mezclas asfálticas mediante los siguientes ensayos: gravedad específica máxima teórica, contenido de ligante asfáltico, peladura, gravedad específica Bulk, densidad, porcentaje de vacíos, estabilidad, flujo y módulo resiliente.

Finalmente, con los resultados de estas tres etapas se presentan tablas con sus respectivos límites e interpretaciones, además, se establece una correlación estadística entre módulo resiliente y deformación permanente para comparar los dos mecanismos de compactación.

## **ABSTRACT**

The following dissertation involves the analysis of hot-mix asphalt mixtures in two plants located in the Pichincha province: EQFALTO in Quito, and TEA S.A. in Guayllabamba. The main objective is to develop a comparative analysis of both the resilient modulus and the permanent deformation by means of briquettes compacted with a Marshall hammer and a Superpave gyratory compactor.

For such purpose, this project has been divided in various stages which establish the properties of stone aggregate, bituminous material, and their mixtures. They are followed by a statistical correlation between the resilient modulus, obtained via indirect tensile strength tests, and the permanent deformation, obtained via Marshall flow tests. All laboratory procedures comply with national and international regulations in force.

During the first stage, the properties of the stone aggregates were measured by means of the following tests: sieve analysis, specific gravity, soundness (resistance to the effects of sodium sulfate), degradation of thicker aggregates in a Los Angeles machine, and sand equivalent for fine aggregates.

During the second stage, the properties of bituminous material were measured by means of the following tests: penetration, density, kinematic viscosity, flash & fire point, absolute viscosity, softening point, RTFO (Rolling Thin-Film Oven), ductility (after TFO), and absolute viscosity (after TFO).

During the third stage, the properties of the asphalt mixtures were measured by means of the following tests: theoretical maximum specific gravity, asphalt binder content, peel, bulk specific gravity, density, void content percentage, stability, flow, and resilient modulus.

Finally, the results of all three stages are presented in tables alongside their limits and interpretations. Furthermore, a statistical correlation is established between the resilient modulus and the permanent deformation in order to compare both compaction mechanisms.

## JUSTIFICACIÓN

En Ecuador el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), tiene a su cargo 8653 kilómetros de carreteras pertenecientes a la red vial estatal, de las mismas 6741 kilómetros se administran directamente, 1350 kilómetros se encuentran concesionadas y 562 kilómetros son delegadas a consejos provinciales. Considerando los 6741 kilómetros administrados directamente por el MTO, 3382 kilómetros correspondiente al 50.2% son de pavimento flexible, 1118 kilómetros correspondiente al 16.6% son de pavimento rígido, 180 kilómetros correspondiente al 2.7% son de doble tratamiento superficial bituminoso y 2061 kilómetros correspondiente al 30.5% se encuentran en mantenimiento.

En los datos presentados anteriormente se evidencia que la mayor parte de vías en Ecuador están construidas con pavimentos flexibles, por lo tanto, es fundamental realizar un estudio detallado del diseño de las mezclas asfálticas para garantizar su correcto desempeño durante su vida útil cumpliendo con estándares de calidad, funcionalidad y economía, sin dejar de lado parámetros que provean a los usuarios un manejo seguro y confortable.

A nivel mundial las mezclas asfálticas en caliente son las más empleadas para la construcción de vías, razón por la cual, se han desarrollado especificaciones técnicas de los materiales pétreos, el ligante asfáltico y la combinación de ambos con el fin de obtener propiedades que aseguren resistencia a la fatiga y a las deformaciones, así como también garantizar la durabilidad de la mezcla.

A lo largo del tiempo se ha buscado elaborar un diseño vanguardista de mezclas asfálticas en caliente a través de diferentes métodos empíricos en laboratorio, para predecir el comportamiento de la mezcla ante cargas vehiculares simulando las condiciones reales a las que se encontrará sometida la misma; en Ecuador el método de diseño empleado para la construcción de vías es el método Marshall el cual se encuentra establecido por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas en la norma: "Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP-001-F 2002)".

En países industrializados se ha desarrollado un método denominado Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE) que está desplazando al método tradicional Marshall, debido a que su simulación en laboratorio se adapta mejor a la realidad en campo y sus ensayos nos permiten determinar el desempeño de la mezcla ante cargas vehiculares; adicionalmente, se pueden conocer propiedades mecánicas como resistencia a las deformaciones permanentes y a la fisuración por fatiga.

Por los motivos mencionados anteriormente se procede a evaluar los dos métodos de diseño que emplean diferentes mecanismos de compactación: impacto efectuado con martillo Marshall y amasado efectuado con compactador giratorio SUPERPAVE.

Debido a que no es posible elaborar la misma mezcla asfáltica en planta y en laboratorio se tomó muestras de dos plantas asfálticas de la provincia de Pichincha: EQFALTO ubicada en Quito y TEA S.A. ubicada en Guayllabamba; garantizando de esta manera que los resultados obtenidos en esta investigación sean verídicos y puedan correlacionarse.

# OBJETIVOS

## Objetivo general

Establecer una correlación estadística entre el módulo resiliente y la deformación permanente de las mezclas asfálticas de las plantas EQFALTO y TEA S.A., para comparar los métodos de diseño de mezclas en caliente Marshall y SUPERPAVE, mediante la evaluación de briquetas elaboradas en laboratorio con los dos mecanismos de compactación mencionados.

## Objetivos específicos

- Ensayar y caracterizar los materiales pétreos empleados en las mezclas asfálticas en estudio.
- Ensayar y calificar los materiales bituminosos que utilizan las plantas asfálticas en consideración.
- Ensayar y establecer las propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas en análisis.
- Determinar el módulo resiliente de briquetas compactadas con martillo Marshall y compactador giratorio SUPERPAVE de las mezclas en caliente consideradas para el estudio.
- Establecer la deformación permanente de las mezclas compactadas en análisis a través del ensayo de flujo Marshall.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Materiales pétreos

#### 1.1.1. Generalidades de los materiales pétreos

Los agregados de material pétreo empleados en la construcción provienen de fuentes naturales, ya sea mediante la explotación de minas, el triturado de la matriz rocosa del suelo o de fuentes artificiales; los agregados se clasifican en tres grupos dependiendo de su origen: ígneas, sedimentarias y metamórficas. En las mezclas asfálticas en caliente se suele usar agregados livianos, los cuales se obtienen como producto de las arcillas y escorias calentadas a elevadas temperaturas, estos tipos de agregado presentan gran resistencia al patinaje en el pavimento flexible. (Minaya & Ordóñez, 2001)

Como se puede observar en la Tabla 1.1 se tiene el tipo de roca ideal para agregado, garantizando un correcto desempeño de la carpeta asfáltica.

**Tabla 1.1:** Rocas para agregados utilizados en mezclas asfálticas en caliente

Tipo de Roca	Dureza/Tenacidad	Resistencia al desprendimiento*	Textura superficial	Forma fracturada
Ígnea: Granito Sienita Diorita Basalto Diabasa Gabro	Regular Bueno Bueno Bueno Bueno Bueno	Regular Regular Regular Bueno Bueno Bueno	Regular Regular Regular Bueno Bueno Bueno	Regular Regular Bueno Bueno Bueno Bueno
Sedimentaria: Caliza, dolomía Arenisca Chert Lutita	Pobre Regular Bueno Pobre	Bueno Bueno Regular Pobre	Bueno Bueno Pobre Regular	Regular Bueno Bueno Regular
Metamórfica: Gneis Esquisto Pizarra Cuarcita Mármol Serpentina**	Regular Regular Regular Bueno Pobre Bueno	Regular Regular Regular Regular Bueno Regular	Bueno Bueno Regular Bueno Regular Regular	Bueno Regular Regular Bueno Regular Regular

\*Agregados hidrofílicos tienden a separar más fácilmente las películas de asfalto.

\*\* Es un mineral que se forma para alteración de las rocas ultrabásicas

**Fuente:** Minaya & Ordóñez, 2001, p. 59

### 1.1.2. Fuentes de material pétreo

Debido a que estamos situados en la zona andina, la sierra ecuatoriana es un sector ideal para encontrar material pétreo de excelentes condiciones, en la provincia de Pichincha se encuentra rocas volcánicas del cenozoico, es decir rocas volcánicas continentales de composición andesita, rocas volcano-sedimentarias mesozoico que contienen lutita volcánica y conglomerados volcánicos, rocas metamórficas del paleozoico y rocas ígneas intrusivas por lo que hace que el material de la región andina sea propicio para un mejor desempeño al emplearlo en la fabricación de la carpeta asfáltica. (Gobierno Autónomo Descentralizado de Pichincha, 2002). Para este estudio se empleó material pétreo y asfalto de dos plantas ubicadas en la provincia de Pichincha EQFALTO y TEA S.A.

EQFALTO ubicado en la Av. Simón Bolívar, cerca de Llano Chico (Quito) cuyas coordenadas UTM son 784015.33 Este; 9985260.00 Norte la cual comprende un área aproximada de 10450.86 metros cuadrados en donde se encuentra distribuida toda la planta asfáltica y almacenamiento del material pétreo. Esta planta emplea agregados de distintas fuentes como se presenta a continuación:

- **Material 3/4:** Proviene de la mina de Pifo de la empresa Ripconci.
- **Material 3/8:** Proviene de la mina de Nayón de la empresa Paco Vallejo.
- **Arena:** Proviene de la mina de Lasso, de la empresa Maquinco.

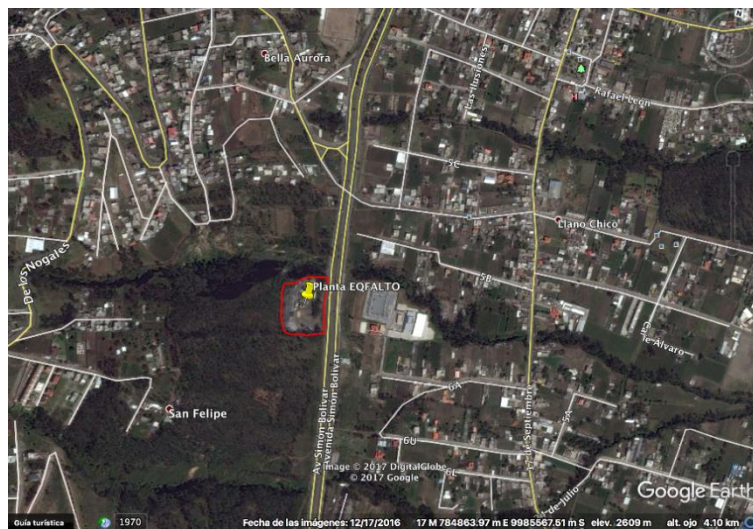


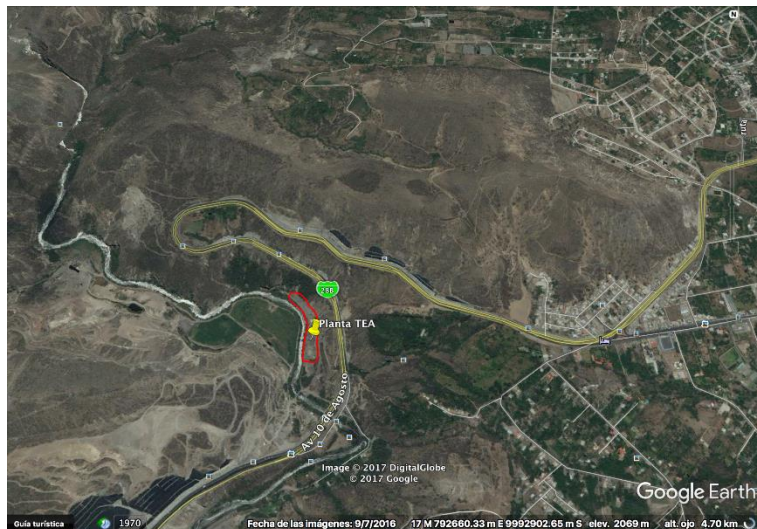
Figura 1.1: Ubicación planta EQFALTO (Google Maps, 2017)



**Figura 1.2:** Planta asfáltica EQFALTO (Balseca & Becerra, 2017)

TEA S.A. ubicada en la panamericana norte kilómetro 32 (Guayllabamba) cuyas coordenadas UTM son 792331.00 Este; 9992727.00 Norte, la cual comprende un área aproximada de 17097,89 metros cuadrados en donde se encuentra distribuida toda la planta asfáltica, incluidas las canteras del río Guayllabamba. Esta planta emplea los siguientes agregados que se presenta a continuación:

- **Material 3/4, 3/8 y arena:** Proviene de la mina de Tabacundo, no se emplea material de la misma cantera debido a que no cumple con las especificaciones del diseño de la mezcla asfáltica.



**Figura 1.3:** Ubicación planta TEA S.A. (Google Maps, 2017)



**Figura 1.4:** Planta asfáltica TEA S.A. (Balseca & Becerra, 2017)

## **1.2. Materiales bituminosos**

### **1.2.1. Antecedentes históricos**

El asfalto es uno de los materiales más antiguos usado en la construcción, debido a su versatilidad y universalidad es aplicado a los pavimentos flexibles; este material bituminoso proviene de fuentes naturales a través de procesos de destilación que han ocurrido durante millones de años, o a su vez del refinamiento del petróleo donde se separan las fracciones volátiles dando como resultado el material bituminoso o asfalto. (Asphalt Institute, 1989)

Gracias a sus propiedades ligantes, impermeabilizantes y duraderas, además de su alta resistencia a la mayor parte de álcalis, sales y ácidos, el asfalto ha sido empleado a través de los tiempos como material cementante para la construcción de mamposterías y caminos, impermeabilización de baños en templos y depósitos artificiales de agua, construcción de embarcaciones, iluminación, medicinas e incluso los egipcios lo utilizaban para el proceso de momificación. (Arenas, 2006)

#### **1.2.1.1. Asfalto de fuentes naturales**

Es un material aglomerante que se ha formado en depósitos naturales como manantiales, lagos, exudaciones, impregnado de rocas, filones (intrusiones de asfalto en masas rocosas), algunos se encuentran totalmente libres de materiales externos, otros se encuentran mezclados con varios minerales, agua y otras sustancias, se lo puede encontrar en estado líquido, sólido o semisólido, cuyos elementos constituyentes son los betunes. (Arenas, 2006).

**Manantiales:** Depósitos que poseen salida al exterior a través de grietas de roca, que contiene petróleo o asfalto líquido en pequeñas cantidades. (Arenas, 2006).

**Lagos:** Proviene de manantiales de gran caudal, generalmente situados en el fondo de depresiones profundas y pueden formar lagos de asfaltos, como ejemplo tenemos el de Trinidad en Venezuela que es uno de los yacimientos más grandes de asfalto en el mundo. (Arenas, 2006).

**Exudaciones:** Se presenta en rocas porosas que están completamente cubiertas de asfalto y fluye bajo efectos de presiones internas o calor. (Arenas, 2006).

**Impregnado de rocas:** Se encuentra frecuentemente en yacimientos de rocas porosas donde el asfalto se encuentra cubriendo los poros de las rocas, pero sin llegar a exudar. (Arenas, 2006).

**Filones:** Se pueden encontrar de manera vertical o inclinada cuando se produce de forma natural intrusiones de asfalto en la matriz rocosa, a través de fallas o grietas en diferentes estratos, y de forma horizontal cuando se encuentra como consecuencia de una sedimentación del asfalto en varias capas alternadas de suelo, asfalto y otros materiales. (Arenas, 2006)

#### **1.2.1.2. Asfalto derivado del petróleo**

La mayoría del asfalto que se emplea en la actualidad proviene de la destilación del crudo de petróleo, también puede recibir el nombre de asfalto residual ya que es un residuo de la destilación del mismo; el asfalto se puede obtener mediante varios procesos como destilación primaria, destilación al vacío, desasfaltización con propano o butano. El asfalto contiene una gran cantidad de hidrocarburos, generando una composición química y molecular que puede ser muy variada, por lo que se desarrolló un programa estratégico de investigación en asfaltos "Strategic Highway Research Program" (SHRP). (Asphalt Institute, 1989)

**Destilación primaria:** Para este proceso se debe calentar el asfalto a 375° C, en hornos de forma tubular en donde los componentes más livianos como la nafta, kerosene y gas oil se transforman en vapor. El conjunto de vapores y material caliente pasa a una columna fraccionada donde se separa el residuo de destilación primaria que se junta en el fondo de la columna y se bombea a otro proceso de la refinería. (Asphalt Institute, 1989)

**Destilación al vacío:** En este proceso, mediante equipos especiales, se reduce la presión (aumenta el vacío) en la columna fraccionada, produciendo que las porciones más pesadas hiervan a una menor temperatura, el material que se obtiene en el fondo de la

columna es un residuo asfáltico semiduro a temperatura ambiente. De acuerdo a la cantidad de vacío que se aplique en el proceso de destilación, se obtendrá distintos cortes de asfalto que pueden ser utilizados para la construcción de mezclas. (Asphalt Institute, 1989)

**Desasfaltización con propano o butano:** Existe también una forma de separar el aceite de los asfaltos disolviendo el mismo en gas licuado de petróleo, a este proceso se le denomina desasfaltización, en donde el aceite muy pesado (aceite desasfaltizado) se mezcla con un solvente, ya sea propano o butano líquido, el cual al ser aplicado alta presión y temperaturas que oscilan entre 70 y 120 °C es destilado y queda un residuo viscoso llamado bitumen. (Asphalt Institute, 1989)

### **1.2.2. Tipos de asfaltos**

Los asfaltos que se emplean en la construcción de pavimentos flexibles están divididos en tres tipos:

- Asfaltos líquidos o cut back
- Emulsiones asfálticas
- Cemento de asfaltos (Arenas, 2006)

#### **1.2.2.1. Asfaltos líquidos o cut back**

También conocidos como asfaltos rebajados o fluidificados, estos asfaltos se obtienen a partir de la dilución de solventes de petróleo previamente seleccionados, los cuales una vez colocados inician un proceso de volatilización dejando al cemento asfáltico en condiciones óptimas para su uso, este método produce gran contaminación ambiental, por lo que ha sido restringido en muchos países a nivel mundial. (Arenas, 2006)

Para que un asfalto sea considerado como líquido el “Material asfáltico cuya consistencia blanda o fluida hace que salga del campo en que se aplica el ensayo de penetración cuyo límite máximo es 300”. (Asphalt Institute, 1989, p.28). Lo ideal para realizar un asfalto de este tipo es usar solventes que procedan del mismo crudo asfáltico, el fluidificante que se aplica a la mezcla puede ser bencina, kerosene o aceite.

Teniendo en cuenta el grado de volatilización del fluidificante, estos se clasifican en tres tipos de asfaltos líquidos:

- Asfaltos líquidos de curado rápido (RC)
- Asfaltos líquidos de curado medio (MC)
- Asfaltos líquidos de curado lento (SC) (Arenas, 2006)

**Asfaltos líquidos de curado rápido (Rapid Curing):** Tiene como elemento fluidificante la bencina o nafta, el cual es un diluyente liviano muy volátil, con un punto de ebullición muy bajo. Este se simboliza con sus siglas en inglés junto con el grado de viscosidad en centistokes (1 centistoke = 1 mm<sup>2</sup>/s) y son los siguientes:

**Tabla 1.2:** Tipos de asfaltos de curado rápido

<b>Grado</b>	<b>Residuo asfáltico en volumen</b>
RC-70	55%
RC-250	65%
RC-800	75%
RC-3000	80%

**Fuente:** Arenas, 2006, p. 232

**Asfaltos líquidos de curado medio (Médium curing):** El elemento fluidificante es de grado de volatilidad media y punto de ebullición del kerosene. Este se simboliza con sus siglas en inglés junto con el grado de viscosidad en centistokes y son los siguientes:

**Tabla 1.3:** Tipos de asfaltos de curado medio

<b>Grado</b>	<b>Residuo asfáltico en volumen</b>
MC-30	50%
MC-70	55%
MC-250	67%
MC-800	75%
MC-3000	80%

**Fuente:** Arenas, 2006, p. 233

**Asfaltos líquidos de curado lento (Slow curing):** Su elemento fluidificante es un aceite de poca volatilidad. Este se simboliza con sus siglas en inglés junto con el grado de viscosidad en centistokes. (Arenas, 2006)

#### **1.2.2.2. Emulsiones asfálticas**

“Es una dispersión fina de cierto grado de estabilidad de un líquido en otro, que no se puede mezclar entre sí”. (Arenas, 2006, p. 254)

El asfalto es por naturaleza hidrófobo, lo cual proporciona la unión entre glóbulos y da lugar a otros de mayor tamaño provocando la separación del agua y el asfalto; para evitar este fenómeno se adiciona un agente estabilizador denominado emulsificante o emulgente, los tipos de emulsiones asfálticas más usados se especifican el ASTM D977 y ASTM D2397. Existen dos tipos de emulsiones asfálticas:

**Emulsiones directas:** Son las que se emplean en la tecnología de asfaltos en frío, en el cual la fase continua es de tipo acuoso y la discontinua es de tipo aceitoso o bituminoso. (Arenas, 2006)

**Emulsiones inversas:** En este proceso la fase continua es de tipo aceitoso o bituminoso y la fase discontinua es de tipo acuoso, es decir se producen dispersiones de agua en aceite. (Arenas, 2006)

### **1.2.2.3. Cemento de asfaltos**

El cemento asfáltico se usa en su mayoría para producir mezclas asfálticas en caliente, misma que es empleada en la construcción de pavimentos flexibles a nivel mundial. El cemento asfáltico puede ser mezclado con material pétreo ya que gracias a sus propiedades ligantes facilita la unión entre agregados, esta mezcla ayuda en gran medida a soportar las grandes cargas de tráfico. El cemento asfáltico se clasifica mediante tres métodos basados en su penetración (ASTM D946), viscosidad (ASTM D3381) o comportamiento, estos métodos se emplean para determinar el grado del asfalto. (Montesinos & Reyes, 2010)

El grado de penetración del asfalto se mide en cinco penetraciones estándar, 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, 200-300, por otro lado, se obtiene el grado del asfalto por la viscosidad original o la viscosidad después del curado en el horno de partícula delgada (RTFO). Para la viscosidad original incluye asfaltos AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-30 y AC-40, mientras que la viscosidad del residuo asfáltico por ensayo RTFO incluye AR-2000, AR-4000, AR-8000, y AR-16000; el valor numérico indica la viscosidad en Poises. El tercer método se fundamenta en el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP). (Arenas, 2006)

### **1.3. Mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas se encuentran conformadas por agregados pétreos y ligante asfáltico, siendo el ligante el encargado de cubrir a los agregados creando una película continua. Generalmente, son elaboradas en plantas mezcladoras (fijas o móviles) y son transportadas hacia la obra en ejecución mediante volquetas, en donde serán colocadas y

compactadas de acuerdo a las especificaciones técnicas; sin embargo, en caso de que se requiera se pueden fabricar en el lugar de la obra (in situ). (Acosta, 2014)

Es importante destacar que en la composición de una mezcla asfáltica los agregados pétreos representan entre el 88% y el 96% de la masa total, por otro lado, representan aproximadamente el 75% del volumen de la misma. Los agregados soportan las cargas vehiculares aplicadas en la capa de rodadura y las transmiten a las capas inferiores en menores proporciones, adicionalmente, las fallas que se presentan en las mezclas como el ahuellamiento, la fatiga y el daño por humedad dependen directamente de la calidad de los materiales pétreos. (Rondón & Reyes, 2015)

Se utilizan mezclas asfálticas en la construcción de carreteras, pistas de aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros; de forma más específica, en la construcción de vías se emplean como capas de rodadura y bases cuando se espera un tráfico muy pesado, mientras que en vías existentes se usan para recapeo. (Padilla, 2004)

### **1.3.1. Propiedades de las mezclas asfálticas**

Al emplearse las mezclas como capa de rodadura en una carretera, deben asegurarse propiedades funcionales que generen una superficie adecuada para la movilidad de los usuarios; entre ellas se encuentran:

Seguridad:

- Resistencia al deslizamiento.
- Permeabilidad apropiada (conductividad hidráulica).
- Regularidad transversal.
- Textura superficial. (Padilla, 2004)

Comodidad:

- Absorción de ruido.
- Regularidad transversal y longitudinal. (Padilla, 2004)

Durabilidad:

- Capacidad de soporte.
- Resistencia a la desintegración superficial. (Padilla, 2004)

Adicionalmente, deben poseer propiedades técnicas que garanticen su correcto comportamiento ante diferentes condiciones climáticas y cargas de tráfico que se presenten a lo largo de su vida útil; entre estas propiedades tenemos:

Durabilidad considerando las condiciones climáticas:

- Resistencia al lavado por agua.
- Resistencia a la fisuración térmica.
- Resistencia a la fisuración por reflexión.
- Resistencia al envejecimiento. (Padilla, 2004)

Propiedades mecánicas considerando las cargas de tráfico:

- Resistencia a la fisuración por fatiga.
- Resistencia a las deformaciones permanentes. (Padilla, 2004)

Trabajabilidad:

- Compactabilidad.
- Resistencia a la segregación. (Padilla, 2004)

En el diseño de mezclas se deben seleccionar y dosificar correctamente los materiales pétreos y bituminosos para conseguir las propiedades descritas anteriormente, al mismo tiempo, es sumamente importante cumplir con los siguientes objetivos:

- Adecuada cantidad de asfalto para cubrir completamente el material pétreo, garantizando un pavimento durable. (Asphalt Institute, 2014)
- Suficiente estabilidad en la mezcla para responder satisfactoriamente ante las demandas de tráfico previstas, evitando distorsiones y desplazamientos. (Asphalt Institute, 2014)
- Apropiado porcentaje de vacíos en la mezcla compactada que permita una leve expansión térmica del ligante asfáltico y una ligera compactación adicional bajo las cargas de tráfico, impidiendo afloramientos de asfalto y pérdida de estabilidad. Adicionalmente, debe controlarse el porcentaje máximo de vacíos para limitar la permeabilidad de la mezcla. (Asphalt Institute, 2014)
- Suficiente trabajabilidad que aporte a una conveniente colocación en obra, evitando la segregación, pérdidas de estabilidad y disminución en el desempeño de la mezcla. (Asphalt Institute, 2014)
- Adecuada textura y dureza de los materiales pétreos para asegurar suficiente resistencia al deslizamiento en condiciones climáticas desfavorables. (Asphalt Institute, 2014)

### **1.3.2. Clasificación de las mezclas asfálticas**

A continuación, se presentan diversas clasificaciones de las mezclas asfálticas de acuerdo a los parámetros más utilizados para este fin.

**Tabla 1.4:** Clasificación de mezclas asfálticas

<b>Parámetros</b>	<b>Tipo de mezcla</b>	<b>Descripción</b>
Fracciones de agregado empleadas	Masilla	Polvo mineral más ligante
	Mortero	Agregado fino más masilla
	Concreto	Agregado grueso más mortero
	Macadam	Agregado grueso más ligante asfáltico
Temperatura de puesta en obra	En frío	Fabricación y puesta en obra a temperatura ambiente
	En caliente	Altas temperaturas de fabricación y puesta en obra
Proporción de vacíos	Cerradas o densas	Proporción bajo el 6%
	Semicerradas o semidensas	Proporción entre el 6% y 10%
	Abiertas	Proporción supera el 12%
	Porosas o drenantes	Proporción supera el 20%
Tamaño máximo del agregado	Gruesas	Tamaño máximo excede los 10 milímetros
	Finas	Tamaño máximo bajo los 10 milímetros
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral	Fricción interna de los agregados genera resistencia
	Sin esqueleto mineral	Cohesión de la masilla genera resistencia
Granulometría	Continuas	Agregados bien graduados
	Discontinuas	Agregados mal graduados

**Fuente:** Padilla, 2004

Únicamente se detallará la clasificación basada en la temperatura de puesta en obra o temperatura de aplicación, debido al tema de investigación que se ha desarrollado en el presente trabajo.

### **1.3.2.1. Mezclas asfálticas en caliente**

Para su fabricación se calientan a elevadas temperaturas los agregados pétreos y el ligante asfáltico garantizando un recubrimiento homogéneo de los mismos, de igual manera, se requiere de altas temperaturas para asegurar una compactación propicia en obra. La temperatura de mezcla es de aproximadamente 160 °C, determinándose en base a las características viscosas del asfalto, mientras que la temperatura de compactación se encuentra alrededor de 130 °C. (García, 2010)

Las mezclas asfálticas en caliente son las más usadas en la construcción de vías alrededor del mundo, siendo las primeras en desarrollarse y regularse mediante normas internacionales. No obstante, se presentan complicaciones en obra porque se debe controlar que la temperatura no disminuya durante el proceso de compactación, considerando este inconveniente y la seguridad de los trabajadores se han creado mezclas que requieran bajas temperaturas de operación. (García, 2010)

#### **1.3.2.2. Mezclas asfálticas en frío**

Para su fabricación se emplea asfalto diluido o emulsificado consiguiendo bajas temperaturas de operación (inferiores a 60 °C), normalmente las mezclas en frío se trabajan a temperatura ambiente. Se debe destacar que la emulsión asfáltica es la mejor solución técnica puesto que es amigable con el medio ambiente y proporciona buenas características de adherencia entre todos los componentes. (García, 2010)

Este tipo de mezclas se caracterizan por su trabajabilidad debido a que el asfalto diluido o emulsificado posee una viscosidad baja que permanece durante un largo periodo de tiempo, por esta misma razón, se vuelve factible su almacenamiento. (Cárdenas, 2014)

A pesar de estas ventajas generalmente son empleadas cuando no es conveniente utilizar mezclas en caliente, también, se usan como bases estabilizadas o para mantenimiento preventivo de la capa de rodadura. (García, 2010)

#### **1.4. Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente**

Los diferentes diseños de mezclas en caliente han buscado generar en laboratorio modelos más acordes con la realidad para alcanzar las propiedades deseadas en obra, de igual manera, han establecido criterios que aportan a la durabilidad y al desempeño de la mezcla. A continuación, se describe brevemente la evolución de los mismos a través de los años.

**Clifford Richardson (1908):** Escribió el primer manual de ingeniería de pavimentos, destacando la importancia que poseen los vacíos de aire y los vacíos en el agregado; también Richardson creó una mezcla asfáltica en caliente constituida por arena angular limpia, asfalto y relleno mineral. (Asphalt Institute, 2014)

**Frederick Warren (1912):** Produjo mezclas con agregados grandes bien graduados cuyo tamaño máximo era 3 pulgadas, de esta forma, se minimizaron los vacíos consiguiendo alta estabilidad y reduciendo los costos de fabricación ya que se requería menos asfalto. (Asphalt Institute, 2014)

**Prevost Hubbard y Frederick Field (1920):** Desarrollaron un procedimiento de diseño para mezclas finas y determinaron un valor mínimo de estabilidad Hubbard-Field, el cual se estableció mediante análisis empíricos de pavimentos capaces de resistir deformaciones. (Asphalt Institute, 2014)

**Bruce Marshall (1930):** Consideraba que la compactación en laboratorio debía representar la densidad que se tendría in situ después del tráfico, por lo tanto, recomendaba seleccionar el contenido de asfalto que produzca la mayor densidad y al mismo tiempo proporcione valores aceptables de estabilidad y flujo. Este método ha sido ampliamente utilizado en carreteras, aunque inicialmente se empleó para la construcción de pistas en áreas remotas durante la Segunda Guerra Mundial. (Asphalt Institute, 2014)

**Francis Hveem (1930):** Desarrolló un procedimiento de diseño de mezcla que empleaba un compactador amasador, desde su perspectiva esta forma de compactación era mucho más representativa en comparación con otros mecanismos. Además, creó el “estabilómetro Hveem” para evaluar la resistencia de la mezcla asfáltica ante las fuerzas de corte generadas por el tráfico. (Asphalt Institute, 2014)

**Western Association of State Highway on Transportation Officials, WASHTO (1984):** Propuso modificaciones en las especificaciones de los materiales y el diseño de mezclas asfálticas, de esta manera, se obtendría mejor resistencia a las deformaciones plásticas. (Acosta, 2014)

**Asphalt Aggregate Mixture Analysis System, AAMAS (1987):** Identificó la necesidad de reformar el procedimiento de diseño de mezclas nuevamente, debido a que se deseaba incluir un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas. Además, se desarrollaron pruebas para identificar deformaciones permanentes y fisuras por fatiga. (Padilla, 2004)

**Strategic Highway Research Program, SHRP (1993):** Desarrolló el procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente conocido como: “Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE)”, empleando un compactador giratorio para conformar especímenes de prueba y realizando ensayos de desempeño para estipular la capacidad de la mezcla. (Asphalt Institute, 2014)

#### **1.4.1. Método Marshall**

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos perfeccionó el método formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas de Mississippi, mediante investigaciones y análisis de correlación para obtener un método de diseño en laboratorio y control en obra. Originalmente el método solo se podía emplear en mezclas

con agregados pétreos cuyo tamaño máximo sea 25 milímetros o menor, sin embargo, las modificaciones efectuadas permitieron su aplicación para agregados con tamaños máximos hasta de 38 milímetros. (Chimborazo, 2012)

En la actualidad es el método de diseño más empleado en todo el mundo debido a que asegura mezclas competentes en base a especificaciones mínimas de estabilidad, flujo, densidad y porcentaje de vacíos; el cumplimiento de estas especificaciones también se emplea para determinar el porcentaje de asfalto óptimo. (Universidad Mayor de San Simón, 2004)

Los objetivos principales del método Marshall son:

- Realizar pruebas de estabilidad y flujo (parámetros resistentes), debido a que se encuentran relacionados con la deformación plástica de la mezcla. (García, 2010)
- Analizar la densidad y el porcentaje de vacíos (parámetros volumétricos), asegurando que las proporciones de sus componentes sean las adecuadas para obtener durabilidad en el pavimento. (García, 2010)

#### **1.4.1.1. Procedimiento de diseño**

Se inicia el diseño con la elección de una curva granulométrica de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado pétreo y a las líneas de control (superior e inferior) que sirven como límites, posteriormente, se determina la fórmula de trabajo para obtener el porcentaje de asfalto de diseño. (Chimborazo, 2012)

Se deben realizar varias briquetas con diferentes contenidos de asfalto para que los resultados de las relaciones entre los parámetros generen curvas bien definidas, por lo tanto, se emplean como mínimo 2 contenidos de asfalto sobre el valor de diseño y 2 contenidos bajo el valor de diseño; la variación entre ellos debe ser igual a 0.5% y se requieren al menos 3 briquetas para cada uno de los mismos. (Asphalt Institute, 2014)

Se debe escoger como porcentaje óptimo de asfalto el valor que proporcione el promedio de los límites del porcentaje de vacíos, por lo tanto, al tratarse de una mezcla asfáltica que se utilizará como capa de rodadura se selecciona el valor que proporcione 4% de vacíos. Una vez definido el porcentaje óptimo se determinan los valores del resto de parámetros para compararlos con los criterios de diseño Marshall, en caso de que no se cumplen todos estos criterios se deben realizar ajustes o diseñar nuevamente la mezcla. (García, 2010)

#### **1.4.1.2. Martillo Marshall**

El martillo Marshall puede ser manual o automático, siendo el segundo el más adecuado ya que proporciona una compactación confiable, garantizando la misma energía en todos los golpes; también, mejora la productividad en laboratorio puesto que se realizan más briquetas en menos tiempo. Otra ventaja es el contador de número de golpes dados que permite programar el equipo para apagarse al completar el proceso de compactación. (Pinzuar, 2013)

Este equipo es portátil, fácil de usar y se ha empleado exitosamente durante varios años, pero no representa de forma verídica la compactación de mezclas en obra, ya que compacta las muestras de mezclas asfálticas mediante el impacto generado por la caída de un peso de 10 libras (4.54 kilogramos) desde una altura de 18 pulgadas (457.2 milímetros). El número de golpes depende del tipo de tráfico esperado, por lo que se deben realizar 75 o 50 golpes en cada cara de la muestra. (Asphalt Institute, 2014)



**Figura 1.5:** Martillo automático Marshall (Balseca & Becerra, 2017)

#### **1.4.2. Método SUPERPAVE**

En países desarrollados el método Marshall ha sido sustituido por el método SUPERPAVE, puesto que presenta las siguientes limitaciones:

- En laboratorio las muestras se compactan por impacto, mientras que en obra las mezclas asfálticas son compactadas de manera diferente. (Rondón & Reyes, 2015)
- En los ensayos se aplican cargas monotónicas, en cambio, en obra las cargas de tráfico son cíclicas. (Rondón & Reyes, 2015)
- No considera el comportamiento de los materiales pétreos y bituminosos de la mezcla al exponerse ante las condiciones ambientales de servicio, debido a que únicamente evalúa su comportamiento a altas temperaturas; razón por la cual no se analizan las fisuras generadas por bajas temperaturas, ni el comportamiento viscoelastoplástico del asfalto que depende de la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga. (Rondón & Reyes, 2015)

Por lo tanto, el método SUPERPAVE es más avanzado en cuanto a sus criterios de diseño volumétrico y requerimientos de materiales pétreos y bituminosos, además, los ensayos en laboratorio permiten realizar un análisis del desempeño de las mezclas muy acorde con la realidad en obra y determinan el comportamiento mecánico de las mismas, pretendiendo limitar las deformaciones permanentes y las fisuras generadas por fatiga y bajas temperaturas. (Acosta, 2014)

Este método se encuentra constituido por los siguientes componentes:

- Diseño y análisis de mezclas asfálticas de acuerdo a sus propiedades volumétricas. (Rondón & Reyes, 2015)
- Ensayos y modelos de predicción del comportamiento de las mezclas. (Rondón & Reyes, 2015)
- Especificaciones del cemento asfáltico y determinación de su clasificación en base de su grado de funcionamiento (PG). (Rondón & Reyes, 2015)

El grado de funcionamiento es el rango de temperaturas en las cuales el asfalto se desempeña de forma satisfactoria, resistiendo deformaciones y agrietamientos generados por diferentes causas, por lo que esta clasificación permite elegir el asfalto más adecuado de acuerdo a la temperatura máxima y mínima del sitio de la obra. (García, 2010)

#### **1.4.2.1. Procedimiento de diseño**

Este método de diseño fue establecido por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), en la norma: "Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures (AASHTO R 35)". Consta de tres niveles cuyos incrementos representan mayor confiabilidad y complejidad, por lo tanto, la elección del mismo se basa en el tráfico esperado y la función de la mezcla en el pavimento. (Rondón & Reyes, 2015)

**Nivel 1:** Es el más sencillo, económico y se utiliza cuando se esperan volúmenes bajos de tráfico. Emplea el PG del asfalto, especificaciones para los agregados y criterios volumétricos de diseño, no obstante, el comportamiento mecánico de las mezclas bajo cargas cíclicas no es evaluado, dificultando la determinación de la resistencia a la fatiga y a las deformaciones permanentes. (Rondón & Reyes, 2015)

**Nivel 2:** Es el más utilizado en la práctica, se emplea cuando se esperan volúmenes intermedios de tráfico y a diferencia del nivel 1 se realizan ensayos para determinar la resistencia a la fatiga y a las deformaciones permanentes. Adicionalmente, para analizar el comportamiento de la mezcla se efectúan los ensayos de corte “SUPERPAVE Shear Test (SST)” y de tensión indirecta “Indirect Tensile Test (IDT)”. (Chimborazo, 2012)

**Nivel 3:** Se utiliza cuando se esperan volúmenes altos de tráfico y proporciona la mayor confiabilidad, sin embargo, es el menos empleado en el diseño. Incluye todos los ensayos realizados en los niveles anteriores y se efectúan pruebas adicionales de corte y tensión indirecta a diferentes temperaturas. (Chimborazo, 2012)

Una vez establecido el nivel de diseño se determinan los materiales pétreos a emplearse en la mezcla, se recomienda que la curva granulométrica de los mismos pase obligatoriamente por los puntos de control que corresponden al tamaño: máximo nominal, intermedio (2.36 milímetros) y de finos (0.075 milímetros), por otro lado, se debe evitar el paso por la zona restringida que se localiza entre los tamaños intermedio y de 0.3 milímetros. Posteriormente, se selecciona el tipo de material bituminoso que se requiere de acuerdo al lugar de la obra y se determinan los contenidos óptimos de ambos materiales. (Rondón & Reyes, 2015)

#### **1.4.2.2. Compactador giratorio SUPERPAVE**

El compactador giratorio SUPERPAVE (SGC) es un equipo que simula de mejor manera el efecto producido por los rodillos compactadores en obra, debido a que compacta las muestras por amasado. Este equipo permite alcanzar en laboratorio una densidad más acorde con la realidad, considerando las condiciones climáticas y la carga que se espera en obra, además, es capaz de compactar mezclas asfálticas con grandes agregados. (Montejo, 2002)

Se encuentra constituido por una base rotatoria que soporta el molde durante la compactación, el cual es posicionado mediante cojines reactivos en un ángulo de inclinación de 1.25°. La base gira a una velocidad constante de 30 revoluciones por minuto, mientras la muestra es sometida a una presión de compactación de 600 kPa a través de un pistón accionado por un sistema hidráulico o mecánico. (Montejo, 2002)



**Figura 1.6:** Compactador giratorio SUPERPAVE (Balseca & Becerra, 2017)

## CAPÍTULO II

### 2. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se determinará el módulo resiliente de las dos mezclas asfálticas en análisis mediante ensayos de tracción indirecta, siendo la única variable el mecanismo de compactación (martillo Marshall y compactador giratorio SUPERPAVE) empleado en la elaboración de las briquetas. Por otro lado, la deformación permanente de las mezclas se establecerá mediante ensayos de flujo utilizando briquetas compactadas únicamente con martillo Marshall.

Una vez obtenidos estos parámetros se determinará una correlación estadística, que permita realizar un análisis comparativo entre los métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente: Marshall y SUPERPAVE.

En general, para la fabricación de mezclas asfálticas es indispensable estudiar detalladamente los materiales pétreos y bituminosos empleados, ya que influyen directamente en su desempeño, para lo cual se tiene diversas normas y especificaciones tanto nacionales como internacionales. Por lo tanto, la investigación está sustentada en las normas establecidas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), American Society of Testing Materials (ASTM) y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

#### 2.1. Materiales pétreos

La norma del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) denominada: “Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP – 001 - F 2002)”, divide los requisitos de los agregados para las mezclas de acuerdo al lugar de elaboración de las mismas. (MTO, 2002)

##### 2.1.1. Mezclas asfálticas en planta

Los agregados mezclados en planta se clasifican en A, B y C de acuerdo a lo siguiente:

- **Agregados tipo A:** Todas las partículas que conforman el agregado grueso son obtenidas mediante el proceso de trituración, mientras que el agregado fino puede ser de material natural o triturado, además si se requiere puede añadirse relleno de material para cumplir la graduación. (MTO, 2002)

- **Agregados tipo B:** Por lo menos el 50% del agregado grueso se obtiene mediante trituración, mientras que el agregado fino puede provenir de fuentes naturales o trituración dependiendo la disponibilidad del material. (MTOPI, 2002)
- **Agregados tipo C:** Proviene de fuentes naturales o trituración dependiendo de la disponibilidad que exista en el sector, siempre y cuando se haya verificado mediante el ensayo Marshall los límites fijados en la Tabla 2.1. (MTOPI, 2002)

**Tabla 2.1:** Criterios Marshall

<b>Tipo de Tráfico</b>	<b>Muy Pesado</b>		<b>Pesado</b>		<b>Medio</b>		<b>Liviano</b>	
<b>Criterios Marshall</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>
<b>No. De Golpes/Cara</b>	75		75		50		50	
<b>Estabilidad (libras)</b>	2200	--	1800	--	1200	--	1000	2400
<b>Flujo (pulgada/100)</b>	8	14	8	14	8	16	8	16
<b>% de Vacíos en la Mezcla</b>								
-Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
-Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
-Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9
% Vacíos agregados	Ver Tabla 2.2							
Relación filler/betún	0,8	1,2	0,8	1,2				
<b>% Estabilidad retenida luego 7 días en agua temperatura ambiente</b>								
-Capa de Rodadura	70	--	70	--				
-Intermedia o base	60	--	60	--				

Fuente: MTOPI, 2002, p. IV-105

**Tabla 2.2:** Vacíos en los agregados

<b>Tipo de Mezcla</b>	<b>V.A.M. Mínimo (%)</b>
A	16
B	15
C, D	14
E	13

Fuente: MTOPI, 2002, p. IV-106

“Los agregados estarán compuestos de partículas de piedra triturada, grava triturada, grava o piedra natural, arena, etc., de tal manera que cumplan los requisitos de graduación que se establecen en la Tabla 2.3 o Tabla 2.4”. (MTO, 2002, p. VIII-81)

**Tabla 2.3:** Requisitos granulométricos para mezclas en planta

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
2" (50.8 mm)	100	--	--
1 ½" (38.1 mm)	90 – 100	100	--
1" (25.4 mm)	--	90 – 100	100
¾" (19.0 mm)	56 – 80	--	90 – 100
½" (12.5 mm)	--	56 – 80	--
⅜" (9.5 mm)	--	--	56 – 80
Nº 4 (4.75 mm)	23 – 53	29 – 59	35 – 65
Nº 8 (2.36 mm)	15 – 41	19 – 45	23 – 49
Nº 50 (0.30 mm)	4 – 16	5 – 17	5 – 19
Nº 200 (0.075 mm)	0 - 6	1 – 7	2 – 8

Fuente: MTO, 2002, p. VIII-84

**Tabla 2.4:** Requisitos granulométricos para mezclas en planta

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	⅜"	Nº 4
1" (25.4 mm)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm)	90 – 100	100	--	--
½" (12.5 mm)	--	90 – 100	100	--
⅜" (9.5 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	--	7 – 23	7 – 40
Nº 100 (0.15 mm)	--	5 – 21	--	3 – 20
Nº 200 (0.075 mm)	2 – 8	2 – 10	2 – 10	2 – 10

Fuente: MTO, 2002, p. VIII-85

Los fragmentos usados como agregados deberán estar limpios, resistentes y duros, libres de materia vegetal y de exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, así como de material mineral cubierto de arcilla u otro material inconveniente. Además, se utilizarán materiales completamente secos, de no ser posible se secarán mediante ventiladores de tal manera que cuando se culmine el mezclado la humedad no exceda del 1%. (MTOPE, 2002)

### 2.1.2. Mezclas asfálticas en sitio

Este apartado se relaciona a las mezclas que se producen en el campo empleando un equipo especializado, para esto la granulometría debe cumplir con Tabla 2.5 y Tabla 2.6. (MTOPE, 2002)

**Tabla 2.5:** Requisitos granulométricos para mezclas en sitio

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
2" (50.8 mm)	100	--	--
1 ½" (38.1 mm)	70 – 100	100	--
1" (25.4 mm)	55 – 85	70 – 100	100
¾" (19.0 mm)	50 – 80	60 – 90	70 – 100
⅜" (9.5 mm)	40 – 70	45 – 75	50 – 80
Nº 4 (4.75 mm)	30 – 60	30 – 60	35 – 65
Nº 10 (2.00 mm)	20 – 50	20 – 50	25 – 50
Nº 40 (0.425 mm)	5 – 30	5 – 30	10 – 30
Nº 200 (0.075 mm)	0 - 5	0 – 5	0 – 5

Fuente: MTOPE, 2002, p. VIII-84

**Tabla 2.6:** Requisitos granulométricos para mezclas en sitio

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	
	⅜"	¼"
1/2" (12.5 mm)	100	--
⅜" (9.5 mm)	90 – 100	100
¼" (6.3 mm)	55 – 75	85 – 100
Nº 4 (4.75 mm)	30 – 50	--
Nº 8 (2.36 mm)	15 – 32	15 – 32
Nº 16 (1.18 mm)	0 – 15	0 – 15
Nº 200 (0.075 mm)	0 – 3	0 – 3

Fuente: MTOPE, 2002, p. VIII-85

A continuación, se presentan los ensayos realizados a los materiales pétreos de las dos plantas asfálticas EQFALTO y TEA S.A., mismas que realizan la mezcla asfáltica en planta.

- Granulometría.
- Gravedad específica.
- Durabilidad de los agregados a la acción del sulfato de sodio.
- Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de Los Ángeles.
- Equivalente de arena en agregados finos, valores mínimos en la Tabla 2.7.

**Tabla 2.7:** Equivalente de arena

	Equivalente de Arena	
	Tráfico liviano y mediano	Tráfico pesado
<b>Base</b>	35	40
<b>Capa de rodadura</b>	45	50

**Fuente:** MTOP, 2002, p. VIII-83

## 2.2. Materiales bituminosos

“El cemento asfáltico se designa por las letras CA o AC (Asphalt Cement en un país anglosajón) y se clasifica por lo general de acuerdo con su consistencia evaluada a través de dos ensayos: penetración y viscosidad”. (Rondón & Reyes, 2015, p. 2). Por otro lado, en países desarrollados se utiliza una clasificación del material bituminoso diferente, basada en su grado de funcionamiento o desempeño.

En Ecuador se emplea con mayor frecuencia la clasificación por viscosidad, cuyos parámetros se encuentran establecidos en la norma del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) denominada: “Productos derivados del petróleo. Cemento asfáltico (clasificación por viscosidad) requisitos (NTE INEN 2515)”. Por otro lado, los parámetros de la clasificación por penetración se encuentran señalados en la norma del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) denominada: “Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP – 001 - F 2002)”.

La siguiente tabla de equivalencias entre las dos clasificaciones del cemento asfáltico empleadas en nuestro país, permitirá un mejor entendimiento del análisis que se

efectuará posteriormente empleando los resultados obtenidos en la caracterización de los materiales bituminosos.

**Tabla 2.8:** Equivalencias entre grado de penetración y de viscosidad

<b>Grado de penetración</b>	<b>Grado de viscosidad</b>
40 - 50	AC - 40
60 - 70	AC - 20
85 - 100	AC - 10
120 - 150	AC - 5
200 - 300	AC - 2.5

**Fuente:** Salazar, 2011, p. 5

La toma de muestra del material bituminoso de la planta EQFALTO se efectuó el martes 21 de marzo del 2017, mientras que la toma de muestra de la planta TEA S.A. se efectuó el miércoles 29 de marzo del 2017. Las dos muestras de asfalto debían cumplir los criterios de calificación por viscosidad de un AC - 20 y los criterios de calificación por penetración de un 60 - 70, de acuerdo a la producción existente en nuestro país.

A continuación, se mencionan los ensayos realizados a los asfaltos originales y a los asfaltos envejecidos de las dos plantas asfálticas en análisis.

Asfaltos originales:

- Penetración.
- Densidad.
- Viscosidad cinemática en base a la viscosidad a elevadas temperaturas usando viscosímetro rotatorio.
- Punto de chispa y llama con el equipo de copa abierta de Cleveland.
- Viscosidad por viscosímetro capilar al vacío.
- Punto de ablandamiento (aparato anillo y bola).

Asfaltos envejecidos:

- Horno de película delgada rodante (RTFO).
- Ductilidad (RTFO).
- Viscosidad por viscosímetro capilar al vacío (RTFO).

### **2.3. Mezclas asfálticas**

La muestra de mezcla asfáltica de la planta EQFALTO fue tomada el martes 21 de marzo del 2017, mientras que la muestra de la planta TEA S.A. fue tomada el miércoles 29 de marzo del 2017. Las dos mezclas debían cumplir los criterios Marshall, debido al método de diseño empleado en el Ecuador, correspondientes a un tipo de tráfico pesado y a mezclas empleadas como capa de rodadura; dichos criterios se encuentran establecidos por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) en la norma: “Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (MOP – 001 - F 2002)”.

A continuación, se mencionan los ensayos realizados a las mezclas asfálticas sueltas y compactadas (briquetas) con martillo Marshall y compactador giratorio de las dos plantas en análisis.

Mezclas asfálticas sueltas:

- Gravedad específica máxima teórica.
- Contenido de ligante asfáltico por el método de ignición.
- Efecto del agua en mezclas bituminosas empleando agua hirviendo (peladura).

Para completar la caracterización de las mezclas se realizaron 9 briquetas compactadas con martillo Marshall por cada una de las plantas en consideración, por lo tanto, en 18 briquetas en total se efectuaron los siguientes ensayos:

- Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas bituminosas compactadas.
- Porcentaje de vacíos de aire en mezclas bituminosas compactadas.
- Estabilidad y flujo Marshall de mezclas bituminosas compactadas.

Finalmente, se compactaron 9 briquetas con martillo Marshall y 9 briquetas con compactador giratorio con cada una de las mezclas asfálticas en análisis, por lo tanto, se efectuó el ensayo de módulo resiliente en 36 briquetas en total.

### **2.4. Martillo Marshall**

El objetivo de este método es determinar la cantidad de bitumen óptimo para una mezcla asfáltica con agregados minerales, además, obtener información sobre las características físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente, con el fin de poder establecer el cumplimiento de parámetros establecidos para densidad y contenido de vacíos óptimo para su correcto funcionamiento durante la construcción de la capa de pavimento. (Minaya & Ordóñez, 2001)

Para aplicar este método se preparan briquetas de 63.5 milímetros de espesor y 100 milímetros de diámetro, mediante cargas de impacto normadas, se emplearon 75 golpes por cada cara de la biqueta mediante un martillo de compactación mecánico el cual posee una base de apisonado de 98.4 milímetros de diámetro, equipado con un pistón de 10 libras de peso total y cuya altura de caída es de 457.2 milímetros. (Minaya & Ordóñez, 2001)

En esta investigación se elaboraron 9 briquetas de cada planta asfáltica para determinar las características volumétricas de las mezclas, realizándose los ensayos de gravedad específica Bulk y densidad de mezclas bituminosas compactadas para obtener el porcentaje de vacíos de aire en mezcla. Además, se establecieron las propiedades mecánicas a través del ensayo de estabilidad y flujo Marshall

También, se realizaron 9 briquetas adicionales de cada planta asfáltica para determinar el módulo resiliente de las mezclas.



**Figura 2.1:** Briquetas compactadas con martillo Marshall (Balseca & Becerra, 2017)

## **2.5. Compactador giratorio SUPERPAVE**

Los moldes del compactador giratorio proporcionan confinamiento a la mezcla asfáltica durante el proceso de compactación, por lo tanto, las paredes de acero deben ser gruesas con un espesor mínimo de 7.5 milímetros y la placa base debe ser capaz de resistir deformación bajo carga. Los moldes fueron diseñados con dos diámetros: 6 pulgadas correspondientes a 152.4 milímetros y 4 pulgadas correspondientes a 101.6 milímetros, siendo el primero el molde estándar. (Asphalt Institute, 2014)

Para obtener el módulo resiliente de mezclas compactadas con el método SUPERPAVE (compactador giratorio), se realizaron 9 briquetas utilizando la mezcla de la planta asfáltica EQFALTO y 9 briquetas utilizando la mezcla de la planta asfáltica TEA S.A. Es importante destacar que se emplearon los moldes de 4 pulgadas, requiriéndose para cada briqueta 1200 gramos de mezcla aproximadamente, ya que al utilizar los moldes estándar se debían extraer núcleos debido a la necesidad de muestras más pequeñas para realizar el ensayo.

La extracción de núcleos podía quebrar los agregados pétreos, alterando los resultados obtenidos en el ensayo y distorsionando el proceso de investigación; mientras que ocupando moldes que posean el mismo diámetro, tanto en el método Marshall como en el método SUPERPAVE, se generarían análisis comparativos más adecuados al evitar la utilización de núcleos que se encontrarían más densificados en comparación con la mezcla asfáltica compactada en los bordes del molde estándar.

Las mezclas asfálticas se calentaban hasta alcanzar la temperatura de compactación (130 °C), de igual manera, el molde y los accesorios a emplearse en la colocación y el acomodo de la mezcla debían calentarse para evitar la pérdida de temperatura durante el proceso de compactación. Posteriormente, se procedía a elaborar las briquetas empleando el compactador giratorio.



**Figura 2.2:** Molde de compactador giratorio SUPERPAVE (Balseca & Becerra, 2017)

### 2.5.1. Número de giros

La energía de compactación que debe emplearse en el método SUPERPAVE se encuentra en función del tráfico esperado, el cual debe ser determinado de acuerdo al número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas que circularán en el carril durante el período de diseño seleccionado (“Equivalent Simple Axial Load”, ESAL’s). A continuación, se presenta el número de giros requeridos según el criterio ya mencionado. (Rondón & Reyes, 2015)

**Tabla 2.9:** Esfuerzo de compactación giratoria SUPERPAVE

ESAL’s de diseño (millones)	Parámetros de compactación		
	N <sub>inicial</sub>	N <sub>diseño</sub>	N <sub>máximo</sub>
< 0.3	6	50	75
0.3 a < 3	7	75	115
3 a < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

**Fuente:** Asphalt Institute, 2014, p. 68

De acuerdo a un tráfico pesado se seleccionaron 75, 100 y 115 giros para elaborar 3 briquetas con cada uno de los mismos y realizar el ensayo de gravedad específica Bulk, para determinar el porcentaje de vacíos en mezcla; una vez efectuado este cálculo se comparan los resultados con el porcentaje de vacíos en mezcla compactada con martillo Marshall. De esta manera, se asegura que la propiedad volumétrica de porcentaje de vacíos sea la misma en ambos métodos.

Este procedimiento se efectuó con las mezclas de las dos plantas asfálticas en consideración y después de analizar los resultados obtenidos en ambos casos, se seleccionaron 75 giros como la energía de compactación más adecuada para el método SUPERPAVE.

## CAPÍTULO III

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

#### 3.1. Materiales pétreos

##### 3.1.1. Granulometría

**Norma:**       ASTM C136               AASHTO T27

Es la distribución de los tamaños de las partículas del material pétreo, determinada al tamizar una muestra representativa de material y tomando los pesos retenidos en cada malla; se emplean series de tamices de aberturas cuadradas o redondas, ordenados de mayor a menor. En una mezcla asfáltica la granulometría de los agregados determina el incremento o disminución de sus propiedades mecánicas e influye en su costo ya que una granulometría adecuada asegura un mejor acomodo de las partículas, requiriéndose menor cantidad de asfalto para cubrirlas de forma homogénea. (Montesinos & Reyes, 2010)



**Figura 3.1:** Series de tamices para agregado grueso y fino (Balseca & Becerra, 2017)

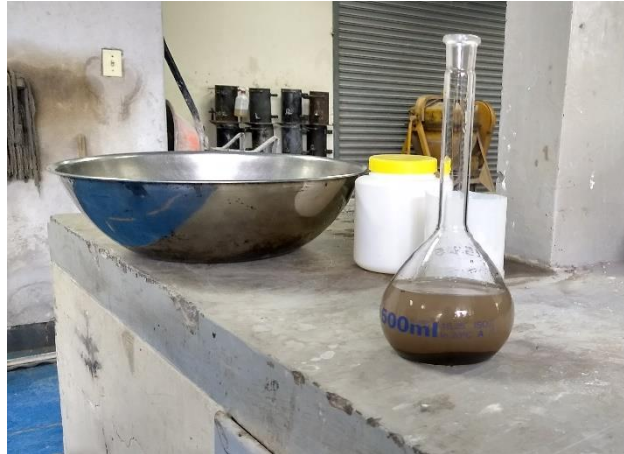
##### 3.1.2. Gravedad específica

**Norma agregado grueso:**   ASTM 127               AASHTO T85

**Norma agregado fino:**       ASTM C128               AASHTO T84

“La gravedad específica de un agregado es útil para determinar la relación peso-volumen del agregado compactado y así calcular el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas en caliente compactadas”. (Minaya & Ordóñez, 2001, p.103). Se define como

gravidad específica a la relación entre el peso del volumen de un material y el peso del mismo volumen lleno de agua, en este ensayo se establecen tres gravedades específicas diferentes del agregado grueso y fino: gravidad específica Bulk, gravidad específica saturada con superficie seca y gravidad específica aparente; adicionalmente, se determina el porcentaje de absorción de los materiales pétreos. (Minaya & Ordóñez, 2001)



**Figura 3.2:** Muestra de agregado fino en matraz (Balseca & Becerra, 2017)

### **3.1.3. Durabilidad de los agregados a la acción del sulfato de sodio**

**Norma:**        ASTM C88                AASHTO T104

Determina la resistencia del agregado a desintegrarse en el momento en que el agua contenida dentro de sus poros se expande por congelamiento, por lo tanto, pretende estimar la resistencia al intemperismo. En este ensayo las muestras de material pétreo se sumergen en sulfato de sodio o magnesio, posteriormente, se retira el mismo y se secan las muestras en el horno para deshidratar la sal dentro de sus poros; luego se coloca nuevamente sulfato para volver a hidratar la sal. Se realiza este procedimiento hasta completar cinco ciclos y las muestras se desintegran debido a la fuerza interna de expansión que genera la rehidratación de la sal en cada ciclo. (Rondón & Reyes, 2015)



**Figura 3.3:** Muestras sumergidas en sulfato de sodio (Balseca & Becerra, 2017)

#### **3.1.4. Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de Los Ángeles**

**Norma:**        ASTM C131        AASHTO T96

Este ensayo nos permite obtener de manera teórica la abrasión o desgaste del material pétreo por medio de la fricción entre partículas, en la realidad el ensayo solo presenta resistencia al fisuramiento ya que dicho material está sometido a fuerzas de impacto. Esto se debe a que el agregado grueso (partículas hasta 37,5 milímetros) es golpeado dentro de un cilindro metálico por esferas de acero, las cuales poseen un diámetro de 46,8 milímetros y masa comprendida entre 390 y 445 gramos, mismas que fisuran el agregado. (Rondón & Reyes, 2015)



**Figura 3.4:** Máquina de los Ángeles (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.1.5. Equivalente de arena en agregados finos

**Norma:** ASTM D2419 AASHTO T176

Evalúa el contenido de partículas de tamaño de arcilla que se encuentran adheridas al agregado pétreo fino (arenas y limos). Este ensayo es fundamental en una mezcla asfáltica ya que esta fracción de material empieza a reemplazar al agregado grueso, además estas partículas producen una pérdida de adherencia con el asfalto, aumentando la cantidad de bitumen empleado en la mezcla. (Rondón & Reyes, 2015)



**Figura 3.5:** Probetas graduadas con agregado fino (Balseca & Becerra, 2017)

## 3.2. Materiales bituminosos

### 3.2.1. Penetración de materiales bituminosos

**Norma:** ASTM D5/D5M AASHTO T49

Establece la resistencia del material bituminoso a ser penetrado con una aguja de 100 gramos, a una temperatura de 25 °C durante cinco segundos y se mide en décimas de milímetro; este ensayo evalúa de forma directa la consistencia del asfalto y de forma indirecta su rigidez, puesto que la aguja penetrará menos en un asfalto más rígido. Tres ensayos a diferentes temperaturas permiten conocer el índice de penetración del asfalto, si este valor es mayor a +1.0 se trata de un asfalto muy rígido y viscoso con baja susceptibilidad térmica que puede generar en las mezclas problemas de fisuración a bajas temperaturas; por otro lado, si este valor es menor a -1.2 se trata de un asfalto con alta susceptibilidad térmica que disminuye bruscamente su rigidez y genera en las mezclas desplazamientos verticales significativos. (Rondón & Reyes, 2015)



**Figura 3.6:** Ensayo de penetración (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.2.2. Densidad de materiales bituminosos semisólidos

**Norma:**        ASTM D70            AASHTO T 229

Se obtiene mediante el método del picnómetro y sirve para determinar la viscosidad absoluta y relativa del material bituminoso, este ensayo consiste en el uso de un picnómetro cuya calibración se la realiza llenándolo con agua, para posteriormente llenarlo con material bituminoso, finalmente se aplica una fórmula con las masas obtenidas y se determina la densidad. (INEN, 2013)



**Figura 3.7:** Picnómetro lleno con asfalto (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.2.3. Viscosidad cinemática de asfaltos

**Norma:** ASTM D2170 AASHTO T201

Este ensayo permite conocer el estado de fluidez de los asfaltos a temperaturas que se emplean durante la aplicación del mismo, garantiza el almacenamiento, transporte y permite determinar la temperatura de mezclado y compactación junto al ensayo de viscosidad absoluta a 60°C; se puede obtener la viscosidad de asfaltos líquidos y residuos destilados de asfaltos líquidos, a temperatura de 60 °C y de cementos asfálticos a 135 °C, en el rango de 10 a 100000 centistokes (1 centistoke = 1 mm<sup>2</sup>/s). Se puede obtener a otras temperaturas, pero la norma solamente establece la precisión para 60 °C y 135 °C. (Asphalt Institute, 1989)



**Figura 3.8:** Equipo para determinar la viscosidad cinemática (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.2.4. Punto de chispa y llama con el equipo de copa abierta de Cleveland

**Norma:** ASTM D92 AASHTO T 79

El punto de chispa permite conocer la temperatura a la cual se puede calentar el material bituminoso sin peligro de inflamación si existe presencia de llama libre, esta temperatura es mucho menor a la cual el material ardería; mientras que el punto de llama es la temperatura a la cual el asfalto arde completamente y se mide por el ensayo de vaso

abierto de Cleveland, el punto de llama muy rara vez se incluye en las especificaciones del material bituminoso. (Asphalt Institute, 1989)



**Figura 3.9:** Equipo copa abierta de Cleveland (Balseca & Becerra, 2017)

### **3.2.5. Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío**

**Norma:**        ASTM D2171        AASHTO T202

Este ensayo permite conocer el estado de fluidez de los asfaltos a temperaturas que se emplean durante la aplicación del mismo, este método consiste en determinar la consistencia del asfalto a 60°C y se realiza con asfalto original, posteriormente, se vuelve a realizar el ensayo con asfalto envejecido para determinar un rango de fluidez del mismo. (ASTM, 2010)



**Figura 3.10:** Equipo para determinar la viscosidad al vacío (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.2.6. Punto de ablandamiento de bitumen

**Norma:**        ASTM D36/D36M                    AASHTO T53

Determina la temperatura a la cual el bitumen pasa de estado sólido a líquido, mediante un aparato denominado anillo y bola, fijando así la máxima temperatura de operación de las mezclas asfálticas en obra. Es fundamental destacar que el pavimento no debería experimentar dicha temperatura, ya que el asfalto perdería gran parte de su rigidez y por ende la mezcla también. (Rondón & Reyes, 2015)



**Figura 3.11:** Ensayo de punto de ablandamiento (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.2.7. Horno de película delgada rodante (RTFO)

**Norma:** ASTM D2872 AASHTO T240

Evalúa la susceptibilidad del cemento asfáltico al envejecimiento a corto plazo, midiendo el cambio de masa con respecto a la muestra original; su resultado representa pérdida de masa cuando el signo es negativo, por el contrario, representa ganancia de masa cuando el signo es positivo. (Salazar, 2011). Se debe mencionar que el envejecimiento a corto plazo se produce en la planta asfáltica durante el almacenamiento del bitumen y la fabricación de la mezcla, mientras que en obra se produce durante la colocación y compactación de la mezcla. En general, el asfalto envejecido reduce su adherencia con el material pétreo y pasa de un comportamiento dúctil a frágil bajo la acción de cargas, sin embargo, aumenta su rigidez volviéndose deseable en cierta medida. (Rondón & Reyes, 2015)

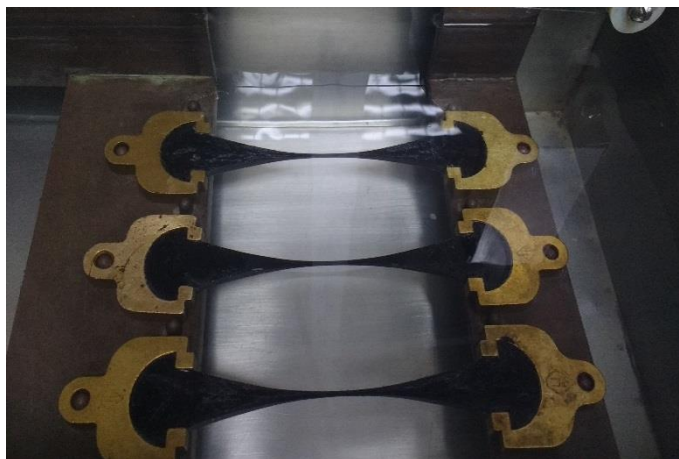


**Figura 3.12:** Botellas RTFO (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.2.8. Ductilidad de materiales bituminosos

**Norma:** ASTM D113            AASHTO T51

Este ensayo emplea como equipo un ductilímetro para traccionar las muestras de material bituminoso, y es fundamental ya que se deben garantizar mezclas asfálticas dúctiles ante la acción de las cargas cíclicas previstas. Un comportamiento dúctil produce deformaciones elásticas o permanentes sin generar fallas estructurales en la mezcla, por el contrario, un comportamiento frágil ocasiona microfisuración ante bajas temperaturas y no produce deformaciones ya que la mezcla se rompe rápidamente bajo la aplicación de las cargas. (Rondón & Reyes, 2015)



**Figura 3.13:** Ensayo de ductilidad (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.3. Mezclas bituminosas y briquetas compactadas

#### 3.3.1. Gravedad específica máxima teórica de mezclas bituminosas de pavimentación

**Norma:** ASTM D2041 AASHTO T209

La gravedad específica máxima teórica también llamada gravedad específica Rice, en honor a James Rice quién desarrolló el procedimiento de este ensayo. Nos permite conocer la gravedad específica máxima de mezclas asfálticas en estado suelto. (Minaya & Ordoñez, 2001)



**Figura 3.14:** Equipo para determinar la gravedad específica Rice (Balseca & Becerra, 2017)

#### 3.3.2. Contenido de ligante asfáltico por el método de ignición

**Norma:** ASTM D6307 AASHTO T308

El contenido de asfalto de una mezcla se determina a través del volumen total de la mezcla menos la cantidad de agregado mineral, que al ser sometido al horno de ignición a 500°C queda solamente el material pétreo. Se define como la porción total de asfalto añadida a la mezcla que se queda como una capa exterior de la partícula de material pétreo, cuyo espesor es suficiente para resistir los elementos del intemperismo evitando de esta manera que el asfalto se oxide con rapidez. Esta capa no debe ser tan gruesa como para que la mezcla pierda estabilidad, es decir, deformación excesiva por flujo plástico o resistencia y no soporte las cargas de vehículos, además este contenido de asfalto predomina en el desempeño de una mezcla asfáltica. (Garnica, Delgado & Sandoval, 2005)



**Figura 3.15:** Horno de ignición (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.3.3. Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas bituminosas compactadas no absorbentes

**Norma:**        ASTM D2726        AASHTO T166

La gravedad específica Bulk de mezclas bituminosas compactadas se utiliza esencialmente para determinar su composición volumétrica, es decir, permite calcular su porcentaje de vacíos de aire de acuerdo al método de diseño Marshall. También, este ensayo permite calcular el porcentaje de agua absorbida y la densidad de las mezclas compactadas. (Minaya & Ordóñez, 2001)



**Figura 3.16:** Briqueta sumergida en agua a 25 °C (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.3.4. Efecto del agua en mezclas bituminosas empleando agua hirviendo (peladura)

**Norma:** ASTM D3625

Es un ensayo visual que determina si la película de material bituminoso continuará envolviendo al agregado pétreo cuando ingrese agua a la mezcla asfáltica, consiste en colocar una muestra de mezcla suelta en agua destilada hirviendo (punto de ebullición igual a 70 °C) durante diez minutos y presenta su resultado en base a la estimación de la superficie de agregado que continúa recubierta por una capa de asfalto (mayor o menor al 95% de cobertura). (Acosta, 2014)



**Figura 3.17:** Ensayo de peladura (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.3.5. Porcentaje de vacíos de aire en mezclas bituminosas compactadas

**Norma:** ASTM 3203      AASHTO T269

El porcentaje de vacíos hace referencia a las relaciones de peso-volumen de las mezclas asfálticas, para obtener el porcentaje de vacíos por briqueta se debe conocer previamente la gravedad específica Bulk y la gravedad específica Rice de la mezcla. Es un parámetro muy importante porque si existe demasiada cantidad de vacíos en una mezcla, esta puede fallar fácilmente por la acción de las cargas vehiculares aplicadas a la capa de pavimento. (Minaya & Ordoñez, 2001)

### 3.3.6. Estabilidad y flujo Marshall de mezclas bituminosas compactadas

**Norma:** ASTM D6927 AASHTO T245

La estabilidad es la máxima carga que resiste la mezcla bituminosa compactada en el ensayo de rotura a una temperatura de 60 °C, por lo que determina su resistencia estructural; depende principalmente del contenido de asfalto que proporciona cohesión a la mezcla y de la granulometría, la textura y la forma del material pétreo que junto a la densidad de la mezcla y la cantidad y tipo de asfalto producen la fricción interna de la misma. El flujo es la deformación ocasionada en dirección perpendicular al eje cilíndrico antes de producirse la fractura de la briqueta durante el ensayo de estabilidad, y es un valor que se emplea como indicador de la predisposición de la mezcla asfáltica a alcanzar una condición plástica, por lo tanto, representa su resistencia a la deformación ante la acción de las cargas de tráfico esperadas. (Universidad Mayor de San Simón, 2004)



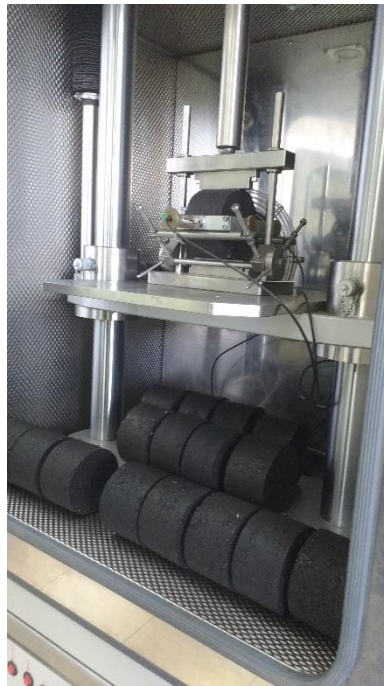
**Figura 3.18:** Ensayo de estabilidad y flujo Marshall (Balseca & Becerra, 2017)

### 3.3.7. Módulo resiliente de mezclas bituminosas compactadas

**Norma:** ASTM D7369

Se considera la deformación recuperable luego de aplicar carga a la briqueta en análisis, además indica que tan rígido es un material bajo carga cíclica del tipo resiliente y

es un parámetro de gran importancia cuando el diseño de pavimentos se realiza por métodos racionales. Dadas las características elásticas y de viscosidad de la mezcla asfáltica, la deformación que se recupera luego de aplicada la carga se divide en dos componentes: una recuperabilidad instantánea luego de finalizar el pulso de carga, y otra recuperabilidad total que se produce con un pequeño desfase luego de eliminar la carga aplicada, por lo tanto, al módulo resiliente también se conoce como módulo instantáneo y módulo total. (Acosta, 2014)



**Figura 3.19:** Máquina universal (Balseca & Becerra, 2017)

## **CAPÍTULO IV**

### **4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CORRELACIÓN ESTADÍSTICA**

En este capítulo se presentan únicamente tablas de los resultados obtenidos en los ensayos descritos anteriormente y empleados para caracterizar los materiales pétreos, clasificar los materiales bituminosos de acuerdo a su grado de viscosidad y penetración, y caracterizar las mezclas bituminosas y briquetas compactadas de las dos plantas asfálticas analizadas: EQFALTO y TEA S.A.

Los cálculos realizados para obtener los resultados se incluyen en los anexos, perteneciendo el Anexo 1 a los ensayos efectuados con las muestras de la planta EQFALTO y el Anexo 2 a los ensayos efectuados con las muestras de la planta TEA S.A.; en los anexos también se encuentran las tablas de los resultados de las diferentes caracterizaciones para verificar de forma sencilla los mismos.

Finalmente, en este capítulo se desarrollan los cálculos requeridos para determinar las correlaciones estadísticas entre módulo resiliente y deformación permanente para los métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente Marshall y SUPERPAVE, mediante los valores obtenidos en los ensayos de tracción indirecta y flujo Marshall realizados a las mezclas compactadas de las dos plantas asfálticas.

#### **4.1. Resultados de la caracterización de materiales pétreos**

La granulometría de la mezcla de agregados de cada planta asfáltica se estableció mediante el promedio de los valores obtenidos en dos ensayos de granulometría, los mismos fueron realizados después de efectuarse el ensayo de contenido de ligante asfáltico (método de ignición) en muestras de mezcla asfáltica suelta.

A continuación, se comparan dichas granulometrías con las especificaciones establecidas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) en la norma MOP - 001 - F 2002 en la Tabla 405-5.1, perteneciente a la Sección 811 (Agregados para hormigón asfáltico) considerando como tamaño máximo de los agregados 3/4 de pulgada (19 milímetros).

**Tabla 4.1:** Resultados de la granulometría de mezcla de agregados

Agregados para hormigón asfáltico							Resultados			
Ensayo	Unidad	Norma	Malla N°	Tamaño (mm)	Mín.	Máx.	Planta asfáltica EQFALTO		Planta asfáltica TEA S.A.	
Granulometría	%	ASTM C136	3/4	19	90	100	100.0	Cumple	97.0	Cumple
			1/2	12.5	-	-	90.6	-	82.3	-
			3/8	9.5	56	80	86.1	No cumple	73.6	Cumple
			# 4	4.8	35	65	67.9	No cumple	56.1	Cumple
			# 8	2.4	23	49	52.0	No cumple	46.2	Cumple
			# 16	1.2	-	-	40.8	-	37.9	-
			# 30	0.6	-	-	30.2	-	27.7	-
			# 50	0.3	5	19	19.1	No cumple	15.2	Cumple
			# 100	0.2	-	-	9.5	-	7.6	-
			# 200	0.1	2	8	4.6	Cumple	3.6	Cumple

**Fuente:** Balseca & Becerra, 2017

De igual manera, se comparan los resultados de la caracterización de materiales pétreos con las especificaciones establecidas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) en la norma MOP - 001 - F 2002 en la Sección 811.

**Tabla 4.2:** Resultados de la caracterización de materiales pétreos de la planta EQFALTO

Agregados para hormigón asfáltico					Resultados planta asfáltica EQFALTO					
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máx.	Agregado grueso (3/4)		Agregado fino (3/8)		Agregado fino (arena)	
Gravedad específica Bulk	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.54	-	2.51	-	2.62	-
Gravedad específica saturada con superficie seca	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.60	-	2.58	-	2.65	-
Gravedad específica aparente	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.72	-	2.71	-	2.69	-
Porcentaje de absorción	%	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.64	-	2.90	-	0.91	-
Desgaste de agregado grueso en la máquina de Los Ángeles	%	ASTM C131	-	40	22.00	Cumple	-	-	-	-
Durabilidad a la acción del sulfato de sodio	%	ASTM C88	-	12	0.9	Cumple	23.1	No cumple	17.0	No cumple
Equivalente de arena en agregados finos	%	ASTM D2419	50	-	-	-	74	Cumple	88	Cumple

**Fuente:** Balseca & Becerra, 2017

**Tabla 4.3:** Resultados de la caracterización de materiales pétreos de la planta TEA S.A.

Agregados para hormigón asfáltico					Resultados planta asfáltica TEA S.A.					
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máx.	Agregado grueso (3/4)		Agregado grueso (3/8)		Agregado fino (arena)	
Gravedad específica Bulk	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.16	-	2.25	-	2.46	-
Gravedad específica saturada con superficie seca	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.34	-	2.28	-	2.54	-
Gravedad específica aparente	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.63	-	2.30	-	2.68	-
Porcentaje de absorción	%	ASTM C127 ASTM C128	-	-	8.22	-	0.97	-	3.31	-
Desgaste de agregado grueso en la máquina de Los Ángeles	%	ASTM C131	-	40	30.82	Cumple	30.64	Cumple	-	-
Durabilidad a la acción del sulfato de sodio	%	ASTM C88	-	12	2.7	Cumple	4.9	Cumple	12.9	No cumple
Equivalente de arena en agregados finos	%	ASTM D2419	50	-	-	-	-	-	67	Cumple

**Fuente:** Balseca & Becerra, 2017

#### 4.2. Resultados de la caracterización de materiales bituminoso

A continuación, se comparan los resultados de la caracterización de materiales bituminosos con las especificaciones para la calificación del asfalto por viscosidad, establecidas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) en la norma NTE INEN 2515 en la Tabla 7.

**Tabla 4.4:** Resultados de la calificación por viscosidad de los materiales bituminosos

Grado de viscosidad AC - 20					Resultados			
					Planta asfáltica EQFALTO		Planta asfáltica TEA S.A.	
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máy.				
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D2171	160	240	249.248	No cumple	193.892	Cumple
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	ASTM D2170	300	-	413.786	Cumple	374.362	Cumple
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	232	-	311	Cumple	319	Cumple
Índice de penetración	-	ASTM D5/D5M	-1.5	+1	-0.4	Cumple	-0.9	Cumple
<b>Residuo de ensayos de película fina de horno giratorio (RTFO)</b>								
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D2171	-	800	1067.826	No cumple	740.721	Cumple
Cambio de masa	%	ASTM D2872	-	1	-0.029	Cumple	-0.006	Cumple
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min	cm	ASTM D113	50	-	46	No cumple	58	Cumple

**Fuente:** Balseca & Becerra, 2017

Del mismo modo, se comparan los resultados de la caracterización de materiales bituminosos con las especificaciones para la calificación del asfalto por penetración, establecidas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) en la norma MOP - 001 - F 2002 en la Tabla 810.2.1, perteneciente a la Sección 810 (Asfaltos y productos asfálticos).

**Tabla 4.5:** Resultados de la calificación por penetración de los materiales bituminosos

Grado de penetración 60 - 70					Resultados			
					Planta asfáltica EQFALTO		Planta asfáltica TEA S.A.	
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máx.				
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s	mm/10	ASTM D5/D5M	60	70	65	Cumple	69	Cumple
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36/D36M	48	57	50.55	Cumple	48.30	Cumple
Índice de penetración	-	ASTM D5/D5M	-1.5	+1	-0.4	Cumple	-0.9	Cumple
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	232	-	311	Cumple	319	Cumple
Densidad relativa 25 °C / 25 °C	-	ASTM D70	1.000	-	1.013	Cumple	1.011	Cumple
<b>Residuo de ensayos de película fina de horno giratorio (RTFO)</b>								
Variación de masa	%	ASTM D2872	-	0.8	-0.029	Cumple	-0.006	Cumple
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min	cm	ASTM D113	50	-	46	No cumple	58	Cumple

Fuente: Balseca & Becerra, 2017

#### 4.3. Resultados de la caracterización de mezclas bituminosas y briquetas compactadas

A continuación, se comparan los resultados de la caracterización de mezclas bituminosas y briquetas compactadas con las especificaciones establecidas por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) en la norma MOP - 001 - F 2002 en la Tabla 405.5.4. perteneciente a la Sección 405 (Capas de rodadura).

**Tabla 4.6:** Resultados de la caracterización de mezclas bituminosas y briquetas compactadas

Mezclas asfálticas para tráfico pesado					Resultados			
					Planta asfáltica EQFALTO		Planta asfáltica TEA S.A.	
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máx.				
Estabilidad	lb	ASTM D6927	1800	-	3269.25	Cumple	3599.36	Cumple
Flujo	in/100	ASTM D6927	8	14	9.53	Cumple	10.61	Cumple
Porcentaje de vacíos en mezcla	%	ASTM D3203	3	5	10.36	No cumple	3.54	Cumple
Gravedad específica máxima teórica	-	ASTM D2041	-	-	2.398	-	2.355	-
Contenido de ligante asfáltico	%	ASTM D6307	-	-	6.43	-	7.13	-
Efecto del agua hirviendo (peladura)	%	ASTM D3625	95	-	100.00	Cumple	100.00	Cumple
Gravedad específica Bulk	-	ASTM D2726	-	-	2.150	-	2.272	-
Densidad a 25°C	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D2726	-	-	2143.085	-	2264.827	-
Porcentaje de agua absorbida	%	ASTM D2726	-	-	0.13	-	0.30	-
Módulo resiliente (Marshall)	Mpa	ASTM D7369	-	-	2194.56	-	2562.89	-
Módulo resiliente (SUPERPAVE)	Mpa	ASTM D7369	-	-	2182.78	-	2648.11	-

Fuente: Balseca & Becerra, 2017

#### 4.4. Correlación estadística entre el módulo resiliente y la deformación permanente (flujo)

Con los resultados obtenidos en los ensayos de tracción indirecta (módulo resiliente) y flujo Marshall (deformación permanente) se establecen como variables para establecer una correlación estadística entre los dos métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente para cada planta analizada. El parámetro de flujo Marshall se considera como variable independiente “x”, mientras que el módulo resiliente se considera como variable dependiente “y”; para determinar dicha correlación se emplearán las siguientes fórmulas:

Media aritmética de flujo Marshall:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (\text{Mendehall, Beaver \& Beaver, 2010, p. 54})$$

Donde:  $\sum x_i$  = Sumatoria de los valores de flujo Marshall.

$n$  = Número de mediciones en la muestra.

Media aritmética de módulo resiliente:

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad (\text{Mendehall, Beaver \& Beaver, 2010, p. 54})$$

Donde:  $\sum y_i$  = Sumatoria de los valores de módulo resiliente.

$n$  = Número de mediciones en la muestra.

Desviación muestral estándar de flujo:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}{n-1}} \quad (\text{Mendehall, Beaver \& Beaver, 2010, p.63})$$

Desviación muestral estándar de módulo resiliente:

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}}{n-1}} \quad (\text{Mendehall, Beaver \& Beaver, 2010, p.63})$$

Covarianza entre flujo y módulo resiliente:

$$s_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \quad (\text{Mendehall, Beaver \& Beaver, 2010, p.106})$$

Coefficiente de correlación:

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (\text{Mendehall, Beaver \& Beaver, 2010, p.105})$$

Una vez elaborados los análisis estadísticos para cada uno de los métodos de diseño de mezclas asfálticas se procede a realizar sus gráficas de dispersión con los valores de flujo y módulo resiliente obtenidos en laboratorio, de esta manera, se determina la línea de tendencia y la ecuación de correlación del método Marshall y SUPERPAVE para las plantas asfálticas consideradas.

Posteriormente, se presenta el cálculo del punto de balance o equilibrio de los métodos: Marshall y SUPERPAVE, el cual es determinado por el punto de intersección de sus respectivas líneas de tendencia (mismos valores de flujo y módulo resiliente) para cada una de las plantas asfálticas; a partir de este punto se pueden comparar los métodos de diseño de mezclas en caliente analizados.

#### 4.4.1. Planta asfáltica EQFALTO

**Tabla 4.7:** Cálculos para correlación entre módulo resiliente y deformación permanente (flujo) para la planta asfáltica EQFALTO

N°	Flujo (0,01 in) "x"	Módulo (MPa)		x <sup>2</sup>	y <sub>1</sub> <sup>2</sup>	y <sub>2</sub> <sup>2</sup>	(x <sub>i</sub> - $\bar{x}$ ). (y <sub>1i</sub> - $\bar{y}_1$ )	(x <sub>i</sub> - $\bar{x}$ ). (y <sub>2i</sub> - $\bar{y}_2$ )
		Marshall "y <sub>1</sub> "	SUPERPAVE "y <sub>2</sub> "					
1	9.00	2325	2183	81.00	5405625	4765489	-68.846	-0.117
2	9.50	1990	2116	90.25	3960100	4477456	5.682	1.855
3	9.25	2146	2005	85.56	4605316	4020025	13.488	49.383
4	10.50	1889	2290	110.25	3568321	5244100	-297.068	104.244
5	10.50	2021	2180	110.25	4084441	4752400	-168.735	-2.701
6	9.50	1872	2063	90.25	3504384	4255969	8.960	3.327
7	9.25	2492	2309	85.56	6210064	5331481	-82.623	-35.062
8	8.50	2343	2090	72.25	5489649	4368100	-152.568	95.355
9	9.75	2673	2409	95.06	7144929	5803281	106.321	50.272
<b>Σ</b>	85.75	19751	19645	820.44	43972829	43018301	-635.39	266.56

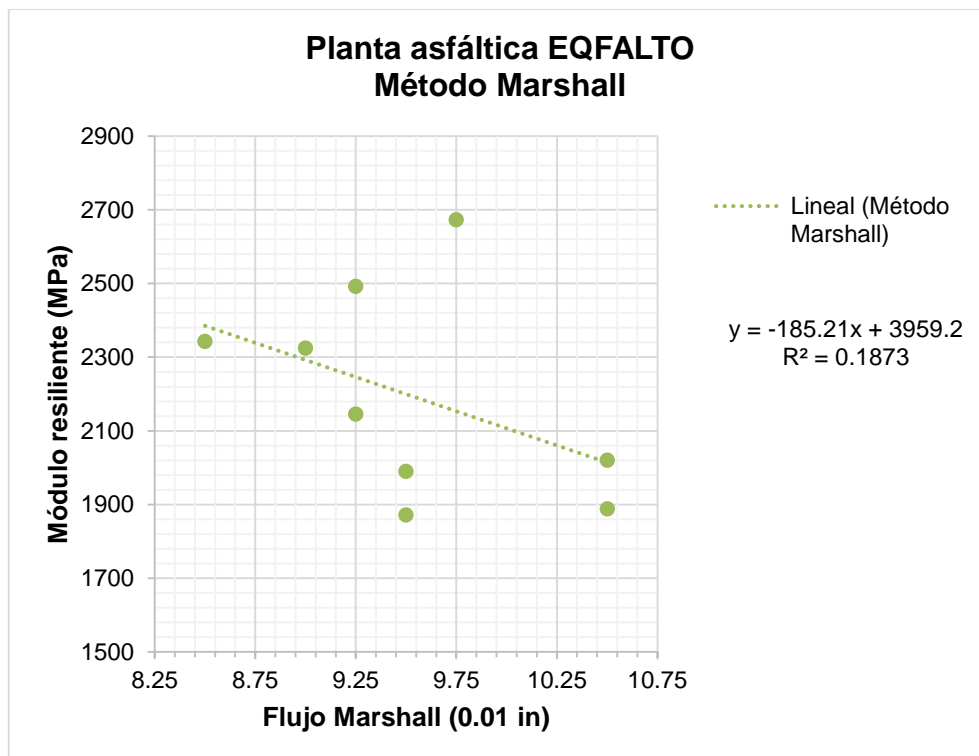
**Fuente:** Balseca & Becerra, 2017

**Tabla 4.8:** Análisis estadístico del método Marshall para la planta EQFALTO

$\bar{x}$	9.53
$\bar{y}_1$	2194.56
$s_x$	0.655
$s_{y1}$	280.215
$s_{xy1}$	-79.424
$r_1$	-0.433
$r_1^2$	0.1873

**Fuente:** Balseca & Becerra, 2017

De acuerdo a la Tabla 4.8 se puede evidenciar que el coeficiente de correlación lineal ( $r$ ) es negativo moderado; por lo tanto, se debe realizar una correlación polinómica para que la misma proporcione un coeficiente que se aproxime a -1 (correlación perfecta negativa).



**Figura 4.1:** Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño Marshall para la planta asfáltica EQFALTO (Balseca & Becerra, 2017)

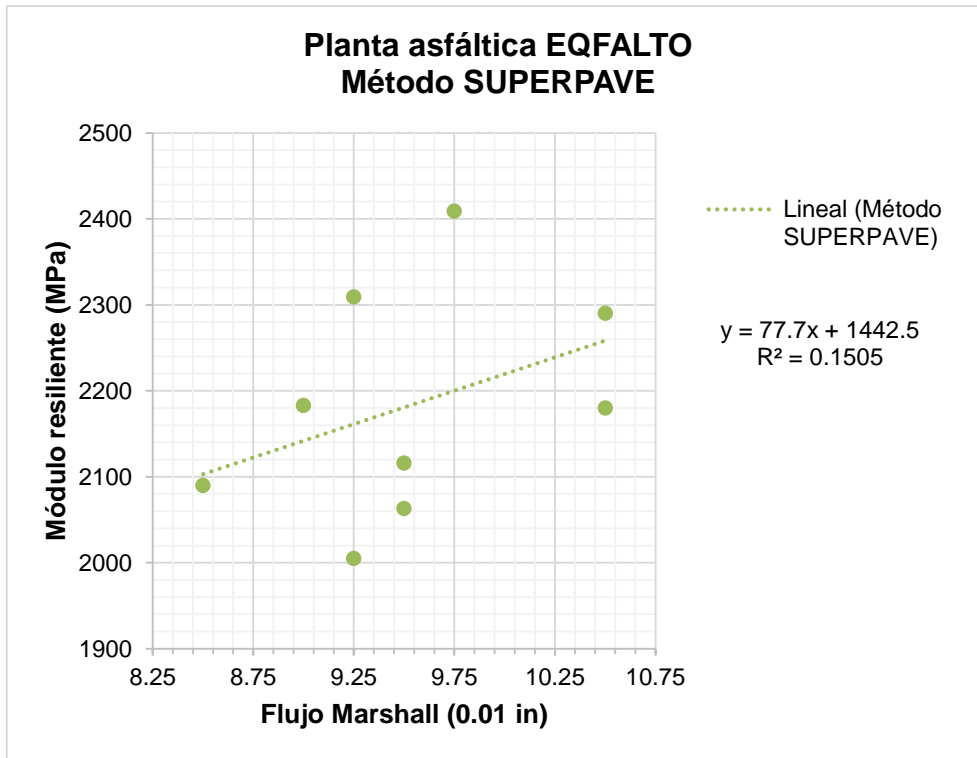
De acuerdo a la Figura 4.1 se puede evidenciar que el modelo de correlación lineal del método Marshall para la planta asfáltica EQFALTO es negativo, debido a que la mayoría de los puntos se encuentran en el cuadrante II y IV (revisar Anexo 8); dicho modelo se puede comprobar mediante los valores del producto  $(x_i - \bar{x}) \cdot (y_{1i} - \bar{y}_1)$  de la Tabla 4.7, siendo la mayoría de los mismos negativos.

**Tabla 4.9:** Análisis estadístico del método SUPERPAVE para la planta EQFALTO

$\bar{x}$	9.53
$\bar{y}_2$	2182.78
$s_x$	0.655
$s_{y2}$	131.164
$s_{xy2}$	33.319
$r_2$	0.388
$r_2^2$	0.1505

**Fuente:** Balseca & Becerra, 2017

De acuerdo a la Tabla 4.9 se puede evidenciar que el coeficiente de correlación lineal ( $r$ ) es positivo bajo; por lo tanto, se debe realizar una correlación polinómica para que la misma proporcione un coeficiente que se aproxime a 1 (correlación perfecta positiva).



**Figura 4.2:** Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño SUPERPAVE para la planta asfáltica EQFALTO (Balseca & Becerra, 2017)

De acuerdo a la Figura 4.2 se puede evidenciar que el modelo de correlación del método SUPERPAVE para la planta asfáltica EQFALTO es positivo, debido a que la mayoría de los puntos se encuentran en el cuadrante I y III (revisar Anexo 8); dicho modelo se puede comprobar mediante los valores del producto  $(x_i - \bar{x}) \cdot (y_{2i} - \bar{y}_2)$  de la Tabla 4.7, siendo la mayoría de los mismos positivos.

#### 4.4.1.1. Punto de balance o equilibrio de los métodos

Ecuaciones de las líneas de tendencia:

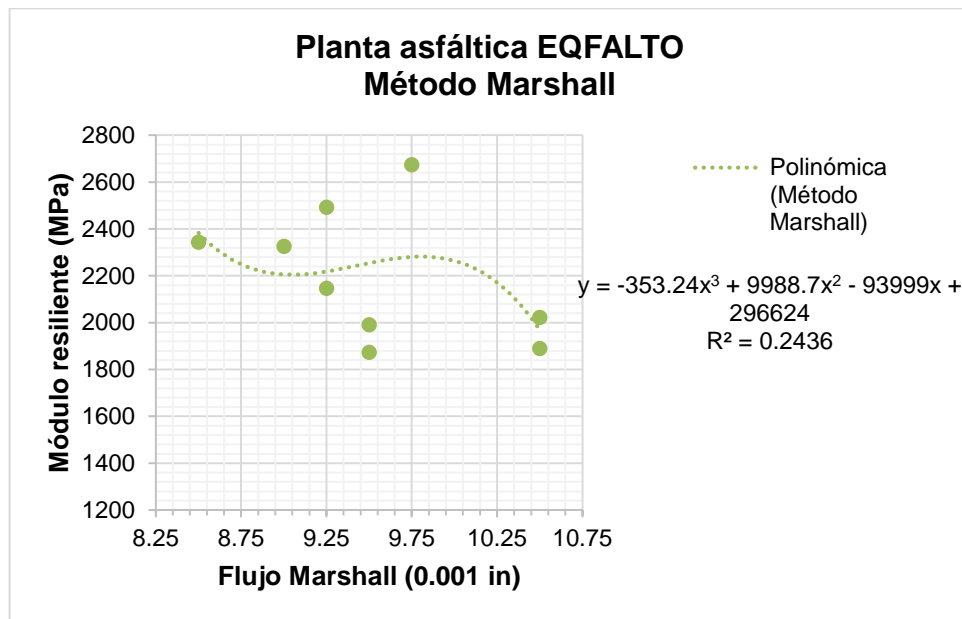
- Método Marshall  $y = -185.21x + 3959.2$
- Método SUPERPAVE  $y = 77.7x + 1442.5$

Punto de balance:

- Flujo "x" 9.57 in/100
- Módulo resiliente "y" 2186.28 MPa

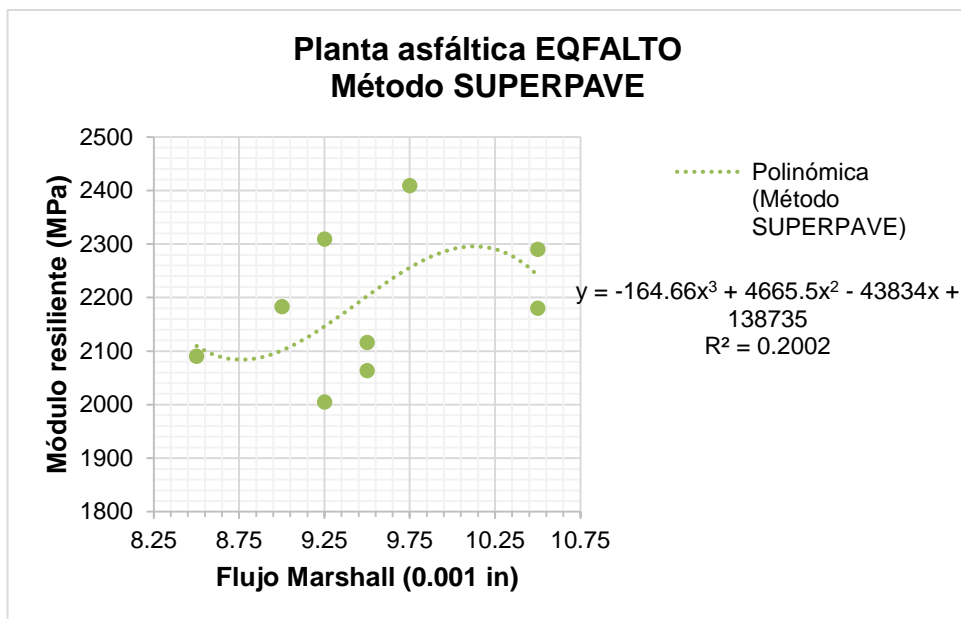
#### 4.4.1.2. Ajuste de correlación lineal a polinómica

Conforme aumenta el grado de la correlación polinómica mejora el coeficiente de correlación entre las variables, por este motivo, empleando la herramienta de cálculo Excel se analizaron los diferentes grados y se determinó que la línea polinómica de tercer grado modela de mejor manera los valores obtenidos en laboratorio tanto para el método Marshall como SUPERPAVE.



**Figura 4.3:** Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño Marshall para la planta asfáltica EQFALTO (Balseca & Becerra, 2017)

$R = \sqrt{R^2} = \sqrt{0.2436} = 0.49$  Por lo tanto, el coeficiente de correlación continúa siendo moderado.



**Figura 4.4:** Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño SUPERPAVE para la planta asfáltica EQFALTO (Balseca & Becerra, 2017)

$R = \sqrt{R^2} = \sqrt{0.2002} = 0.45$  Por lo tanto, el coeficiente de correlación pasó de bajo a moderado.

#### 4.4.2. Planta asfáltica TEA S.A.

**Tabla 4.10:** Cálculos para correlación entre módulo resiliente y deformación permanente (flujo) para la planta asfáltica TEA S.A.

N°	Flujo (0,01 in) "x"	Módulo (MPa)		$x^2$	$y_1^2$	$y_2^2$	$(x_i - \bar{X}).$ $(y_{1i} - \bar{y}_1)$	$(x_i - \bar{X}).$ $(y_{2i} - \bar{y}_2)$
		Marshall "y <sub>1</sub> "	SUPERPAVE "y <sub>2</sub> "					
1	12.00	3019	2124	144.00	9114361	4511376	633.488	-727.932
2	8.00	2743	1938	64.00	7524049	3755844	-470.290	1854.179
3	10.50	2421	2267	110.25	5861241	5139289	15.765	42.346
4	10.00	2690	2274	100.00	7236100	5171076	-77.679	228.623
5	10.25	2589	2910	105.06	6702921	8468100	-9.429	-94.571
6	11.00	2523	2510	121.00	6365529	6300100	-15.512	-53.710
7	9.75	2297	3374	95.06	5276209	11383876	228.960	-625.071
8	12.25	2435	2995	150.06	5929225	8970025	-209.596	568.512
9	11.75	2349	3441	138.06	5517801	11840481	-243.596	903.012
<b>Σ</b>	<b>95.50</b>	<b>23066</b>	<b>23833</b>	<b>1027.50</b>	<b>59527436</b>	<b>65540167</b>	<b>-147.89</b>	<b>2095.39</b>

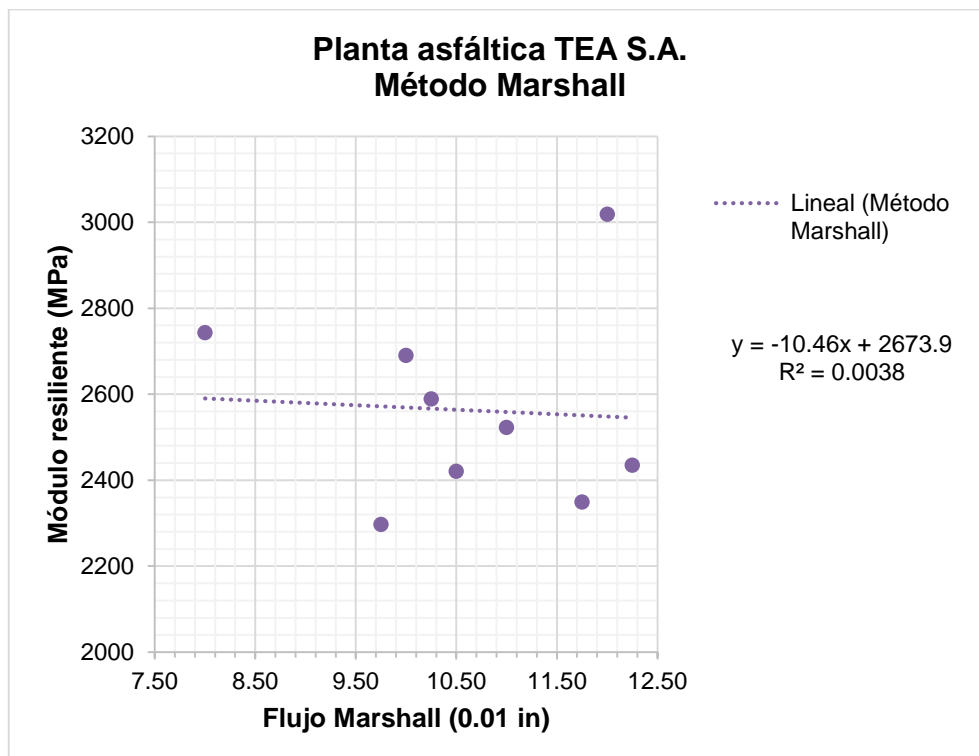
Fuente: Balseca & Becerra, 2011

**Tabla 4.11:** Análisis estadístico del método Marshall para la planta TEA S.A.

$\bar{x}$	10.61
$\bar{y}_1$	2562.89
$s_x$	1.329
$s_{y1}$	226.892
$s_{xy1}$	-18.486
$r_1$	-0.061
$r_1^2$	0.0038

**Fuente:** Balseca & Becerra, 2017

De acuerdo a la Tabla 4.11 se puede evidenciar que el coeficiente de correlación lineal ( $r$ ) es negativo muy bajo; por lo tanto, se debe realizar una correlación polinómica para que la misma proporcione un coeficiente que se aproxime a -1 (correlación perfecta negativa).



**Figura 4.5:** Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño Marshall para la planta asfáltica TEA S.A. (Balseca & Becerra, 2017)

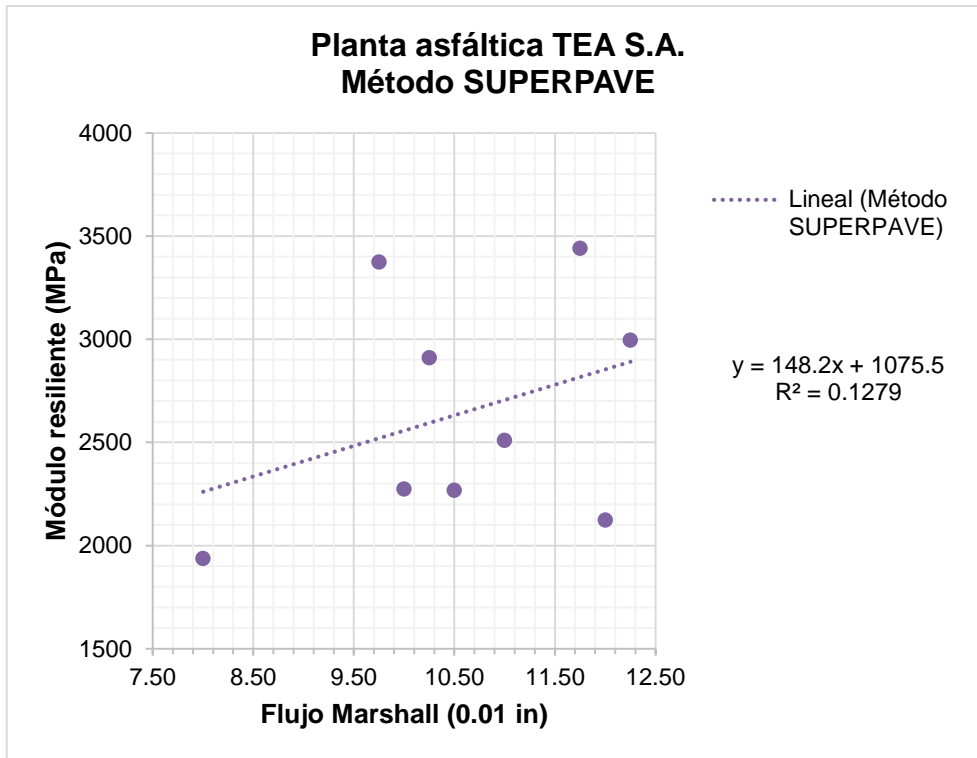
De acuerdo a la Figura 4.5 se puede evidenciar que el modelo de correlación del método Marshall para la planta asfáltica TEA S.A. es negativo, debido a que la mayoría de los puntos se encuentran en el cuadrante II y IV (revisar Anexo 8); dicho modelo se puede comprobar mediante los valores del producto  $(x_i - \bar{x}).(y_{1i} - \bar{y}_1)$  de la Tabla 4.10, siendo la mayoría de los mismos negativos.

**Tabla 4.12:** Análisis estadístico del método SUPERPAVE para la planta TEA S.A.

$\bar{x}$	10.61
$\bar{y}_2$	2648.11
$s_x$	1.329
$s_{y2}$	550.878
$s_{xy2}$	261.924
$r_2$	0.358
$r_2^2$	0.1279

**Fuente:** Balseca & Becerra, 2017

De acuerdo a la Tabla 4.12 se puede evidenciar que el coeficiente de correlación lineal ( $r$ ) es positivo bajo; por lo tanto, se debe realizar una correlación polinómica para que la misma proporcione un coeficiente que se aproxime a 1 (correlación perfecta positiva).



**Figura 4.6:** Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño SUPERPAVE para la planta asfáltica TEA S.A. (Balseca & Becerra, 2017)

De acuerdo a la Figura 4.6 se puede evidenciar que el modelo de correlación del método SUPERPAVE para la planta asfáltica TEA S.A. es positivo, debido a que la mayoría de los puntos se encuentran en el cuadrante I y III (revisar Anexo 8); dicho modelo se puede comprobar mediante los valores del producto  $(x_i - \bar{x}) \cdot (y_{2i} - \bar{y}_2)$  de la Tabla 4.10, siendo la mayoría de los mismos positivos.

#### 4.4.2.1. Punto de balance o equilibrio de los métodos

Ecuaciones de las líneas de tendencia:

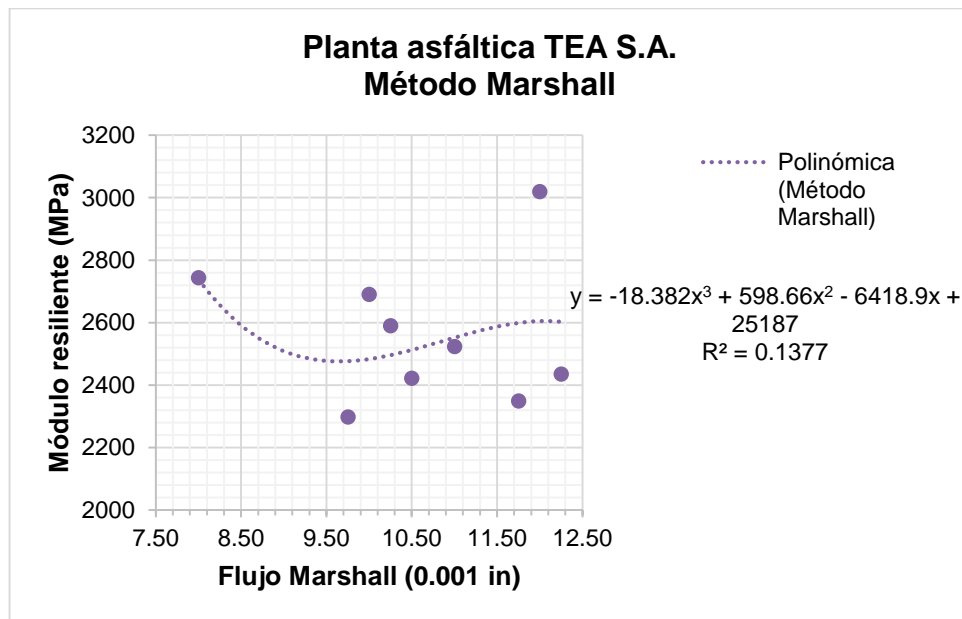
- Método Marshall  $y = -10.46x + 2673.9$
- Método SUPERPAVE  $y = 148.2x + 1075.5$

Punto de balance:

- Flujo "x" 10.07 in/100
- Módulo resiliente "y" 2568.52 MPa

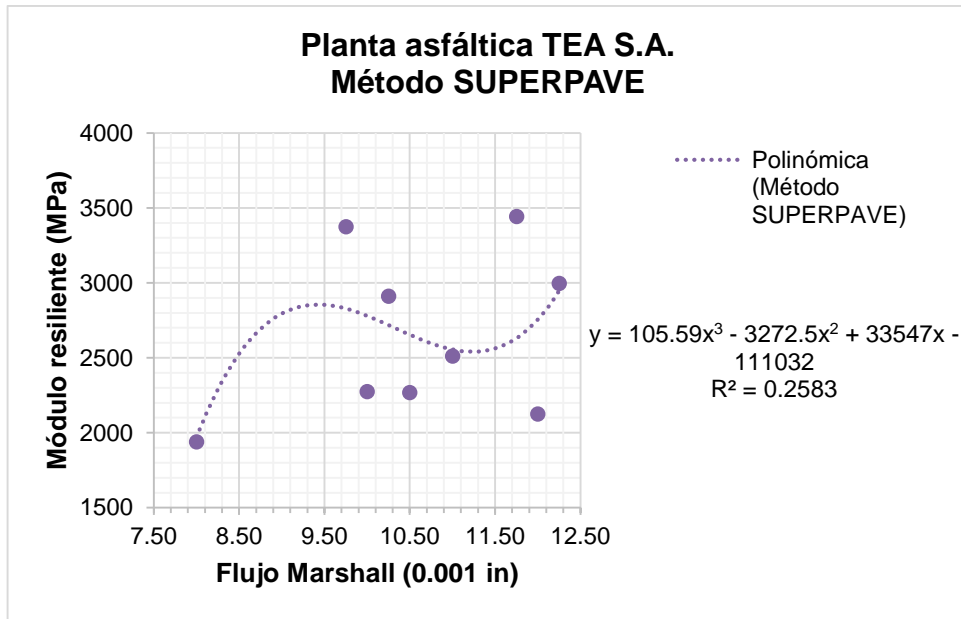
#### 4.4.2.2. Ajuste de correlación lineal a polinómica

Conforme aumenta el grado de la correlación polinómica mejora el coeficiente de correlación entre las variables, por este motivo, empleando la herramienta de cálculo Excel se analizaron los diferentes grados y se determinó que la línea polinómica de tercer grado modela de mejor manera los valores obtenidos en laboratorio tanto para el método Marshall como SUPERPAVE.



**Figura 4.7:** Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño Marshall para la planta asfáltica TEA S.A. (Balseca & Becerra, 2017)

$R = \sqrt{R^2} = \sqrt{0.1377} = 0.37$  Por lo tanto, el coeficiente de correlación pasó de muy bajo a bajo.



**Figura 4.8:** Flujo Marshall vs. módulo resiliente del método de diseño SUPERPAVE para la planta asfáltica TEA S.A. (Balseca & Becerra, 2017)

$R = \sqrt{R^2} = \sqrt{0.2583} = 0.51$ 
Por lo tanto, el coeficiente de correlación pasó de bajo a moderado.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- La planta asfáltica EQFALTO emplea agregados de tres minas diferentes: Pifo, Nayón y Lasso, mientras que la planta asfáltica TEA S.A. emplea agregados de una sola mina: Tabacundo. Las granulometrías de las mezclas de agregados de cada planta se determinaron luego de realizarse los ensayos de contenido de ligante asfáltico por el método de ignición, ya que se ensayaron las mezclas asfálticas producidas en planta, obteniendo como resultados que la mezcla de EQFALTO no cumple con las especificaciones establecidas en la norma MOP - 001 - F 2002, mientras que la mezcla de TEA S.A. cumple con dichas especificaciones; los resultados pueden ser comprobados en la Tabla 4.1.
- En los resultados obtenidos en la caracterización de materiales pétreos se evidencia que los agregados finos de la planta EQFALTO (3/8 y arena) y TEA S.A (arena) exceden el límite establecido para el ensayo de durabilidad a la acción del sulfato de sodio en la norma MOP - 001 - F 2002, como se puede verificar en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3 respectivamente; este parámetro no afecta directamente en el desempeño de los materiales, debido a que en el país no existe el fenómeno de congelamiento.
- En base a los resultados obtenidos en la calificación de materiales bituminosos de acuerdo a su viscosidad (norma NTE INEN 2515) y su penetración (norma MOP - 001 - F 2002), Tabla 4.4 y Tabla 4.5 respectivamente, el asfalto de la planta EQFALTO no satisface con los requerimientos señalados para viscosidad absoluta (asfalto original y envejecido) y ductilidad de asfalto envejecido a 25 °C; dicha viscosidad influye en la trabajabilidad, transporte y bombeo de la mezcla al momento de la construcción, mientras que la ductilidad del asfalto interviene en el comportamiento de la mezcla asfáltica bajo la acción de cargas cíclicas, generando deformaciones elásticas o permanentes sin producir fallas estructurales en la mezcla.
- Los criterios Marshall para mezclas asfálticas determinados en la norma MOP - 001 - F 2002 son: estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos, como se evidencia en la Tabla 4.6 los valores obtenidos en el ensayo de estabilidad Marshall de las dos plantas analizadas indican una adecuada resistencia estructural de las mezclas

asfálticas, respondiendo de forma satisfactoria ante las demandas de tráfico esperadas; comparando estos resultados con las especificaciones establecidas en la norma MOP - 001 - F 2002 (ver Tabla 2.1) las mezclas pueden soportar tráfico muy pesado, aunque fueron diseñadas para tráfico pesado.

- Por otro lado, en la Tabla 4.6 también se evidencia que la mezcla de la planta EQFALTO no satisface los lineamientos planteados para porcentaje de vacíos; generando alta permeabilidad en la mezcla lo que permitiría el ingreso de aire y agua en la misma, dando como resultado un envejecimiento del asfalto a largo plazo porque ocurre progresivamente durante su etapa de servicio; el envejecimiento incrementa la probabilidad de agrietamiento de las mezclas debido a su endurecimiento y a la pérdida de adherencia del bitumen con los agregados, por lo tanto, afecta directamente a la durabilidad de la capa de rodadura.
- Se realizó un análisis comparativo de los métodos Marshall y SUPERPAVE, garantizando que el parámetro volumétrico de porcentaje de vacíos en mezcla sea similar; el método de diseño de mezclas asfálticas empleado en las plantas EQFALTO y TEA S.A. es Marshall, por lo tanto, se tomaron como base los resultados de porcentaje de vacíos obtenidos con dicho método y se determinó el número de giros del compactador giratorio SUPERPAVE necesario para obtener el mismo porcentaje. Sin embargo, si se desea reducir el porcentaje de vacíos en mezcla se puede aumentar el número de giros durante el proceso de compactación.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo de efecto del agua en mezclas bituminosas empleando agua hirviendo (peladura) de las dos mezclas asfálticas examinadas cumplen con la especificación visual establecida en la norma MOP - 001 - F 2002 descrita en la Tabla 4.6, asegurando que ante la presencia de agua el espesor del bitumen sobre los agregados es suficiente para resistir la misma; de igual manera, se encuentra relacionado con el contenido de ligante asfáltico, determinado por el método de ignición, el cual es suficiente para resistir los elementos del intemperismo.
- El cálculo del punto de balance o equilibrio de los métodos: Marshall y SUPERPAVE de cada planta se realizó con la correlación lineal, con el fin de conseguir una comparación apropiada para determinar el método de diseño de mezclas en caliente que proporcione mejores resultados; dicha comparación se aplica para un rango de valores para flujo Marshall de 8 a 14 in/100, estos límites se encuentran establecidos en la Tabla 4.6. Se determina que el método de diseño que proporciona mejores resultados es SUPERPAVE, puesto que en la planta EQFALTO proporciona módulos resilientes mayores en un rango de 9.57 a 14

in/100, por otro lado, en la planta TEA S.A proporciona módulos resilientes mayores en un rango de 10.07 a 14 in/100; consiguiendo altos valores de módulo resiliente se asegura un buen comportamiento de la mezcla ante la acción de cargas cíclicas de tráfico, debido a que resiste las mismas satisfactoriamente.

- Una vez analizadas las correlaciones lineales se mejoraron los coeficientes de correlación ( $r$ ) en cada uno de los métodos, empleando una correlación polinómica de tercer grado mediante la herramienta de cálculo Excel, para obtener una relación entre el módulo resiliente y el flujo Marshall más aproximada; de esta manera, se busca obtener una aplicación más genérica de las correlaciones demostradas en las gráficas de dispersión de la Figura 4.3 y Figura 4.4 de la planta EQFALTO, y Figura 4.7 y Figura 4.8 de la planta TEA S.A.
- Considerando las correlaciones polinómicas de la planta EQFALTO se obtiene en el método Marshall un coeficiente de correlación igual a 0.49 (moderado) y en el método SUPERPAVE un coeficiente de correlación igual a 0.45 (moderado); mientras que considerando las correlaciones polinómicas de la planta TEA S.A. se obtiene en el método Marshall un coeficiente de correlación igual a 0.37 (bajo) y en el método SUPERPAVE un coeficiente de correlación igual a 0.51 (moderado). Es importante destacar que mientras se posea mayor número de datos se pueden obtener mejores correlaciones, incrementando el grado de la correlación polinómica ya que la línea de tendencia se adaptará mejor a las propiedades de la mezcla.
- Se establece que para flujos bajos es más viable emplear el método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, analizando la relación costo-beneficio, ya que el análisis en laboratorio representaría un costo significativamente menor en comparación con el método SUPERPAVE; adicionalmente, la implementación del martillo Marshall en obra es sencilla, permitiendo realizar controles a tiempo real de la mezcla. Sin embargo, es necesario implementar el método SUPERPAVE para el diseño de mezclas asfálticas en caliente para obtener mejores resultados en el desempeño de la mezcla a corto, mediano y largo plazo; en el Laboratorio de Resistencia de Materiales, Mecánica de Suelos, Pavimentos y Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador se cuenta con el equipo necesario para ser los pioneros en impulsar dicho método.

## **5.2. Recomendaciones**

- Al realizar el ensayo de durabilidad a la acción del sulfato de sodio o magnesio se recomienda lavar y extraer las partículas suspendidas de las muestras de agregados, también, se debe retirar el sulfato cuidadosamente tratando de no

perder ninguna partícula durante los cinco ciclos, ya que la diferencia de peso influirá significativamente en los resultados.

- Para elaborar las briquetas compactadas con martillo Marshall se debe evitar la compactación manual, puesto que la energía de compactación va a ser variable, disminuyendo la misma conforme aumenta el número de briquetas realizadas; esto se evidencia claramente en las curvas de flujo vs. estabilidad Marshall.
- Para analizar de forma adecuada las briquetas elaboradas con compactador giratorio SUPERPAVE se recomienda utilizar el molde de 101.6 milímetros para evitar la extracción de núcleos, debido a que este procedimiento puede quebrar los agregados pétreos alterando sus resultados; además, se evita que las partículas de agregado de mayor tamaño se desplacen hacia los bordes del molde y se obtengan diferentes densidades en el núcleo y en el exterior del mismo.
- Durante el ensayo de tracción indirecta en la máquina Universal se recomienda verificar que las briquetas se encuentren completamente libres de partículas externas, ya que al ser aplicada carga la presencia de dichas partículas afecta la medición de las deformaciones.
- Las correlaciones entre módulo resiliente y deformación permanente (flujo) establecidas para las dos plantas asfálticas estudiadas, solamente se podrán replicar si se elaboran mezclas asfálticas con las mismas características mecánicas y volumétricas, adicionalmente, se recomienda verificar que los materiales pétreos y bituminosos posean las mismas características presentadas en esta investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, A. (2014). *Análisis de la correlación entre estabilidad y módulo de rigidez para mezclas asfálticas en caliente, empleando agregados pétreos del Distrito Metropolitano de Quito*. (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperada de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/7880>
- American Society of Testing Materials, ASTM. (2010). *Standard test method for viscosity of asphalts by vacuum capillary viscometer, ASTM D2171*. Estados Unidos: ASTM.
- American Society of Testing Materials, ASTM. (2015). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures, ASTM D6927*. Estados Unidos: ASTM.
- Arenas, H. (2006). *Tecnología del cemento asfáltico*. Recuperado de [ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/MATERIALES%20I/DOCUMENTO S%20DE%20CONSULTA/tecnologia%20del%20cemento%20asfaltico-HUGO%20LEON%20ARENAS.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/MATERIALES%20I/DOCUMENTO%20S%20DE%20CONSULTA/tecnologia%20del%20cemento%20asfaltico-HUGO%20LEON%20ARENAS.pdf)
- Asphalt Institute. (1989). *Manual del asfalto (Traducción Española)*. Recuperado de <http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Pavimentos%20Asfalticos/4%20Manual%20del%20asfalto.pdf>.
- Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*. Estados Unidos: Asphalt Institute
- Cárdenas, G. (2014). *Estudio de mezclas asfálticas colocadas en vías de la Región Amazónica del Ecuador mediante pruebas de desempeño*. (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Recuperada de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1421>
- Chimborazo, W. (2012). *Diseño de Mezclas Asfálticas Mediante el Método SUPERPAVE*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Cuenca. Recuperada de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/760/1/ti887.pdf>
- Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas, EPMMOP. (2011). *Estudios de ingeniería definitivos del proyecto ruta sur – vía aeropuerto*. Recuperado el 17 de septiembre de 2017 de [http://www.epmmop.gob.ec/doc\\_solucion\\_guayasamin/2.%20ANTECEDENTES/Ruta%20Viva%20sur/RUTA%20VIVA/1.%20Estudios%20ambientales/3.%20INFORME%20FUENTE%20DE%20MATERIALES%20\(10p\).pdf](http://www.epmmop.gob.ec/doc_solucion_guayasamin/2.%20ANTECEDENTES/Ruta%20Viva%20sur/RUTA%20VIVA/1.%20Estudios%20ambientales/3.%20INFORME%20FUENTE%20DE%20MATERIALES%20(10p).pdf)

- García, M. (2010). *Comparación del comportamiento mecánico de mezcla asfáltica tibia y mezcla asfáltica caliente*. (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Recuperada de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1159>
- Garnica, P., Delgado, H. & Sandoval, C. (2005). *Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*, Instituto Mexicano del Transporte, *Publicación Técnica N° 271*. Recuperada de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt271.pdf>
- Garnica, P., Gómez, J. & Delgado, H. (2003). *Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio*, Instituto Mexicano del Transporte, *Publicación Técnica N° 228*. Recuperada de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt228.pdf>
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Pichincha. (2002). *Mapas Temáticos*. Recuperado el 18 de septiembre de 2017 de <http://www.pichincha.gob.ec/component/phocadownload/file/320-sistema-de-participacion-ciudadana-anexo-12-taller-quito.html?tmpl=component>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN. (2013). *Materiales bituminosos. Determinación de la densidad por el método del picnómetro*, NTE INEN 923. Quito: INEN
- Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN. (2014). *Productos derivados del petróleo. Cemento asfáltico (clasificación por viscosidad) requisitos*, NTE INEN 2515. Quito: INEN.
- Mendenhall, W., Beaver, R. & Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. Recuperado de [http://investigadores.cide.edu/aparicio/data/refs/Mendenhall\\_Prob\\_Estadistica\\_13.pdf](http://investigadores.cide.edu/aparicio/data/refs/Mendenhall_Prob_Estadistica_13.pdf)
- Minaya, S., & Ordoñez, A. (2001). *Manual de laboratorio ensayos para pavimentos, volumen I*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/2416949/MANUAL-DE-ENSAYOS-PARA-PAVIMENTOS#>
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, MOPC. (2011). *Manual de carreteras del Paraguay, normas para materiales y ensayos de materiales, tomo 6, volumen II*. Recuperado de <http://www.mopc.gov.py/userfiles/files/asfalto.pdf>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas, MTOP. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, MOP – 001 - F 2002*. Quito: MTOP

- Ministerio de Transporte y Obras Públicas, MTOP. (2012). *82 años construyendo obras viales en el Ecuador*. Recuperado el 20 de septiembre de 2017 de: [http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/06-07-2011\\_Especial\\_MTOP\\_82\\_anios.pdf](http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/06-07-2011_Especial_MTOP_82_anios.pdf)
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Bogotá: Ágora Editores
- Montesinos, C., & Reyes, P. (2010). *Compactación de módulos de rigidez por tensión indirecta utilizando método de compactación Marshall y Superpave para el diseño de mezclas asfálticas*. (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Recuperada de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/2697>
- Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. (Tesis de Pregrado). Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperada de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Pinzuar. (2013). *Manual compactador automático de asfaltos Ref PA-80*. Recuperado el 04 de octubre de 2017 de: [https://issuu.com/pinzuar/docs/web\\_ref\\_pa-80\\_compactador\\_autom\\_tico\\_de\\_asfaltos](https://issuu.com/pinzuar/docs/web_ref_pa-80_compactador_autom_tico_de_asfaltos)
- Rondón, H., & Reyes, F. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Salazar, J. (2011). *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047)*. Recuperado el 28 de septiembre de 2017 de: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/download/8392/7926>
- Universidad Mayor de San Simón. (2004). *Pavimentos*. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón.

# ANEXOS

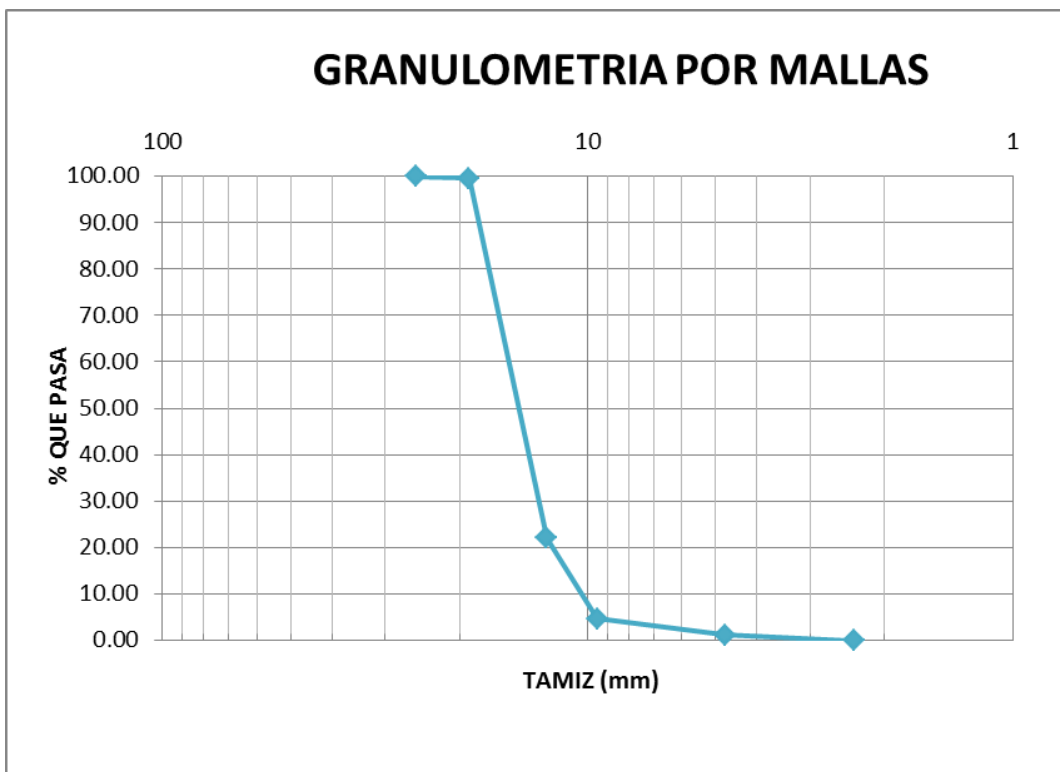
## Anexo 1: Planta asfáltica EQFALTO

### Anexo 1.1: Caracterización de materiales pétreos

#### Anexo 1.1.1: Granulometría de los agregados

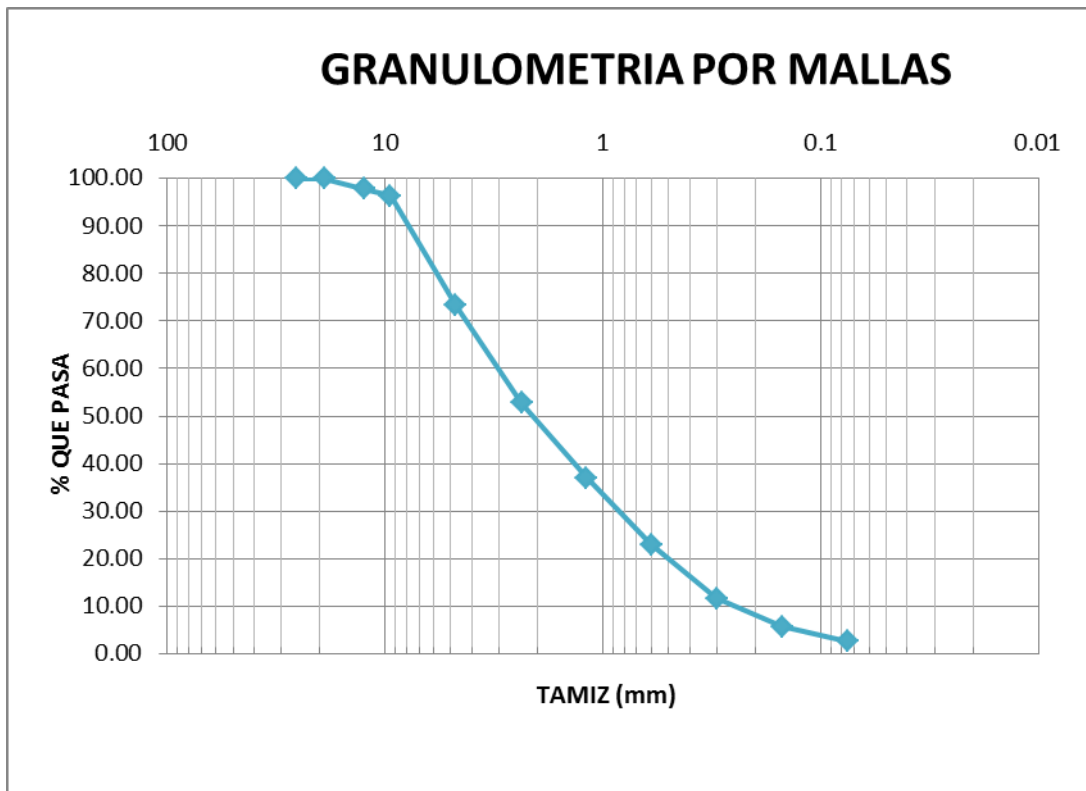
Agregado grueso (3/4)

Malla N°	Tamaño (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acum. (g)	Retenido Acum. (%)	Pasa (%)
1	25.4	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4	19.0	54.7	54.7	0.5	99.5
1/2	12.5	8760.0	8814.7	77.9	22.1
3/8	9.5	1990.0	10804.7	95.4	4.6
# 4	4.8	390.0	11194.7	98.9	1.1
Pasa # 4		125.3	11320.0	100.0	0.0
		11320.0			



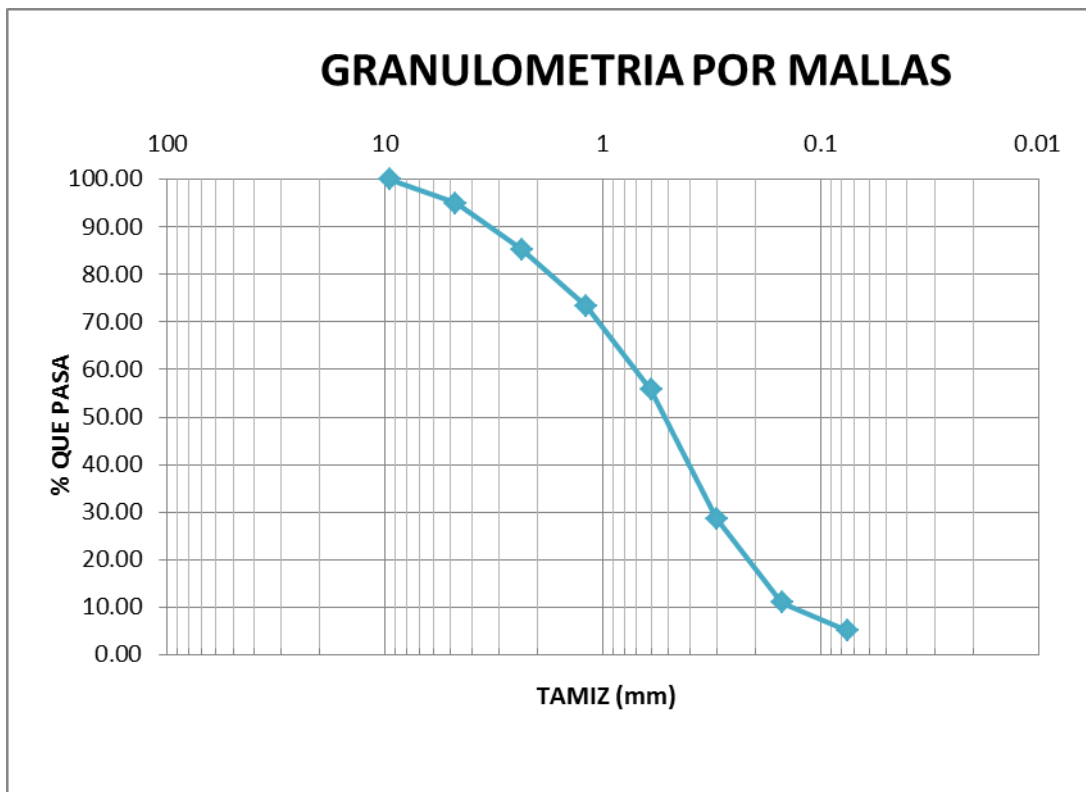
Agregado fino (3/8)

Malla N°	Tamaño (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acum. (g)	Retenido Acum. (%)	Pasa (%)
1	25.0	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	36.1	36.1	2.2	97.8
3/8	9.5	23.0	59.1	3.7	96.3
# 4	4.8	369.8	428.9	26.7	73.3
# 8	2.4	328.2	757.1	47.2	52.8
# 16	1.2	254.8	1011.9	63.0	37.0
# 30	0.6	224.7	1236.6	77.0	23.0
# 50	0.3	179.9	1416.5	88.3	11.7
# 100	0.2	96.9	1513.4	94.3	5.7
# 200	0.1	48.2	1561.6	97.3	2.7
Pasa # 200		43.4	1605.0	100.0	0.0
		1605.0			



Agregado fino (arena)

Malla N°	Tamaño (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acum. (g)	Retenido Acum. (%)	Pasa (%)
3/8	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0
# 4	4.8	52.5	52.5	5.1	94.9
# 8	2.4	99.1	151.6	14.8	85.2
# 16	1.2	123.4	275.0	26.8	73.2
# 30	0.6	179.2	454.2	44.2	55.8
# 50	0.3	279.1	733.3	71.4	28.6
# 100	0.2	180.0	913.3	89.0	11.0
# 200	0.1	62.3	975.6	95.0	5.0
Pasa # 200		51.0	1026.6	100.0	0.0
		1026.6			



**Anexo 1.1.2:** Granulometría de la mezcla de agregados

Muestra 1

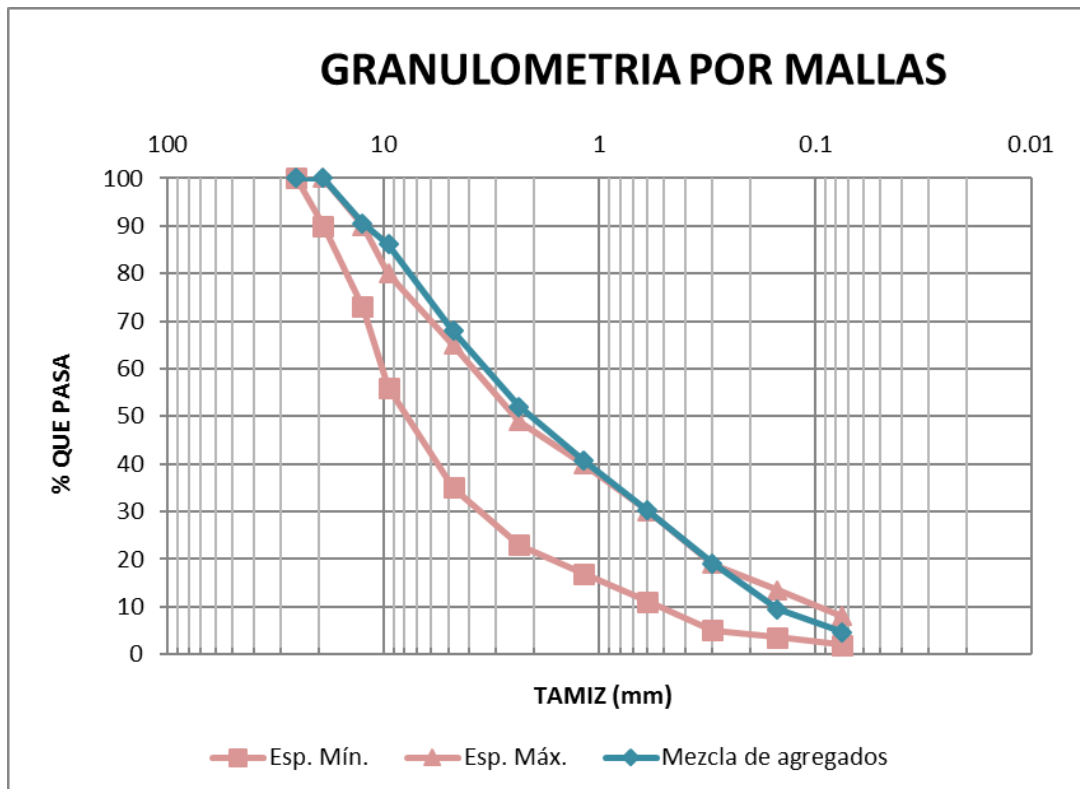
<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Masa Retenida (g)</b>	<b>Masa Retenida Acum. (g)</b>	<b>Retenido Acum. (%)</b>	<b>Pasa (%)</b>
1/2	12.5	114.1	114.1	9.8	90.2
3/8	9.5	52.6	166.7	14.4	85.6
# 4	4.8	211.1	377.8	32.5	67.5
# 8	2.4	181.4	559.2	48.2	51.8
# 16	1.2	125.8	685.0	59.0	41.0
# 30	0.6	120.2	805.2	69.3	30.7
# 50	0.3	129.0	934.2	80.5	19.6
# 100	0.2	114.2	1048.4	90.3	9.7
# 200	0.1	59.3	1107.7	95.4	4.6
Pasa # 200		53.5	1161.2	100.0	0.0
		1161.2			

Muestra 2

<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Masa Retenida (g)</b>	<b>Masa Retenida Acum.(g)</b>	<b>Retenido Acum. (%)</b>	<b>Pasa (%)</b>
1/2	12.5	100.7	100.7	8.9	91.1
3/8	9.5	51.5	152.2	13.5	86.5
# 4	4.8	203.8	356.0	31.6	68.4
# 8	2.4	183.2	539.2	47.9	52.1
# 16	1.2	129.9	669.1	59.4	40.6
# 30	0.6	121.3	790.4	70.2	29.8
# 50	0.3	126.9	917.3	81.4	18.6
# 100	0.2	103.5	1020.8	90.6	9.4
# 200	0.1	53.4	1074.2	95.4	4.6
Pasa # 200		52.1	1126.3	100.0	0.0
		1126.3			

Promedio

Malla N°	Tamaño (mm)	Promedio Pasa (%)
1/2	12.5	90.6
3/8	9.5	86.1
# 4	4.8	67.9
# 8	2.4	52.0
# 16	1.2	40.8
# 30	0.6	30.2
# 50	0.3	19.1
# 100	0.2	9.5
# 200	0.1	4.6



### Anexo 1.1.3: Gravedad específica

Agregado grueso (3/4)

<b>Masa de la muestra seca (g)</b>	6330.0
<b>Masa de la muestra saturada superficie seca (g)</b>	6497.0
<b>Masa de la muestra sumergida en agua (g)</b>	4001.0

<b>Gravedad específica Bulk</b>	2.54
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.60
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.72
<b>Porcentaje de absorción (%)</b>	2.64

Agregado fino (3/8)

<b>Masa del matraz (g)</b>	160.2
<b>Masa del conjunto matraz, agua y muestra (g)</b>	966.6
<b>Masa de la muestra saturada con superficie seca (g)</b>	500.0
<b>Masa de la muestra seca (g)</b>	485.9
<b>Masa de agua añadida al matraz (g)</b>	306.4

<b>Gravedad específica Bulk</b>	2.51
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.58
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.71
<b>Porcentaje de absorción (%)</b>	2.90

Agregado fino (arena)

<b>Masa del matraz (g)</b>	160.2
<b>Masa del conjunto matraz, agua y muestra (g)</b>	971.3
<b>Masa de la muestra saturada con superficie seca (g)</b>	500.0
<b>Masa de la muestra seca (g)</b>	495.5
<b>Masa de agua añadida al matraz (g)</b>	311.1

<b>Gravedad específica Bulk</b>	2.62
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.65
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.69
<b>Porcentaje de absorción (%)</b>	0.91

**Anexo 1.1.4:** Durabilidad de los agregados a la acción del sulfato de sodio

Agregado grueso (3/4)

<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Masa de las fracciones antes del ensayo (g)</b>	<b>Masa de las fracciones después del ensayo (g)</b>	<b>Desgaste (%)</b>
1/2	12.5	671.3	666.9	0.7
3/8	9.5	329.2	325.5	1.1
# 4	4.8	300.5	297.5	1.0
<b>Promedio</b>				0.9

Agregado fino (3/8)

<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Masa de las fracciones antes del ensayo (g)</b>	<b>Masa de las fracciones después del ensayo (g)</b>	<b>Desgaste (%)</b>
# 4	4.8	100.0	80.5	19.5
# 8	2.4	100.0	83.3	16.7
# 16	1.2	100.0	72.3	27.7
# 30	0.6	100.0	71.1	28.9
# 50	0.3	100.0	77.2	22.8
<b>Promedio</b>				23.1

Agregado fino (arena)

<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Masa de las fracciones antes del ensayo (g)</b>	<b>Masa de las fracciones después del ensayo (g)</b>	<b>Desgaste (%)</b>
# 8	2.4	100.0	82.6	17.4
# 16	1.2	100.0	81.9	18.1
# 30	0.6	100.0	83.5	16.5
# 50	0.3	100.0	84.1	15.9
<b>Promedio</b>				17.0

**Anexo 1.1.5:** Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de Los Ángeles

Agregado grueso (3/4)

<b>Tipo de gradación</b>	B
<b>Masa inicial de la muestra (g)</b>	5090
<b>Masa retenida en el tamiz N° 12 después de 500 revoluciones (g)</b>	3970
<b>Masa que pasa el tamiz N° 12 (g)</b>	1120
<b>Porcentaje de desgaste (%)</b>	22.00

**Anexo 1.1.6:** Equivalente de arena en agregados finos

Agregado fino (3/8)

<b>Muestra N°</b>	1	2
<b>Lectura inicial</b>	4.7	4.7
<b>Lectura final</b>	3.5	3.5
<b>Equivalente de arena</b>	74	74
<b>Promedio</b>	74	

Agregado fino (arena)

<b>Muestra N°</b>	1	2
<b>Lectura inicial</b>	4.4	4.5
<b>Lectura final</b>	4	3.8
<b>Equivalente de arena</b>	91	84
<b>Promedio</b>	88	

**Anexo 1.2:** Caracterización de material bituminoso

**Anexo 1.2.1:** Penetración de materiales bituminosos

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	25
<b>Carga (g)</b>	100.01
<b>Tiempo de carga (s)</b>	5.00

<b>Punto</b>	1	2	3
<b>Penetración (décimas de mm)</b>	66	64	65
<b>Promedio</b>	65		

**Anexo 1.2.2:** Densidad de materiales bituminosos semisólidos

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	25
<b>Picnómetro N°</b>	AMK
<b>Masa de picnómetro + tapón (g)</b>	32.784
<b>Masa de picnómetro + tapón + agua destilada (g)</b>	61.992
<b>Masa de picnómetro + tapón + asfalto (g)</b>	54.093
<b>Masa de picnómetro + tapón + agua destilada + asfalto (g)</b>	62.262

<b>Densidad relativa de la muestra</b>	1.013
<b>Densidad del agua a la temperatura de ensayo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	997.000
<b>Densidad de la muestra (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1009.795

**Anexo 1.2.3:** Viscosidad cinemática de asfaltos

Viscosidad del asfalto a elevadas temperaturas usando viscosímetro rotatorio

<b>Viscosímetro</b>	Brookfield DV-II + Pro
<b>Husillo</b>	SC4 - 21
<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	135
<b>Velocidad de rotación (rpm)</b>	100.00
<b>Viscosidad (cP)</b>	391.50
<b>Torque (%)</b>	78.30

Viscosidad cinemática del asfalto

<b>Viscosidad con viscosímetro rotatorio (ASTM D4400/D4402M) (cP)</b>	391.500
<b>Densidad relativa de la muestra a 25/25 °C</b>	1.013
<b>Viscosidad cinemática (mm<sup>2</sup>/s)</b>	413.786

**Anexo 1.2.4:** Punto de chispa y llama con el equipo de copa abierta de Cleveland

<b>Punto de chispa (°C)</b>	304
<b>Punto de llama (°C)</b>	330
<b>Presión barométrica (mmHg)</b>	550.1
<b>Punto de chispa corregido (°C)</b>	311
<b>Punto de llama corregido (°C)</b>	337

**Anexo 1.2.5:** Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	60
<b>Número del viscosímetro</b>	100
<b>Serie del viscosímetro</b>	L807
<b>Constante del viscosímetro (Pa.s/s)</b>	3.180
<b>Tiempo de flujo (s)</b>	78.380
<b>Viscosidad (Pa.s)</b>	249.248

**Anexo 1.2.6:** Punto de ablandamiento de bitumen (aparato anillo y bola)

<b>Muestra N°</b>	1	2
<b>Punto de ablandamiento (°C)</b>	50.5	50.6
<b>Promedio</b>	50.55	

**Anexo 1.2.7:** Índice de penetración

<b>Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s (décimas de mm)</b>	65
<b>Punto de ablandamiento (°C)</b>	50.55
<b>Índice de penetración</b>	-0.4

**Anexo 1.2.8:** Horno de película delgada rodante (RTFO)

<b>Botella</b>	1	2
<b>Masa de botella + asfalto antes (g)</b>	199.852	203.562
<b>Masa de botella + asfalto después (g)</b>	199.842	203.455
<b>Cambio de masa (%)</b>	-0.005	-0.053
<b>Promedio</b>	-0.029	

**Anexo 1.2.9:** Ductilidad de materiales bituminosos (RTFO)

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	25
<b>¿Se usa aditivo para la densidad del agua?</b>	No
<b>Número de réplicas</b>	3

<b>Molde</b>	1	2	3
<b>Ductilidad (cm)</b>	37	48	54
<b>Promedio</b>	46		

**Anexo 1.2.10:** Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío (RTFO)

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	60
<b>Número del viscosímetro</b>	200
<b>Serie del viscosímetro</b>	K628
<b>Constante del viscosímetro (Pa.s/s)</b>	10.820
<b>Tiempo de flujo (s)</b>	98.690
<b>Viscosidad (Pa.s)</b>	1067.826

**Anexo 1.3:** Caracterización de mezcla bituminosa y briquetas compactadas

**Anexo 1.3.1:** Contenido de ligante asfáltico por el método de ignición

<b>Muestra</b>	1	2
<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	500	500
<b>Masa del conjunto bandeja (balanza externa) (g)</b>	3382.64	3394.66
<b>Masa total inicial (balanza externa) (g)</b>	4625.56	4599.08
<b>Masa de la muestra inicial (g)</b>	1243.16	1204.42
<b>Masa total (balanza horno) (g)</b>	4630.00	4603.09
<b>Comprobar si está dentro de <math>\pm 5g</math></b>	4.44	4.01
<b>Contenido de ligante corregido (%)</b>	6.45	6.40
<b>Promedio</b>	6.43	

**Anexo 1.3.2:** Gravedad específica máxima teórica de mezclas bituminosas de pavimentación

<b>Muestra</b>	1	2
<b>Masa de la muestra (g)</b>	2666.2	2551.1
<b>Masa del contenedor lleno de agua a 25±0,5 °C (g)</b>	7413.1	7413.1
<b>Masa del contenedor lleno con la muestra agua a 25±1 °C (g)</b>	8966.8	8900.6
<b>Gravedad específica máxima teórica, Gmm</b>	2.397	2.399
<b>Promedio</b>	2.398	

**Anexo 1.3.3:** Efecto del agua en mezclas bituminosas empleando agua hirviendo (peladura)

Los agregados impregnados con material bituminoso permanecen con el mismo al 100%, después de realizarse el ensayo de resistencia a la peladura, según la norma ASTM D3625.

**Anexo 1.3.4:** Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas bituminosas compactadas no absorbentes

<b>Briqueta N°</b>	<b>Masa seca (g)</b>	<b>Masa sumergida (g)</b>	<b>Masa saturada con superficie seca (g)</b>	<b>Gravedad específica Bulk a 25 °C</b>	<b>Densidad a 25°C (kg/m³)</b>	<b>Porcentaje de agua absorbida (%)</b>
1	1044.06	556.51	1044.67	2.139	2132.350	0.12
2	1028.32	543.43	1029.80	2.114	2107.932	0.30
3	968.96	513.98	969.66	2.126	2120.025	0.15
4	966.38	516.16	967.02	2.143	2136.985	0.14
5	954.45	510.25	955.03	2.146	2139.455	0.13
6	1107.48	597.78	1107.86	2.171	2164.675	0.07
7	1037.16	561.08	1037.56	2.177	2170.182	0.08
8	1007.00	539.28	1007.26	2.152	2145.346	0.06
9	1037.92	561.76	1038.45	2.177	2170.816	0.11
<b>Promedio</b>				2.150	2143.085	0.13

**Anexo 1.3.5:** Porcentaje de vacíos de aire en mezclas bituminosas compactadas

Briqueta N°	Gravedad específica Bulk a 25 °C	Gmm	Porcentaje de vacíos (%)
1	2.139	2.398	10.81
2	2.114		11.83
3	2.126		11.33
4	2.143		10.62
5	2.146		10.51
6	2.171		9.46
7	2.177		9.23
8	2.152		10.27
9	2.177		9.20
		<b>Promedio</b>	10.36

**Anexo 1.3.6:** Estabilidad y flujo Marshall de mezclas bituminosas compactadas (factores de corrección de estabilidad en Anexo 3)

Briqueta N°	Espesor (mm)	Diámetro (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Factor de corrección	Estabilidad (lb)	Estabilidad corregida (lb)	Flujo (0,01 in)	
1	61.04	100.58	485	1.09	2725	2970.25	9.00	
2	60.38	101.66	490	1.09	2150	2343.50	9.50	
3	56.45	101.61	458	1.19	2200	2618.00	9.25	
4	55.43	101.96	453	1.25	2300	2875.00	10.50	
5	55.54	101.31	448	1.25	2750	3437.50	10.50	
6	63.36	101.45	512	1.00	3800	3800.00	9.50	
7	59.34	101.46	480	1.14	3400	3876.00	9.25	
8	57.47	101.79	468	1.19	3000	3570.00	8.50	
9	59.37	101.48	480	1.14	3450	3933.00	9.75	
						<b>Promedio</b>	3269.25	9.53

**Anexo 1.3.7:** Módulo resiliente de mezclas bituminosas compactadas

Briqueta N°	Martillo Marshall			Compactador giratorio		
	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Módulo (MPa)
1	102	62	2325	100	69	2183
2	102	69	1990	100	69	2116
3	102	62	2146	100	65	2005
4	102	59	1889	100	67	2290
5	102	64	2021	100	69	2180
6	102	63	1872	100	66	2063
7	102	56	2492	100	63	2309
8	102	58	2343	100	60	2090
9	102	58	2673	100	69	2409
			<b>Promedio</b>	2194.56		
					<b>Promedio</b>	2182.78

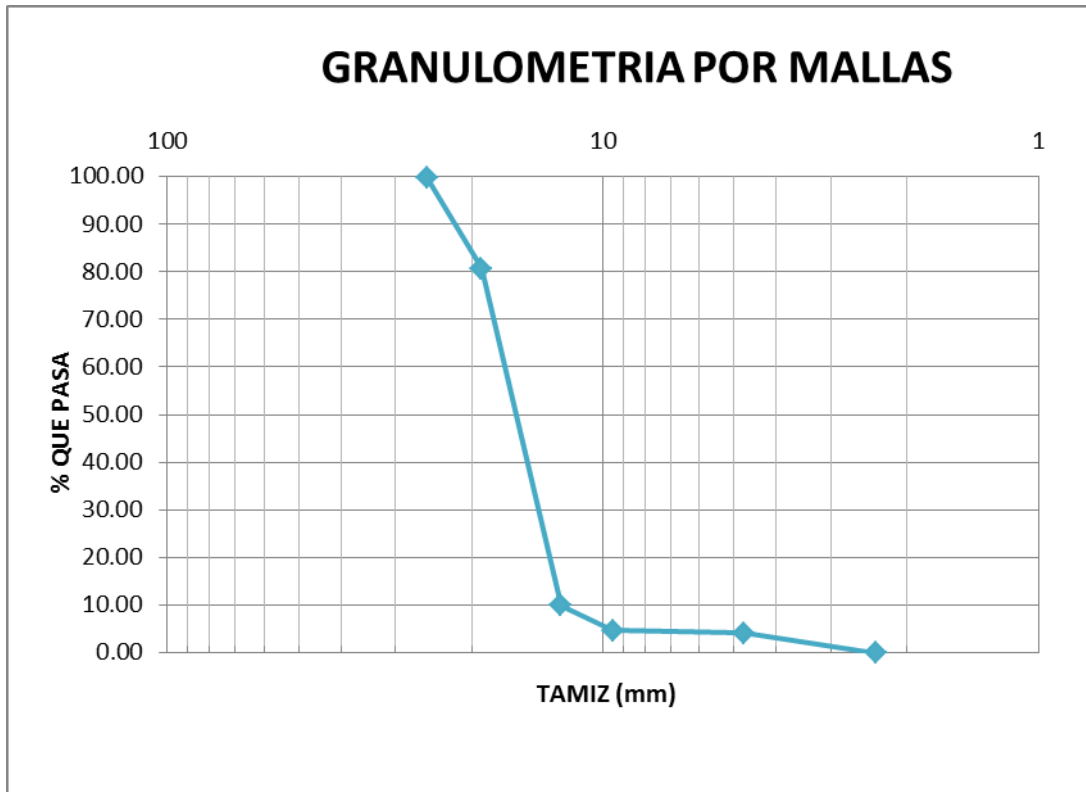
**Anexo 2:** Planta asfáltica TEA S.A.

**Anexo 2.1:** Caracterización de materiales pétreos

**Anexo 2.1.1:** Granulometría de los agregados

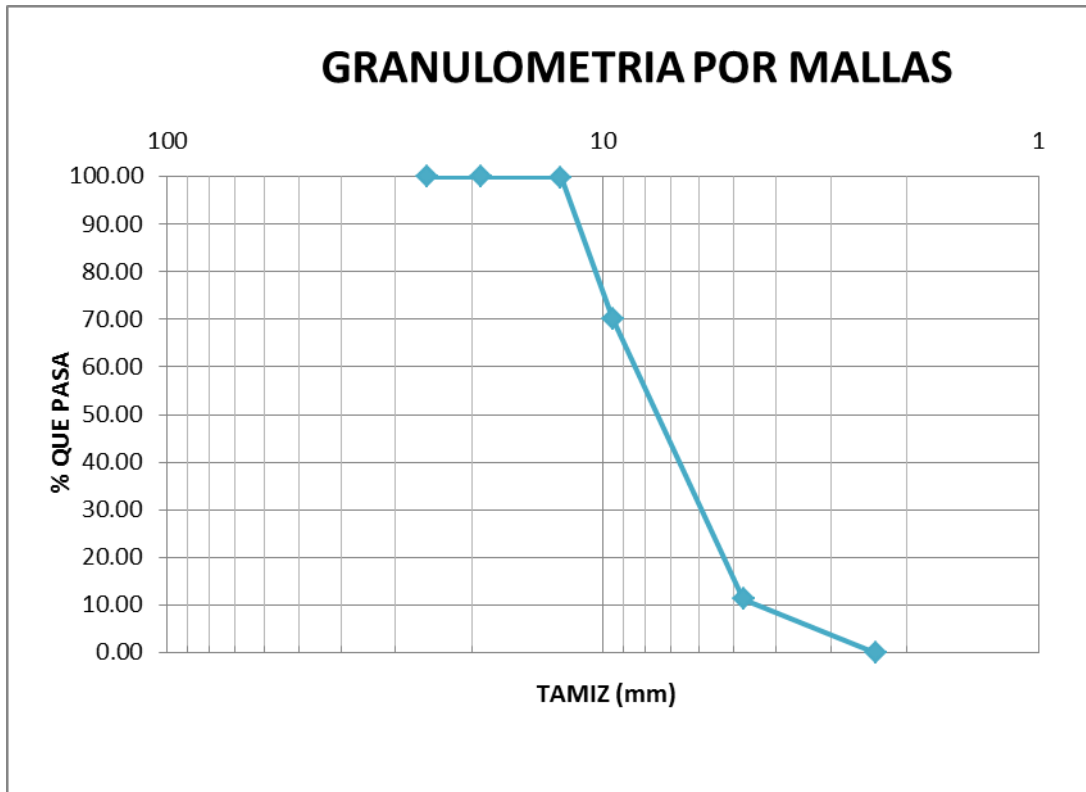
Agregado grueso (3/4)

Malla N°	Tamaño (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acum. (g)	Retenido Acum. (%)	Pasa (%)
1	25.4	26.1	26.1	0.2	99.8
3/4	19.0	2010.0	2036.1	19.3	80.7
1/2	12.5	7485.0	9521.1	90.1	9.9
3/8	9.5	560.0	10081.1	95.4	4.6
# 4	4.8	60.0	10141.1	95.9	4.1
Pasa # 4		428.9	10570.0	100.0	0
		10570.0			



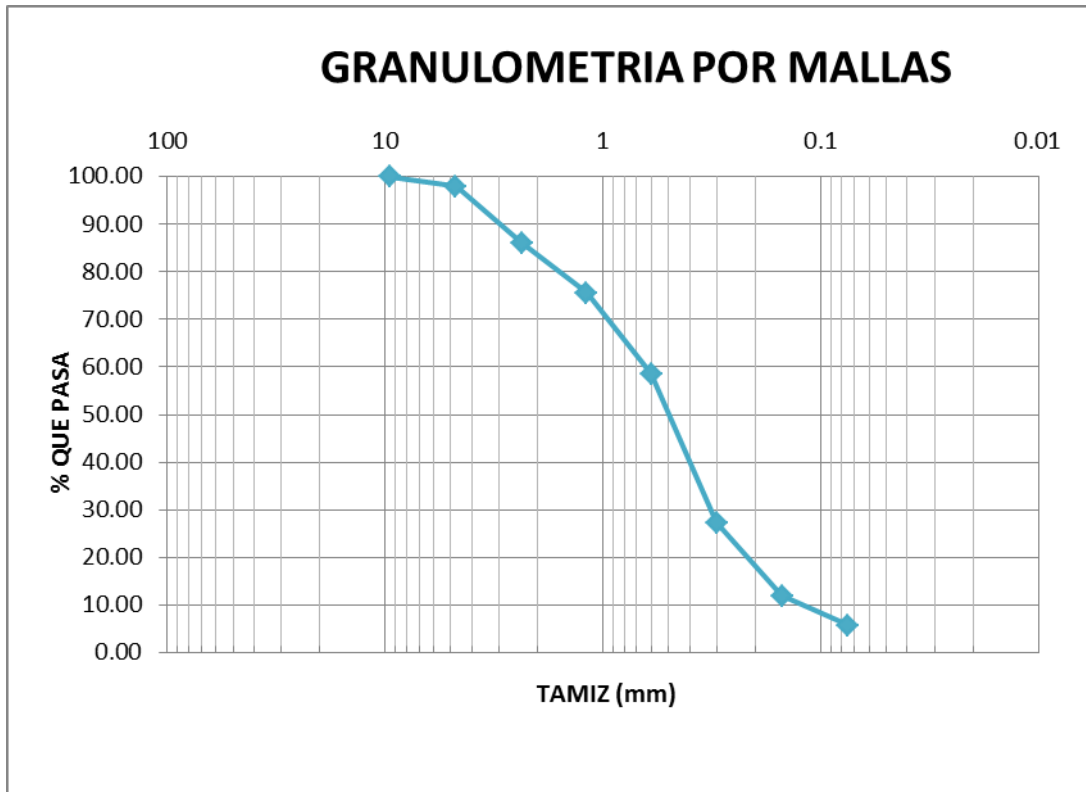
Agregado grueso (3/8)

Malla N°	Tamaño (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acum. (g)	Retenido Acum. (%)	Pasa (%)
1	25.4	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2	12.5	25.9	25.9	0.2	99.8
3/8	9.5	3310.0	3335.9	29.8	70.2
# 4	4.8	6590.0	9925.9	88.8	11.2
Pasa # 4		1254.1	11180.0	100.0	0.0
		11180.0			



Agregado fino (arena)

Malla N°	Tamaño (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acum. (g)	Retenido Acum. (%)	Pasa (%)
3/8	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0
# 4	4.8	15.1	15.1	2.1	97.9
# 8	2.4	84.3	99.4	14.0	86.0
# 16	1.2	74.5	173.9	24.5	75.5
# 30	0.6	120.7	294.6	41.4	58.6
# 50	0.3	222.7	517.3	72.7	27.3
# 100	0.2	109.1	626.4	88.1	11.9
# 200	0.1	44.5	670.9	94.3	5.7
Pasa # 200		40.3	711.2	100.0	0.0
		711.2			



**Anexo 2.1.2:** Granulometría de la mezcla de agregados

Muestra 1

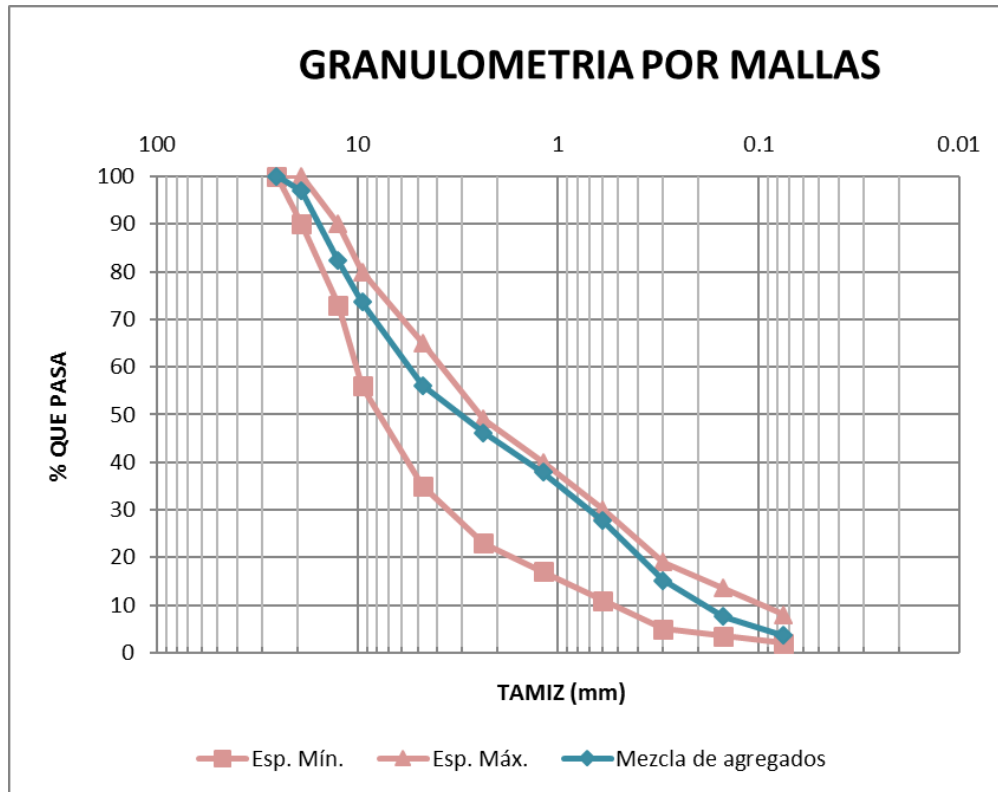
Malla N°	Tamaño (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acum.(g)	Retenido Acum. (%)	Pasa (%)
3/4	19.0	39.9	39.9	3.6	96.5
1/2	12.5	178.9	218.8	19.5	80.5
3/8	9.5	97.2	316.0	28.1	71.9
# 4	4.8	198.4	514.4	45.8	54.2
# 8	2.4	101.6	616.0	54.8	45.2
# 16	1.2	82.9	698.9	62.2	37.8
# 30	0.6	104.5	803.4	71.5	28.5
# 50	0.3	150.8	954.2	84.9	15.1
# 100	0.2	84.6	1038.8	92.4	7.6
# 200	0.1	43.2	1082.0	96.3	3.7
Pasa # 200		42.0	1124.0	100.0	0.0
		1124.0			

Muestra 2

<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Masa Retenida (g)</b>	<b>Masa Retenida Acum.(g)</b>	<b>Retenido Acum. (%)</b>	<b>Pasa (%)</b>
3/4	19.0	28.5	28.5	2.5	97.5
1/2	12.5	152.2	180.7	16.0	84.0
3/8	9.5	98.1	278.8	24.6	75.4
# 4	4.8	197.5	476.3	42.1	57.9
# 8	2.4	121.9	598.2	52.9	47.1
# 16	1.2	103.9	702.1	62.0	38.0
# 30	0.6	124.8	826.9	73.1	26.9
# 50	0.3	131.1	958.0	84.7	15.4
# 100	0.2	87.1	1045.1	92.4	7.7
# 200	0.1	46.6	1091.7	96.5	3.5
Pasa # 200		40.0	1131.7	100.0	0.0
		1131.7			

Promedio

<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Promedio Pasa (%)</b>
3/4	19.0	97.0
1/2	12.5	82.3
3/8	9.5	73.6
# 4	4.8	56.1
# 8	2.4	46.2
# 16	1.2	37.9
# 30	0.6	27.7
# 50	0.3	15.2
# 100	0.2	7.6
# 200	0.1	3.6



**Anexo 2.1.3:** Gravedad específica

Agregado grueso (3/4)

<b>Masa de la muestra seca (g)</b>	6190.0
<b>Masa de la muestra saturada superficie seca (g)</b>	6699.0
<b>Masa de la muestra sumergida en agua (g)</b>	3837.0

<b>Gravedad específica Bulk</b>	2.16
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.34
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.63
<b>Porcentaje de absorción (%)</b>	8.22

Agregado grueso (3/8)

<b>Masa de la muestra seca (g)</b>	5850.0
<b>Masa de la muestra saturada superficie seca (g)</b>	5907.0
<b>Masa de la muestra sumergida en agua (g)</b>	3312.0

<b>Gravedad específica Bulk</b>	2.25
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.28
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.30
<b>Porcentaje de absorción (%)</b>	0.97

Agregado fino (arena)

<b>Masa del matraz (g)</b>	160.2
<b>Masa del conjunto matraz, agua y muestra (g)</b>	963.7
<b>Masa de la muestra saturada con superficie seca (g)</b>	500.0
<b>Masa de la muestra seca (g)</b>	484.0
<b>Masa de agua añadida al matraz (g)</b>	303.5

<b>Gravedad específica Bulk</b>	2.46
<b>Gravedad específica saturada con superficie seca</b>	2.54
<b>Gravedad específica aparente</b>	2.68
<b>Porcentaje de absorción (%)</b>	3.31

**Anexo 2.1.4:** Durabilidad de los agregados a la acción del sulfato de sodio

Agregado grueso (3/4)

<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Masa de las fracciones antes del ensayo (g)</b>	<b>Masa de las fracciones después del ensayo (g)</b>	<b>Desgaste (%)</b>
1/2	12.5	670.4	656.2	2.1
3/4	19.0	500.1	492.8	1.5
3/8	9.5	330.1	315.5	4.4
<b>Promedio</b>				2.7

Agregado grueso (3/8)

<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Masa de las fracciones antes del ensayo (g)</b>	<b>Masa de las fracciones después del ensayo (g)</b>	<b>Desgaste (%)</b>
3/8	9.5	330.4	319.9	3.2
# 4	4.8	300.1	280.0	6.7
<b>Promedio</b>				4.9

Agregado fino (arena)

<b>Malla N°</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Masa de las fracciones antes del ensayo (g)</b>	<b>Masa de las fracciones después del ensayo (g)</b>	<b>Desgaste (%)</b>
# 4	4.8	100.0	86.6	13.4
# 8	2.4	100.0	83.8	16.2
# 16	1.2	100.0	87.9	12.1
# 30	0.6	100.0	90.3	9.7
<b>Promedio</b>				12.9

**Anexo 2.1.5:** Desgaste de los agregados gruesos en la máquina de Los Ángeles

Agregado grueso (3/4)

<b>Tipo de gradación</b>	B
<b>Masa inicial de la muestra (g)</b>	5025
<b>Masa retenida en el tamiz N° 12 después de 500 revoluciones (g)</b>	3476.3
<b>Masa que pasa el tamiz N° 12 (g)</b>	1548.7
<b>Porcentaje de desgaste (%)</b>	30.82

Agregado grueso (3/8)

<b>Tipo de gradación</b>	C
<b>Masa inicial de la muestra (g)</b>	5050
<b>Masa retenida en el tamiz N° 12 después de 500 revoluciones (g)</b>	3502.7
<b>Masa que pasa el tamiz N° 12 (g)</b>	1547.3
<b>Porcentaje de desgaste (%)</b>	30.64

**Anexo 2.1.6:** Equivalente de arena en agregados finos

Agregado fino (arena)

<b>Muestra N°</b>	1	2
<b>Lectura inicial</b>	5.4	5.3
<b>Lectura final</b>	3.5	3.6
<b>Equivalente de arena</b>	65	68
<b>Promedio</b>	67	

**Anexo 2.2:** Caracterización de material bituminoso**Anexo 2.2.1:** Penetración de materiales bituminosos

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	25
<b>Carga (g)</b>	100.01
<b>Tiempo de carga (s)</b>	5.00

<b>Punto</b>	1	2	3
<b>Penetración (décimas de mm)</b>	68	69	70
<b>Promedio</b>	69		

**Anexo 2.2.2:** Densidad de materiales bituminosos semisólidos

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	25
<b>Picnómetro N°</b>	1215
<b>Masa de picnómetro + tapón (g)</b>	38.594
<b>Masa de picnómetro + tapón + agua destilada (g)</b>	62.124
<b>Masa de picnómetro + tapón + asfalto (g)</b>	55.612
<b>Masa de picnómetro + tapón + agua destilada + asfalto (g)</b>	62.303

<b>Densidad relativa de la muestra</b>	1.011
<b>Densidad del agua a la temperatura de ensayo (kg/m<sup>3</sup>)</b>	997.000
<b>Densidad de la muestra (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1007.598

### Anexo 2.2.3: Viscosidad cinemática de asfaltos

Viscosidad del asfalto a elevadas temperaturas usando viscosímetro rotatorio

<b>Viscosímetro</b>	Brookfield DV-II + Pro
<b>Husillo</b>	SC4 - 21
<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	135
<b>Velocidad de rotación (rpm)</b>	100.00
<b>Viscosidad (cP)</b>	353.50
<b>Torque (%)</b>	70.70

Viscosidad cinemática del asfalto

<b>Viscosidad con viscosímetro rotatorio (ASTM D4400/D4402M) (cP)</b>	353.500
<b>Densidad relativa de la muestra a 25/25 °C</b>	1.011
<b>Viscosidad cinemática (mm<sup>2</sup>/s)</b>	374.362

### Anexo 2.2.4: Punto de chispa y llama con el equipo de copa abierta de Cleveland

<b>Punto de chispa (°C)</b>	312
<b>Punto de llama (°C)</b>	324
<b>Presión barométrica (mmHg)</b>	550.1
<b>Punto de chispa corregido (°C)</b>	319
<b>Punto de llama corregido (°C)</b>	331

### Anexo 2.2.5: Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	60
<b>Número del viscosímetro</b>	100
<b>Serie del viscosímetro</b>	L801
<b>Constante del viscosímetro (Pa.s/s)</b>	3.177
<b>Tiempo de flujo (s)</b>	61.030
<b>Viscosidad (Pa.s)</b>	193.892

**Anexo 2.2.6:** Punto de ablandamiento de bitumen (aparato anillo y bola)

<b>Muestra N°</b>	1	2
<b>Punto de ablandamiento (°C)</b>	48.2	48.4
<b>Promedio</b>	48.30	

**Anexo 2.2.7:** Índice de penetración

<b>Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s (décimas de mm)</b>	69
<b>Punto de ablandamiento (°C)</b>	48.3
<b>Índice de penetración</b>	-0.9

**Anexo 2.2.8:** Horno de película delgada rodante (RTFO)

<b>Botella</b>	1	2
<b>Masa de botella + asfalto antes (g)</b>	195.926	201.264
<b>Masa de botella + asfalto después (g)</b>	195.920	201.246
<b>Cambio de masa (%)</b>	-0.003	-0.009
<b>Promedio</b>	-0.006	

**Anexo 2.2.9:** Ductilidad de materiales bituminosos (RTFO)

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	25
<b>¿Se usa aditivo para la densidad del agua?</b>	No
<b>Número de réplicas</b>	3

<b>Molde</b>	1	2	3
<b>Ductilidad (cm)</b>	50	61	62
<b>Promedio</b>	58		

**Anexo 2.2.10:** Viscosidad de asfaltos por viscosímetro capilar al vacío (RTFO)

<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	60
<b>Número del viscosímetro</b>	200
<b>Serie del viscosímetro</b>	K596
<b>Constante del viscosímetro (Pa.s/s)</b>	11.950
<b>Tiempo de flujo (s)</b>	61.985
<b>Viscosidad (Pa.s)</b>	740.721

**Anexo 2.3:** Caracterización de mezcla bituminosa y briquetas compactadas

**Anexo 2.3.1:** Contenido de ligante asfáltico por el método de ignición

<b>Muestra</b>	1	2
<b>Temperatura de ensayo (°C)</b>	500	500
<b>Masa del conjunto bandeja (balanza externa) (g)</b>	3382.80	3395.25
<b>Masa total inicial (balanza externa) (g)</b>	4607.29	4608.36
<b>Masa de la muestra inicial (g)</b>	1224.49	1213.11
<b>Masa total (balanza horno) (g)</b>	4610.00	4613.00
<b>Comprobar si está dentro de <math>\pm 5g</math></b>	2.71	4.64
<b>Contenido de ligante corregido (%)</b>	7.28	6.97
<b>Promedio</b>	7.13	

**Anexo 2.3.2:** Gravedad específica máxima teórica de mezclas bituminosas de pavimentación

<b>Muestra</b>	1	2
<b>Masa de la muestra (g)</b>	2131.7	2119.1
<b>Masa del contenedor lleno de agua a <math>25\pm 0,5</math> °C (g)</b>	7413.1	7413.1
<b>Masa del contenedor lleno con la muestra agua a <math>25\pm 1</math> °C (g)</b>	8639.4	8632.7
<b>Gravedad específica máxima teórica, Gmm</b>	2.354	2.356
<b>Promedio</b>	2.355	

**Anexo 2.3.3:** Efecto del agua en mezclas bituminosas empleando agua hirviendo (peladura)

Los agregados impregnados con material bituminoso permanecen con el mismo al 100%, después de realizarse el ensayo de resistencia a la peladura, según la norma ASTM D3625.

**Anexo 2.3.4:** Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas bituminosas compactadas no absorbentes

Briqueta N°	Masa seca (g)	Masa sumergida (g)	Masa saturada con superficie seca (g)	Gravedad específica Bulk a 25 °C	Densidad a 25°C (kg/m <sup>3</sup> )	Porcentaje de agua absorbida (%)
1	1199.93	673.94	1200.60	2.278	2271.542	0.13
2	1167.61	654.15	1169.26	2.267	2259.920	0.32
3	1121.33	634.36	1124.35	2.288	2281.610	0.62
4	1081.08	604.52	1081.48	2.267	2259.805	0.08
5	1150.85	645.14	1152.09	2.270	2263.335	0.24
6	1126.00	631.55	1127.27	2.271	2264.629	0.26
7	1070.45	602.15	1071.55	2.280	2273.623	0.23
8	1176.97	656.86	1178.74	2.255	2248.484	0.34
9	1158.09	649.81	1160.59	2.267	2260.495	0.49
			<b>Promedio</b>	2.272	2264.827	0.30

**Anexo 2.3.5:** Porcentaje de vacíos de aire en mezclas bituminosas compactadas

Briqueta N°	Gravedad Específica Bulk a 25 °C	Gmm	Porcentaje de vacíos (%)
1	2.278	2.355	3.25
2	2.267		3.75
3	2.288		2.82
4	2.267		3.75
5	2.270		3.60
6	2.271		3.55
7	2.280		3.16
8	2.255		4.24
9	2.267		3.72
		<b>Promedio</b>	3.54

**Anexo 2.3.6:** Estabilidad y flujo Marshall de mezclas bituminosas compactadas (factores de corrección de estabilidad en Anexo 3)

Briqueta N°	Espesor (mm)	Diámetro (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Factor de corrección	Estabilidad (lb)	Estabilidad corregida (lb)	Flujo (0,01 in)	
1	66.00	101.49	534	0.96	4100	3936.00	12.00	
2	64.42	101.84	525	0.96	4075	3912.00	8.00	
3	62.31	101.58	505	1.04	3425	3562.00	10.50	
4	59.58	101.68	484	1.09	3475	3787.75	10.00	
5	63.44	101.59	514	1.00	3450	3450.00	10.25	
6	62.43	101.54	506	1.04	3850	4004.00	11.00	
7	60.32	101.78	491	1.09	3000	3270.00	9.75	
8	66.02	101.75	537	0.93	3450	3208.50	12.25	
9	64.64	101.72	525	0.96	3400	3264.00	11.75	
						<b>Promedio</b>	3599.36	10.61

**Anexo 2.3.7:** Módulo resiliente de mezclas bituminosas compactadas

Briqueta N°	Martillo Marshall			Compactador giratorio		
	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Módulo (MPa)
1	101	61	3019	100	72	2124
2	102	64	2743	102	69	1938
3	102	59	2421	100	65	2267
4	102	70	2690	100	72	2274
5	102	62	2589	100	61	2910
6	102	63	2523	100	59	2510
7	100	64	2297	100	57	3374
8	100	62	2435	100	67	2995
9	102	65	2349	100	67	3441
		<b>Promedio</b>	2562.89		<b>Promedio</b>	2648.11

**Anexo 3:** Factores de corrección de estabilidad Marshall (ASTM, 2015, p.6).

Volumen de la briqueta (cm <sup>3</sup> )	Factor de corrección
200 - 213	5.56
214 - 225	5.00
226 - 237	4.55
238 - 250	4.17
251 - 264	3.85
265 - 276	3.57
277 - 289	3.33
290 - 301	3.03
302 - 316	2.78
317 - 328	2.50
329 - 340	2.27
341 - 353	2.08
354 - 367	1.92
368 - 379	1.79
380 - 392	1.67
393 - 405	1.56
406 - 420	1.47

Volumen de la briqueta (cm <sup>3</sup> )	Factor de corrección
421 - 431	1.39
432 - 443	1.32
444 - 456	1.25
457 - 470	1.19
471 - 482	1.14
483 - 495	1.09
496 - 508	1.04
509 - 522	1.00
523 - 535	0.96
536 - 546	0.93
547 - 559	0.89
560 - 573	0.86
574 - 585	0.83
586 - 598	0.81
599 - 610	0.78
611 - 625	0.76

**Anexo 4:** Resultados de las granulometrías de mezclas de agregados

Agregados para hormigón asfáltico							Resultados			
Ensayo	Unidad	Norma	Malla N°	Tamaño (mm)	Mín.	Máx.	Planta asfáltica EQFALTO		Planta asfáltica TEA S.A.	
Granulometría	%	ASTM C136	3/4	19	90	100	100.0	Cumple	97.0	Cumple
			1/2	12.5	-	-	90.6	-	82.3	-
			3/8	9.5	56	80	86.1	No cumple	73.6	Cumple
			# 4	4.8	35	65	67.9	No cumple	56.1	Cumple
			# 8	2.4	23	49	52.0	No cumple	46.2	Cumple
			# 16	1.2	-	-	40.8	-	37.9	-
			# 30	0.6	-	-	30.2	-	27.7	-
			# 50	0.3	5	19	19.1	No cumple	15.2	Cumple
			# 100	0.2	-	-	9.5	-	7.6	-
			# 200	0.1	2	8	4.6	Cumple	3.6	Cumple

**Anexo 5:** Resultados de la caracterización de los materiales pétreos

Agregados para hormigón asfáltico					Resultados planta asfáltica EQFALTO					
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máy.	Agregado grueso (3/4)		Agregado fino (3/8)		Agregado fino (arena)	
Gravedad específica Bulk	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.54	-	2.51	-	2.62	-
Gravedad específica saturada con superficie seca	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.60	-	2.58	-	2.65	-
Gravedad específica aparente	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.72	-	2.71	-	2.69	-
Porcentaje de absorción	%	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.64	-	2.90	-	0.91	-
Desgaste de agregado grueso en la máquina de Los Ángeles	%	ASTM C131	-	40	22.00	Cumple	-	-	-	-
Durabilidad a la acción del sulfato de sodio	%	ASTM C88	-	12	0.9	Cumple	23.1	No cumple	17.0	No cumple
Equivalente de arena en agregados finos	%	ASTM D2419	50	-	-	-	74	Cumple	88	Cumple

Agregados para hormigón asfáltico					Resultados planta asfáltica TEA S.A.					
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máx.	Agregado grueso (3/4)		Agregado grueso (3/8)		Agregado fino (arena)	
Gravedad específica Bulk	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.16	-	2.25	-	2.46	-
Gravedad específica saturada con superficie seca	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.34	-	2.28	-	2.54	-
Gravedad específica aparente	-	ASTM C127 ASTM C128	-	-	2.63	-	2.30	-	2.68	-
Porcentaje de absorción	%	ASTM C127 ASTM C128	-	-	8.22	-	0.97	-	3.31	-
Desgaste de agregado grueso en la máquina de Los Ángeles	%	ASTM C131	-	40	30.82	Cumple	30.64	Cumple	-	-
Durabilidad a la acción del sulfato de sodio	%	ASTM C88	-	12	2.7	Cumple	4.9	Cumple	12.9	No cumple
Equivalente de arena en agregados finos	%	ASTM D2419	50	-	-	-	-	-	67	Cumple

**Anexo 6:** Resultados de la caracterización de los materiales bituminoso

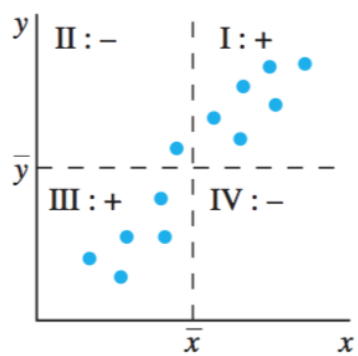
Grado de viscosidad AC - 20					Resultados			
					Planta asfáltica EQFALTO		Planta asfáltica TEA S.A.	
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máy.				
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D2171	160	240	249.248	No cumple	193.892	Cumple
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	ASTM D2170	300	-	413.786	Cumple	374.362	Cumple
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	232	-	311	Cumple	319	Cumple
Índice de penetración	-	ASTM D5/D5M	-1.5	+1	-0.4	Cumple	-0.9	Cumple
<b>Residuo de ensayos de película fina de horno giratorio (RTFO)</b>								
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa.s	ASTM D2171	-	800	1067.826	No cumple	740.721	Cumple
Cambio de masa	%	ASTM D2872	-	1	-0.029	Cumple	-0.006	Cumple
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min	cm	ASTM D113	50	-	46	No cumple	58	Cumple

Grado de penetración 60 - 70					Resultados			
					Planta asfáltica EQFALTO		Planta asfáltica TEA S.A.	
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máx.				
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 s	mm/10	ASTM D5/D5M	60	70	65	Cumple	69	Cumple
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36/D36M	48	57	50.55	Cumple	48.30	Cumple
Índice de penetración	-	ASTM D5/D5M	-1.5	+1	-0.4	Cumple	-0.9	Cumple
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	232	-	311	Cumple	319	Cumple
Densidad relativa 25 °C / 25 °C	-	ASTM D70	1.000	-	1.013	Cumple	1.011	Cumple
<b>Residuo de ensayos de película fina de horno giratorio (RTFO)</b>								
Variación de masa	%	ASTM D2872	-	0.8	-0.029	Cumple	-0.006	Cumple
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min	cm	ASTM D113	50	-	46	No cumple	58	Cumple

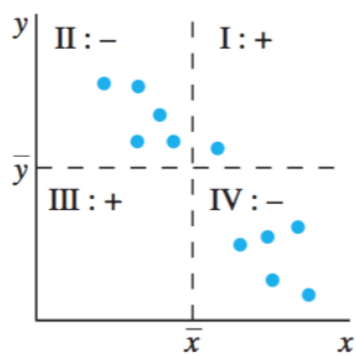
**Anexo 7:** Resultados de la caracterización las mezclas bituminosas y briquetas compactadas

Mezclas asfálticas para tráfico pesado					Resultados			
					Planta asfáltica EQFALTO		Planta asfáltica TEA S.A.	
Ensayo	Unidad	Norma	Mín.	Máx.				
Estabilidad	lb	ASTM D6927	1800	-	3269.25	Cumple	3599.36	Cumple
Flujo	in/100	ASTM D6927	8	14	9.53	Cumple	10.61	Cumple
Porcentaje de vacíos en mezcla	%	ASTM D3203	3	5	10.36	No cumple	3.54	Cumple
Gravedad específica máxima teórica	-	ASTM D2041	-	-	2.398	-	2.355	-
Contenido de ligante asfáltico	%	ASTM D6307	-	-	6.43	-	7.13	-
Efecto del agua hirviendo (peladura)	%	ASTM D3625	95	-	100.00	Cumple	100.00	Cumple
Gravedad específica Bulk	-	ASTM D2726	-	-	2.150	-	2.272	-
Densidad a 25°C	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D2726	-	-	2143.085	-	2264.827	-
Porcentaje de agua absorbida	%	ASTM D2726	-	-	0.13	-	0.30	-
Módulo resiliente (Marshall)	Mpa	ASTM D7369	-	-	2194.56	-	2562.89	-
Módulo resiliente (SUPERPAVE)	Mpa	ASTM D7369	-	-	2182.78	-	2648.11	-

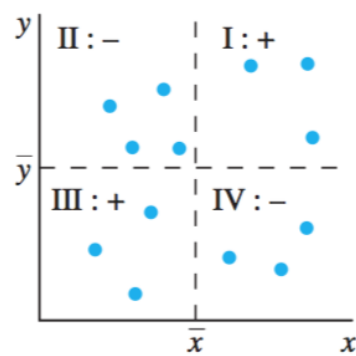
**Anexo 8:** Modelos del coeficiente de correlación,  $r$ . (Mendehall, Beaver & Beaver, 2010, p.106)



a) Modelo positivo



b) Modelo negativo



c) Sin modelo

**Anexo 9:** Gráficas de Estabilidad y Flujo Marshall obtenidas en laboratorio

**Anexo 9.1:** Gráficas de Estabilidad y Flujo Marshall planta EQFALTO



MARK SELECTION  
 A  B

30/03/2017

H-1322 CP

5K / 10K

4.5K / 9K

4K / 8K

3.5K / 7K

3K / 6K

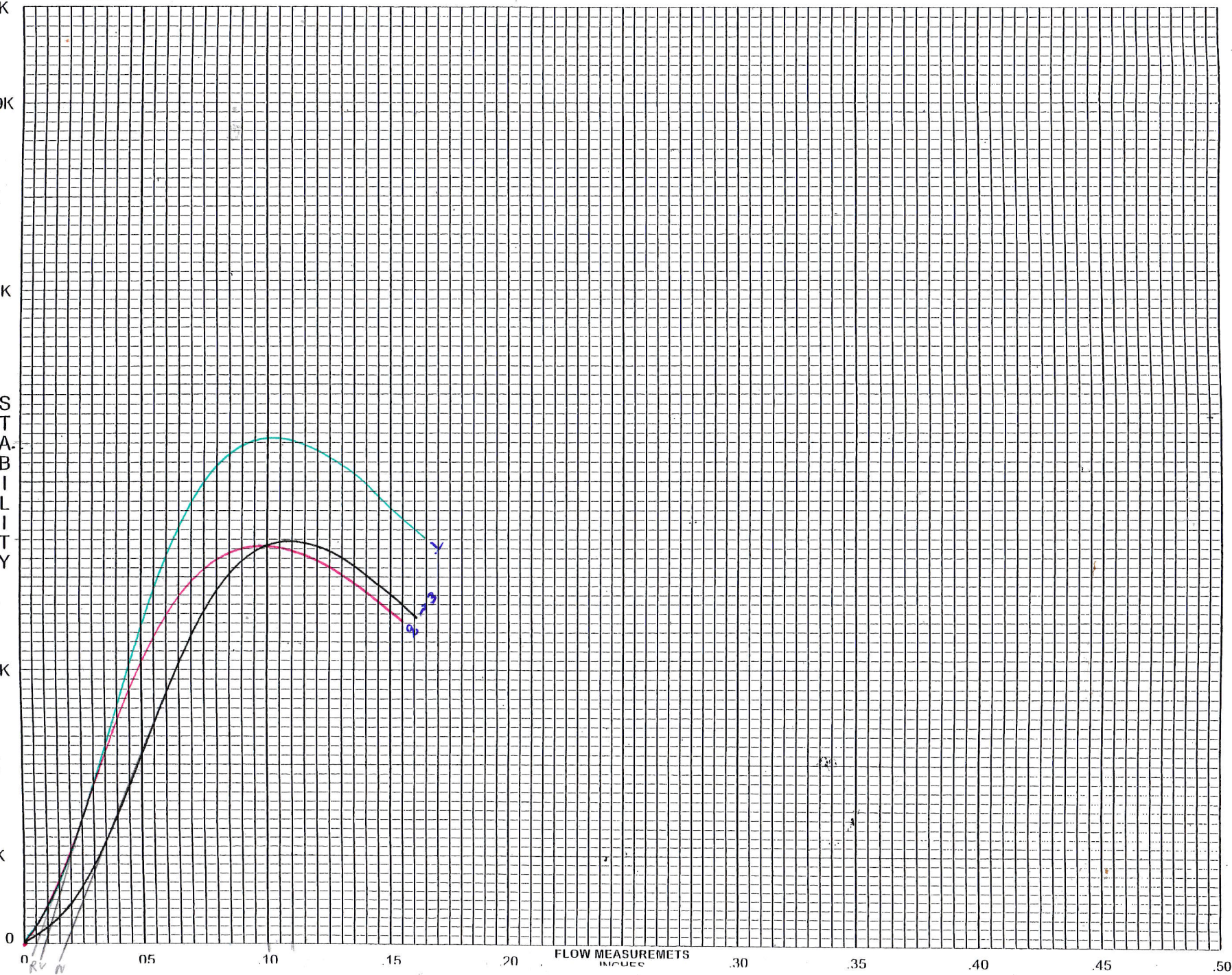
K, Lbf

2K / 4K

1.5K / 3K

1K / 2K

.5K / 1K



0  
RV  
N

FLOW MEASUREMENTS  
INCHES

.30 .35 .40 .45 .50



MARK SELECTION

340

30/03/2017

H-1322 CP

5K / 10K

4.5K / 9K

4K / 8K

3.5K / 7K

3K / 6K

2K / 4K

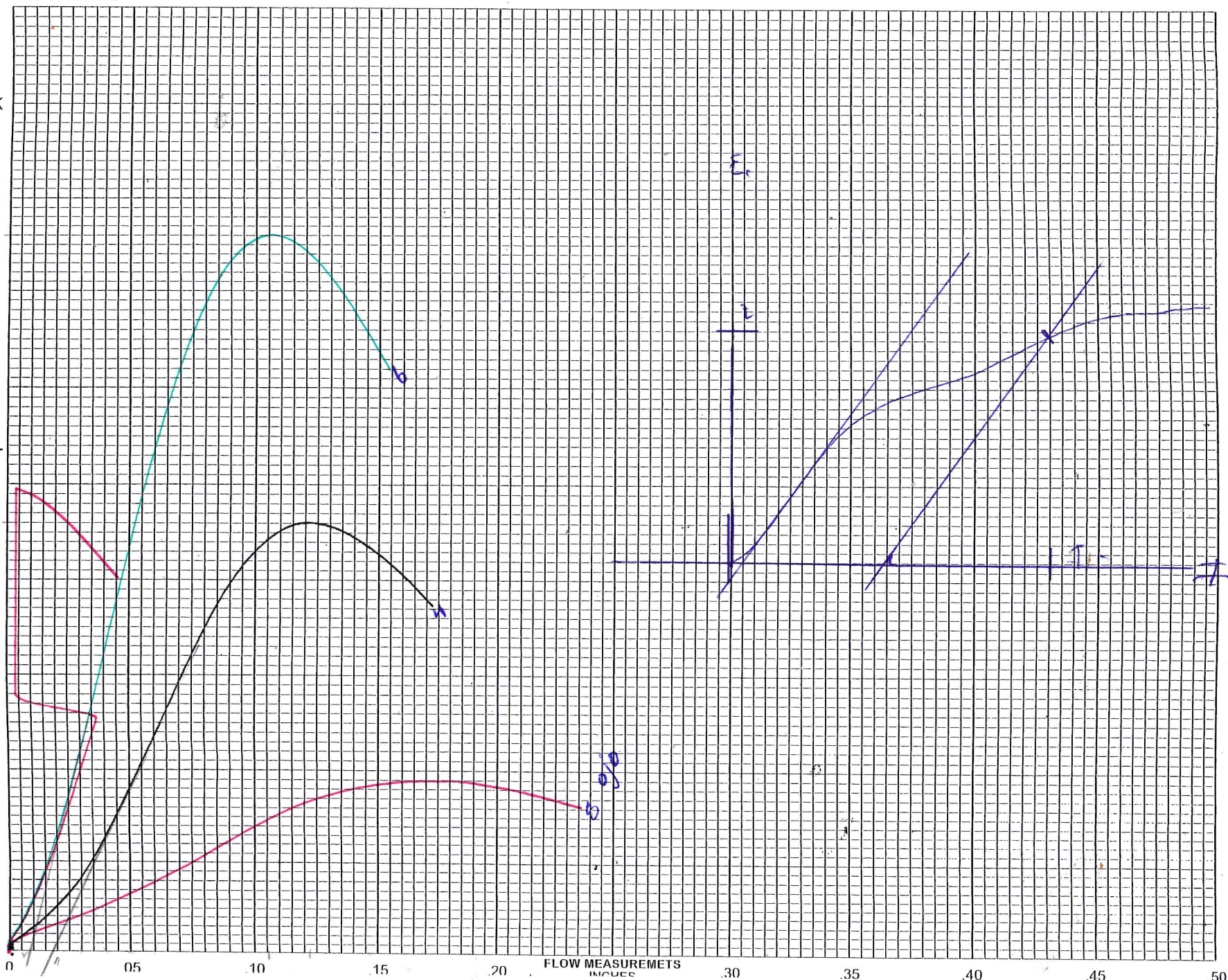
1.5K / 3K

1K / 2K

.5K / 1K

0

S  
T  
A  
B  
I  
L  
I  
T  
Y



FLOW MEASUREMENTS  
INCHES

0 0.05 0.10 0.15 0.20 0.30 0.35 0.40 0.45 0.50



MARK SELECTION

3/4

30/03/2017

H-1322 GP

5K / 10K

4.5K / 9K

4K / 8K

3.5K / 7K

3K / 6K

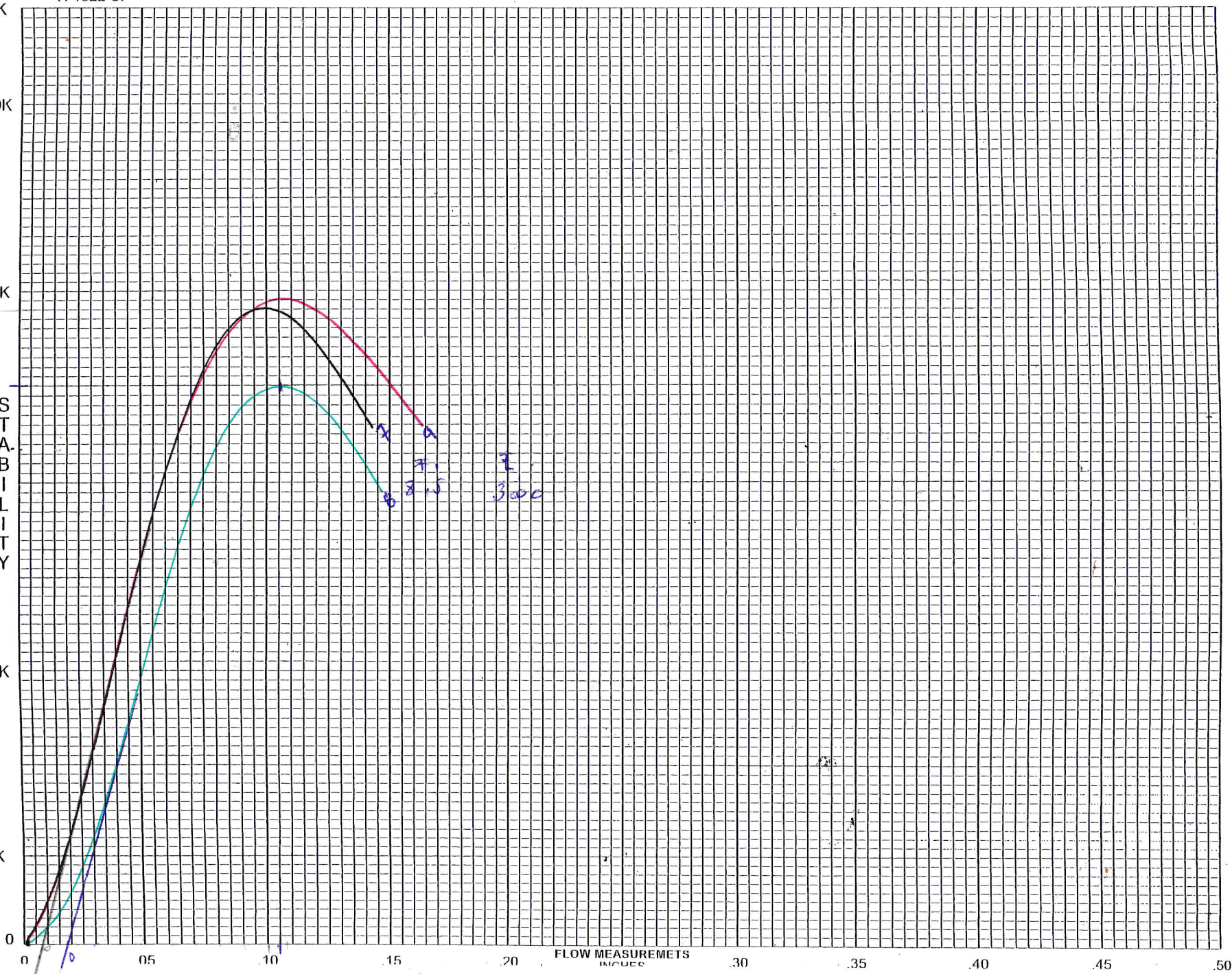
K, Lbf

2K / 4K

1.5K / 3K

1K / 2K

.5K / 1K



STABILITY

FLOW MEASUREMENTS

METERS

**Anexo 9.2:** Gráficas de Estabilidad y Flujo Marshall planta TEA S.A

MARK SELECTION

/

H-1322 CP

TEA

5K / 10K

4.5K / 9K

4K / 8K

3.5K / 7K

3K / 6K

K, Lbf

2K / 4K

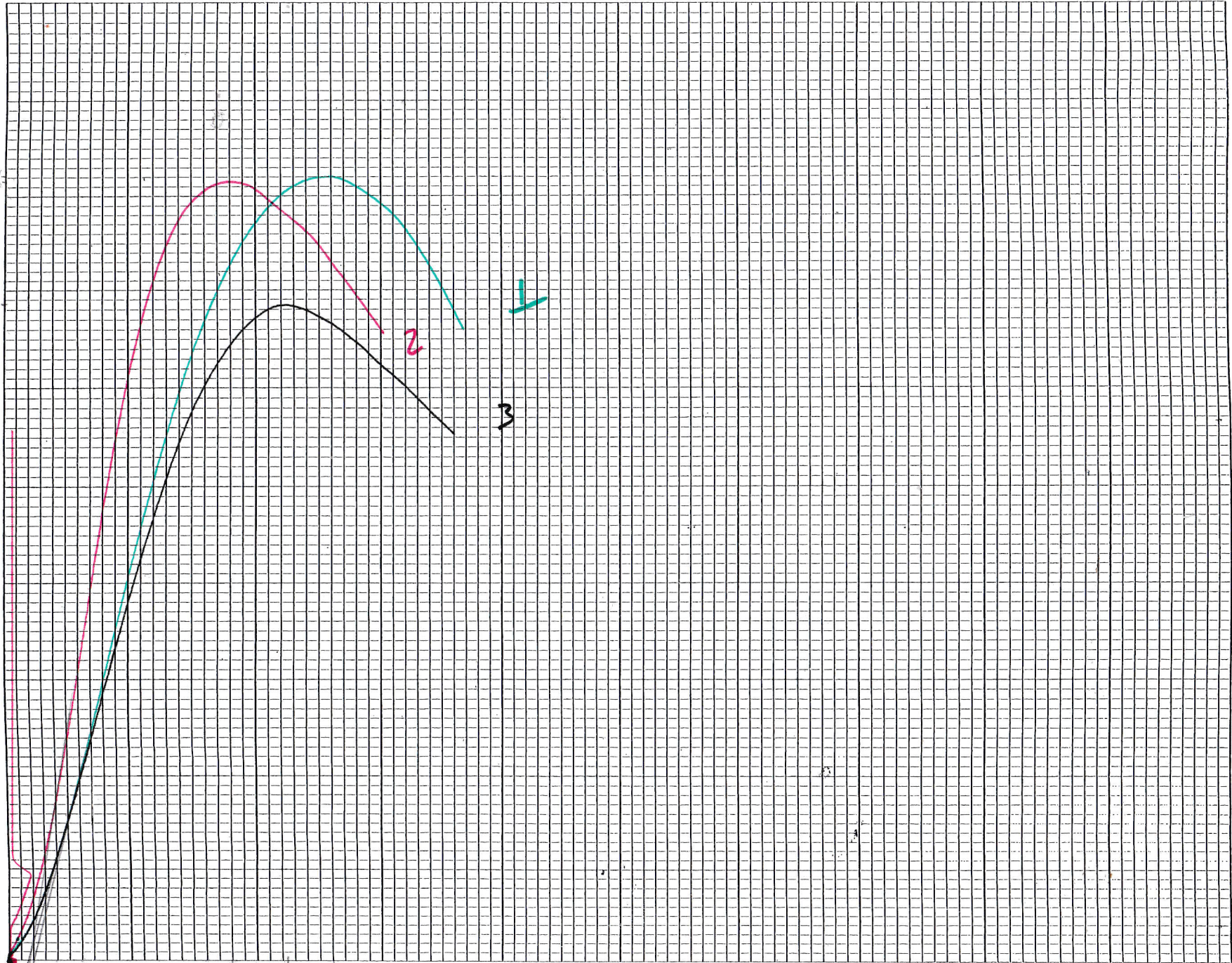
1.5K / 3K

1K / 2K

.5K / 1K

0

S  
T  
A  
B  
I  
L  
I  
T  
Y



FLOW MEASUREMENTS INCHES

.30

.35

.40

.45

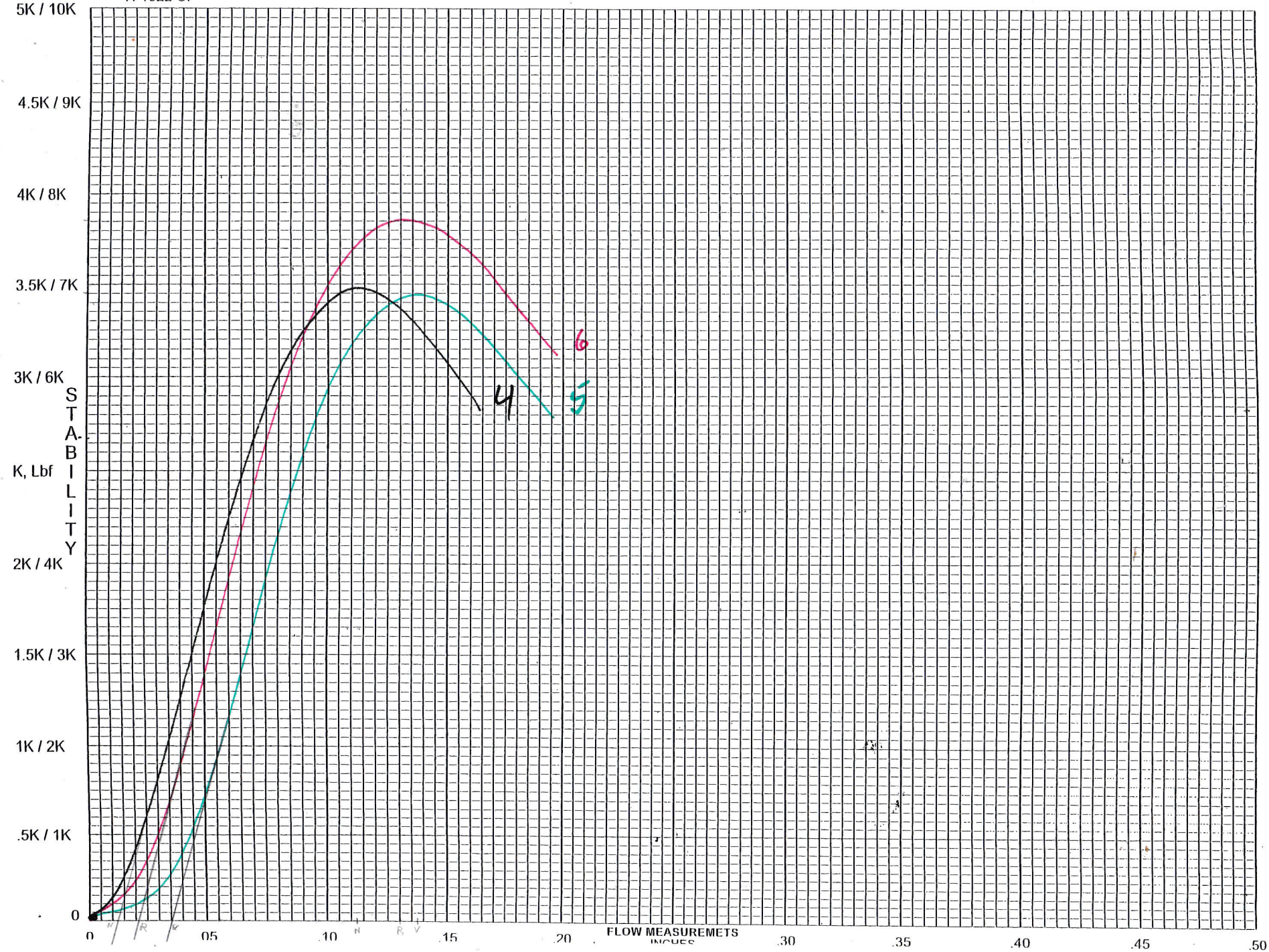
.50



MARK SELECTION  
□/□

H-1322 CP

TEA





MARK SELECTION □/□

H-1322 CP

TEA

5K / 10K

4.5K / 9K

4K / 8K

3.5K / 7K

3K / 6K

2.5K / 5K

2K / 4K

1.5K / 3K

1K / 2K

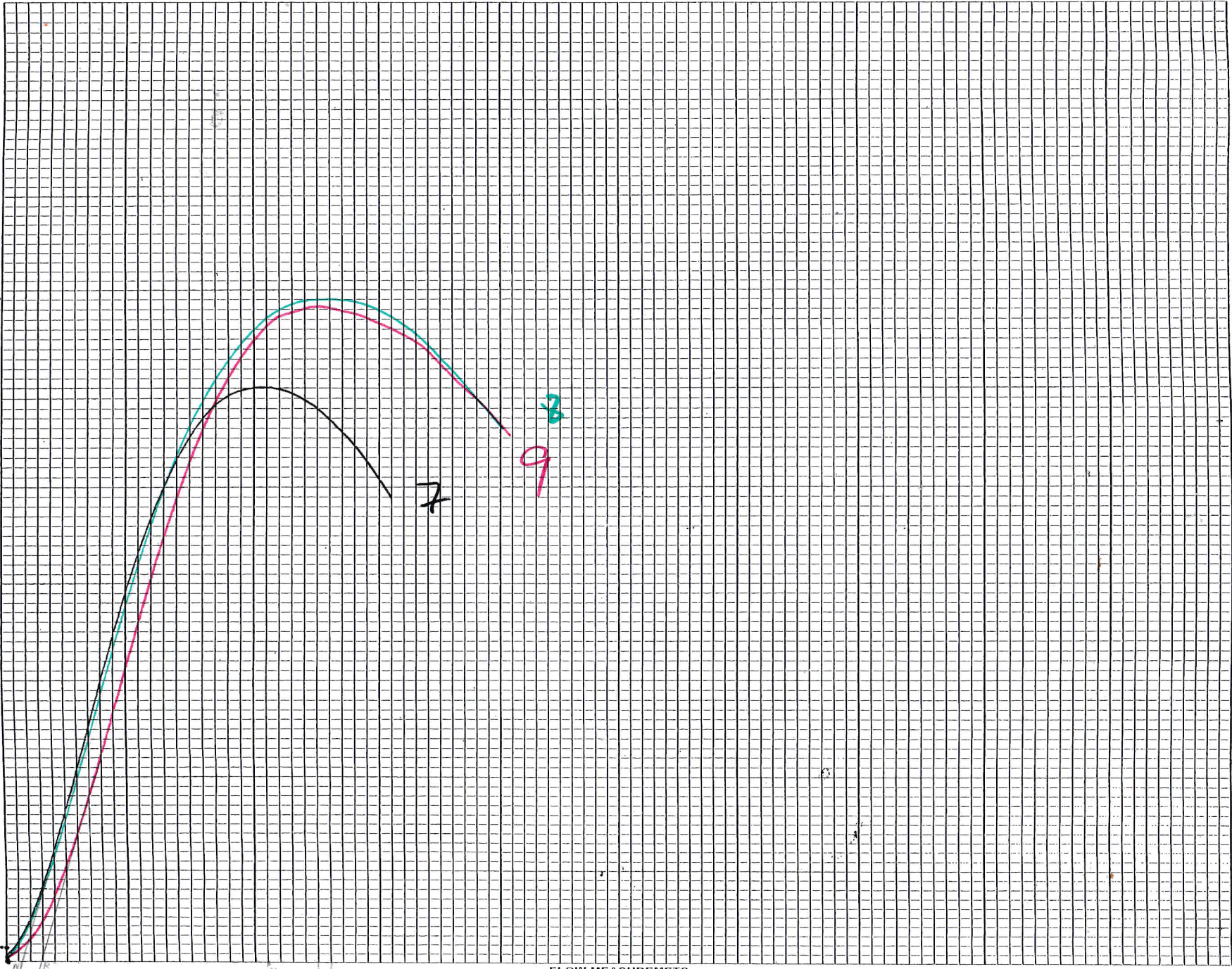
.5K / 1K

0

S  
T  
A  
B  
I  
L  
I  
T  
Y

0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5 9 9.5 10 10.5 11 11.5 12 12.5 13 13.5 14 14.5 15 15.5 16 16.5 17 17.5 18 18.5 19 19.5 20 20.5 21 21.5 22 22.5 23 23.5 24 24.5 25 25.5 26 26.5 27 27.5 28 28.5 29 29.5 30 30.5 31 31.5 32 32.5 33 33.5 34 34.5 35 35.5 36 36.5 37 37.5 38 38.5 39 39.5 40 40.5 41 41.5 42 42.5 43 43.5 44 44.5 45 45.5 46 46.5 47 47.5 48 48.5 49 49.5 50

FLOW MEASUREMENTS INCHES



7

8

9

**Anexo 10:** Resultados de la máquina Universal del ensayo de Módulo Resiliente

**Anexo 10.1:** Planta EQFALTO. Briquetas compactadas con martillo Marshall

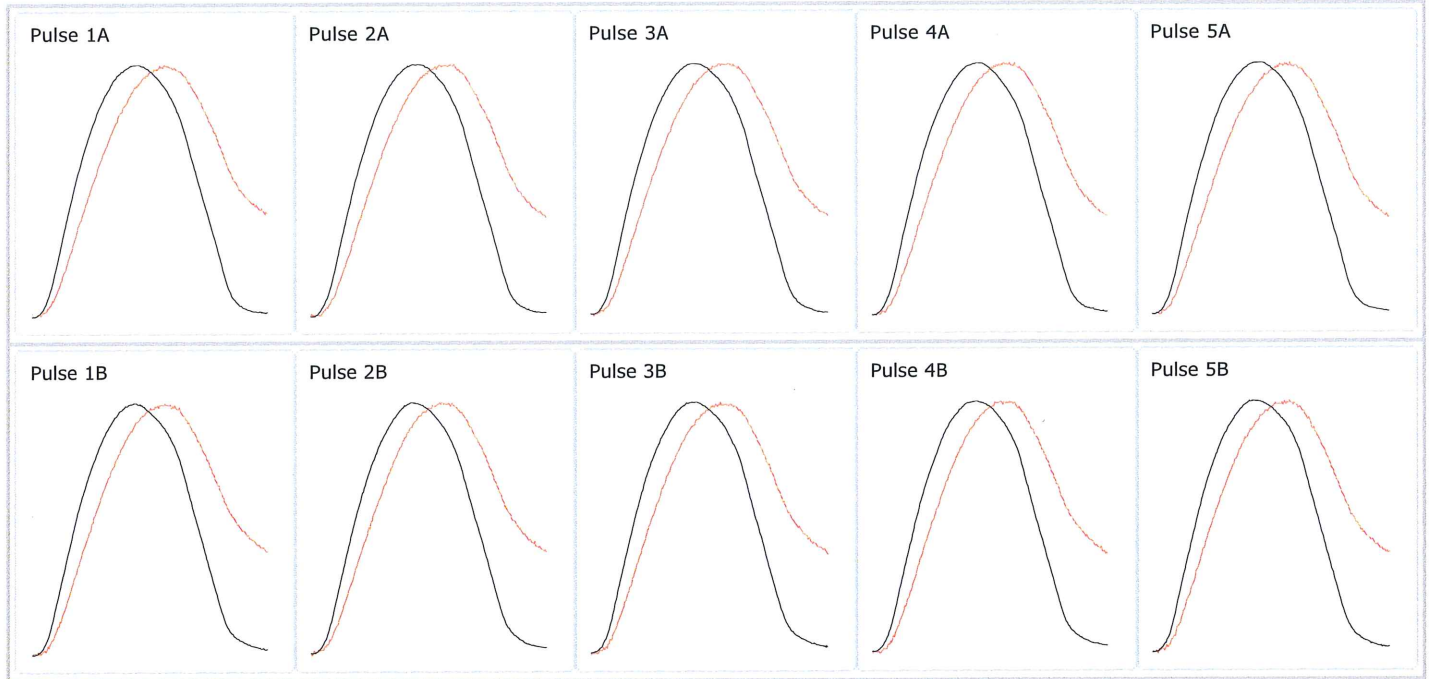
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test: lun, 10 de abr de 2017 @ 13:59  
 Report Number:  
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: MARSHALL 1 (2)  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	62

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.909	0.907	0.909	0.913	0.914	0.910	0.830	0.828	0.828	0.830	0.825	0.828	<b>0.869</b>
Horizontal Stress (kPa)	91.5	91.3	91.5	91.9	92.0	91.6	83.5	83.3	83.3	83.6	83.0	83.4	<b>87.5</b>
Load-Area Factor	0.76	0.77	0.77	0.76	0.76	0.76	0.79	0.80	0.79	0.79	0.80	0.79	<b>0.78</b>
Horizontal Deformation (um)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	<b>4.89</b>
Load Rise Time (ms)	125	124	123	123	126	124	127	125	128	128	126	127	<b>126</b>
Measured Stiffness (MPa)	2140	2172	2183	2185	2174	2171	2083	2112	2101	2114	2125	2107	<b>2139</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2308	2350	2360	2361	2347	2345	2273	2313	2291	2313	2335	2305	<b>2325</b>

Data File: MARSHALL 1 (2)\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_

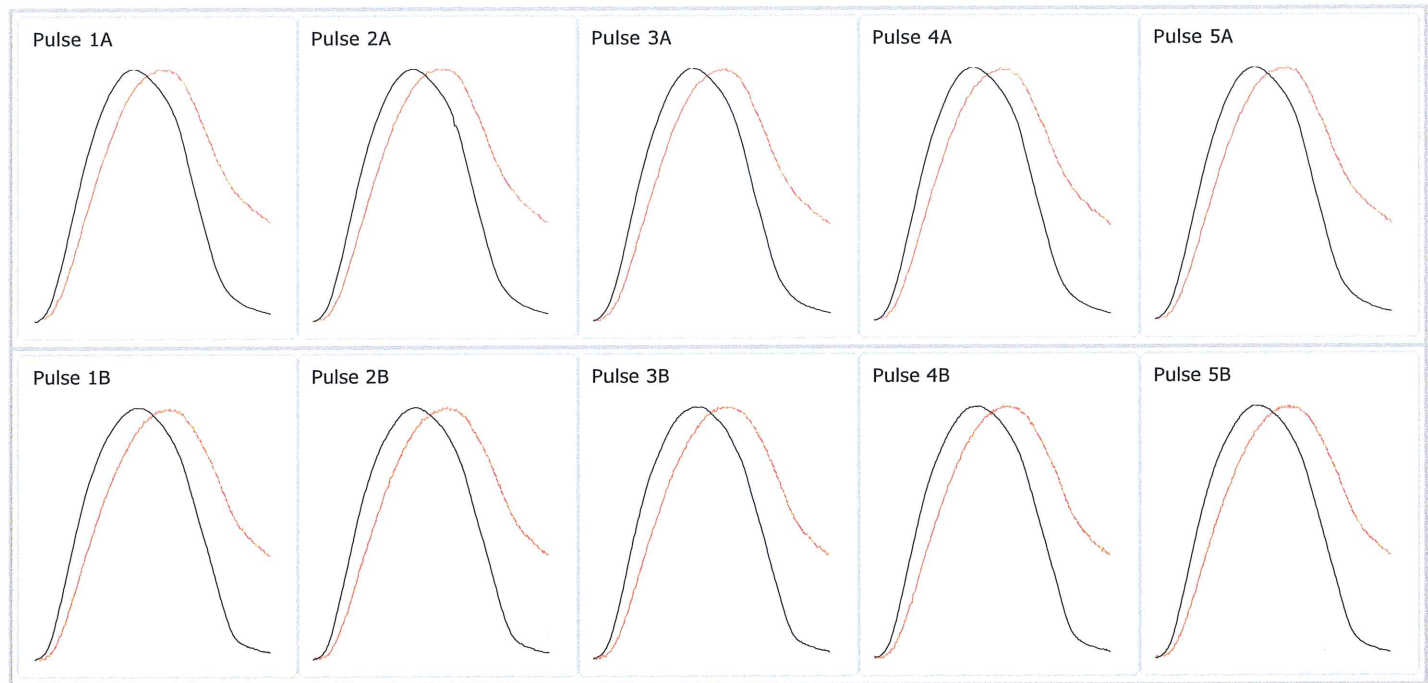
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test vie, 07 de abr de 2017 @ 16:07  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID MARSHALL 2  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	69

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.181	1.185	1.183	1.181	1.184	1.183	0.843	0.846	0.846	0.845	0.847	0.846	<b>1.014</b>
Horizontal Stress (kPa)	106.4	106.7	106.5	106.4	106.6	106.5	75.9	76.2	76.2	76.1	76.3	76.1	<b>91.3</b>
Load-Area Factor	0.62	0.60	0.60	0.61	0.59	0.60	0.63	0.64	0.62	0.65	0.63	0.63	<b>0.62</b>
Horizontal Deformation (um)	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58	<b>4.82</b>
Load Rise Time (ms)	70	74	73	70	72	72	144	140	142	137	142	141	<b>106</b>
Measured Stiffness (MPa)	2211	2220	2203	2192	2202	2205	1727	1739	1748	1754	1740	1742	<b>1974</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2228	2217	2207	2205	2195	2211	1747	1768	1764	1798	1767	1769	<b>1990</b>

Data File MARSHALL 2\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

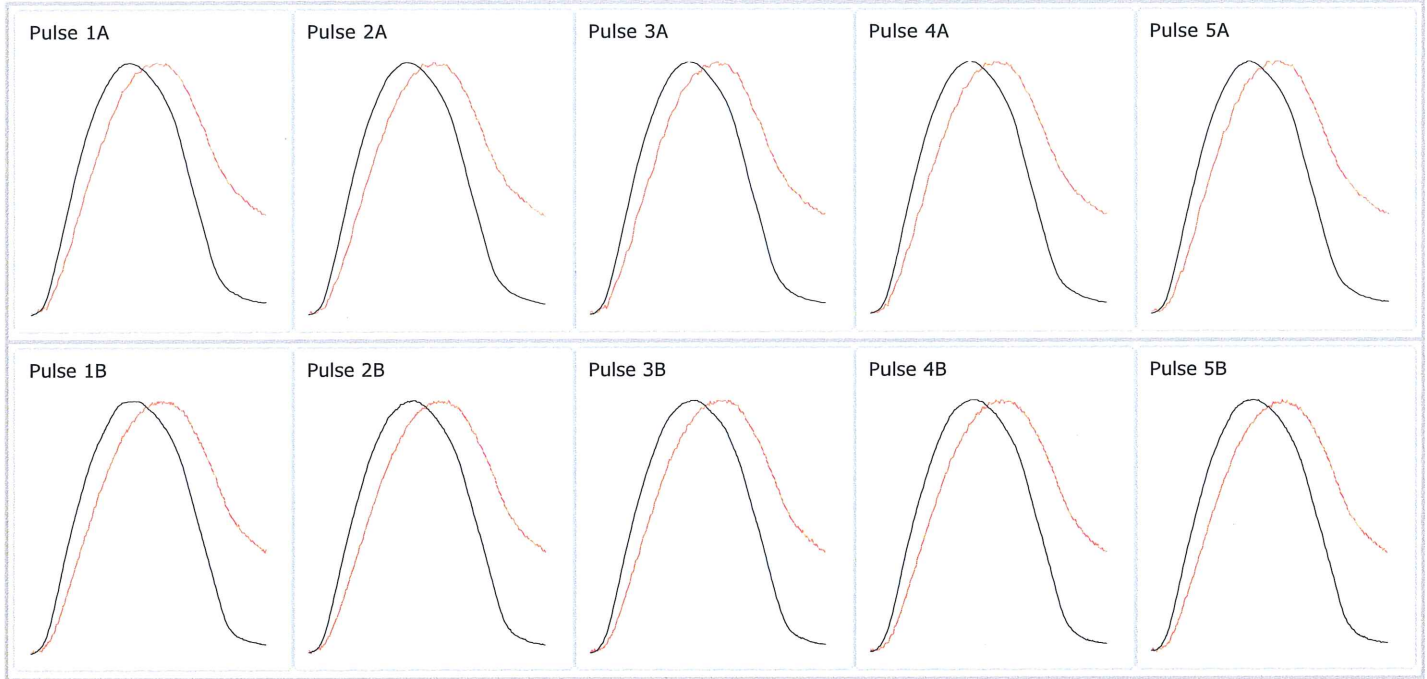
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test vie, 07 de abr de 2017 @ 15:31  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID MARSHALL 3  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	62

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.158	1.157	1.157	1.159	1.166	1.160	0.865	0.869	0.870	0.869	0.869	0.868	<b>1.014</b>
Horizontal Stress (kPa)	117.8	117.8	117.8	117.9	118.6	118.0	88.0	88.4	88.5	88.4	88.4	88.4	<b>103.2</b>
Load-Area Factor	0.56	0.54	0.57	0.55	0.56	0.56	0.60	0.59	0.59	0.59	0.60	0.60	<b>0.58</b>
Horizontal Deformation (um)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	<b>4.73</b>
Load Rise Time (ms)	70	73	69	71	70	71	129	134	132	132	129	131	<b>101</b>
Measured Stiffness (MPa)	2365	2350	2354	2347	2367	2357	1982	1984	1996	1992	1982	1987	<b>2172</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2323	2280	2324	2293	2321	2308	1986	1973	1987	1983	1987	1983	<b>2146</b>

Data File MARSHALL 3\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

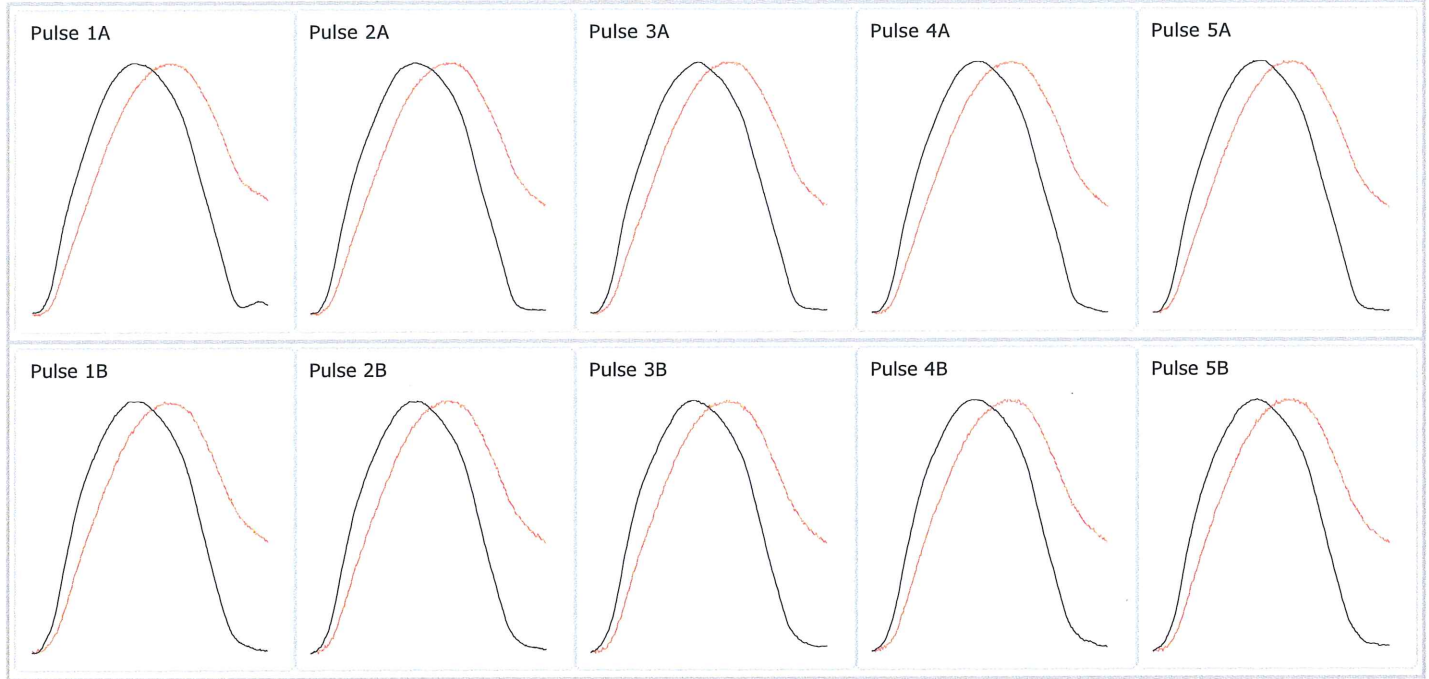
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mar, 25 de abr de 2017 @ 14:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID x-3  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	59

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.861	0.857	0.867	0.862	0.857	0.861	0.667	0.668	0.672	0.667	0.671	0.669	<b>0.765</b>
Horizontal Stress (kPa)	91.3	90.9	92.0	91.4	90.9	91.3	70.7	70.8	71.3	70.7	71.1	71.0	<b>81.1</b>
Load-Area Factor	0.75	0.74	0.74	0.74	0.75	0.74	0.78	0.75	0.73	0.75	0.73	0.75	<b>0.74</b>
Horizontal Deformation (um)	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	<b>5.29</b>
Load Rise Time (ms)	185	183	185	185	180	184	120	126	127	124	127	125	<b>154</b>
Measured Stiffness (MPa)	1708	1719	1737	1727	1730	1724	1772	1813	1829	1823	1854	1818	<b>1771</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	1822	1831	1844	1836	1849	1836	1918	1934	1943	1949	1962	1941	<b>1889</b>

Data File x-3\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

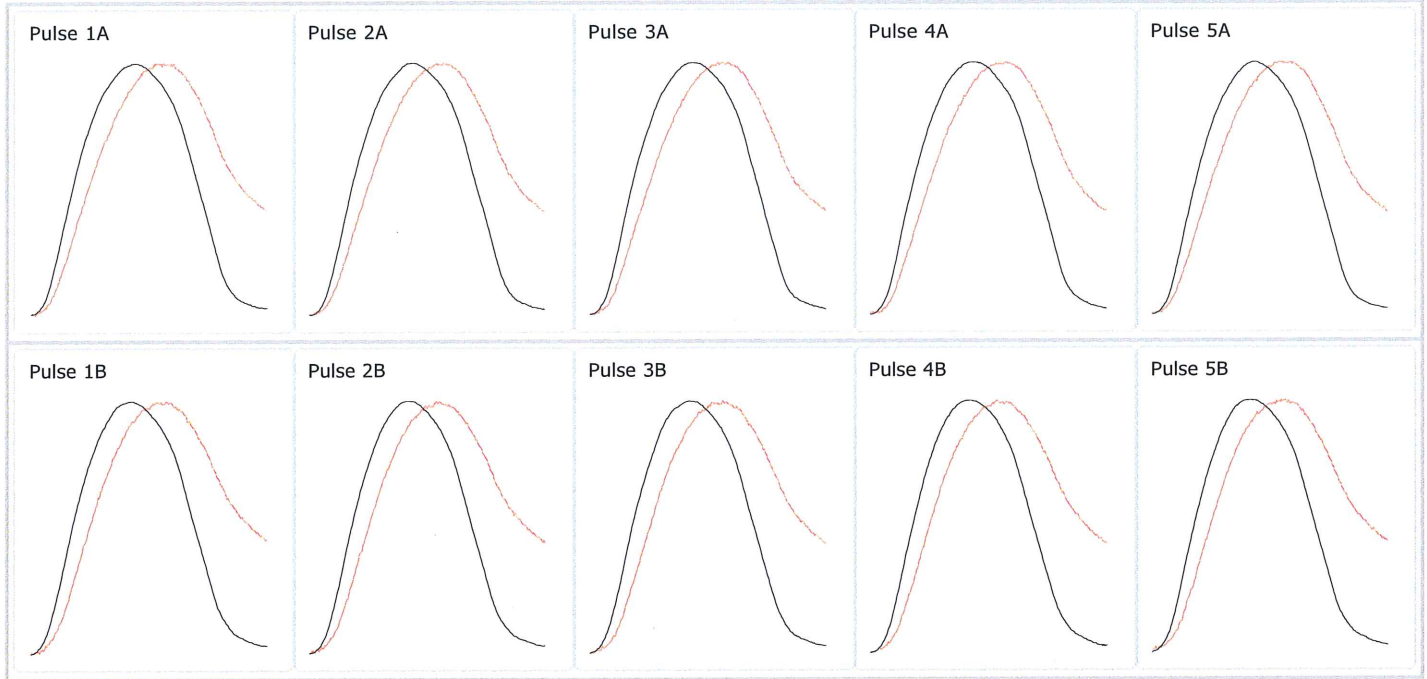
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test vie, 07 de abr de 2017 @ 14:31  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID MARSHALL 5  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	64

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.958	0.958	0.956	0.953	0.964	0.958	0.949	0.954	0.952	0.951	0.950	0.951	<b>0.954</b>
Horizontal Stress (kPa)	93.2	93.2	93.0	92.6	93.7	93.1	92.3	92.7	92.5	92.4	92.4	92.5	<b>92.8</b>
Load-Area Factor	0.68	0.66	0.67	0.66	0.66	0.67	0.66	0.66	0.64	0.66	0.64	0.65	<b>0.66</b>
Horizontal Deformation (um)	5.01	5.01	5.01	5.01	5.01	5.01	5.16	5.16	5.16	5.16	5.16	5.16	<b>5.09</b>
Load Rise Time (ms)	121	124	123	124	124	123	125	125	127	126	128	126	<b>125</b>
Measured Stiffness (MPa)	2000	2009	2010	2010	2020	2010	1924	1913	1931	1923	1929	1924	<b>1967</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2072	2066	2076	2071	2075	2072	1975	1965	1970	1975	1962	1970	<b>2021</b>

Data File MARSHALL 5\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

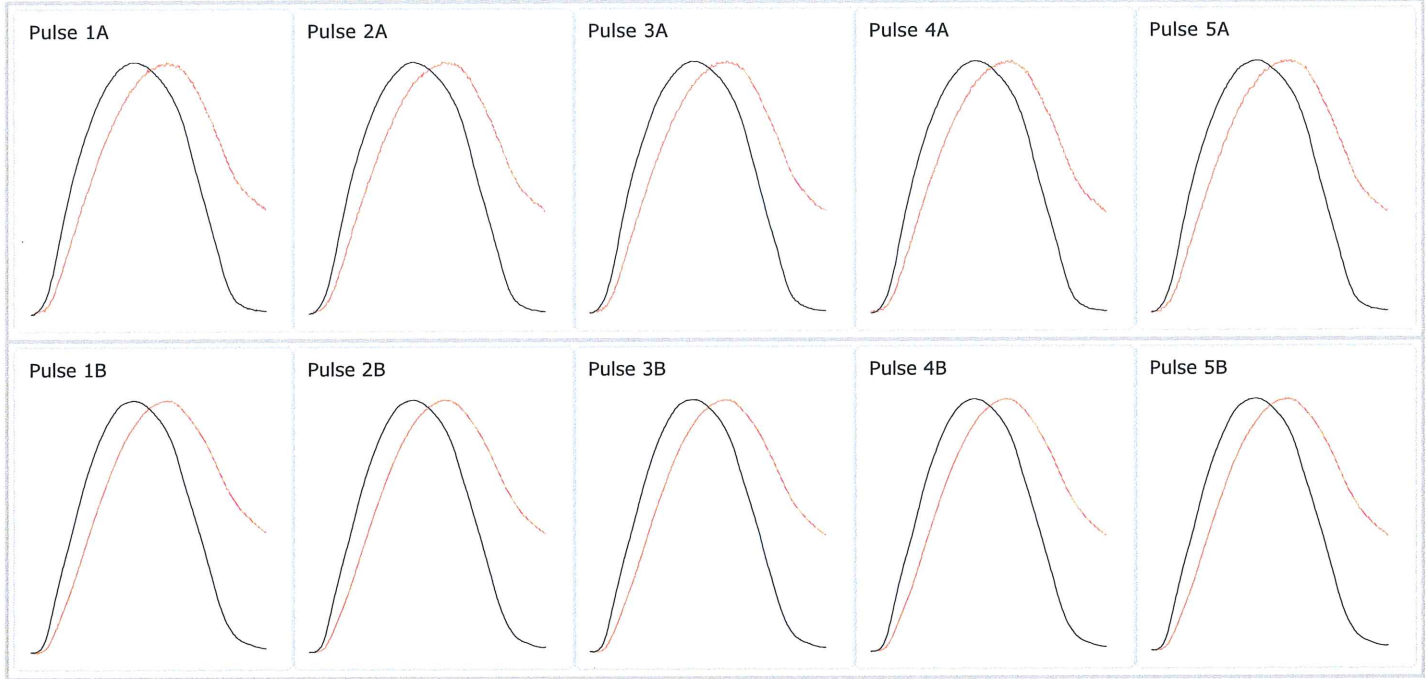
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: lun, 10 de abr de 2017 @ 13:20  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: MARSHALL 6 (2)  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.905	0.907	0.904	0.905	0.907	0.905	1.527	1.531	1.531	1.533	1.530	1.531	<b>1.218</b>
Horizontal Stress (kPa)	89.6	89.8	89.6	89.6	89.8	89.7	151.3	151.7	151.7	151.9	151.6	151.6	<b>120.7</b>
Load-Area Factor	0.79	0.79	0.79	0.80	0.78	0.79	0.70	0.70	0.70	0.71	0.71	0.71	<b>0.75</b>
Horizontal Deformation (um)	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	11.79	11.79	11.79	11.79	11.79	11.79	<b>8.52</b>
Load Rise Time (ms)	126	124	126	123	128	125	187	185	185	185	184	185	<b>155</b>
Measured Stiffness (MPa)	2033	2063	2074	2073	2092	2067	1414	1420	1423	1429	1429	1423	<b>1745</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2216	2252	2266	2273	2274	2256	1474	1484	1487	1496	1496	1487	<b>1872</b>

Data File: MARSHALL 6 (2)\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

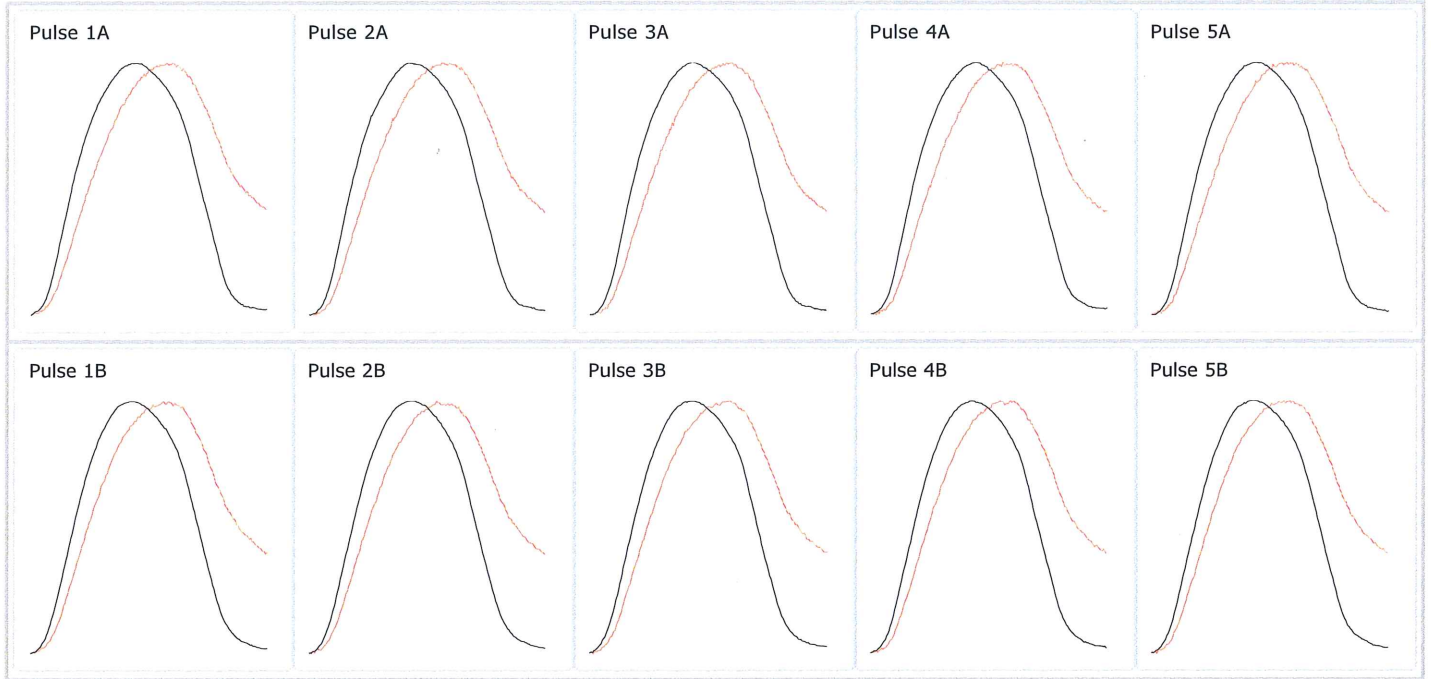
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: jue, 20 de abr de 2017 @ 11:59  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: MARSHALL 7 (3)  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	56

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.796	0.801	0.796	0.801	0.799	0.799	0.866	0.867	0.865	0.865	0.867	0.866	<b>0.832</b>
Horizontal Stress (kPa)	88.8	89.3	88.7	89.3	89.1	89.0	96.6	96.7	96.4	96.4	96.7	96.6	<b>92.8</b>
Load-Area Factor	0.74	0.74	0.75	0.75	0.75	0.75	0.68	0.69	0.71	0.69	0.72	0.70	<b>0.72</b>
Horizontal Deformation (um)	4.44	4.44	4.44	4.44	4.44	4.44	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	<b>4.60</b>
Load Rise Time (ms)	113	112	110	111	110	111	87	88	86	89	85	87	<b>99</b>
Measured Stiffness (MPa)	2316	2351	2350	2363	2370	2350	2316	2325	2351	2373	2375	2348	<b>2349</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2472	2517	2531	2537	2553	2522	2412	2429	2479	2480	2514	2463	<b>2492</b>

Data File: MARSHALL 7 (3)\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

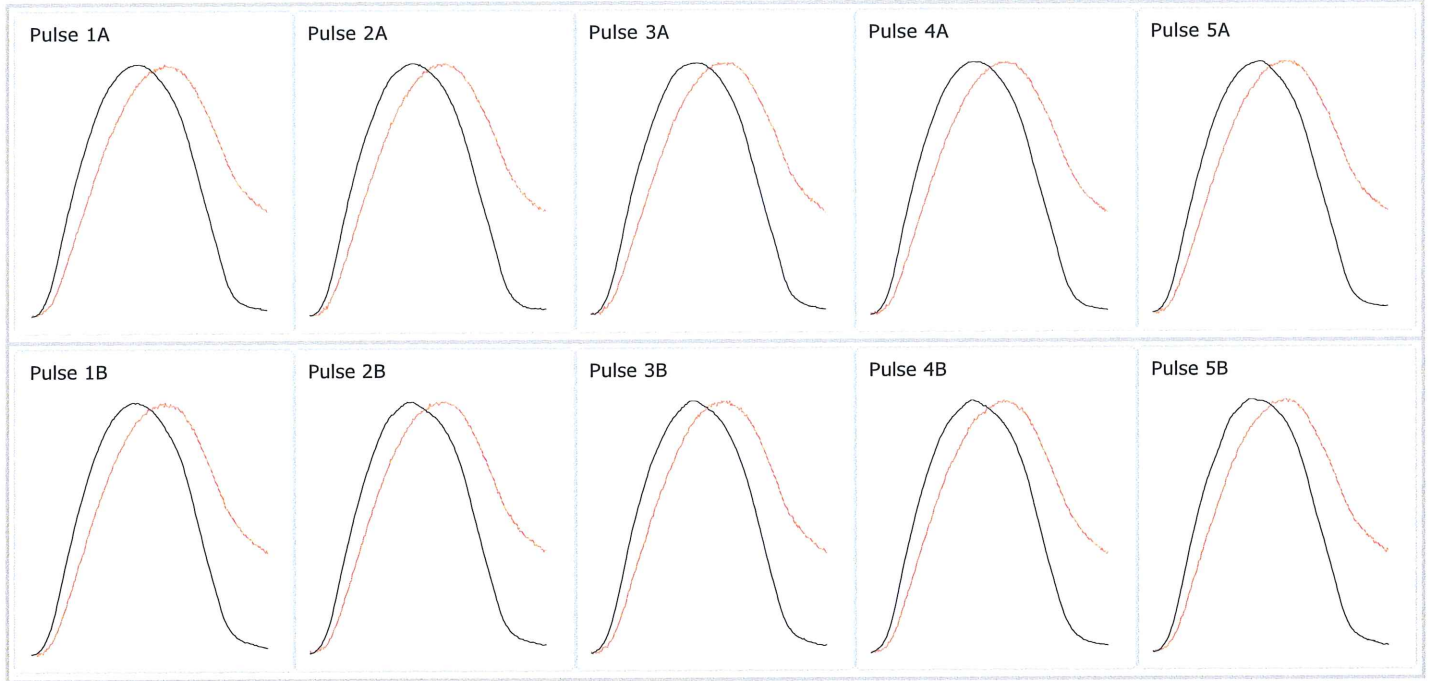
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test vie, 07 de abr de 2017 @ 15:00  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID MARSHALL 8  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	58

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.925	0.926	0.924	0.927	0.932	0.927	0.835	0.829	0.829	0.837	0.826	0.831	<b>0.879</b>
Horizontal Stress (kPa)	99.0	99.1	98.9	99.2	99.7	99.2	89.4	88.7	88.7	89.6	88.4	88.9	<b>94.1</b>
Load-Area Factor	0.68	0.69	0.70	0.70	0.70	0.69	0.72	0.70	0.71	0.69	0.71	0.71	<b>0.70</b>
Horizontal Deformation (um)	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48	<b>4.76</b>
Load Rise Time (ms)	129	125	124	125	126	126	107	108	109	110	110	109	<b>117</b>
Measured Stiffness (MPa)	2177	2192	2203	2197	2234	2201	2230	2260	2297	2276	2271	2267	<b>2234</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2261	2285	2313	2308	2341	2302	2366	2367	2420	2378	2390	2384	<b>2343</b>

Data File MARSHALL 8\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

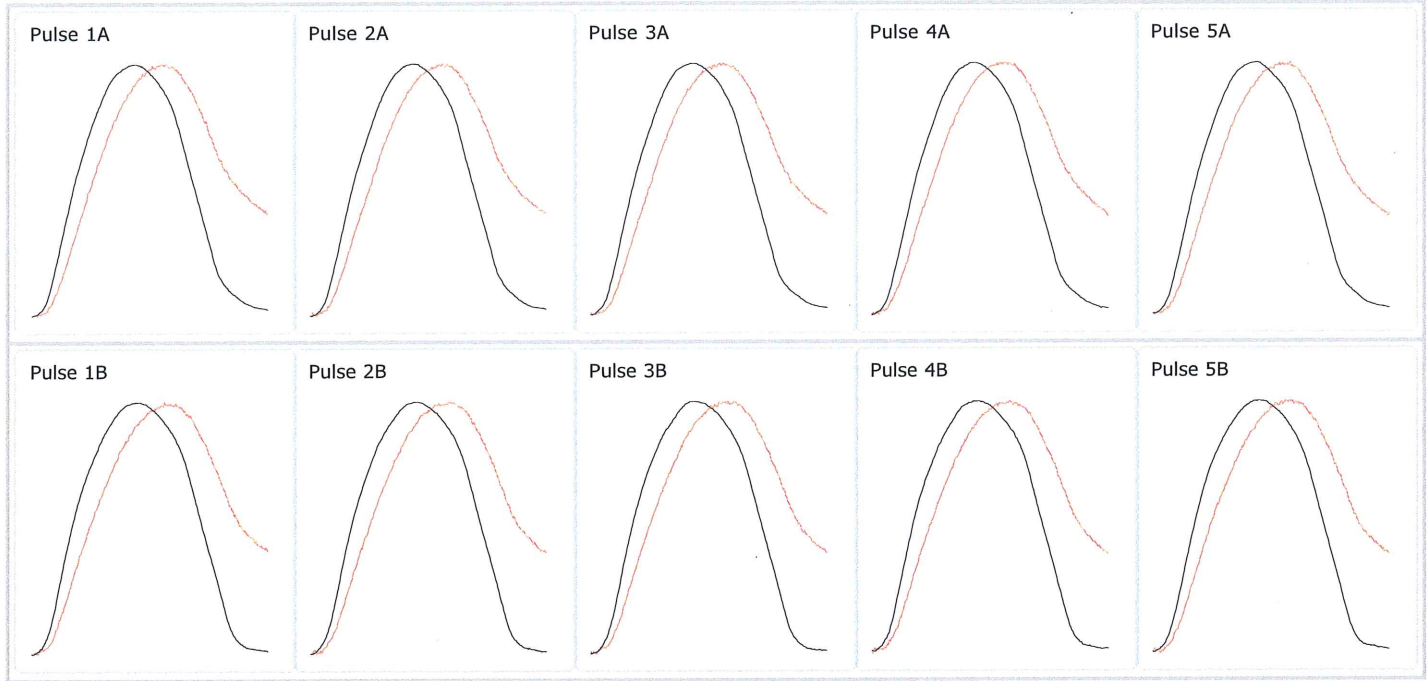
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: lun, 10 de abr de 2017 @ 13:48  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: MARSHALL 9 (2)  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	58

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.990	0.989	0.988	0.989	0.993	0.990	0.848	0.853	0.851	0.849	0.851	0.850	<b>0.920</b>
Horizontal Stress (kPa)	106.6	106.5	106.4	106.5	106.9	106.5	91.2	91.7	91.5	91.3	91.5	91.5	<b>99.0</b>
Load-Area Factor	0.78	0.76	0.77	0.76	0.76	0.77	0.81	0.79	0.79	0.80	0.79	0.80	<b>0.78</b>
Horizontal Deformation (um)	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	<b>4.85</b>
Load Rise Time (ms)	123	126	122	126	126	125	125	130	129	126	130	128	<b>126</b>
Measured Stiffness (MPa)	2502	2518	2533	2539	2539	2526	2323	2367	2379	2382	2399	2370	<b>2448</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2731	2723	2758	2746	2749	2741	2567	2597	2605	2621	2629	2604	<b>2673</b>

Data File: MARSHALL 9 (2)\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

**Anexo 10.2:** Planta EQFALTO. Briquetas compactadas con Compactador Giratorio

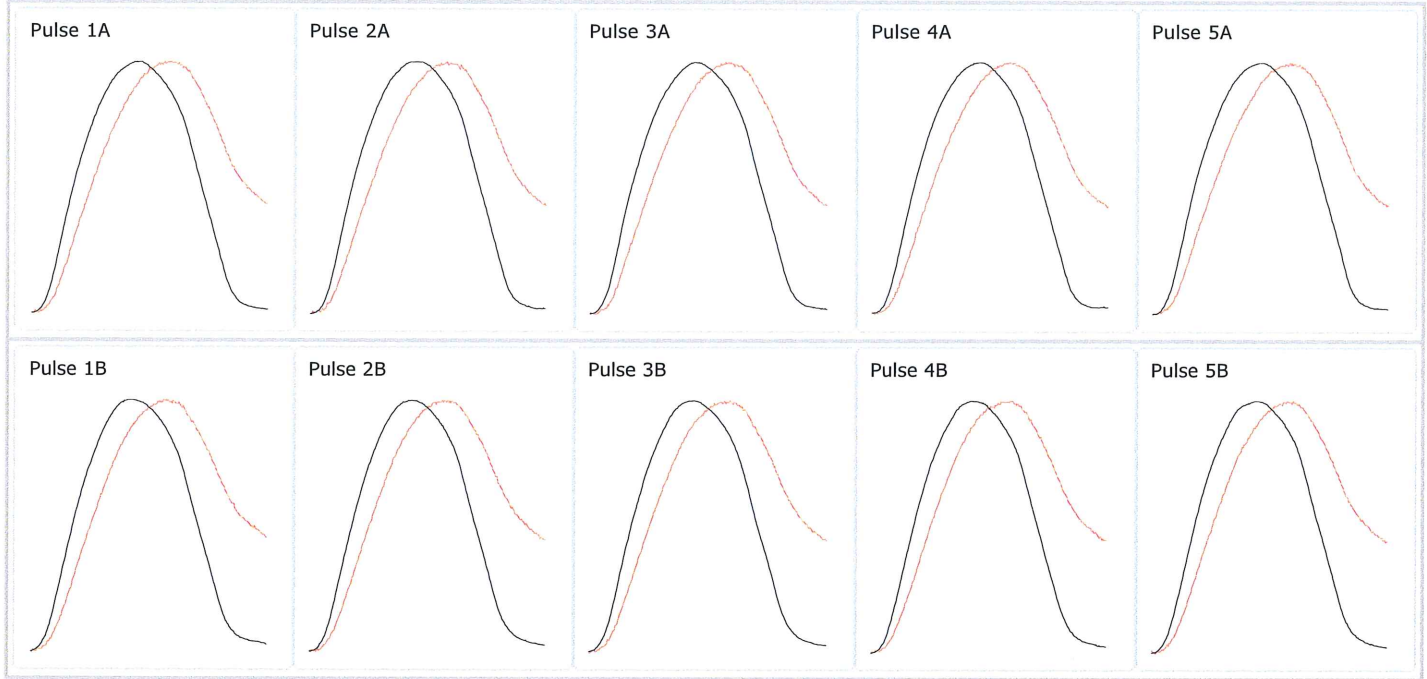
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: lun, 10 de abr de 2017 @ 14:12  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: COMPACTADOR 1  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	69

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.020	1.012	1.024	1.018	1.020	1.019	1.011	1.013	1.011	1.012	1.014	1.013	<b>1.016</b>
Horizontal Stress (kPa)	93.5	92.8	93.9	93.3	93.5	93.4	92.7	92.9	92.7	92.8	93.0	92.8	<b>93.1</b>
Load-Area Factor	0.72	0.73	0.73	0.73	0.72	0.73	0.74	0.76	0.74	0.75	0.75	0.75	<b>0.74</b>
Horizontal Deformation (um)	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	<b>5.13</b>
Load Rise Time (ms)	128	128	127	128	128	128	125	123	126	123	123	124	<b>126</b>
Measured Stiffness (MPa)	2038	2034	2059	2053	2057	2048	2031	2051	2052	2058	2056	2050	<b>2049</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2153	2162	2186	2179	2177	2171	2166	2207	2187	2207	2206	2195	<b>2183</b>

Data File: COMPACTADOR 1\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

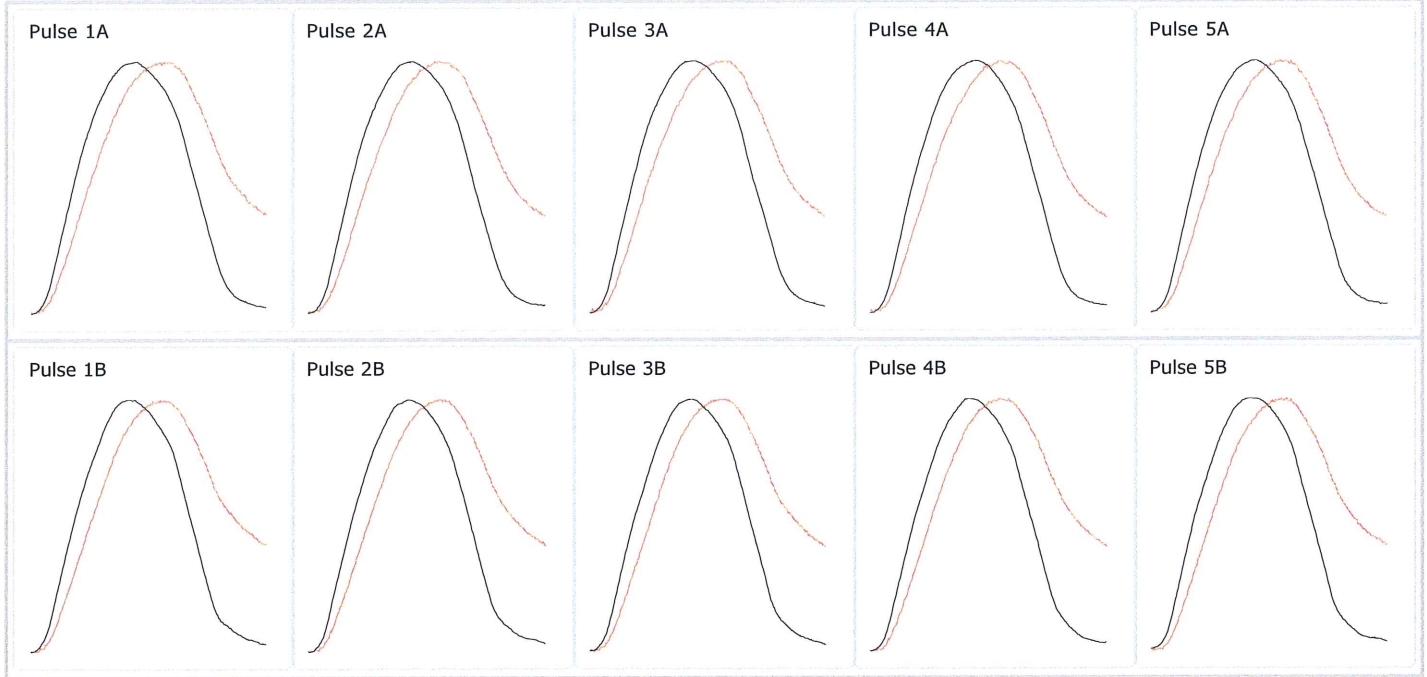
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: lun, 10 de abr de 2017 @ 14:25  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: COMPACTADOR 2  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	69

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.894	0.895	0.890	0.891	0.893	0.893	0.939	0.939	0.945	0.952	0.943	0.943	<b>0.918</b>
Horizontal Stress (kPa)	83.2	83.3	82.9	82.9	83.1	83.1	87.4	87.4	88.0	88.6	87.7	87.8	<b>85.5</b>
Load-Area Factor	0.78	0.78	0.78	0.79	0.80	0.79	0.74	0.76	0.74	0.73	0.75	0.74	<b>0.77</b>
Horizontal Deformation (um)	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	<b>5.03</b>
Load Rise Time (ms)	124	122	124	121	119	122	123	122	123	126	126	124	<b>123</b>
Measured Stiffness (MPa)	2036	2031	2026	2018	2035	2029	1880	1887	1900	1910	1888	1893	<b>1961</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2207	2211	2195	2205	2233	2210	2004	2029	2028	2025	2021	2022	<b>2116</b>

Data File: COMPACTADOR 2\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed:

Date:

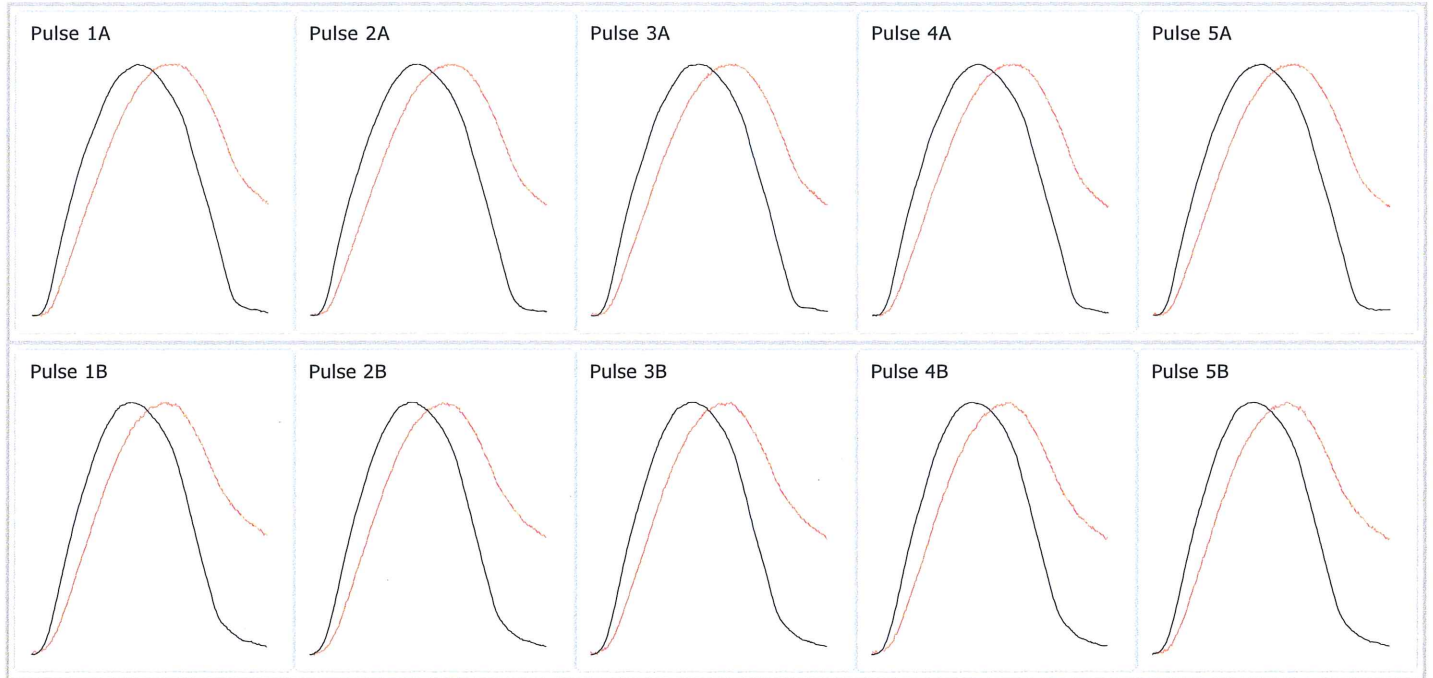
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: lun, 10 de abr de 2017 @ 14:37  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: COMPACTADOR 3  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	65

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.980	0.977	0.973	0.976	0.977	0.977	0.895	0.898	0.897	0.894	0.898	0.896	<b>0.936</b>
Horizontal Stress (kPa)	96.5	96.2	95.8	96.1	96.2	96.2	88.1	88.5	88.3	88.0	88.5	88.3	<b>92.2</b>
Load-Area Factor	0.76	0.76	0.77	0.76	0.76	0.76	0.74	0.72	0.73	0.72	0.71	0.73	<b>0.75</b>
Horizontal Deformation (um)	5.79	5.79	5.79	5.79	5.79	5.79	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	<b>5.56</b>
Load Rise Time (ms)	184	185	186	185	185	185	127	130	129	130	132	130	<b>157</b>
Measured Stiffness (MPa)	1865	1864	1864	1885	1877	1871	1867	1884	1885	1887	1897	1884	<b>1878</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2005	2007	2012	2026	2021	2014	1986	1991	2004	1997	1999	1995	<b>2005</b>

Data File: COMPACTADOR 3\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed:

Date:

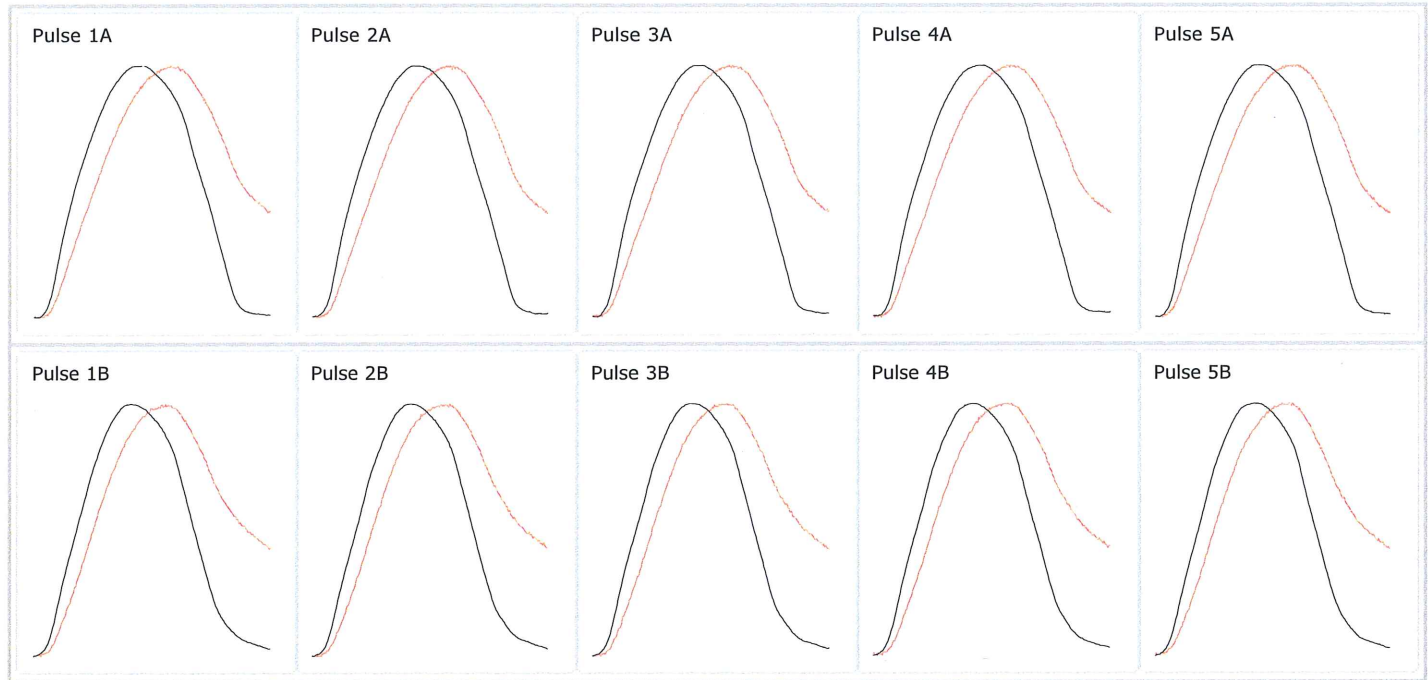
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: jue, 20 de abr de 2017 @ 11:47  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: COMPACTADOR 4 (2)  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	67

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.120	1.123	1.123	1.121	1.117	1.121	1.067	1.070	1.068	1.067	1.068	1.068	<b>1.094</b>
Horizontal Stress (kPa)	106.4	106.7	106.7	106.5	106.1	106.5	101.4	101.7	101.5	101.4	101.5	101.5	<b>104.0</b>
Load-Area Factor	0.76	0.76	0.76	0.78	0.77	0.77	0.69	0.68	0.67	0.69	0.70	0.69	<b>0.73</b>
Horizontal Deformation (um)	5.72	5.72	5.72	5.72	5.72	5.72	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	<b>5.37</b>
Load Rise Time (ms)	184	187	184	182	185	185	122	124	125	119	120	122	<b>153</b>
Measured Stiffness (MPa)	2085	2101	2098	2101	2109	2099	2198	2220	2226	2233	2219	2219	<b>2159</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2250	2263	2262	2282	2279	2267	2290	2303	2307	2337	2326	2313	<b>2290</b>

Data File: COMPACTADOR 4 (2)\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_

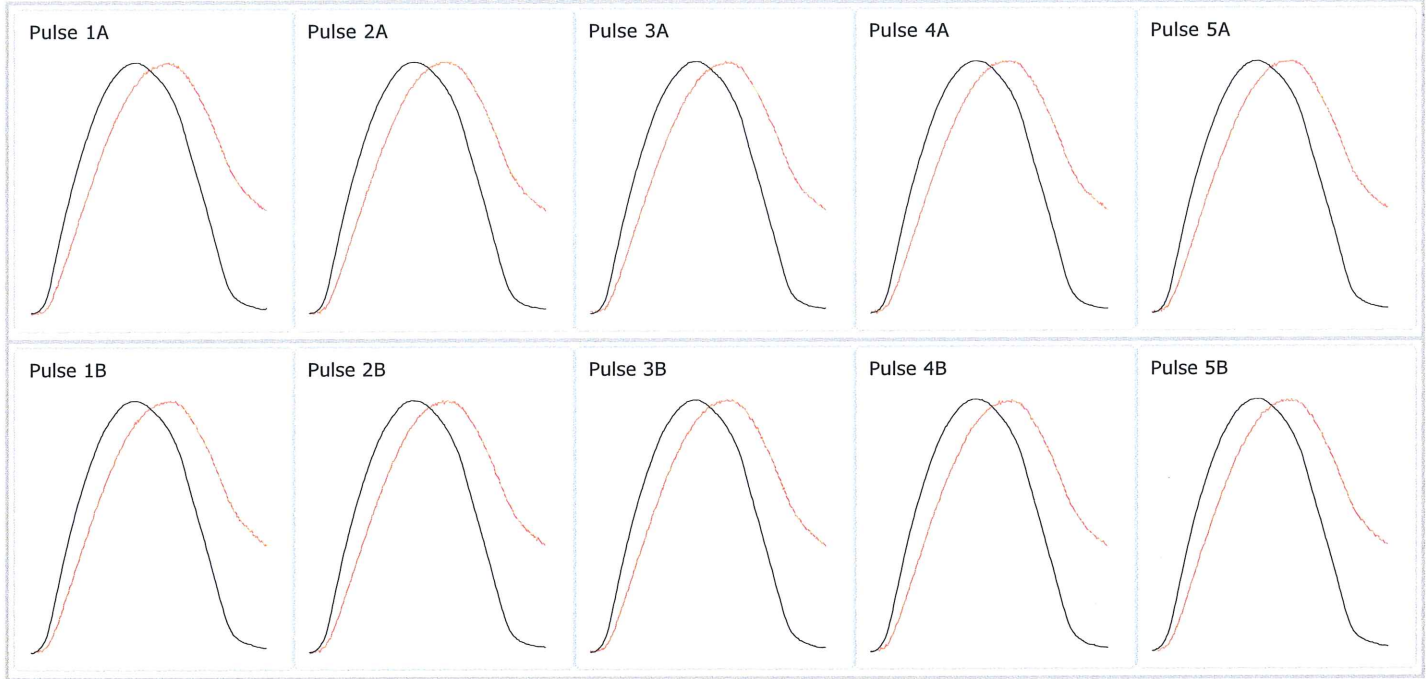
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mar, 25 de abr de 2017 @ 14:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID V  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	69

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.136	1.132	1.132	1.129	1.134	1.133	1.058	1.062	1.062	1.060	1.062	1.061	<b>1.097</b>
Horizontal Stress (kPa)	105.5	105.1	105.1	104.8	105.3	105.2	98.3	98.6	98.6	98.4	98.6	98.5	<b>101.8</b>
Load-Area Factor	0.64	0.66	0.63	0.67	0.64	0.65	0.69	0.69	0.70	0.71	0.69	0.69	<b>0.67</b>
Horizontal Deformation (um)	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	5.05	<b>5.05</b>
Load Rise Time (ms)	125	124	128	123	128	126	124	125	124	122	125	124	<b>125</b>
Measured Stiffness (MPa)	2126	2136	2118	2131	2135	2129	2084	2087	2089	2082	2092	2087	<b>2108</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2171	2197	2154	2201	2173	2179	2170	2176	2185	2191	2184	2181	<b>2180</b>

Data File V\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

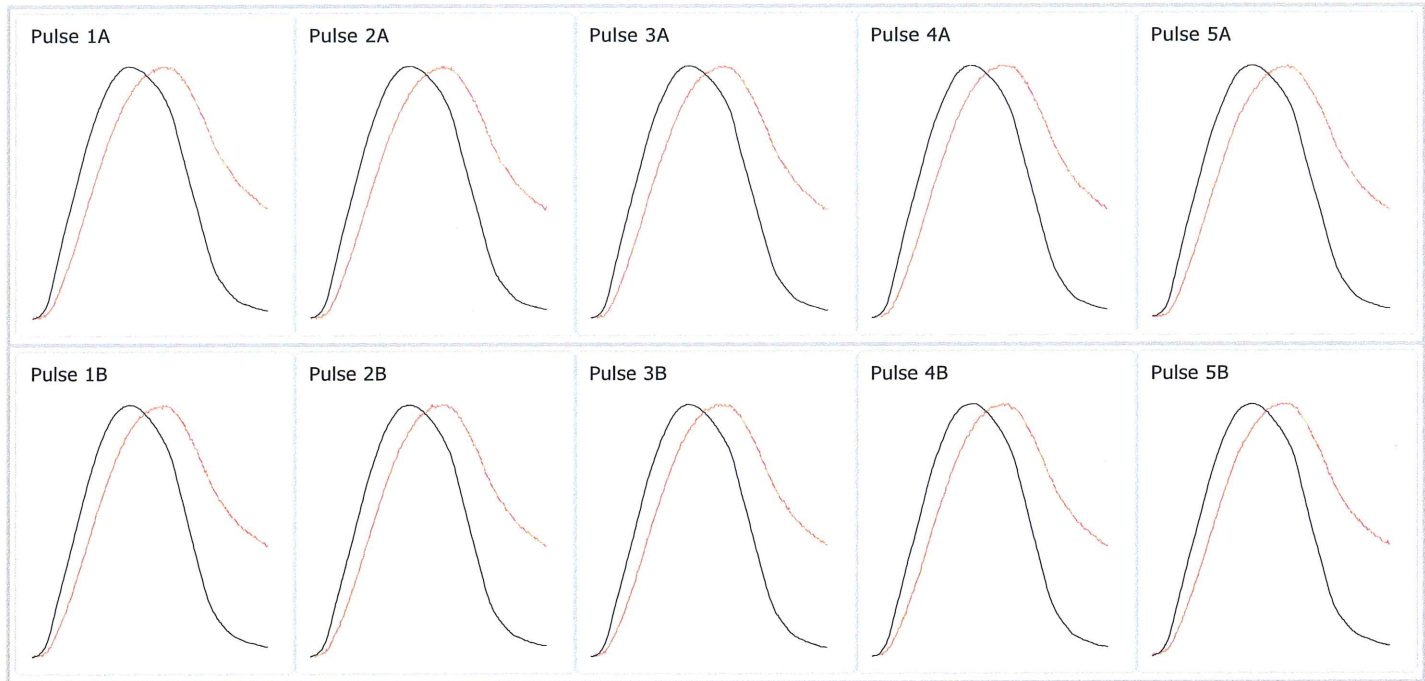
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mié, 12 de abr de 2017 @ 11:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID COMPACTADOR 6 (2)  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	66

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.037	1.036	1.040	1.044	1.047	1.041	0.954	0.960	0.955	0.953	0.962	0.957	<b>0.999</b>
Horizontal Stress (kPa)	100.0	100.0	100.3	100.7	101.0	100.4	92.0	92.6	92.2	91.9	92.8	92.3	<b>96.3</b>
Load-Area Factor	0.69	0.71	0.68	0.70	0.69	0.70	0.63	0.63	0.66	0.65	0.63	0.64	<b>0.67</b>
Horizontal Deformation (um)	5.24	5.24	5.24	5.24	5.24	5.24	5.16	5.16	5.16	5.16	5.16	5.16	<b>5.20</b>
Load Rise Time (ms)	127	124	129	124	125	126	127	129	122	123	128	126	<b>126</b>
Measured Stiffness (MPa)	2093	2088	2096	2107	2098	2096	1888	1894	1907	1900	1903	1898	<b>1997</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2187	2199	2179	2213	2189	2193	1916	1919	1956	1949	1927	1933	<b>2063</b>

Data File COMPACTADOR 6 (2)\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed

Date

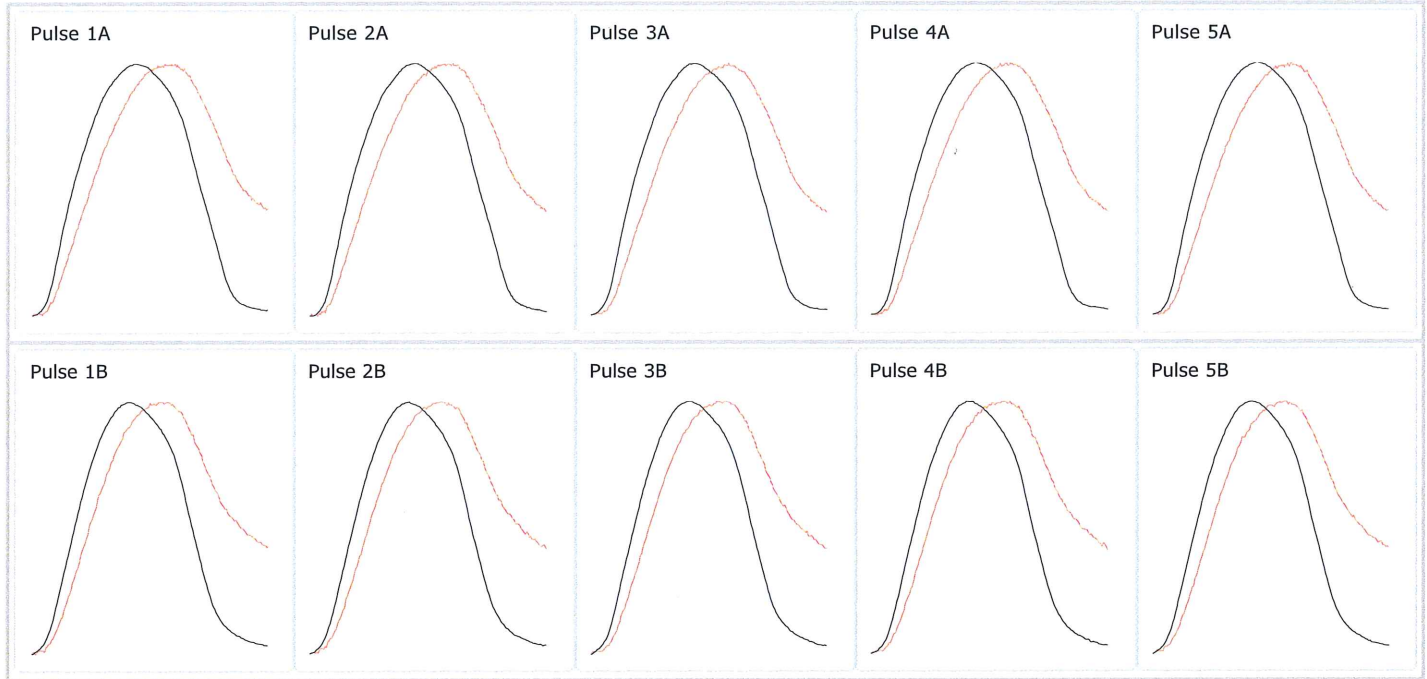
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mié, 12 de abr de 2017 @ 14:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID COMPACTADOR 7  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.982	0.981	0.983	0.977	0.976	0.980	0.893	0.894	0.893	0.900	0.896	0.895	<b>0.937</b>
Horizontal Stress (kPa)	100.0	99.9	100.1	99.5	99.3	99.8	90.9	91.0	90.9	91.7	91.2	91.1	<b>95.5</b>
Load-Area Factor	0.72	0.72	0.69	0.70	0.70	0.70	0.59	0.59	0.60	0.58	0.59	0.59	<b>0.65</b>
Horizontal Deformation (um)	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	<b>4.52</b>
Load Rise Time (ms)	124	124	126	126	126	125	73	73	73	74	73	73	<b>99</b>
Measured Stiffness (MPa)	2156	2162	2167	2155	2156	2159	2338	2361	2358	2377	2363	2359	<b>2259</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2278	2284	2265	2257	2262	2269	2330	2355	2353	2355	2355	2349	<b>2309</b>

Data File COMPACTADOR 7\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

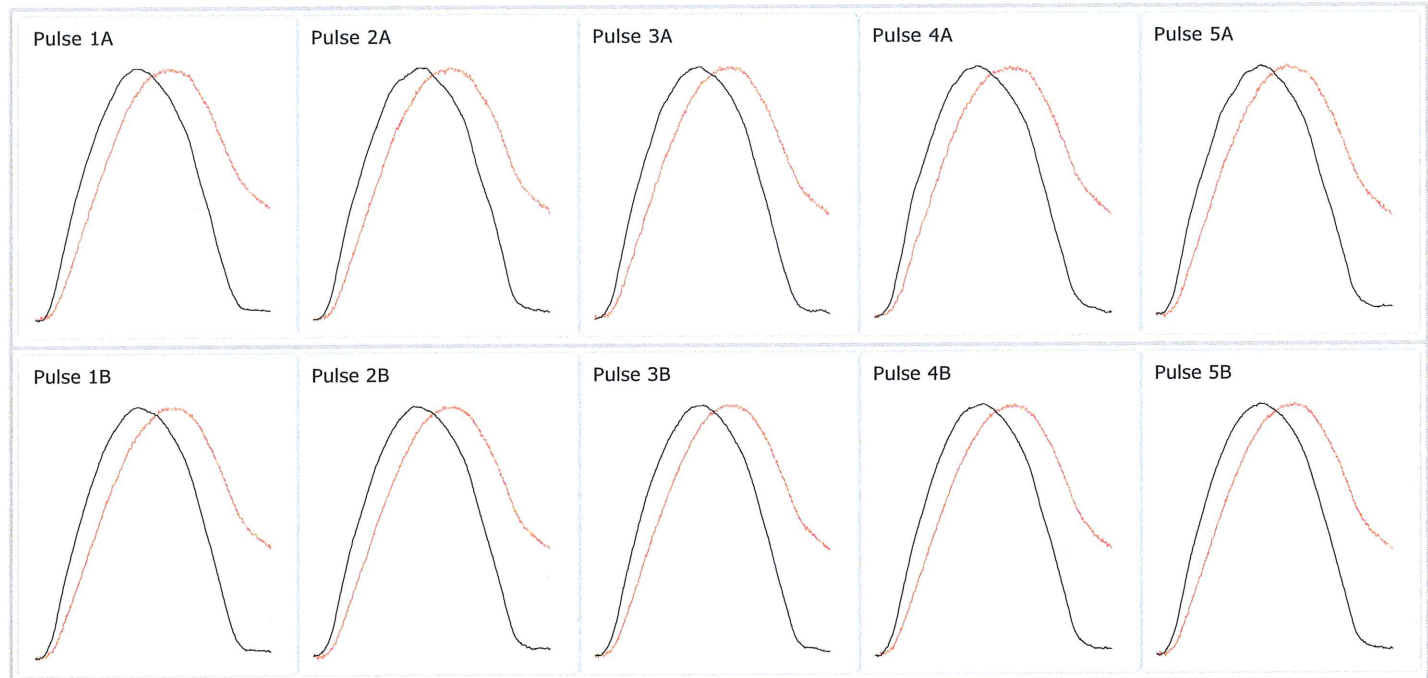
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test vie, 14 de jul de 2017 @ 14:46  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID COMPACTADOR 8 (2)  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	60

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.683	0.672	0.668	0.668	0.678	0.674	0.657	0.662	0.660	0.657	0.661	0.659	<b>0.666</b>
Horizontal Stress (kPa)	72.5	71.3	70.9	70.9	71.9	71.5	69.7	70.3	70.0	69.7	70.1	69.9	<b>70.7</b>
Load-Area Factor	0.69	0.69	0.71	0.71	0.70	0.70	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71	0.72	<b>0.71</b>
Horizontal Deformation (um)	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10	<b>3.93</b>
Load Rise Time (ms)	181	184	181	179	180	181	190	185	188	185	191	188	<b>184</b>
Measured Stiffness (MPa)	2033	2114	2112	2126	2139	2105	1846	1868	1885	1872	1876	1870	<b>1987</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2121	2202	2227	2238	2249	2207	1945	1977	1993	1977	1973	1973	<b>2090</b>

Data File COMPACTADOR 8 (2)\_2.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

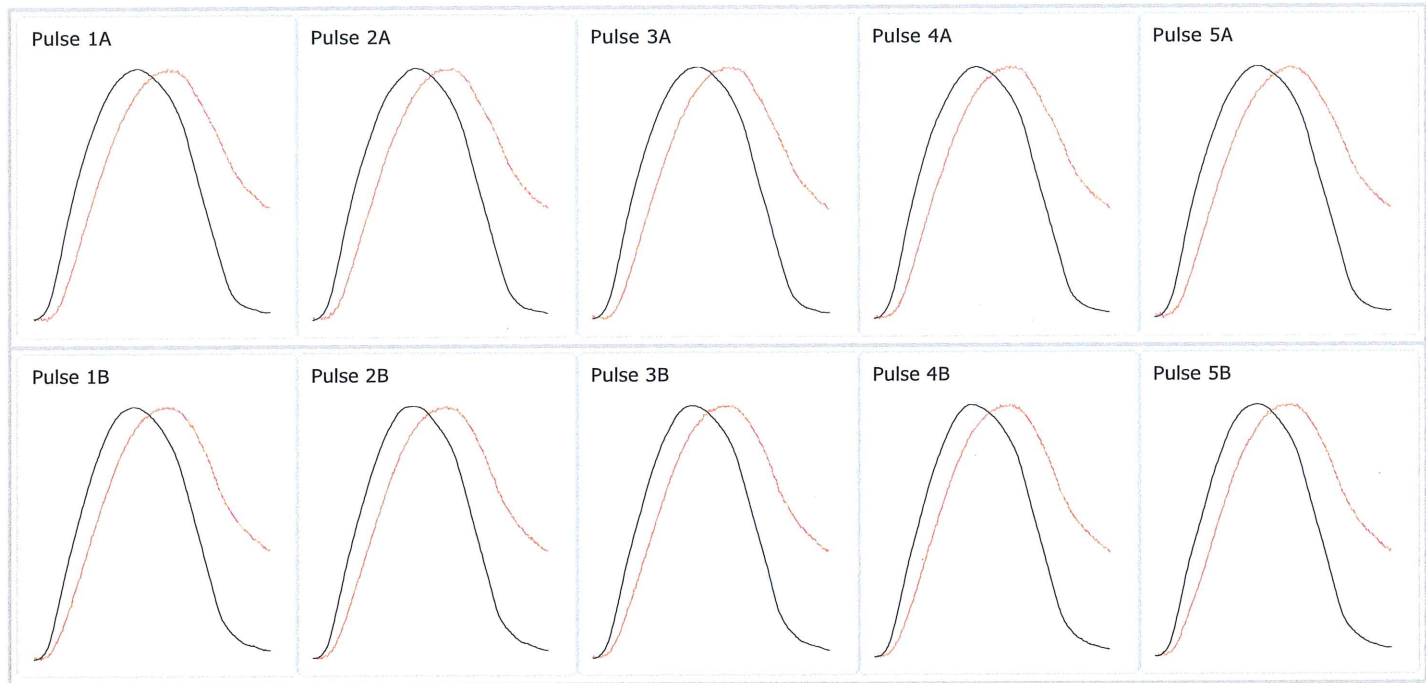
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test vie, 21 de abr de 2017 @ 10:33  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID COMPACTADOR 9 (2)  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	69

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.033	1.036	1.033	1.036	1.036	1.035	1.124	1.123	1.128	1.125	1.129	1.126	<b>1.081</b>
Horizontal Stress (kPa)	95.4	95.6	95.4	95.6	95.6	95.5	103.7	103.6	104.1	103.8	104.2	103.9	<b>99.7</b>
Load-Area Factor	0.70	0.70	0.73	0.72	0.71	0.71	0.69	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	<b>0.70</b>
Horizontal Deformation (um)	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10	<b>4.76</b>
Load Rise Time (ms)	132	134	129	129	133	132	126	124	124	125	127	126	<b>129</b>
Measured Stiffness (MPa)	2350	2351	2359	2363	2354	2355	2218	2218	2236	2228	2221	2224	<b>2290</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2473	2466	2506	2504	2479	2486	2319	2332	2348	2336	2328	2333	<b>2409</b>

Data File COMPACTADOR 9 (2)\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

**Anexo 10.3:** Planta TEA S.A. Briquetas compactadas con martillo Marshall

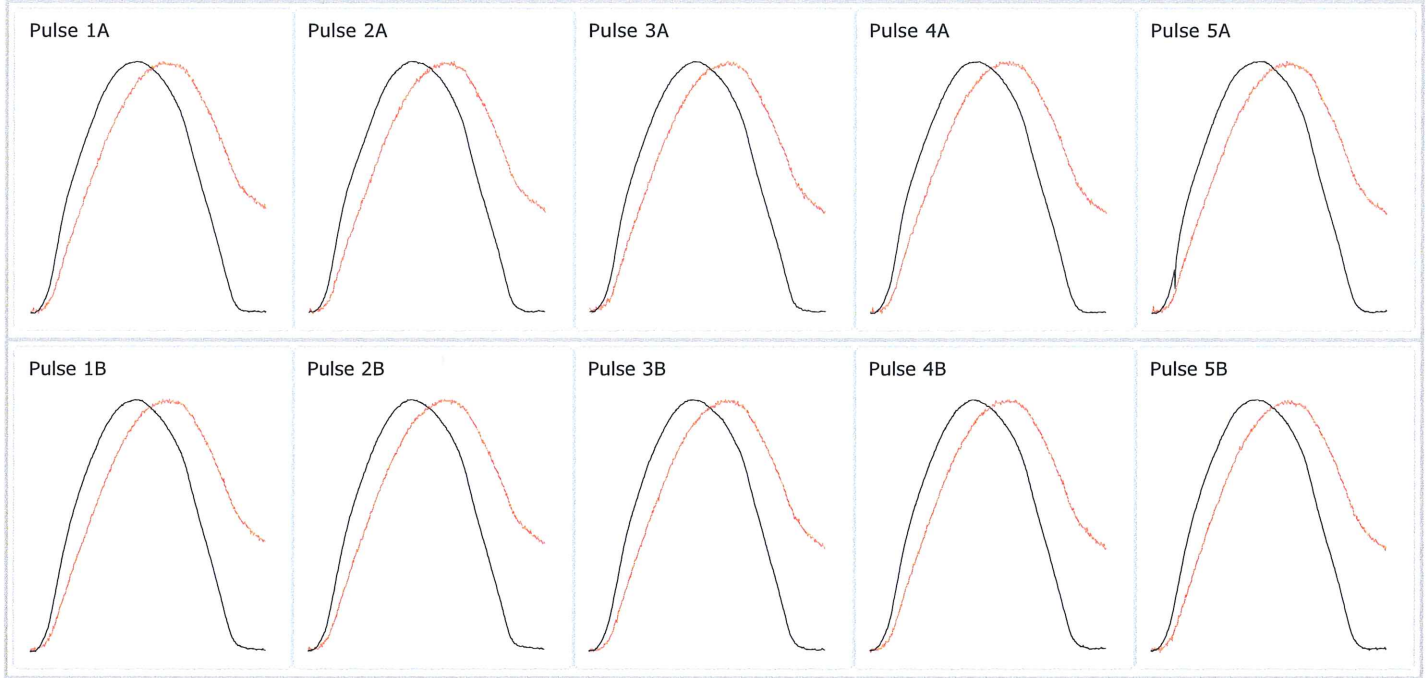
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: mar, 18 de jul de 2017 @ 10:08  
 Report Number:  
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: TEA MARSHALL 1 (2)  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	101
Thickness (mm)	61

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.732	0.734	0.734	0.734	0.733	0.733	0.717	0.716	0.713	0.717	0.715	0.715	<b>0.724</b>
Horizontal Stress (kPa)	75.7	75.8	75.8	75.8	75.7	75.8	74.0	73.9	73.7	74.0	73.9	73.9	<b>74.8</b>
Load-Area Factor	0.84	0.85	0.84	0.85	0.84	0.84	0.79	0.80	0.80	0.78	0.79	0.79	<b>0.82</b>
Horizontal Deformation (um)	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24	3.41	3.41	3.41	3.41	3.41	3.41	<b>3.33</b>
Load Rise Time (ms)	184	182	184	183	186	184	181	179	181	185	184	182	<b>183</b>
Measured Stiffness (MPa)	2819	2831	2876	2886	2873	2857	2504	2545	2587	2598	2590	2565	<b>2711</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	3170	3198	3243	3264	3235	3222	2747	2806	2847	2844	2841	2817	<b>3019</b>

Data File: TEA MARSHALL 1 (2)\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_

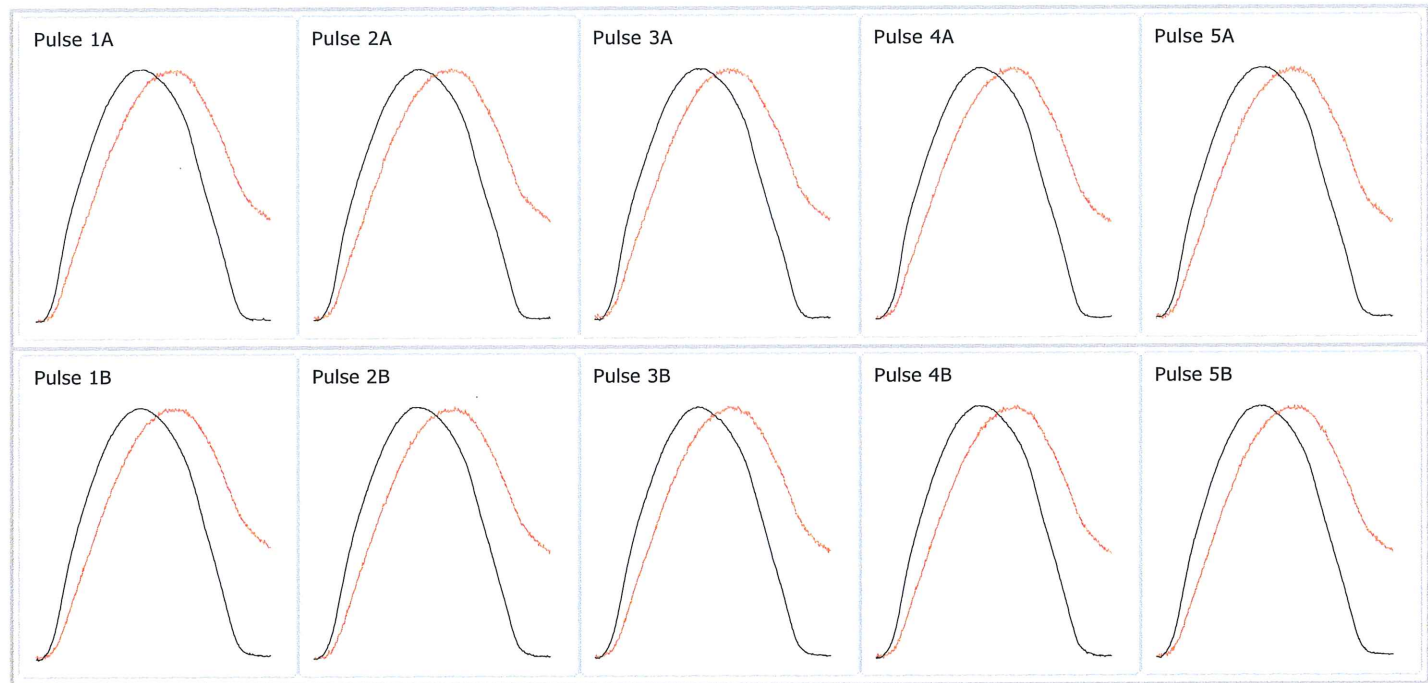
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mié, 19 de jul de 2017 @ 9:47  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA MARSHALL 2 (4)  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	64

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.749	0.751	0.751	0.751	0.751	0.750	0.732	0.731	0.735	0.730	0.732	0.732	<b>0.741</b>
Horizontal Stress (kPa)	73.0	73.2	73.2	73.2	73.3	73.2	71.4	71.3	71.7	71.2	71.4	71.4	<b>72.3</b>
Load-Area Factor	0.83	0.82	0.80	0.80	0.81	0.81	0.78	0.79	0.77	0.78	0.77	0.78	<b>0.80</b>
Horizontal Deformation (um)	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	<b>3.48</b>
Load Rise Time (ms)	181	181	185	186	184	183	183	182	185	184	184	183	<b>183</b>
Measured Stiffness (MPa)	2596	2641	2645	2652	2649	2637	2298	2341	2369	2367	2369	2349	<b>2493</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2900	2941	2923	2926	2940	2926	2509	2565	2576	2577	2576	2561	<b>2743</b>

Data File TEA MARSHALL 2 (4)\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

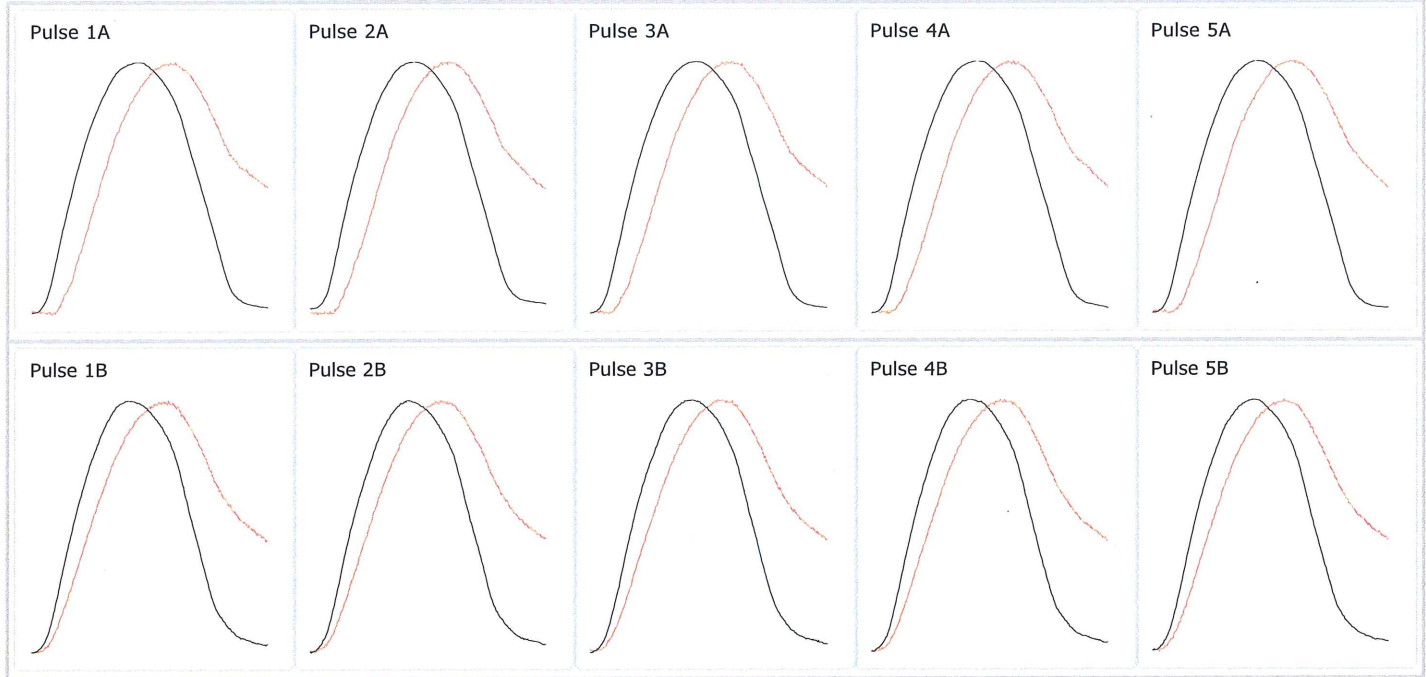
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mar, 02 de may de 2017 @ 13:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA MARSHALL 3  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	59

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.221	1.237	1.216	1.216	1.220	1.222	0.758	0.763	0.758	0.758	0.762	0.760	<b>0.991</b>
Horizontal Stress (kPa)	129.6	131.2	129.1	129.1	129.5	129.7	80.4	81.0	80.4	80.4	80.9	80.6	<b>105.2</b>
Load-Area Factor	0.71	0.72	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	<b>0.70</b>
Horizontal Deformation (um)	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	<b>4.94</b>
Load Rise Time (ms)	123	122	123	124	125	123	126	126	127	127	126	127	<b>125</b>
Measured Stiffness (MPa)	2779	2740	2698	2657	2620	2699	1881	1914	1905	1919	1924	1909	<b>2304</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2934	2907	2838	2795	2749	2845	1967	2002	1991	2007	2018	1997	<b>2421</b>

Data File TEA MARSHALL 3\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

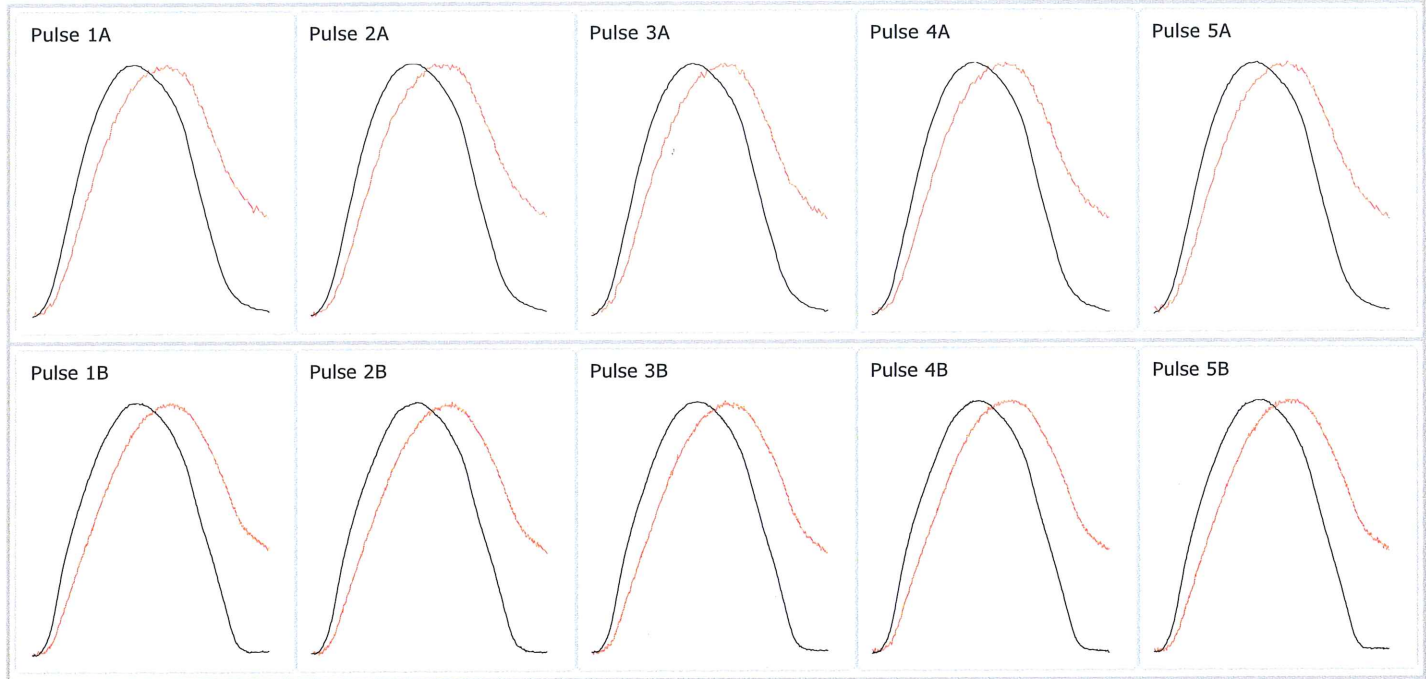
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: mar, 18 de jul de 2017 @ 10:21  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: TEA MARSHALL 4 (3)  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	70

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.752	0.750	0.756	0.751	0.756	0.753	0.695	0.694	0.694	0.694	0.692	0.694	<b>0.724</b>
Horizontal Stress (kPa)	67.1	66.8	67.4	67.0	67.4	67.1	62.0	61.8	61.9	61.9	61.7	61.9	<b>64.5</b>
Load-Area Factor	0.72	0.72	0.71	0.70	0.72	0.72	0.80	0.79	0.80	0.81	0.79	0.80	<b>0.76</b>
Horizontal Deformation (um)	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65	<b>3.14</b>
Load Rise Time (ms)	72	72	72	74	71	72	183	182	182	179	185	182	<b>127</b>
Measured Stiffness (MPa)	2966	2990	2992	3005	2989	2988	1990	2007	2018	2035	2040	2018	<b>2503</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	3154	3177	3174	3168	3187	3172	2177	2191	2207	2236	2224	2207	<b>2690</b>

Data File: TEA MARSHALL 4 (3)\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed:

Date:

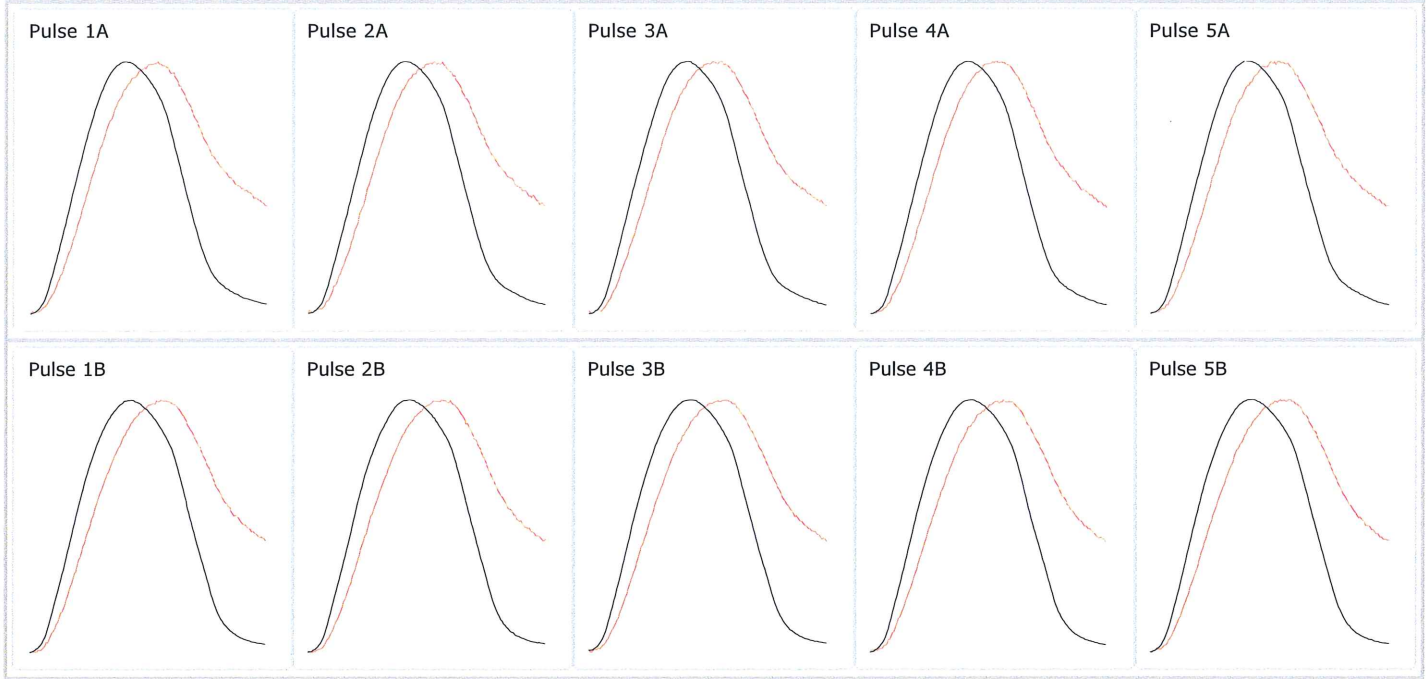
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mar, 02 de may de 2017 @ 11:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA MARSHALL 5  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	62

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.294	1.295	1.300	1.294	1.294	1.296	1.250	1.248	1.252	1.251	1.254	1.251	<b>1.273</b>
Horizontal Stress (kPa)	130.1	130.2	130.7	130.1	130.1	130.2	125.7	125.5	125.9	125.8	126.0	125.8	<b>128.0</b>
Load-Area Factor	0.57	0.58	0.59	0.60	0.58	0.59	0.59	0.61	0.62	0.59	0.60	0.60	<b>0.59</b>
Horizontal Deformation (um)	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	<b>5.16</b>
Load Rise Time (ms)	73	74	73	72	74	73	72	70	69	73	71	71	<b>72</b>
Measured Stiffness (MPa)	2721	2736	2758	2766	2756	2747	2450	2446	2451	2439	2449	2447	<b>2597</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2685	2711	2744	2761	2731	2726	2443	2462	2478	2421	2454	2452	<b>2589</b>

Data File TEA MARSHALL 5\_2.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed

Date

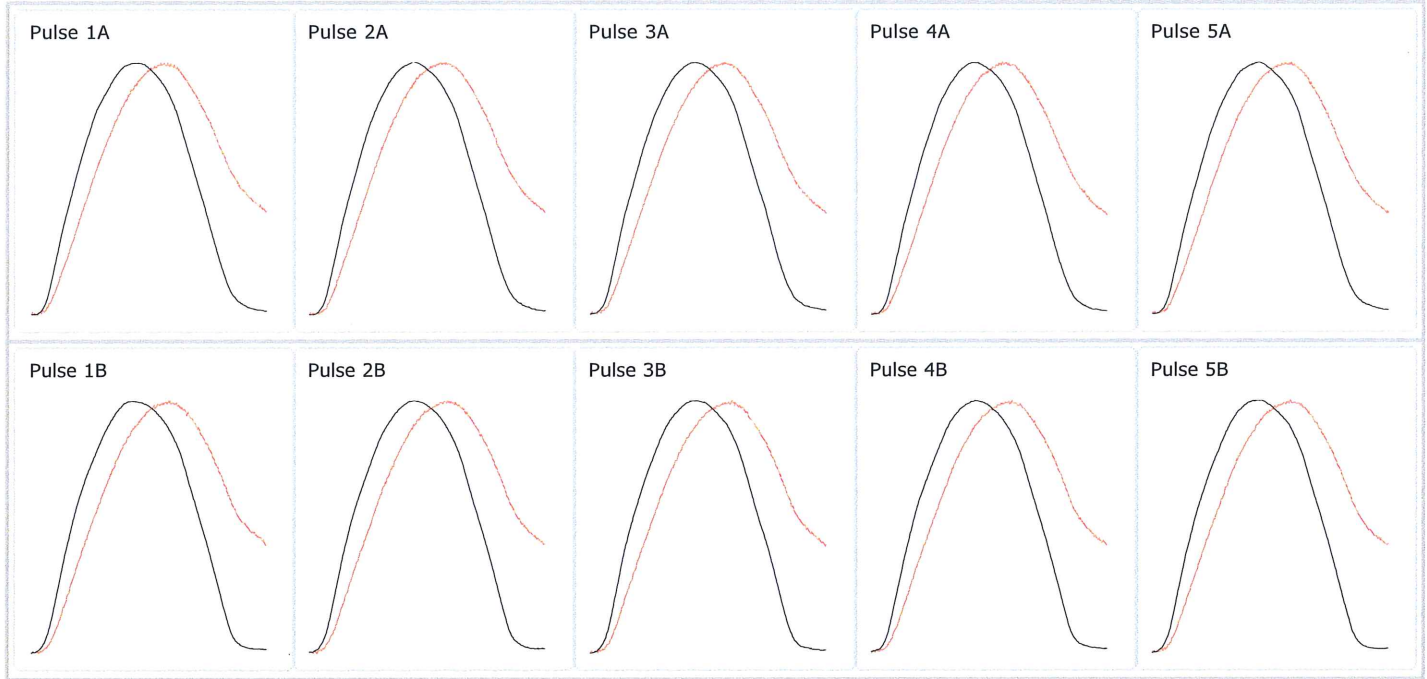
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mar, 02 de may de 2017 @ 11:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA MARSHALL 6  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.139	1.140	1.143	1.140	1.145	1.141	1.055	1.057	1.053	1.058	1.056	1.056	<b>1.099</b>
Horizontal Stress (kPa)	111.9	112.0	112.3	112.0	112.5	112.1	103.6	103.9	103.4	104.0	103.8	103.7	<b>107.9</b>
Load-Area Factor	0.74	0.74	0.74	0.74	0.73	0.74	0.70	0.69	0.70	0.72	0.71	0.71	<b>0.72</b>
Horizontal Deformation (um)	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	<b>5.09</b>
Load Rise Time (ms)	186	184	186	184	184	185	167	169	167	163	164	166	<b>175</b>
Measured Stiffness (MPa)	2423	2456	2446	2461	2474	2452	2279	2306	2294	2314	2319	2302	<b>2377</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2591	2629	2618	2636	2640	2623	2390	2414	2409	2453	2447	2423	<b>2523</b>

Data File TEA MARSHALL 6\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

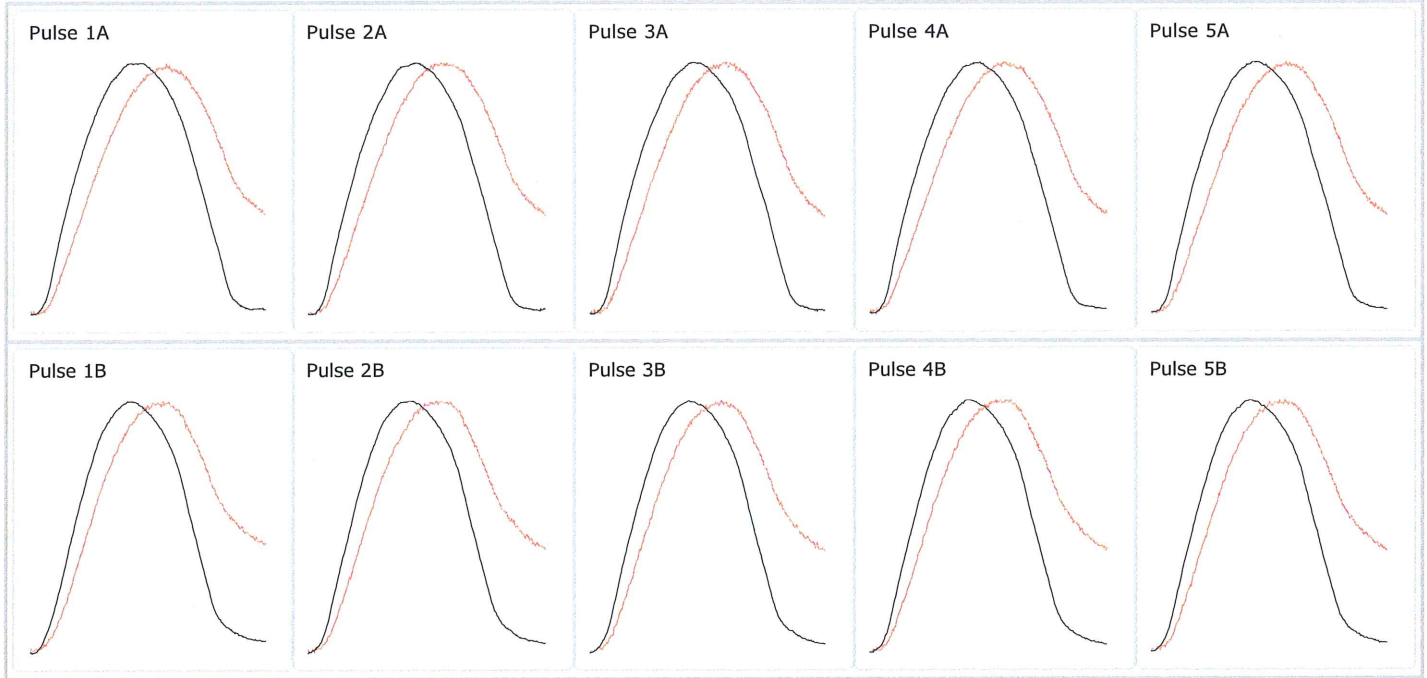
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test vie, 14 de jul de 2017 @ 15:07  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA MARSHALL 7 (2)  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	64

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.698	0.704	0.704	0.706	0.705	0.703	0.666	0.653	0.662	0.661	0.662	0.661	<b>0.682</b>
Horizontal Stress (kPa)	69.4	70.0	70.0	70.3	70.1	70.0	66.3	65.0	65.9	65.8	65.9	65.8	<b>67.9</b>
Load-Area Factor	0.68	0.68	0.66	0.67	0.67	0.67	0.64	0.67	0.65	0.67	0.68	0.66	<b>0.67</b>
Horizontal Deformation (um)	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	<b>3.27</b>
Load Rise Time (ms)	185	182	187	186	186	185	122	119	122	117	117	119	<b>152</b>
Measured Stiffness (MPa)	2090	2132	2129	2113	2120	2117	2254	2334	2342	2364	2357	2330	<b>2223</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2166	2219	2188	2186	2192	2190	2297	2417	2404	2449	2452	2404	<b>2297</b>

Data File TEA MARSHALL 7 (2)\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

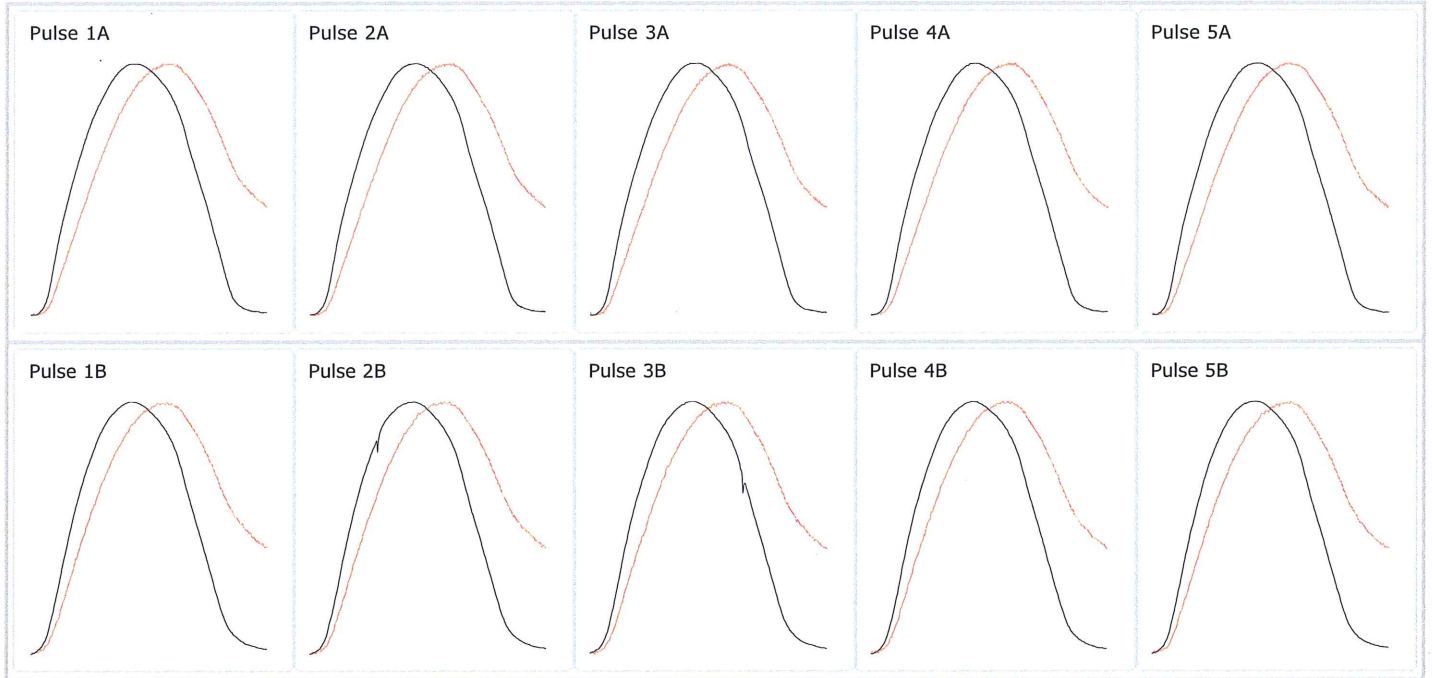
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mar, 02 de may de 2017 @ 11:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA MARSHALL 8  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	62

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.103	1.102	1.101	1.105	1.103	1.103	1.139	1.142	1.142	1.141	1.139	1.141	<b>1.122</b>
Horizontal Stress (kPa)	112.5	112.4	112.2	112.7	112.5	112.5	116.1	116.4	116.4	116.3	116.1	116.3	<b>114.4</b>
Load-Area Factor	0.67	0.66	0.68	0.66	0.68	0.67	0.67	0.68	0.67	0.67	0.66	0.67	<b>0.67</b>
Horizontal Deformation (um)	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	<b>5.13</b>
Load Rise Time (ms)	182	185	180	185	182	183	124	122	126	124	127	125	<b>154</b>
Measured Stiffness (MPa)	2163	2164	2153	2159	2172	2162	2506	2535	2551	2552	2557	2540	<b>2351</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2241	2230	2237	2223	2255	2237	2595	2639	2646	2648	2635	2633	<b>2435</b>

Data File TEA MARSHALL 8\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

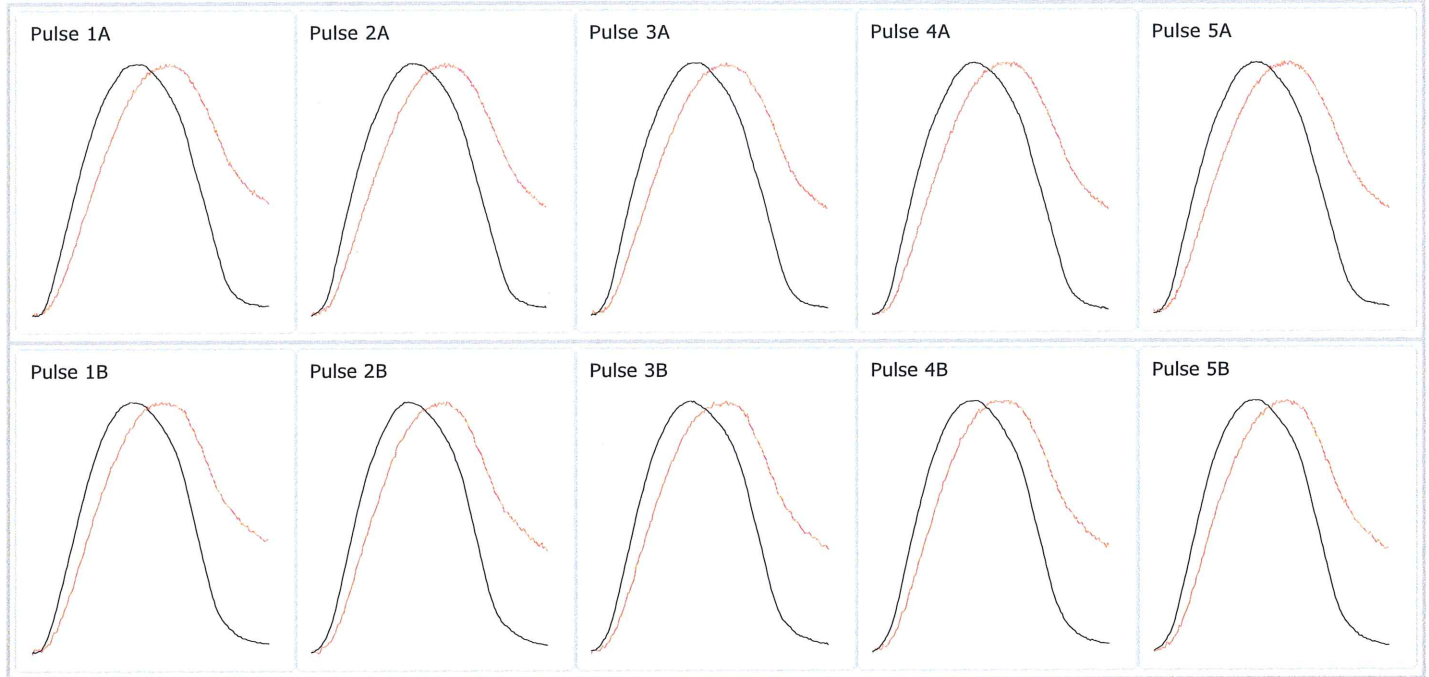
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test vie, 14 de jul de 2017 @ 15:19  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA COMPACTADOR 9 (2)  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	65

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.709	0.702	0.703	0.706	0.706	0.705	0.682	0.683	0.681	0.682	0.679	0.681	<b>0.693</b>
Horizontal Stress (kPa)	68.1	67.4	67.5	67.7	67.8	67.7	65.5	65.6	65.4	65.5	65.2	65.4	<b>66.6</b>
Load-Area Factor	0.68	0.67	0.69	0.68	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.65	0.61	0.64	<b>0.66</b>
Horizontal Deformation (um)	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	<b>3.31</b>
Load Rise Time (ms)	131	134	129	132	126	130	73	72	76	73	78	74	<b>102</b>
Measured Stiffness (MPa)	2047	2125	2137	2149	2142	2120	2363	2464	2460	2485	2464	2447	<b>2283</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2128	2197	2229	2231	2241	2205	2433	2514	2490	2547	2480	2493	<b>2349</b>

Data File TEA MARSHALL 9 (2)\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

**Anexo 10.4:** Planta TEA S.A. Briquetas compactadas con Compactador Giratorio

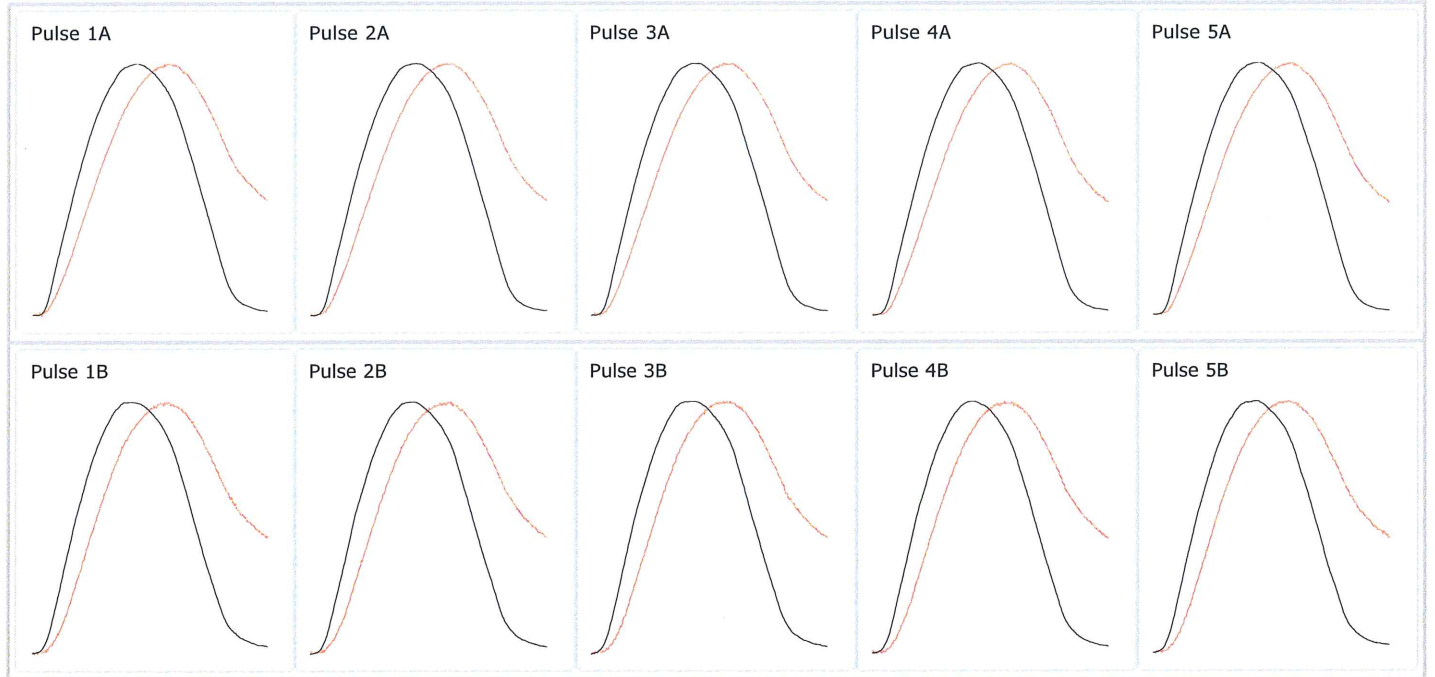
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mar, 02 de may de 2017 @ 14:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA COMPACTADOR 1  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	72

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.540	1.539	1.541	1.543	1.541	1.541	1.171	1.175	1.169	1.178	1.176	1.174	<b>1.357</b>
Horizontal Stress (kPa)	136.8	136.7	137.0	137.2	136.9	136.9	104.1	104.4	103.8	104.7	104.5	104.3	<b>120.6</b>
Load-Area Factor	0.66	0.66	0.66	0.67	0.67	0.67	0.61	0.61	0.61	0.61	0.60	0.61	<b>0.64</b>
Horizontal Deformation (um)	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	<b>5.84</b>
Load Rise Time (ms)	183	184	182	180	181	182	164	163	167	166	168	166	<b>174</b>
Measured Stiffness (MPa)	2093	2096	2088	2083	2082	2088	2075	2084	2089	2087	2088	2085	<b>2087</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2154	2157	2152	2158	2157	2156	2087	2098	2096	2094	2088	2093	<b>2124</b>

Data File TEA COMPACTADOR 1\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

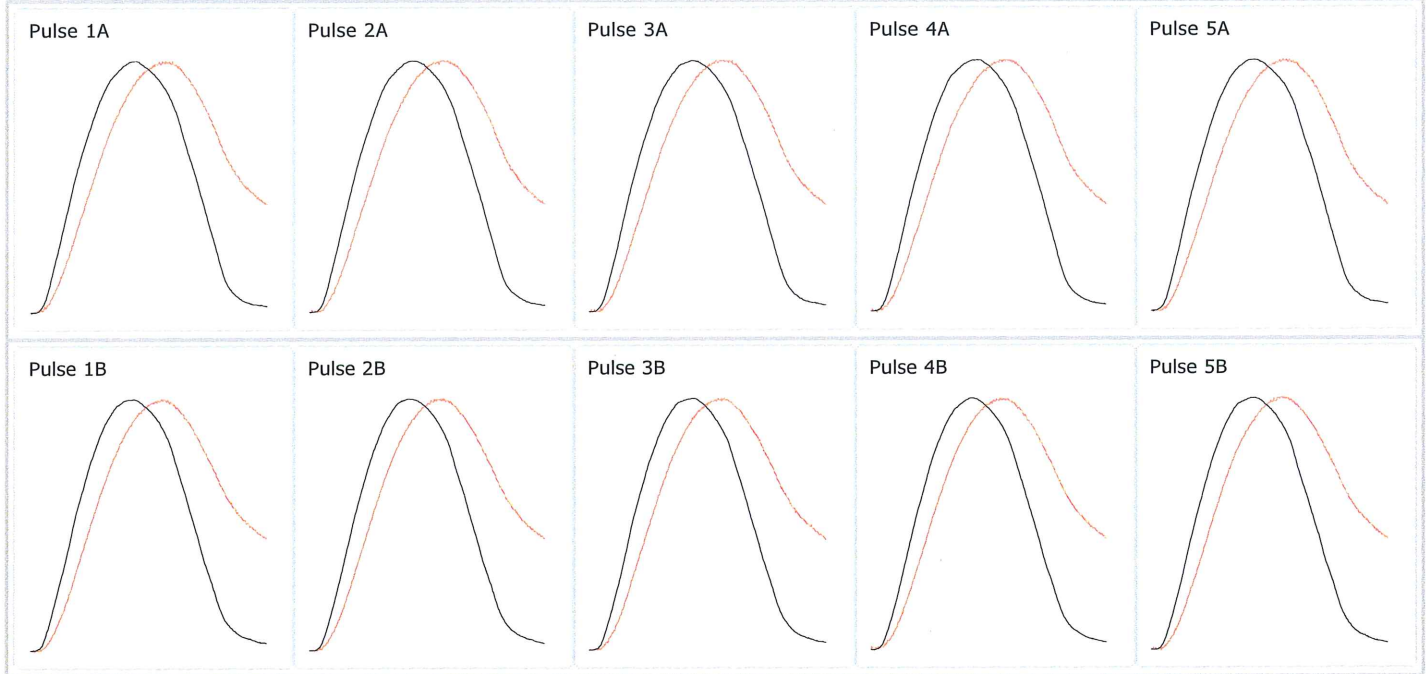
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mar, 02 de may de 2017 @ 14:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA COMPACTADOR 2  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	69

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.093	1.094	1.095	1.091	1.094	1.094	1.236	1.237	1.237	1.240	1.236	1.237	<b>1.165</b>
Horizontal Stress (kPa)	99.7	99.8	99.9	99.5	99.8	99.7	112.7	112.8	112.8	113.1	112.7	112.8	<b>106.3</b>
Load-Area Factor	0.61	0.62	0.62	0.62	0.60	0.62	0.62	0.62	0.63	0.61	0.61	0.62	<b>0.62</b>
Horizontal Deformation (um)	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.14	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95	<b>5.55</b>
Load Rise Time (ms)	183	182	181	181	182	182	182	182	178	181	182	181	<b>182</b>
Measured Stiffness (MPa)	1945	1949	1952	1938	1943	1945	1903	1907	1905	1900	1903	1904	<b>1925</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	1958	1968	1967	1956	1947	1959	1918	1924	1927	1908	1909	1917	<b>1938</b>

Data File TEA COMPACTADOR 2\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed

Date

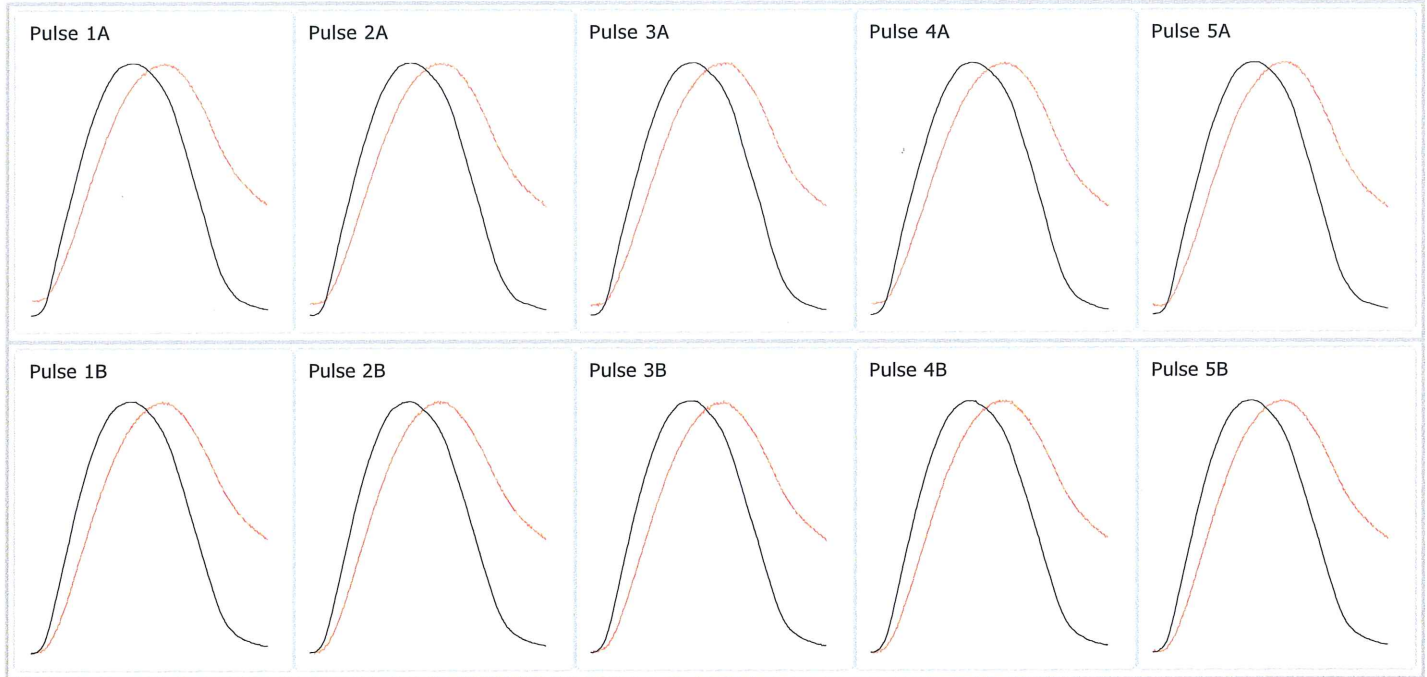
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test mar, 02 de may de 2017 @ 14:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA COMPACTADOR 3  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	65

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.315	1.320	1.319	1.323	1.324	1.320	1.194	1.200	1.198	1.201	1.200	1.198	<b>1.259</b>
Horizontal Stress (kPa)	129.1	129.7	129.6	129.9	130.0	129.7	117.3	117.8	117.7	117.9	117.8	117.7	<b>123.7</b>
Load-Area Factor	0.65	0.64	0.67	0.65	0.66	0.65	0.59	0.60	0.61	0.60	0.59	0.60	<b>0.63</b>
Horizontal Deformation (um)	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.78	5.78	5.78	5.78	5.78	5.78	<b>5.62</b>
Load Rise Time (ms)	135	137	132	134	132	134	183	177	178	179	181	180	<b>157</b>
Measured Stiffness (MPa)	2448	2474	2488	2474	2493	2475	1987	1994	1978	2000	1994	1990	<b>2233</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2511	2524	2571	2541	2573	2544	1977	1998	1984	2002	1985	1989	<b>2267</b>

Data File TEA COMPACTADOR 3\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

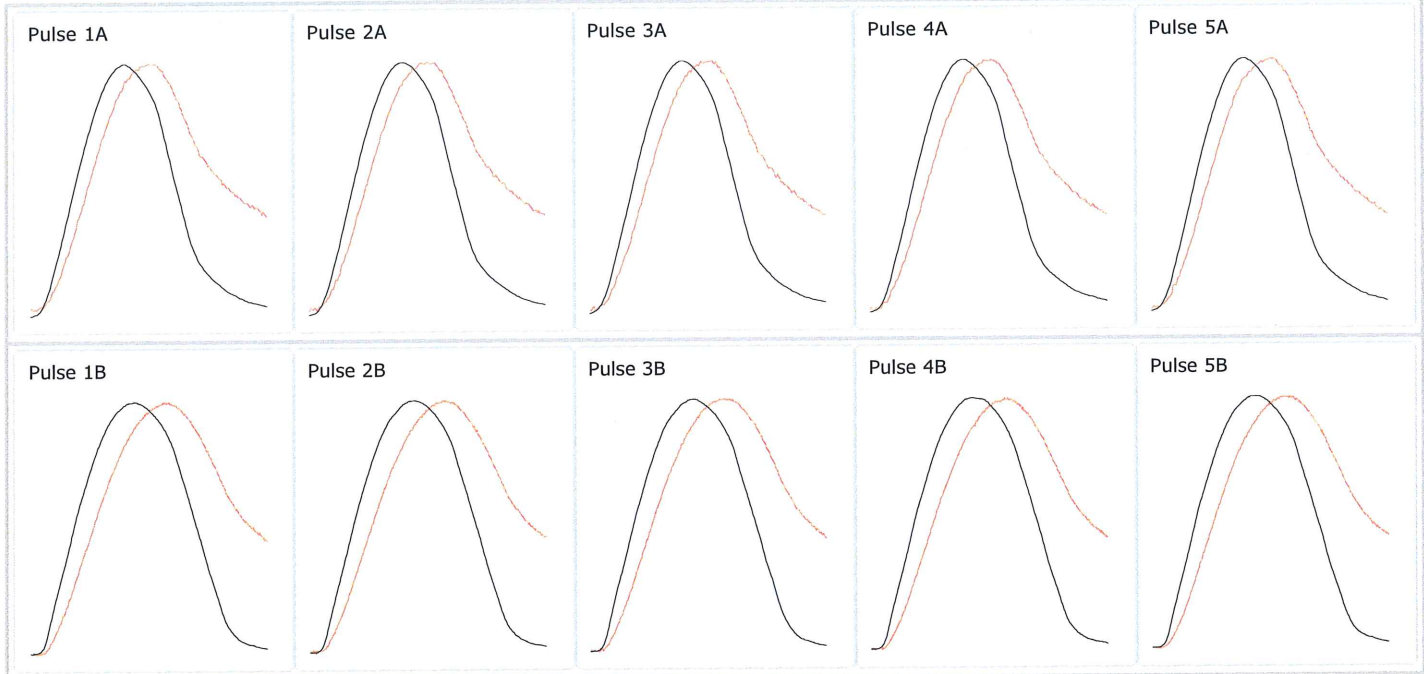
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: mar, 02 de may de 2017 @ 14:  
 Report Number:  
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: TEA COMPACTADOR 4  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	72

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.236	1.231	1.237	1.237	1.238	1.236	1.218	1.219	1.222	1.221	1.221	1.220	<b>1.228</b>
Horizontal Stress (kPa)	109.0	108.6	109.1	109.1	109.2	109.0	107.5	107.5	107.8	107.7	107.7	107.6	<b>108.3</b>
Load-Area Factor	0.57	0.56	0.55	0.56	0.56	0.56	0.67	0.66	0.67	0.66	0.65	0.66	<b>0.61</b>
Horizontal Deformation (um)	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	5.89	5.89	5.89	5.89	5.89	5.89	<b>5.01</b>
Load Rise Time (ms)	74	75	76	75	75	75	182	185	181	184	187	184	<b>129</b>
Measured Stiffness (MPa)	2660	2672	2679	2683	2681	2675	1869	1858	1885	1860	1871	1869	<b>2272</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2620	2619	2616	2629	2627	2622	1932	1914	1949	1914	1918	1925	<b>2274</b>

Data File: TEA COMPACTADOR 4\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

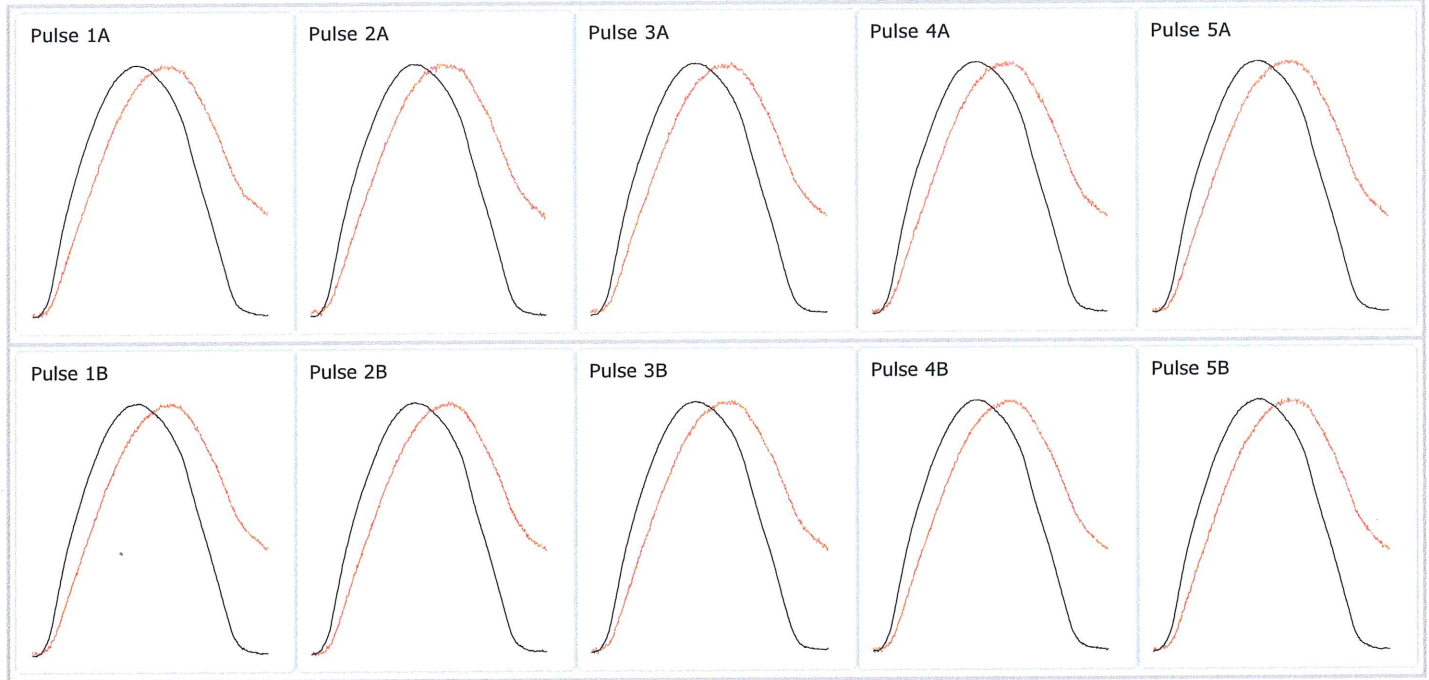
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test mar, 08 de ago de 2017 @ 14:  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA COMPACTADOR 5 (7)  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	61

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.756	0.757	0.758	0.757	0.757	0.757	0.747	0.747	0.747	0.748	0.748	0.747	<b>0.752</b>
Horizontal Stress (kPa)	78.9	79.0	79.1	79.0	79.0	79.0	77.9	77.9	77.9	78.0	78.0	78.0	<b>78.5</b>
Load-Area Factor	0.81	0.81	0.81	0.82	0.81	0.81	0.74	0.75	0.75	0.75	0.76	0.75	<b>0.78</b>
Horizontal Deformation (um)	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65	3.65	<b>3.42</b>
Load Rise Time (ms)	184	182	184	180	180	182	185	184	184	185	181	184	<b>183</b>
Measured Stiffness (MPa)	2865	2894	2905	2910	2939	2903	2373	2414	2416	2424	2433	2412	<b>2657</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	3176	3214	3221	3245	3268	3225	2540	2602	2603	2606	2629	2596	<b>2910</b>

Data File TEA COMPACTADOR 5 (7)\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed \_\_\_\_\_

Date \_\_\_\_\_

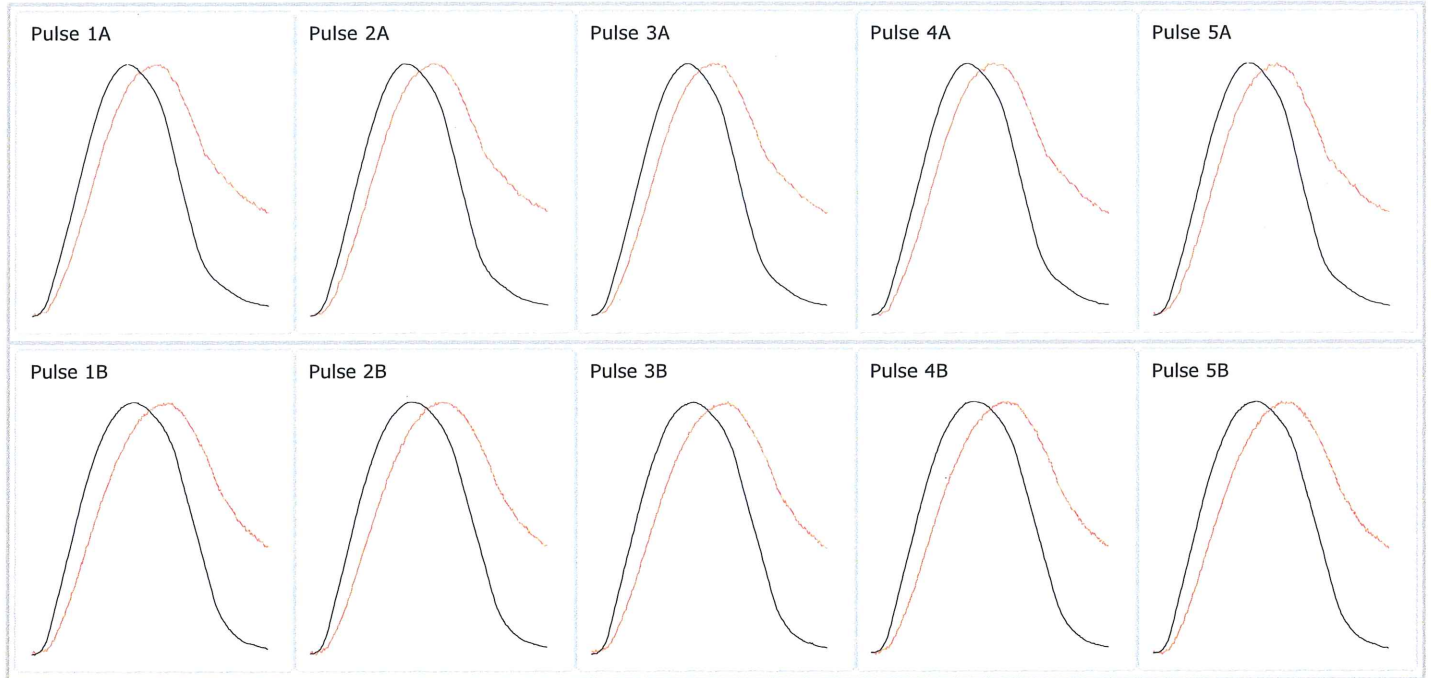
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: mar, 02 de may de 2017 @ 15:  
 Report Number:  
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: TEA COMPACTADOR 6  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	59

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.166	1.164	1.171	1.172	1.169	1.169	0.979	0.977	0.982	0.977	0.981	0.979	<b>1.074</b>
Horizontal Stress (kPa)	126.2	126.0	126.8	126.9	126.6	126.5	106.0	105.8	106.3	105.8	106.2	106.0	<b>116.2</b>
Load-Area Factor	0.57	0.58	0.56	0.56	0.58	0.57	0.63	0.64	0.64	0.65	0.65	0.64	<b>0.61</b>
Horizontal Deformation (um)	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.83	4.83	4.83	4.83	4.83	4.83	<b>4.76</b>
Load Rise Time (ms)	75	74	77	75	73	75	128	127	124	126	124	126	<b>100</b>
Measured Stiffness (MPa)	2745	2741	2755	2758	2733	2746	2252	2287	2263	2268	2272	2268	<b>2507</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2695	2706	2702	2706	2704	2702	2288	2330	2313	2319	2333	2317	<b>2510</b>

Data File: TEA COMPACTADOR 6\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date

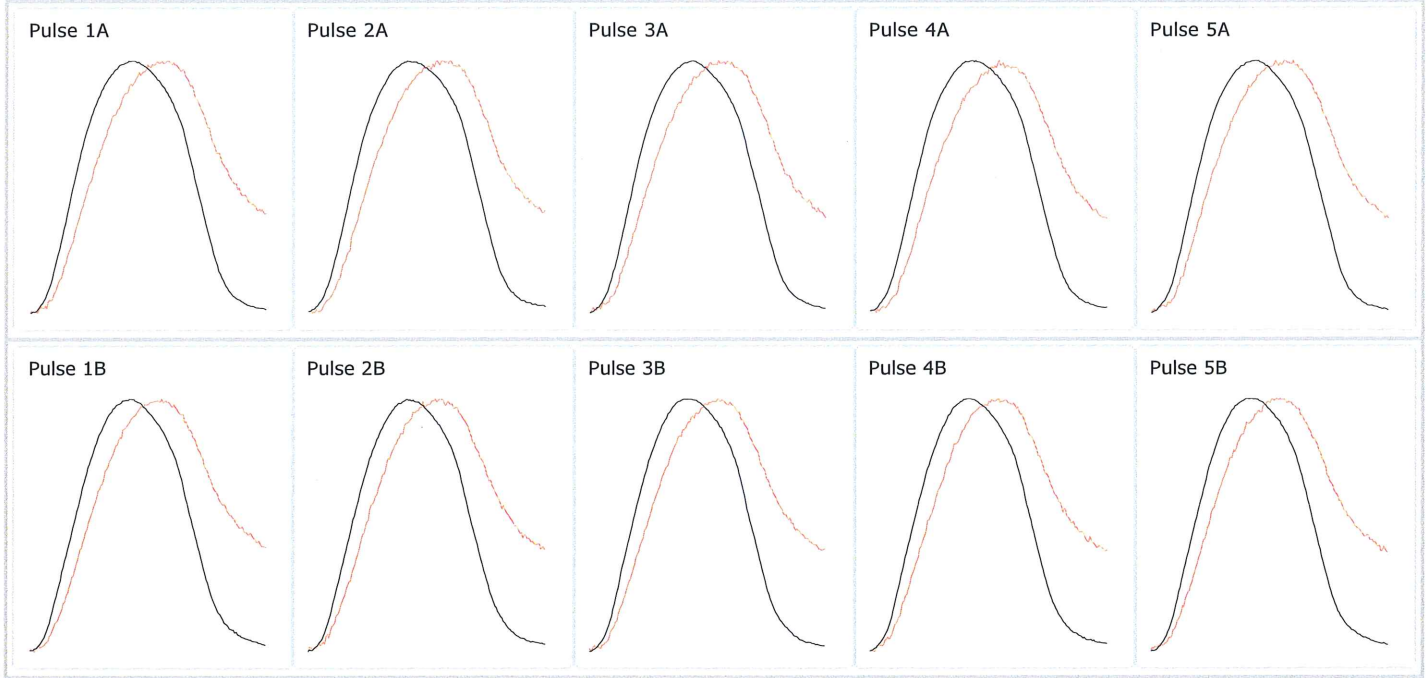
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: mar, 18 de jul de 2017 @ 10:57  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: TEA COMPACTADOR 7 (4)  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	57

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.728	0.724	0.730	0.727	0.728	0.727	0.715	0.713	0.710	0.716	0.712	0.713	<b>0.720</b>
Horizontal Stress (kPa)	81.3	80.9	81.6	81.2	81.4	81.2	79.8	79.6	79.3	79.9	79.5	79.6	<b>80.4</b>
Load-Area Factor	0.70	0.71	0.71	0.69	0.71	0.70	0.68	0.70	0.70	0.70	0.72	0.70	<b>0.70</b>
Horizontal Deformation (um)	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	<b>2.85</b>
Load Rise Time (ms)	74	72	71	74	71	72	74	73	74	73	71	73	<b>73</b>
Measured Stiffness (MPa)	3252	3293	3291	3256	3289	3276	3083	3125	3105	3156	3155	3125	<b>3201</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	3423	3485	3486	3418	3490	3461	3210	3289	3264	3321	3351	3287	<b>3374</b>

Data File: TEA COMPACTADOR 7 (4)\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:  
 Bulk Density:  
 Poisson's Ratio:  
 Description of asphaltic material:  
 How it was mixed:  
 How it was compacted:  
 How bulk density was determined:  
 How the specimen was stored:

Signed:

Date:

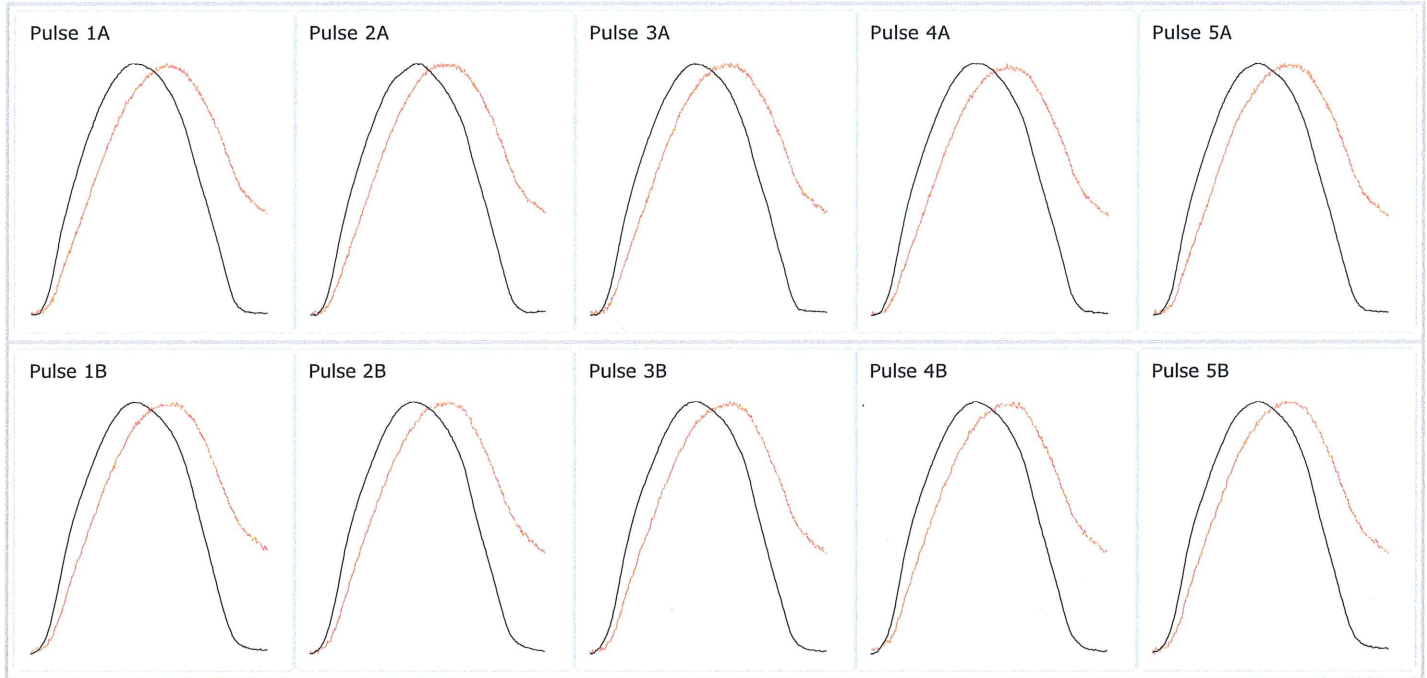
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test: mar, 18 de jul de 2017 @ 10:45  
 Report Number:   
 Operator: Carlos Mallama  
 Specimen ID: TEA COMPACTADOR 8 (3)  
 Client Name:

Lab Address: Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	67

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.738	0.747	0.747	0.739	0.747	0.743	0.770	0.770	0.770	0.769	0.773	0.770	<b>0.757</b>
Horizontal Stress (kPa)	70.1	71.0	71.0	70.2	71.0	70.6	73.1	73.1	73.1	73.1	73.4	73.2	<b>71.9</b>
Load-Area Factor	0.81	0.78	0.79	0.82	0.80	0.80	0.75	0.77	0.76	0.76	0.77	0.76	<b>0.78</b>
Horizontal Deformation (um)	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	<b>3.07</b>
Load Rise Time (ms)	184	185	186	178	180	183	118	114	117	117	114	116	<b>149</b>
Measured Stiffness (MPa)	2496	2563	2554	2551	2576	2548	2906	2933	2937	2915	2952	2929	<b>2738</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2758	2804	2799	2835	2842	2808	3136	3201	3181	3168	3221	3182	<b>2995</b>

Data File: TEA COMPACTADOR 8 (3)\_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_

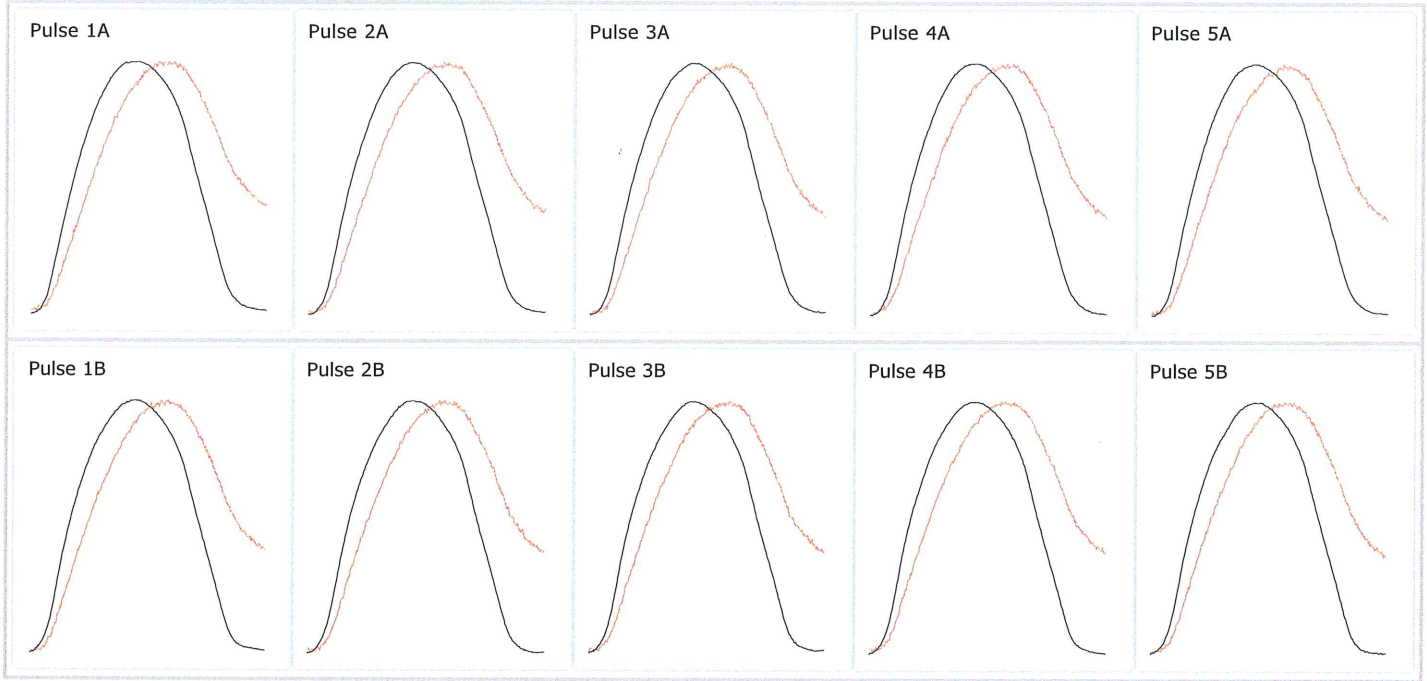
**Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005**

Date of Test vie, 14 de jul de 2017 @ 13:31  
 Report Number  
 Operator Carlos Mallama  
 Specimen ID TEA COMPACTADOR 9  
 Client Name

Lab Address Quito  
 Ecuador

Test Temperature (°)	25
Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	67

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.838	0.841	0.843	0.841	0.842	0.841	0.814	0.817	0.818	0.814	0.817	0.816	<b>0.828</b>
Horizontal Stress (kPa)	79.8	80.1	80.3	80.1	80.3	80.1	77.5	77.8	77.9	77.5	77.8	77.7	<b>78.9</b>
Load-Area Factor	0.78	0.79	0.76	0.78	0.78	0.78	0.77	0.77	0.75	0.74	0.74	0.75	<b>0.77</b>
Horizontal Deformation (um)	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	<b>2.90</b>
Load Rise Time (ms)	125	125	129	124	124	125	129	129	130	132	134	131	<b>128</b>
Measured Stiffness (MPa)	3214	3330	3351	3350	3341	3317	2967	2988	3002	2999	3017	2995	<b>3156</b>
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	3530	3671	3651	3684	3671	3641	3232	3257	3242	3231	3236	3240	<b>3441</b>

Data File TEA COMPACTADOR 9\_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

- Bulk Density:
- Poisson's Ratio:
- Description of asphaltic material:
- How it was mixed:
- How it was compacted:
- How bulk density was determined:
- How the specimen was stored:

Signed

Date