

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**“COMPARATIVA ENTRE EL MÓDULO DE RESILIENCIA Y EL
MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE
DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL EN EL SALVADOR,
CENTROAMÉRICA”**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

MILTON EDGARDO VILLALTA ORANTES

RICARDO JOSÉ FIGUEROA RAMÍREZ

DOCENTE DIRECTOR:

ING. CARLOS OBDULIO GÓCHEZ RUÍZ

MAYO DE 2017

SANTA ANA, EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
AUTORIDADES CENTRALES**

**LICDO. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO
RECTOR**

**DR. MANUEL DE JESÚS JOYA
VICE-RECTOR ACADÉMICO**

**ING. CARLOS ARMANDO VILLALTA
VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO (INTERINO)**

**LICDO. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ
SECRETARIO GENERAL**

**MSC. CLAUDIA MARIA MELGAR DE ZAMBRANA
DEFENSORA DE LOS DERECHOS UNIVERSITARIOS**

**LICDA. NORA BEATRIZ MELÉNDEZ
FISCAL GENERAL (INTERINO)**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
AUTORIDADES**

MSC. RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ
DECANO

ING. ROBERTO CARLOS SIGÜENZA
VICE-DECANO

LCDO. DAVID ALFONSO MATA ALDANA
SECRETARIO DE LA FACULTAD

ING. DOUGLAS GARCÍA RODEZNO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

SANTA ANA, MAYO DE 2017.

TRABAJO DE GRADO APROBADO POR:

ING. CARLOS OBDULIO GÓCHEZ RUÍZ
DOCENTE DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS GENERALES

Primeramente queremos agradecer a Dios Todopoderoso y a la Santísima Virgen María por permitirnos finalizar nuestro trabajo de grado, sin importar las dificultades que surgieron durante su desarrollo.

A la **Universidad de El Salvador Facultad Multidisciplinaria de Occidente**, por brindarnos los conocimientos y aptitudes necesarias durante nuestra vida universitaria, además de facilitar asesorías y los procesos pertinentes.

Al **personal del laboratorio de ASFALCA**, por la colaboración en la realización de los ensayos de laboratorio y la asesoría técnica, especialmente a la Ing. Christa Mata de Lara, Ing. Ricardo Flores Escoto, Ing. Erick Daniel Calidonio Molina y Técnico Carlos Joaquín Contreras.

Al **Ing. Erick Daniel Calidonio Molina**, por todo el apoyo técnico brindado, recomendaciones, orientación durante la fase experimental del trabajo de grado y por habernos facilitado todas las herramientas y recursos necesarios para concluir con éxito nuestro trabajo de grado.

A **Ing. Carlos Obdulio Góchez Ruíz**, por habernos permitido trabajar con él, fue de gran ayuda con sus consejos y recomendaciones, por dar el visto bueno a este trabajo.

En general a todas las personas que contribuyeron de forma directa o indirecta a la realización del presente trabajo de grado.

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso: por permitirme llegar a este momento tan especial.

A mis padres: Ricardo Antonio Villalta y Ana Margarita Orantes, que gracias a su esfuerzo incondicional he logrado esta meta que es fundamental en mi vida, también a toda mi familia por aguantar mis desvelos y algunos regaños.

A mis amigos, que son parte de las experiencias inolvidables y atesoradas que me dejo este pequeño mundo llamado Universidad. Que algunos serán amigos para toda la vida (las piezas fundamentales del equipo New Old Boys), una palabras que se volverán importantes han sido “somos los que estamos y estamos los que somos”.

A mi compañero de Trabajo de Grado, Ricardo Figueroa de quien se que tiene grandes capacidades, agradezco por haberme apoyado y comprendido a lo largo de éste trabajo de graduación, y habernos repuesto ante las dificultades surgidas durante la realización del mismo al igual que sus allegados.

A mi tío Tomas Orantes (Q.E.P.D.), quien fue un ejemplo de vida y de apoyo emocional, por quien me decidí a tomar este camino de la ingeniería, por sus buenos consejos y por las motivaciones que me dio, para poder alcanzar este Título Universitario hoy puedo decirles misión cumplida, sé que donde está se siente orgulloso de este triunfo.

Y por su puesto al Gerente de la Federacion Salvadoreña de Triatlón, Atilio Quezada, por brindar su apoyo siempre con el uso de sus instalaciones a lo largo de mi formación profesional.

Gracias infinita a todos, y no me resta mas que decir que esto apenas comienza, vista al frente y hacia adelante que el pasado es un respaldo importante durante el camino que Dios nos seguirá guiando. Infinitas GRACIAS!

MILTON VILLALTA

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso: por todas las bendiciones que ha puesto en mi vida, por ser mi guía y la fuerza que necesito para poder continuar con la frente en alto en cada etapa de mi vida con perseverancia y paciencia, especialmente en la culminación de este logro.

A la Virgen María: por su bendición, intersección constante, por acompañarme y fortalecerme siempre a través de tus enseñanzas.

A mis padres: Ricardo Figueroa y Florentina Ramírez, por todo el amor y apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida, el esfuerzo extra que dan por procurarme a mí y mi hermano la mejores oportunidades para ser hombres útiles a la sociedad, por sus consejos y por fungir como ejemplos de buenas y capaces personas.

A mi hermano: Wilfredo Figueroa, por su apoyo en los momentos buenos y malos y por permitirme ser un apoyo en sus problemas.

A toda mi familia: especialmente a mis primas Carmen Lima y Claudia Díaz, por confiar en que podía lograr esta meta, por el apoyo y cariño que me demuestran siempre.

A mis abuelos (Q.D.E.P): por los cuidados especiales que tuvieron conmigo en vida, por los buenos momentos y consejos que me regalaron, además de mostrarse como ejemplos de que se puede vivir feliz sin importar las condiciones.

A mi tía (Q.D.E.P): María Felix, por haber sido como una madre para mí desde muy pequeño.

A mi compañero de tesis: Milton Villalta, por mantenerse firme a mi lado para poder finalizar este trabajo de grado, por su contribución y compromiso para la causa.

A todos mis amigos: compañeros de universidad, amigos del grupo Scout Tazumal 97 y otros, por estar presentes en los momentos buenos y malos.

RICARDO FIGUEROA

Resumen

En esta investigación se comparan los módulos de resiliencia y dinámico medidos sobre briquetas elaboradas con mezcla asfáltica procedente del Plantel San Andrés de ECON en El Salvador. La comparación se realizó desde el punto de vista teórico y estadístico, con la finalidad de proveer información sobre la idoneidad del uso de cada módulo en el diseño y control de calidad de mezclas colocadas como carpeta de rodadura en los pavimentos. Se determinaron ambos módulos a temperaturas de 4, 21 y 37°C, siendo medido el módulo resiliente de 12 briquetas Marshall para cada temperatura. Para el módulo dinámico, cada núcleo se sometió a las tres temperaturas y frecuencias de 25, 10, 5, 1, 0.5 y 0.1 Hz, posteriormente se realizó el ajuste de curvas maestras para obtener el módulo dinámico a la frecuencia patrón de 0.33 Hz y mantener uniformidad frecuencias en ambos módulos. Los módulos resultantes se correlacionaron con la densidad y vacíos de las briquetas y/o núcleos por el coeficiente de Spearman y la comparación de módulos a diferentes temperaturas se realizó mediante el estadístico de Kruskal-Wallis y la propuesta de Siegel y Castellan. Según los resultados obtenidos los parámetros de densificación no son apropiados para caracterizar el comportamiento mecánico y producen variaciones aleatorias en el módulo, solo poniendo en evidencia el incremento de los módulos respecto a mayores densidades. Otro aspecto notorio es la estrecha dependencia que tienen las propiedades de la mezcla con la temperatura. Por otro lado, la comparación de módulos expresa diferencias significativas y no es posible determinar relación alguna de los módulos por medio de la densificación.

Palabras claves: módulo de resiliencia, módulo dinámico, mezcla asfáltica, carpeta de rodadura, Marshall, curvas maestras, densidad, vacíos, coeficiente de Spearman, estadístico de Kruskal-Wallis, Siegel y Castellan, densificación, comportamiento mecánico.

Índice

<i>Introducción</i>	<i>1</i>
<i>Capítulo I: Generalidades</i>	<i>3</i>
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general.	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Alcances de la investigación	5
1.4. Limitaciones	6
1.5. Justificación	7
1.6. Antecedentes	9
1.6.1. Diseño de las mezclas asfálticas en el tiempo.	9
1.6.2. Reseña histórica del módulo de resiliencia en mezclas asfálticas.	10
1.6.3. Reseña histórica del módulo dinámico en mezclas asfálticas.	11
<i>Capítulo II: Marco teórico conceptual</i>	<i>13</i>
2.1. Generalidades sobre mezclas asfálticas	13
2.1.1. Componentes de las mezclas asfálticas.	13
2.1.1.1. Asfalto.	13
2.1.1.2. Agregados pétreos.	14
2.1.2. Clasificación.	15
2.1.2.1. Mezclas asfálticas según el agregado pétreo utilizado.	15
2.1.2.2. Mezclas asfálticas según la temperatura.	15
2.1.2.3. Mezclas asfálticas según el contenido de vacío.....	16
2.1.2.4. Mezclas asfálticas según tamaño máximo del agregado pétreo.	16
2.1.2.5. Mezclas asfálticas según la estructura del agregado pétreo.	16
2.1.2.6. Mezclas asfálticas según la granulometría.	16
2.1.3. Características de las mezclas asfálticas.....	16
2.1.3.1. Densidad.	17
2.1.3.2. Vacíos de aire (Va).	17
2.1.3.3. Vacíos en el agregado mineral (VMA).	17
2.1.3.4. Contenido de asfalto.	17
2.1.3.5. Vacíos llenos de asfalto (VFA).	18
2.1.4. Propiedades de las mezclas asfálticas relacionadas con el comportamiento mecánico.	20
2.1.4.1. Flexibilidad.....	20
2.1.4.2. Resistencia a la fatiga.	20

2.2. Generalidades del método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas.	20
2.2.1. Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas.	23
2.3. Pavimentos.	24
2.3.1. Funciones y características de los pavimentos flexibles.	25
2.3.2. Componentes de la estructura de los pavimentos flexibles.	25
2.3.2.1. Carpeta de rodadura.	26
2.3.2.2. Base.	26
2.3.2.3. Sub-base.	26
2.3.2.4. Subrasante.	26
2.3.3. Ventajas de los pavimentos flexibles.	27
2.3.4. Comportamiento de los pavimentos ante la aplicación de cargas.	27
2.4. Comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.	28
2.4.1. Módulo de resiliencia o módulo resiliente.	31
2.4.2. Módulo dinámico.	35
2.4.2.1. Curvas Maestras.	39
2.5. Importancia del módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica en el diseño de pavimentos flexibles.	43
2.5.1. Método AASHTO 1993.	44
2.5.1.1. Espesores de capa mínimos en función del número estructural.	46
2.5.1.2. Determinación del coeficiente estructural de la carpeta asfáltica.	47
Capítulo III: Metodología de la investigación.	49
3.1. Mezcla asfáltica utilizada para la investigación.	49
3.1.1. Lugar de procedencia.	49
3.1.2. Composición de la mezcla asfáltica.	49
3.1.2.1. Agregado pétreo.	49
3.1.2.2. Asfalto.	52
3.1.2.3. Parámetros finales del diseño de la mezcla asfáltica.	55
3.1.3. Proceso de producción de la mezcla asfáltica en la planta.	55
3.1.3.1. Silos o tolvas dosificadoras.	56
3.1.3.2. Secador.	58
3.1.3.3. Quemador.	60
3.1.3.4. Mezclador.	60
3.1.3.5. Precolector de finos.	62
3.1.3.6. Filtro de mangas.	63
3.1.3.7. Silo de descarga.	64
3.1.4. Muestreo de mezcla.	65
3.1.4.1. Procedimiento.	65
3.2. Trabajo de laboratorio.	68

3.2.1. Ubicación de los laboratorios	68
3.2.2. Herramientas y equipos utilizados.....	69
3.2.3. Cuarteo y almacenamiento de la mezcla asfáltica muestreada.....	69
3.2.3.1 Finalidad del cuarteo.....	70
3.2.3.2. Procedimiento (ASTM C702, 2011).....	70
3.2.3.3. Almacenamiento del material.....	72
3.2.4. Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.....	73
3.2.4.1. Significado y uso.....	73
3.2.4.2. Procedimiento (ASTM D2041, 2011).....	73
3.2.5. Acondicionamiento de la mezcla asfáltica para elaboración de briquetas.....	77
3.2.5.1. Significado y uso.....	77
3.2.5.2. Acondicionamiento para elaboración de briquetas con el martillo Marshall.....	77
3.2.5.3. Acondicionamiento para la elaboración de especímenes con el Compactador Giratorio.....	78
3.2.6. Preparación y compactación de briquetas mediante martillo Marshall.....	80
3.2.6.1. Significado y uso.....	80
3.2.6.2. Procedimiento.....	80
3.2.7. Preparación y compactación de briquetas mediante compactador giratorio.....	85
3.2.7.1. Significado y uso.....	85
3.2.7.2. Procedimiento.....	86
3.2.7.3. Extracción de núcleos.....	91
3.2.8. Gravedad específica Bulk de briquetas compactadas.....	93
3.2.8.1. Significado y uso.....	93
3.2.8.2. Procedimiento (ASTM D2726, 2014).....	94
3.2.9. Contenido de vacíos de aire en las briquetas y núcleos a ensayar.....	98
3.2.10. Ensayo para determinación del Módulo de Resiliencia.....	100
3.2.10.1. Significado y uso.....	100
3.2.10.2. Procedimiento.....	101
3.2.10.3. Criterios de aceptación de resultados.....	106
3.2.11. Determinación del Módulo Dinámico de la mezcla asfáltica.....	108
3.2.11.1. Significado y uso.....	108
3.2.11.2. Procedimiento.....	109
Capítulo IV: Tratamiento y análisis de resultados.....	116
4.1. Comprobación de normalidad y homocedasticidad de los datos.....	118
4.1.1. Prueba de normalidad de series.....	118
4.1.2. Prueba de homocedasticidad para las series de módulos.....	126
4.2. Correlaciones de las series.....	127
4.2.1. Correlación de densidad y porcentajes de vacíos en las briquetas.....	127
4.2.2. Correlación de módulos con densidades y vacíos.....	130

4.3. Comparación estadística de módulos.....	132
4.3.1. Prueba estadística Kruskal-Wallis.....	132
4.3.2. Análisis Post Hoc bajo propuesta de Siegel y Castellan.	133
<i>Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.</i>	<i>136</i>
5.1. Conclusiones.....	136
5.2. Recomendaciones.....	137
<i>Bibliografía</i>	<i>138</i>
<i>ANEXOS.</i>	<i>142</i>

Índice de figuras

Capítulo II

Figura 2.1. Comportamiento del asfalto según la temperatura y el tiempo.....	14
Figura 2.2. Comportamiento del agregado sometido a cargas de corte.....	15
Figura 2.3. Diagrama de fases de la mezcla compactada	18
Figura 2.4. Volumen de aire, asfalto efectivo y asfalto absorbido en la mezcla compactada. .	19
Figura 2.5. Estructura de un pavimento flexible.	26
Figura 2.6. Comportamiento de los pavimentos flexibles y rígidos ante una carga.	28
Figura 2.7. Estado de tensiones en las carpetas asfálticas bajo una carga simple.	31
Figura 2.8. Pulso de carga "haversine" y deformaciones en mezclas asfálticas.....	33
Figura 2.9. Representación gráfica de la deformación que sufre la mezcla asfáltica durante la aplicación de carga.	34
Figura 2.10. Comportamiento de la mezcla asfáltica	36
Figura 2.11. Respuesta del material visco-elástico según ensayo de módulo dinámico	37
Figura 2.12. Representación gráfica del módulo dinámico	38
Figura 2.13. Desplazamiento horizontal debido a la aplicación del factor de ajuste a curvas de módulo dinámico.	41
Figura 2.14. Representación gráfica de los parámetros del modelo según la Ecuación 2.6.....	42
Figura 2.15. Ejemplo de Curva Maestra de Módulo Dinámico.....	43
Figura 2.16. Abaco para determinación del Número Estructural.	45
Figura 2.17. Procedimiento para determinar espesores.....	46
Figura 2.18. Determinación del coeficiente estructural para la capa asfáltica.	48
Figura 3.1. Ubicación de la planta asfáltica ECON en San Andrés.	49
Figura 3.2. Análisis granulométrico para comprobación de porcentajes de formulación teórica Bailey.....	51
Figura 3.3. Curva reológica del asfalto AC-30 utilizado en la mezcla de producción.	54
Figura 3.4. Acopio de agregados pétreo.	56
Figura 3.5. Silos dosificadores.	57
Figura 3.6. Celda de carga de alta precisión.....	57
Figura 3.7. Operación de un tambor secador a contraflujo.	58
Figura 3.8. Incorporación del agregado al tambor secador.	59

Figura 3.9. Etapas del secado dentro del tambor.....	59
Figura 3.10. Quemador CIBER.....	60
Figura 3.11. Motorreductoras del mezclador.....	61
Figura 3.12. Tanque térmico para almacenamiento del asfalto.....	61
Figura 3.13. Vista interna del mezclador.....	62
Figura 3.14. Separador estático.....	63
Figura 3.15. Contenedor con los filtros de manga y chimenea.....	64
Figura 3.16. Silo descargando mezcla terminada en una pala cargadora para inspección inicial.	64
Figura 3.17. Remoción de material para homogenizar la muestra.....	66
Figura 3.18. Llenado de bandejas con la mezcla muestreada.....	66
Figura 3.19. Desalojo de bandejas con material en la pala mecánica.....	67
Figura 3.20. Preparación de bandejas con material a ser transportadas.....	68
Figura 3.21. Ubicación de las instalaciones de ASFALCA.....	69
Figura 3.22. Formación de pila cónica durante el cuarteo.....	70
Figura 3.23. Aplanado de pila cónica.....	71
Figura 3.24. División de la mezcla cuarteada en partes iguales.....	71
Figura 3.25. Pesaje de material cuarteado.....	72
Figura 3.26. Material etiquetado en el lugar suministrado para su colocación.....	72
Figura 3.27. Hoja de calibración del picnómetro para gravedad específica teórica máxima... ..	73
Figura 3.28. Pesaje de material en el picnómetro.....	74
Figura 3.29. Temperización del agua para ensayo.....	74
Figura 3.30. Desarrollo del ensayo de gravedad teórica máxima.....	75
Figura 3.31. Aforo de picnómetro.....	75
Figura 3.32. Preparación de mezcla a acondicionar para compactación Marshall.....	77
Figura 3.33. Revisión de mezcla extendida en la bandeja.....	78
Figura 3.34. Acomodamiento de bandejas y molde de compactador giratorio dentro del horno.	79
Figura 3.35. Revoltura de mezcla.....	79
Figura 3.36. Enmoldado de mezcla.....	81
Figura 3.37. Monitoreo de temperatura de la mezcla enmoldada.....	81

Figura 3.38. Colocación del molde en el pedestal para compactación.....	82
Figura 3.39. Colocación del molde en posición invertida para aplicar golpes en la cara inferior.	83
Figura 3.40. Disposición de los moldes para enfriamiento.	84
Figura 3.41. Desmoldado de briquetas.	84
Figura 3.42. Preparación de briquetas.	85
Figura 3.43. Corte de filtros.....	87
Figura 3.44. Enmoldado de mezcla para Compactador Giratorio.	87
Figura 3.45. Colocación de molde con mezcla en el horno para recuperación de temperatura.	88
Figura 3.46. Compactador Giratorio en operación.	89
Figura 3.47. Desmoldado de briqueta.	90
Figura 3.48. Enfriamiento de briqueta.....	90
Figura 3.49. . Extracción de núcleo.	91
Figura 3.50. Medición de altura en núcleo extraído.	92
Figura 3.51. Descabezado de núcleos para lograr alturas de 150 mm	92
Figura 3.52. Pulido de núcleos para reducir las imperfecciones de los bordes.	93
Figura 3.53. Temperado del agua en la cubeta.	94
Figura 3.54. Equipo preparado para determinación de pesos sumergidos y saturado superficialmente seco (SSS).	95
Figura 3.55. Briqueta sumergida en agua.	96
Figura 3.56. Secado de briqueta para obtener condición saturada superficialmente seca (SSS).	96
Figura 3.57. Ensayo de módulo resiliente por tracción indirecta.	101
Figura 3.58. Marco de carga del equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) tipo NU.....	102
Figura 3.59. Esquema de montaje de LVDT's para el ensayo.	102
Figura 3.60. Soporte para marco de montaje de los LVDT's.....	103
Figura 3.61. Esquema final del montaje para el ensayo.	104
Figura 3.62. Montaje del marco para LVDT's sobre el marco de alineación.	105
Figura 3.63. Briqueta preparada para comenzar el ensayo.	105
Figura 3.64. Preparación de núcleo a ensayar.	109

Figura 3.65. Acondicionamiento de núcleos.	110
Figura 3.66. Esquema general del ensayo de módulo dinámico.	111
Figura 3.67. Detalles de las estructuras de montaje.	112
Figura 4.1. Gráfico de normalidad para módulos resilientes a 4°C.....	120
Figura 4.2. Gráfico de normalidad para módulos resilientes a 21°C.....	120
Figura 4.3. Gráfico de normalidad para módulos dinámicos a 4°C.	121
Figura 4.4. Gráfico de normalidad para módulos dinámicos a 21°C.	121
Figura 4.5. Gráfico de normalidad para módulos dinámicos a 37°C.	122
Figura 4.6. Gráfico de normalidad para el porcentaje de vacíos de módulos resilientes a 4°C.	122
Figura 4.7. Gráfico de normalidad para el porcentaje de vacíos de módulos resilientes a 21°C.	123
Figura 4.8. Gráfico de normalidad para el porcentaje de vacíos de módulos dinámicos.	123
Figura 4.9. Gráfico de normalidad para densidades de módulos resilientes a 4°C.	124
Figura 4.10. Gráfico de normalidad para densidades de módulos resilientes a 21°C.	124
Figura 4.11. Gráfico de normalidad para densidades de módulos dinámicos.	125
Figura 4.12. Dispersión general de puntos "porcentaje de vacíos vs densidad".	128
Figura 4.13. Dispersión "porcentaje de vacíos vs densidad" para compactación Marshall. ..	129
Figura 4.14. Dispersión "porcentaje de vacíos vs densidad" para compactación por amasado.	129
Figura 4.15. Desarrollo del módulo resiliente según la temperatura de ensayo.	131
Figura 4.16. Desarrollo del módulo dinámico según la temperatura de ensayo.....	131
Figura 4.17. Comparación de módulos resiliente y dinámico a 4 °C.....	135
Figura 4.18. Comparación de módulos resiliente y dinámico a 21 °C.	135

Índice de tablas

Capítulo II

Tabla 2.1 Causas y efectos de la deficiente resistencia a la fatiga en la carpeta asfáltica.....	20
Tabla 2.2 Criterios para diseño Marshall.....	22
Tabla 2.3 Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral para diseño.....	22
Tabla 2.4 Ventajas y desventajas del método Marshall.....	23

Capítulo III

Tabla 3.1 Procedencia y porcentaje de los agregados utilizados para la combinación del agregado pétreo.....	50
Tabla 3.2 Análisis granulométrico de la combinación de agregados pétreo propuesta.....	50
Tabla 3.3 Resumen de resultados de los ensayos practicados sobre los agregados pétreos....	52
Tabla 3.4 Resumen de resultados de los ensayos practicados sobre el asfalto.....	53
Tabla 3.5 Resumen de resultados del diseño Marshall.....	55
Tabla 3.6 Fecha y cantidad de muestra tomada en la planta San asfáltica Andrés.....	65
Tabla 3.7 Cantidades de material a utilizar en los ensayos de laboratorio por muestreo.....	65
Tabla 3.9 Formato para recolección de datos del ensayo de gravedad teórica máxima.....	76
Tabla 3.10 Número de golpes del martillo Marshall para la compactación de briquetas.....	80
Tabla 3.11 Formato para recolección de las medidas de briqueta.....	85
Tabla 3.12 Número de giros aplicados para la compactación.....	86
Tabla 3.13 Formato para recolección de las medidas de núcleos.....	93
Tabla 3.14 Resumen del cálculo de gravedad específica Bulk y densidad de briquetas Marshall.....	97
Tabla 3.15 Resumen del cálculo de gravedad específica Bulk y densidad de núcleos extraídos.....	98
Tabla 3.16 Cálculo del contenido de vacíos de aire en las briquetas Marshall.....	99
Tabla 3.17 Cálculo del contenido de vacíos de aire en los núcleos extraídos.....	100
Tabla 3.18 Tiempos de acondicionamiento de briquetas según temperatura de ensayo.....	101
Tabla 3.19 Criterios tomados para la aceptación de resultados.....	106
Tabla 3.20 Evaluación de módulos resilientes a 4°C y 0.33 Hz.....	107
Tabla 3.21 Evaluación de módulos resilientes a 21°C y 0.33 Hz.....	107

Tabla 3.22 Evaluación de módulos resilientes a 37°C y 0.33 Hz.....	108
Tabla 3.23 Resultados del ajuste de curvas maestras de módulos dinámicos a 4°C y 0.33 Hz.....	114
Tabla 3.24 Resultados del ajuste de curvas maestras de módulos dinámicos a 21°C y 0.33 Hz.....	114
Tabla 3.25 Resultados del ajuste de curvas maestras de módulos dinámicos a 37°C y 0.33 Hz.....	115

Capítulo IV

Tabla 4.1 Resumen del ensayo de Módulo Resiliente a 4 °C y 0.33 Hz.....	116
Tabla 4.2 Resumen del ensayo de Módulo Resiliente a 21 °C y 0.33 Hz.....	116
Tabla 4.3 Resumen del ajuste de Módulo Dinámico a 4 °C y 0.33 Hz.....	117
Tabla 4.4 Resumen del ajuste de Módulo Dinámico a 21 °C y 0.33 Hz.....	117
Tabla 4.5 Resumen del ajuste de Módulo Dinámico a 37 °C y 0.33 Hz.....	118
Tabla 4.6 Prueba de normalidad para los valores de módulos medidos.....	119
Tabla 4.7 Prueba de normalidad para los valores de densidad y vacíos calculados.....	119
Tabla 4.8 Resumen de criterios de normalidad para cada muestra.....	125
Tabla 4.9 Resultados de prueba Levene para homocedasticidad.....	126
Tabla 4.10 Correlaciones entre densidades y vacíos.....	127
Tabla 4.11 Correlaciones de Módulos con densidades y vacíos.....	130
Tabla 4.12 Resumen de resultados prueba Kruskal-Wallis.....	133
Tabla 4.13 Análisis de diferencias entre ensayos de módulos.....	134

Índice de anexos.

Anexo 1. Materiales, herramientas y equipos utilizados en el laboratorio.....	142
Anexo 2. Calculo de gravedades teóricas máximas suministrados por ECON.....	150
Anexo 3. Dimensiones de las briquetas para módulo resiliente.....	151
Anexo 4. Dimensiones de los núcleos para módulo dinámico.....	152
Anexo 5. Evaluación del cumplimiento de criterios para aceptación de módulos resilientes a 4°C y 0.33 Hz.....	153
Anexo 6. Evaluación del cumplimiento de criterios para aceptación de módulos resilientes a 21°C y 0.33 Hz.....	154
Anexo 7. Evaluación del cumplimiento de criterios para aceptación de módulos resilientes a 37°C y 0.33 Hz.....	155
Anexo 8. Módulos dinámicos registrados para cada núcleo ensayado.....	156
Anexo 9. Parámetros de ajuste y comprobación de las curvas maestras de módulo dinámico.....	157
Anexo 10. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 1.....	158
Anexo 11. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 1.....	159
Anexo 12. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 2.....	160
Anexo 13. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 2.....	161
Anexo 14. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 3.....	162
Anexo 15. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 3.....	163
Anexo 16. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 4.....	164
Anexo 17. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 4.....	165
Anexo 18. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 5.....	166
Anexo 19. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 5.....	167
Anexo 20. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 6.....	168
Anexo 21. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 6.....	169
Anexo 22. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 7.....	170
Anexo 23. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 7.....	171
Anexo 24. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 8.....	172
Anexo 25. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 8.....	173

Anexo 26. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 9.	174
Anexo 27. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 9.	175
Anexo 28. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 10.	176
Anexo 29. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 10.	177
Anexo 30. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 11.	178
Anexo 31. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 11.	179
Anexo 32. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 12.	180
Anexo 33. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 12.	181

Abreviaturas

°C: centígrados.

AAMAS: Asphalt Aggregate Mixture Analysis System (Sistema de Análisis del Agregado de las Mezclas Asfálticas).

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte).

ASFALCA: Asfaltos de Centroamérica.

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).

BSI: Britain Standar Institute (Instituto Británico de Estándares).

cm: centímetro.

cm³: centímetros cúbicos.

cP: centipoise.

cSt: centistokes.

|E*|: Módulo dinámico.

ECON S.A. de C.V.: Empresa Constructora Sociedad Anónima de Capital Variable.

EN: European Normalization (Normalización Europea).

ESAL's: Equivalent Axial Load (Ejes Equivalentes de Carga).

FHWA: Federal Highway Administration (Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos).

g: gramos.

Hz: Hertz.

in: pulgada.

kN: Kilonewton.

Km/h: Kilómetros por hora

kPa: kilopascal.

ksi: kilolibra por pulgada cuadrada.

lbs: libras.

mm: milímetros.

mmHg: milímetros de mercurio.

MPa: Megapascal.

Mr: Módulo resiliente.

ms: milisegundos.

psi: libra por pulgada cuadrada.

R: grados Rankine.

s: segundos.

um: micrómetros.

WAASHTO: Western Association of State Highway on Transportation Officials
(Asociación Occidental de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte).

Glosario

Agregado: material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria, o la roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.

Ahuellamiento: deformación permanente, que se presenta en formas de surcos en la superficie de rodadura, como resultado de una consolidación o movimiento lateral de una o más capas del pavimento bajo efectos del tráfico o que es generada por un desplazamiento de la superficie misma del pavimento.

Angulo de desfase: ángulo, en grados, entre los picos de las funciones sinusoidales de esfuerzo y deformación en un ensayo controlado de esfuerzos.

Asfáltenos: estructuras complejas de compuestos aromáticos de color negro o marrón que contienen además del carbón otros elementos químicos tales como nitrógeno, azufre, oxígeno, en general, son compuestos polares, de alto peso molecular y que, además, son insolubles en disolventes parafínicos normales (n-heptano).

Asfalto: material hidrocarburado viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, autovías o autopistas. También es utilizado en impermeabilizantes.

Asfalto tipo AC-30: tipo de asfalto fabricado a partir de los fondos de la destilación al vacío de hidrocarburos naturales. Estos se someten a un proceso industrial para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de viscosidad absoluta comprendida entre 2400 y 3600 Poises, a 60°C.

Asimetría: medida que permite identificar si los datos estadísticos se distribuyen de forma uniforme alrededor del punto central el cual generalmente se toma como media aritmética.

Briqueta: conglomerado de un material combustible en forma de prisma rectangular. En mezclas asfálticas, por norma, la briqueta posee forma cilíndrica.

Carpeta asfáltica: capa o conjunto de capas que se colocan sobre la base, constituidas por material pétreo y un producto asfáltico. Su función es proporcionar al tránsito una superficie estable, prácticamente impermeable, uniforme y de textura apropiada razón por la cual también es llamada carpeta de rodadura.

Coefficiente de aporte estructural: representa la capacidad estructural de un material para resistir las cargas solicitantes tanto por carga directa de tránsito como por desgaste.

Cohesión: atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de una sustancia. La cohesión es diferente de la adhesión; la cohesión es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo, mientras que la adhesión es la interacción entre las superficies de distintos cuerpos.

Confiabilidad: grado de seguridad o veracidad de que el diseño de la estructura de un pavimento, puede llegar al fin de su período de diseño en buenas condiciones.

Curtosis: medida que determina el grado de concentración que presentan los valores, de una muestra estadística, en la región central de la distribución.

Deflectómetro de impacto: es un aparato de medición para la auscultación y evaluación estructural de pavimentos.

Desmenuzado: deshacer o trocear en partes muy pequeñas, generalmente con las manos y sin utilizar ningún instrumento cortante para evitar que se formen grumos con la mezcla asfáltica al momento de enfriarse.

Ejes equivalentes: número de ejes de 80 kN o 18 kips utilizados para el diseño de pavimentos, que simulan los efectos producidos por el tránsito mixto compuesto por vehículos de diferentes pesos y números de ejes.

Granulometría: medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

Hidrocarburo: Compuesto químico formado por carbono e hidrógeno.

Homocedasticidad: igualdad de varianzas de los grupos o mezclas a comparar estadísticamente

Leptocúrtica: forma de curva normal cuando existe una alta concentración de valores en la región central de la distribución.

Maltenos: sustancias solubles en normal n-heptano y constituidas por resinas, saturadas y aromáticas. Son compuestos muy polares de color marrón o marrón claro, sólido o semisólido y, al igual que los asfaltenos, son compuestos de carbono, hidrógeno y cantidades menores de nitrógeno, oxígeno y azufre.

Mezcla asfáltica: combinación de cemento asfáltico y agregados pétreos en proporciones exactas y previamente especificadas, que logran las características y propiedades deseadas.

Modelo no paramétrico: prueba estadística aplicable cuando los datos a analizar no se ajustan a una distribución conocida.

Pavimento: La estructura integral de las capas de subrasante, subbase, base y carpeta colocado encima de la rasante y destinada a sostener las cargas vehiculares.

Platicúrtica: forma de curva normal cuando existe una baja concentración de valores en la región central de la distribución.

Reología: rama de la física que estudia la viscosidad, plasticidad, elasticidad y el derrame de la materia.

Serviciabilidad: capacidad que tiene una estructura de pavimento para servir al tipo y volumen de tránsito para el cual fue diseñado.

Significancia o grado de significación (α): probabilidad de rechazar erróneamente la hipótesis nula al realizar un contraste estadístico de hipótesis.

Visco-elástico: material con comportamiento reológico anelástico que presentan ciertos materiales que exhiben tanto propiedades viscosas como propiedades elásticas cuando se deforman.

Introducción

Disponer de obras viales en buen estado, tales como caminos o carreteras, propicia el desarrollo de los países en diversos niveles. No obstante, para lograr construir y mantener carreteras con un desempeño óptimo y que sean factibles económicamente, es necesario determinar las condiciones y parámetros de diseño apropiados, los cuales pueden funcionar también como indicadores de calidad. El Salvador no está exento a esta situación y considerando que un alto porcentaje de su red vial está conformada por estructuras de pavimentos flexibles, en las cuales las mezclas asfálticas son el principal material constructivo, es necesario evaluar un parámetro que refleje el comportamiento mecánico de este tipo de mezclas que también permita revisar, mediante controles periódicos, el desempeño del material colocado en obra.

La investigación aborda la “COMPARATIVA ENTRE EL MÓDULO DE RESILIENCIA Y EL MÓDULO DINÁMICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DISEÑADAS POR EL MÉTODO MARSHALL EN EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA”: con el fin de proporcionar información sobre la idoneidad de su uso para el diseño y control de calidad, así como las diferencias entre ambos módulos que son considerados, generalmente y sin distinción, como indicadores de la rigidez de las mezclas asfálticas aun cuando consideran comportamientos diferentes e incluso se obtienen con metodologías bajo diferente normalización.

La investigación está dividida en cinco capítulos los cuales se distribuyen de forma que el Capítulo I, presenta la problemática, los objetivos de investigación, alcances y limitaciones, la motivación y necesidad de la investigación y al final antecedentes que abarcan el arte del diseño de mezclas asfálticas en caliente y reseñas referentes a ambos módulos.

El Capítulo II, expone el marco teórico que incluye generalidades sobre mezclas asfálticas y del método de diseño de mezclas considerado en el estudio, aspecto de los pavimentos haciendo énfasis en los pavimentos flexibles, teoría relacionada con el comportamiento mecánico de las mezclas y la importancia del módulo de rigidez en el diseño enfocado al método AASHTO 1993 que es de uso en el ámbito salvadoreño.

El Capítulo III titulado metodología de la investigación se ha separado en dos partes. La primera expone aspectos de la mezcla asfáltica utilizada como materia prima de ensayo; procedencia, composición, forma de producción en planta y muestreo. La segunda parte hace

referencia al trabajo de laboratorio indicando la ubicación del lugar, instrumentaría utilizada y los procedimientos de ensayos ejecutados.

El Capítulo IV, presenta el análisis estadístico realizado con los datos obtenidos en laboratorio. Previo a la comparación de los datos de módulos, se llevó a cabo la comprobación de la normalidad e igualdad de varianzas de los datos para así determinar cuáles modelos estadístico aplicar. Las correlaciones se realizaron con el coeficiente de Spearman y para la comparación de las medidas de módulo se empleó el estadístico Kruskal-Wallis y la prueba Post Hoc propuesta por Siegel y Castellan. Se refuerza el análisis por medio de gráficos y los datos se presentan ordenadas en tablas.

El Capítulo V, expone las conclusiones que fueron formuladas en base a la teoría y los análisis estadísticos y algunas recomendaciones para el uso de los módulos y estudios futuros que puedan profundizar la línea de investigación.

Capítulo I: Generalidades

1.1. Planteamiento del problema

El Salvador es un país en constante crecimiento vehicular, lo cual hace necesario ampliar y mejorar la red vial ya que, al mantener los caminos en mal estado, los automovilistas verán esto reflejado en mayores gastos de mantenimiento de sus vehículos así como mayores tiempos de circulación para poder llegar a su destino.

Durante la construcción de toda obra civil es necesario un control de calidad de la obra en campo con la finalidad de garantizar que dicha obra cumpla con los requerimientos establecidos en su diseño. Sin embargo, los controles de calidad aplicados a las mezclas colocadas en los proyectos se limitan únicamente, a evaluar la apariencia de la superficie y el grado de compactación logrado, dejando de lado el comportamiento mecánico del material. Por otro parte, para las carpetas asfálticas diseñadas utilizando el módulo dinámico, esto resulta difícil dado que las dimensiones establecidas de las briquetas para el ensayo correspondiente a este módulo son mayores a los espesores de las carpetas asfálticas utilizadas comúnmente en El Salvador, los cuales oscilan entre los 3 a 10 cm, esto hace imposible la extracción de núcleos para su ensayo en laboratorio.

Dado que las dimensiones establecidas para las briquetas del módulo de resiliencia permiten la extracción de núcleos de la red vial salvadoreña y, en términos económicos, puede resultar una mejor alternativa a las actualmente utilizadas, se pretende concluir si es posible comprobar el módulo dinámico utilizando el módulo de resiliencia, para mejorar los controles de calidad de la mezcla en campo y, además, determinar cuál módulo es el más conveniente para la caracterización mecánica de mezclas en el diseño de pavimentos flexibles.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

- Desarrollar una comparación entre el módulo de resiliencia y el módulo dinámico como indicadores de la rigidez de mezclas asfálticas en caliente diseñadas por el método Marshall.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Diferenciar los procedimientos de ensayos establecidos para la determinación del módulo de resiliencia y módulo dinámico.
- Realizar muestreos representativos en una producción de mezcla asfáltica en caliente diseñada por el método Marshall para la elaboración de briquetas y núcleos a ensayar.
- Registrar los procedimientos ejecutados y los datos de interés por medios físicos y digitales para facilitar su manipulación.
- Analizar los resultados de módulos de resiliencia y módulos dinámicos en función de las variables temperatura, frecuencia de aplicación de carga, densidad y contenido de vacíos.
- Comparar estadísticamente el módulo de resiliencia y el módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente.

1.3. Alcances de la investigación

Realizar los ensayos de laboratorio sobre mezcla asfáltica producida en la planta asfáltica “San Andrés” de la empresa ECON, la cual es de uso en proyectos viales en el ámbito salvadoreño.

Dar a conocer la base del funcionamiento y operación de la planta asfáltica “San Andrés”, según las características establecidas por el proveedor de la planta y los criterios empleados por ECON para la producción de mezcla asfáltica en caliente.

Los procedimientos de laboratorio estarán en conformidad a las normativas reconocidas internacionalmente tales como las normas ASTM, normas AASTHO y normas europeas.

Para el análisis experimental se emplearán los datos considerados suficientes en esta investigación los cuales son: temperatura, frecuencia de aplicación de carga, contenido de vacíos, densidad, módulo de resiliencia y módulo dinámico, sin profundizar en otras variables y propiedades de las mezclas asfálticas.

El análisis de los datos será realizado empleando métodos estadísticos que permitan revisar la normalidad y homecedasticidad entre las mediciones para, posteriormente, aplicar las pruebas paramétricas o no paramétricas de correlación y comparación de los datos. La comparación será aplicada entre los módulos medidos y calculados, para poder brindar información acerca de la existencia de una posible relación o independencia entre el módulo de resiliencia y el módulo dinámico de las mezclas asfálticas en condiciones de laboratorio.

1.4. Limitaciones

Para la realización del estudio, se trabajará únicamente con mezcla asfáltica en caliente debido a la baja demanda en el mercado salvadoreño que poseen otros tipos de mezcla asfáltica.

La mezcla asfáltica a utilizar en la investigación será muestreada, únicamente, de la producción en la planta asfáltica de ECON ubicada en San Andrés. Por otra parte, no será posible realizar extracciones de núcleos de proyectos vigentes debido a que no se pueden obtener muestras con las dimensiones requeridas para el ensayo de modulo dinámico.

El método de diseño de la mezcla asfáltica a considerar será el método Marshall, debido a que este es el de uso en El Salvador.

Se tendrá una disponibilidad temporal del extractor de núcleos a partir de briquetas elaboradas en laboratorio y con tamaños de brocas de diamante con diámetro inferior a 101.8 mm.

Los datos empleados para la investigación serán obtenidos totalmente en condiciones de laboratorio, dado que el principal problema a abordar con esta investigación es generado por el hecho que no se pueden extraer núcleos para ensayo del módulo dinámico de carpetas asfálticas puestas en obra, además no se obtuvo facilidad para obtener núcleos extraídos en proyectos viales vigentes durante el desarrollo de la investigación.

1.5. Justificación

En El Salvador, las principales carreteras de la red vial se encuentran construidas principalmente de concreto hidráulico o de concreto asfáltico¹, ocupándose dichos materiales de acuerdo a diversos criterios técnicos basados en las características propias de cada proyecto.

Puesto el uso y la importancia en la red vial nacional del asfalto, especialmente debido a razones económicas, es necesario garantizar la calidad tanto de la mezcla asfáltica como del proceso constructivo con la finalidad de asegurar la durabilidad, seguridad y serviciabilidad de la carretera. Para lograrlo, debe llevarse a cabo un buen control de calidad de la mezcla a usar como capa de rodadura en obra.

Al haberse actualizado en el diseño el uso del módulo dinámico de las mezclas asfálticas, se han limitado las opciones para llevar a cabo el control de calidad de las mezclas en campo en cuanto a su módulo, eliminando la opción de la extracción de núcleos para su ensayo en el laboratorio. Ello es debido a que la altura de las briquetas para el ensayo de módulo dinámico se encuentra alejada de los espesores de las carpetas asfálticas comúnmente construidas en el país, por lo que los núcleos extraídos no cumplirían con las dimensiones establecidas para el ensayo según las normas.

Como alternativa a la extracción de núcleos, en El Salvador, se cuenta con la experiencia de uso del deflectómetro de impacto sin embargo, pese a ciertas ventajas, su escasa disponibilidad en el medio y su elevado costo lleva a la búsqueda de otras opciones.

¹ De acuerdo a datos preliminares del Estudio de Actualización de la Red Vial Nacional 2015, de 4035.05 kilómetros pavimentados en El Salvador, el 14% han sido pavimentados con concreto hidráulico y el 86% con concreto asfáltico (Oficina de Información y Respuesta, Ministerio de Obras Públicas).

El equipo para el ensayo del módulo de resiliencia de mezclas asfálticas sigue existiendo en el país, se espera aprovechar su disponibilidad para ejecutar controles de calidad más completos, tomando en cuenta la densificación y el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas puestas en obras, de una manera más económica y viable.

Al mejorar el control de calidad de una obra se garantiza su desempeño en el tiempo para el cual fue diseñada, representando una reducción en los gastos para el dueño de la obra. Al reducir el costo del control de calidad de la obra, al mismo tiempo, se contribuye a reducir el costo de la misma sin sacrificar la calidad de la obra y sin reducir el control que se tiene sobre ella, por lo que con este estudio se pretende evaluar el uso del módulo resiliente como una alternativa que sea capaz de lograr lo anteriormente planteado sin la dificultad de los costos y la poca practicidad, obteniendo resultados rápidos para el control de calidad en campo los cuales sirvan para conocer el comportamiento que pueda desarrollar la mezcla asfáltica puesta en obra.

1.6. Antecedentes

1.6.1. Diseño de las mezclas asfálticas en el tiempo.

A continuación se muestra la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente (Acosta Vera, 2014).

1. The Hubbard-Field (1920): fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba la estabilidad como prueba para medir la deformación y funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas.
2. Método Marshall (1930): este fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial por el Ingeniero Bruce Marshall y después fue adaptado para su uso en carreteras en 1940. Emplea un análisis de densidad-vacíos y estabilidad-fluencia como pruebas fundamentalmente para obtener un contenido óptimo de asfalto según la combinación de agregados a utilizar. La mayor virtud del método es la importancia que le asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico. Este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla durable. Desafortunadamente una de sus grandes desventajas es el método de compactación de laboratorio por impacto el cual no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo tránsito en un pavimento real. Actualmente es el método de uso común en muchos países, incluido El Salvador².
3. Método Hveem (1930): fue desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall y, similar a este último, también implica análisis de densidad y estabilidad, además de la resistencia de la mezcla al hinchamiento por presencia de agua. El método Hveem presenta dos ventajas concretas: el método de compactación por amasado y el parámetro de resistencia-estabilidad. La desventaja del procedimiento Hveem reside en que el equipo de ensayo, en particular el compactador por amasado y el estabilómetro de Hveem, es más caro que el equipamiento del Marshall y no muy portable.

² (Oficina de Información y Respuesta del Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Viviendo y Desarrollo Urbano [OIR], 2016)

Además, algunas propiedades volumétricas relacionadas con la durabilidad de la mezcla no son rutinariamente determinadas en el método, tomando en cuenta también que el método de selección del contenido de asfalto es demasiado subjetivo y podría resultar en una mezcla poco durable y un contenido óptimo de asfalto muy bajo.

4. Método de la WASHTO (1984): este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia a las roderas (deformación acumulada).
5. Método AAMAS (1987): este incluyó un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia de grietas a baja temperatura.
6. Método SUPERPAVE (1993): el método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas por medio del método SUPERPAVE es actualmente implementado en gran parte de los Estados Unidos de Norteamérica, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento.

1.6.2. Reseña histórica del módulo de resiliencia en mezclas asfálticas.

Los materiales utilizados para carreteras se encuentran sometidos a cargas de tipo dinámico de diversas magnitudes. Para tomar en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales de la estructura del pavimento, diversas investigaciones experimentales han sido llevadas a cabo dentro de los métodos de diseño mencionados anteriormente.

Hay dos tipos de deformaciones en los materiales que conforman el pavimento: la deformación resiliente o elástica, la cual es recuperable instantáneamente, y la deformación plástica, que permanece en el pavimento una vez ha cesado la acción de las cargas. Al tenerse

cargas móviles en el pavimento, las deformaciones permanentes se van acumulando, reduciéndose en cada ciclo, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La mezcla llega así a un estado tal en que posee un comportamiento resiliente. El primero en reconocer la importancia de las propiedades resilientes de las estructuras de pavimento fue Francis Hveem durante la década de los cincuenta, efectuando la identificación de estas propiedades con la aparición de grietas sobre la superficie de los pavimentos, siendo éstas por la influencia de las cargas repetidas como el resultado del tráfico de los vehículos. Hveem desarrolló una prueba triaxial de carga cíclica o repetida, no obstante, no ha sido el único ensayo de este tipo.

1.6.3. Reseña histórica del módulo dinámico en mezclas asfálticas.

Las agencias de transporte en Estados Unidos han utilizado principalmente la guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento y, según la FHWA, un 80% de éstas utilizaba las versiones de 1972, 1986 o 1993, las cuales se encontraban basadas en la ecuación resultante del comportamiento de la pista de pruebas de la AASHTO hasta 1950, encontrándose las siguientes limitantes:

- La pista de pruebas no consideró tramos ni procedimientos de rehabilitación de pavimentos y fueron realizados en un solo lugar, lo cual dio lugar a problemas para predecir el comportamiento bajo condiciones ambientales distintas.
- El tramo de prueba consideró un solo tipo de subsuelo y utilizó bases granulares no estabilizadas. Actualmente, se ha demostrado la importancia de utilizar diferentes tipos de bases tratadas o reforzadas en subsuelos de baja capacidad de soporte.
- El peso y geometría de los vehículos, las presiones de inflado de las llantas y el volumen de tráfico se han incrementado sustancialmente en las últimas décadas.
- El diseño se evaluó en función del espesor que conformaban las distintas capas del pavimento. Actualmente la aplicación de la teoría elástica, permite que en el diseño se evalúe y se determine la influencia de cada una de las distintas capas o elementos estructurales que componen el pavimento.

Con la aparición del método empírico mecanicista en la AASHTO 2002, se abandona el uso de ecuaciones de regresión para el diseño de pavimentos recomendándose la aplicación

de la teoría elástica, modelando el pavimento mediante múltiples capas horizontales, homogéneas, con comportamiento elástico en el caso de la sub-rasante y bases granulares mientras que considera un comportamiento visco-elástico en los materiales asfálticos, siendo la principal diferencia entre el módulo de resiliencia (que considera el material asfáltico como elástico) y el módulo dinámico de este método. En El Salvador se ha avanzado al uso del módulo dinámico para el diseño de pavimentos, sobre todo en los espesores de las carpetas asfálticas. Sin embargo aún se emplea el método AASHTO 1993 como base para el diseño de espesores y rehabilitación de pavimentos, aunque se suele utilizar un módulo de mezcla aproximado de 400000 psi, en lugar de un módulo medido o calculado para cada mezcla asfálticas a utilizar en el diseño (OIR, 2016).

Capítulo II: Marco teórico conceptual

2.1. Generalidades sobre mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas asumen un papel fundamental en los pavimentos flexibles no sólo por los volúmenes requeridos en su construcción, sino porque constituyen la parte más costosa de los mismos: la “fachada” que los usuarios observan cotidianamente y la superficie por la que transitan diariamente los millones de vehículos, que resuelven gran parte de las necesidades de movilidad en las sociedades humanas contemporáneas (Cepeda, 2002).

La mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados pétreos, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el comportamiento funcional de la misma como parte de un pavimento (Cepeda, 2002).

2.1.1. Componentes de las mezclas asfálticas.

2.1.1.1. *Asfalto.*

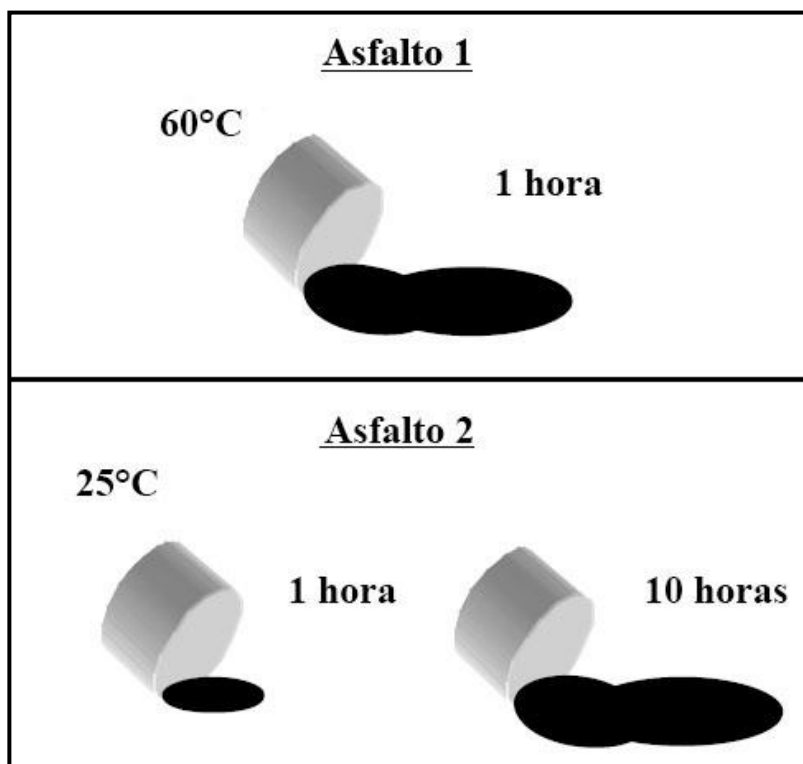
El asfalto es una mezcla compleja de hidrocarburos que puede presentarse en forma de cuerpo semisólido o sólido, a temperatura ambiente, viscoso más o menos elástico, no cristalino y de color negro. Puede ser obtenido de forma natural o como producto de la destilación del petróleo.

Dadas sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, tiene gran variedad de aplicaciones en la construcción de pavimentos flexibles como por ejemplo, mezclas asfálticas, bases estabilizadas, riegos de sello, emulsiones asfálticas, asfaltos diluidos (o cutback), riegos de liga, riegos de imprimación, entre otros.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso que puede adherirse fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cementante para unir las partículas de agregado en una carpeta de rodadura asfáltica. El asfalto es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico.

Las propiedades del asfalto dependen, en gran medida, de la temperatura (**Figura 2.1**). A altas temperaturas se produce un mayor envejecimiento del asfalto, el cual tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas de

agregado. Este fenómeno ocurre debido a que, con las altas temperaturas, la parte soluble del asfalto (maltenos) disminuye su concentración permitiendo que la parte insoluble o sólida (asfaltenos) prevalezca y condicione el asfalto volviéndolo más rígido (Thenoux, 1988).



*Figura 2.1. Comportamiento del asfalto según la temperatura y el tiempo.
Fuente: (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).*

2.1.1.2. Agregados pétreos.

Los agregados para elaborar la mezcla asfáltica pueden ser naturales, triturados o sintéticos. Los naturales se extraen de depósitos fluviales y son utilizados sin ningún procesamiento para elaborar la mezcla asfáltica. Los agregados triturados se explotan en canteras y son reducidos a los tamaños deseados mediante trituración mecánica; mientras que el agregado sintético es un subproducto industrial, como la escoria de altos hornos. Independientemente de la fuente y los métodos de procesamiento o mineralogía se espera que el agregado provea a la mezcla, un fuerte esqueleto pétreo para resistir aplicaciones de carga repetidas.

Las características más importantes que se deben tomar en cuenta al evaluar el material pétreo, son las siguientes: granulometría, dureza, forma de la partícula y adherencia con el asfalto. (Bustamante, 2002)

Los agregados redondeados y lisos presentan facilidad para comprimirse y acomodarse entre sí sin embargo, al aplicar carga a la masa, puede generarse dentro de ella un plano por el que las partículas se deslicen o cizallen unas respecto de las otras (**Figura 2.2**) lo cual resulta en una deformación permanente. Por otra parte los agregados angulares y rugosos, si bien son más difíciles de acomodar, tienden a generar mayor trabazón entre partículas, resultando una masa más resistente y estable. Una mezcla asfáltica se comporta como un material de alta cohesión (debido al asfalto) y de alto ángulo de fricción interna (brindado por la trabazón entre las partículas de agregados).

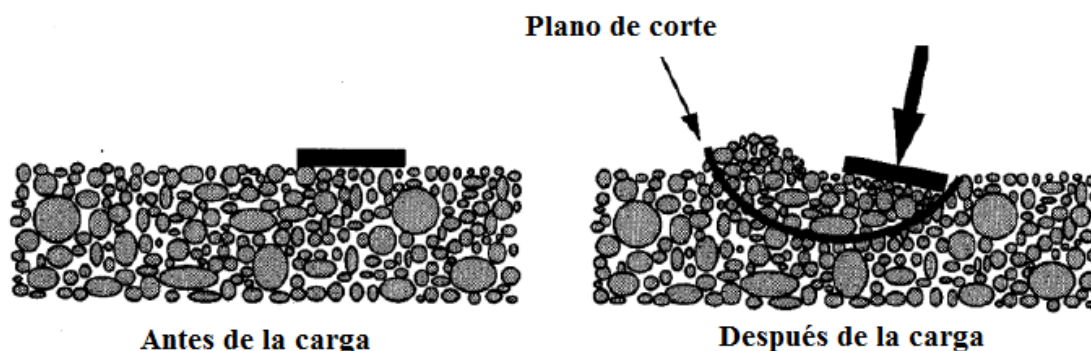


Figura 2.2. Comportamiento del agregado sometido a cargas de corte.

Fuente: (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

2.1.2. Clasificación.

Las mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo a diferentes parámetros, entre ellos (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012):

2.1.2.1. Mezclas asfálticas según el agregado pétreo utilizado.

- **Masilla asfáltica:** Polvo mineral más el ligante.
- **Mortero asfáltico o lechada:** Agregado fino más masilla.
- **Concreto asfáltico:** Agregado grueso más mortero.

2.1.2.2. Mezclas asfálticas según la temperatura.

- **Mezclas Asfálticas en Caliente:** son fabricadas con asfaltos a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

- **Mezclas asfálticas en frío:** el ligante es una emulsión asfáltica (aunque en algunos lugares se usan los asfaltos fluidificados) y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

2.1.2.3. Mezclas asfálticas según el contenido de vacío.

Este aspecto es de importancia fundamental para que no aparezcan deformaciones plásticas con el paso de las cargas y por las variaciones térmicas.

- **Mezclas cerradas o densas:** Con una proporción de vacíos no mayor al 6 %.
- **Mezclas semi-cerradas o semi-densas:** La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- **Mezclas abiertas:** Con una proporción de vacíos mayor de 12 %.
- **Mezclas porosas o drenantes:** Con una proporción de vacíos superior al 20 %.

2.1.2.4. Mezclas asfálticas según tamaño máximo del agregado pétreo.

- **Mezclas gruesas:** el tamaño máximo del agregado es mayor a 10 mm.
- **Mezclas finas:** son microaglomerados o morteros asfálticos; éstas son mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que se extiende la mezcla (del doble al triple del tamaño máximo).

2.1.2.5. Mezclas asfálticas según la estructura del agregado pétreo.

- **Mezclas con esqueleto mineral:** están provistas de un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable.
- **Mezclas sin esqueleto mineral:** no poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.

2.1.2.6. Mezclas asfálticas según la granulometría.

- **Mezclas Continuas:** poseen una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- **Mezclas Discontinuas:** poseen una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

2.1.3. Características de las mezclas asfálticas.

La mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así,

características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Entre estas características principales tenemos las siguientes:

2.1.3.1. Densidad.

Se define como el peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. Es una característica importante para obtener un rendimiento duradero ya que, si la densidad es baja se tienen muchos vacíos por lo que la mezcla compactada será vulnerable al agua. La densidad obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad de la carpeta asfáltica compactada en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo que las especificaciones deben permitir un porcentaje aceptable (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

2.1.3.2. Vacíos de aire (Va).

Están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire. Es de mucha importancia que las mezclas asfálticas contengan un determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debida al tráfico, minimizando la expulsión o desplazamiento del asfalto fuera de la mezcla hacia la superficie, fenómeno conocido como exudación del asfalto (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

Los vacíos de aire también influyen en la permeabilidad de la mezcla. Un alto contenido de vacíos genera una mayor permeabilidad; permitiendo el paso excesivo de agua y aire a través de la mezcla lo cual provoca un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica. Los vacíos de aire, junto con la densidad, suelen ser utilizados como indicadores del grado de compactación logrado en la mezcla.

2.1.3.3. Vacíos en el agregado mineral (VMA).

Son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en la mezcla compactada, es decir el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

2.1.3.4. Contenido de asfalto.

Esta característica es establecida usando los criterios descritos por el método de diseño de mezcla seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de la mezcla, depende en gran medida

de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

Técnicamente se pueden identificar dos tipos de asfalto en la mezcla, estos son:

- **Contenido total de asfalto:** es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla, incluyendo asfalto efectivo y absorbido, para producir las propiedades deseadas en el desempeño de la misma.
- **Contenido efectivo de asfalto:** es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva que cubre la superficie de todo el agregado.

2.1.3.5. Vacíos llenos de asfalto (VFA).

Son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

En la **Figura 2.3**, se presenta un esquema denominado “diagrama de fases de la mezcla compactada”. En este diagrama se presentan las características importantes de la mezcla en términos de volumen y masa, con lo cual se facilita el cálculo empírico de cada una de ellas. En la **Figura 2.4**, es posible visualizar la distribución del asfalto entre el agregado pétreo de una mezcla, además se distingue los diferentes poros que se presentan.

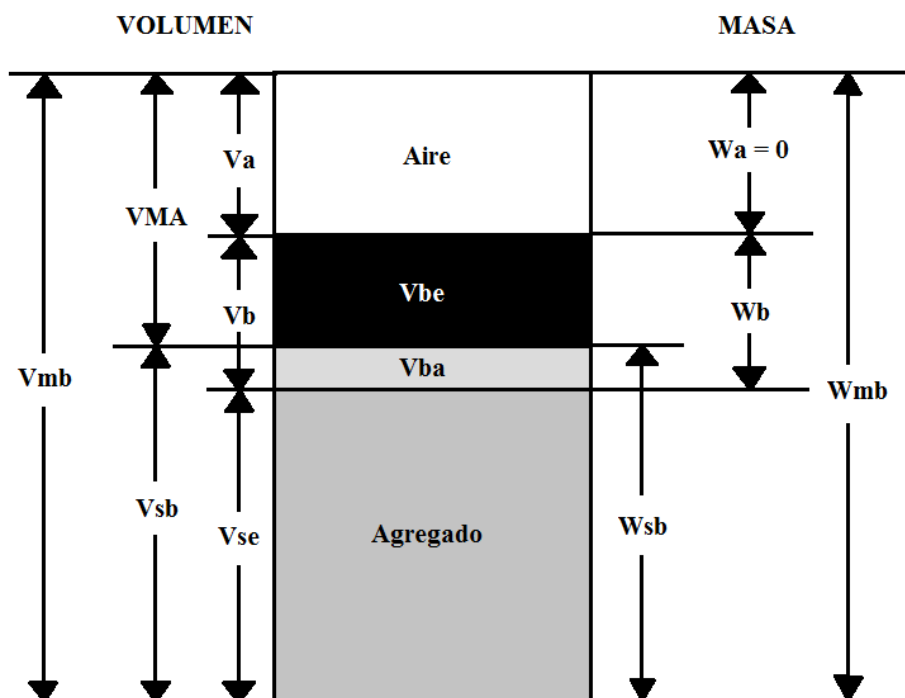


Figura 2.3. Diagrama de fases de la mezcla compactada
Fuente: Elaboración propia.

De la **Figura 2.3** se pueden observar los siguientes términos:

V_{mb} = volumen total de la mezcla compactada;

VMA=volumen de vacíos en el agregado mineral;

V_{sb} = volumen total del agregado;

V_{se} = volumen efectivo de agregado;

V_{be} = volumen efectivo de asfalto;

V_{ba} = volumen de asfalto absorbido;

V_a = volumen de aire;

V_b = volumen total de asfalto en la mezcla;

W_{mb} = masa total de la mezcla compactada;

W_a = masa del aire;

W_b = masa del asfalto;

W_{sb} = masa total del agregado.

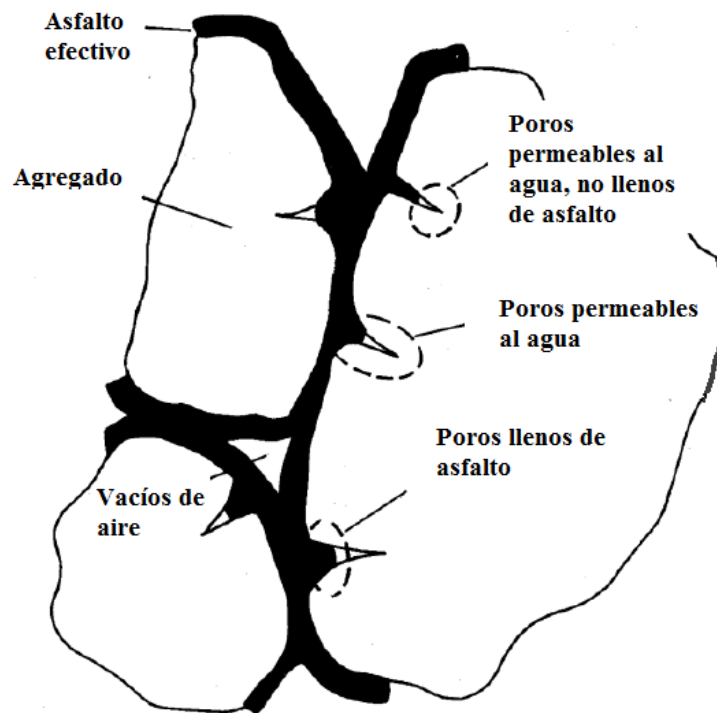


Figura 2.4. Volumen de aire, asfalto efectivo y asfalto absorbido en la mezcla compactada.

Fuente: (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005)

2.1.4. Propiedades de las mezclas asfálticas relacionadas con el comportamiento mecánico.

2.1.4.1. Flexibilidad.

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamientos, soportando los movimientos graduales y asentamientos de las capas inferiores de la estructura del pavimento. La flexibilidad puede ser incrementada agregando un mayor contenido de asfalto, hasta llegar al óptimo, a partir de este, si se aumenta en exceso el contenido del asfalto la carpeta tiende a ser demasiado flexible provocando, una mezcla con estabilidad baja. Generalmente los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

2.1.4.2. Resistencia a la fatiga.

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la flexión repetida causada por las cargas de tránsito. La resistencia a la fatiga de la mezcla, depende en gran medida del contenido de vacíos y de la viscosidad del asfalto utilizado. Si el porcentaje de vacíos de la carpeta asfáltica aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

Tabla 2.1

Causas y efectos de la deficiente resistencia a la fatiga en la carpeta asfáltica.

MALA RESISTENCIA A LA FATIGA	
Causas	Efectos en la carpeta
Bajo contenido de asfalto.	Agrietamiento por fatiga.
Alto contenido de vacíos en el diseño.	Envejecimiento temprano del asfalto.
Falta de compactación.	Envejecimiento temprano del asfalto.
Espesor inadecuado de pavimento.	Demasiada flexión seguida por agrietamiento.

Fuente: (Camargo Moreno & González Pérez, 2007)

2.2. Generalidades del método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas.

El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva

investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5"), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto- agregado. Los dos aspectos principales del método Marshall son el análisis densidad- vacíos y la prueba de estabilidad-flujo de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012). La **Tabla 2.2** presenta los criterios del diseño Marshall, si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla 2.2
Criterios para diseño Marshall.

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Compactación, # de golpes en cada cara del espécimen.	35	35	50	50	75	75
Estabilidad (N) (lb)	3336		5338		8006	
	750		1200		1800	
Flujo, (0.25mm ó 0.01in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos (Va)						
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)	Ver Tabla 2.3.					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: (Empresa Constructora [ECON], 2016).

Tabla 2.3
Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral para diseño.

Tamaño máximo del agregado		VMA MÍNIMO (%)		
		Vacíos de diseño (%)		
Mm	In	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8"	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2"	13.0	14.0	15.0
19.0	3/4"	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50.0	2.0	9.5	10.5	11.5
63.0	2.5	9.0	10.0	11.0

Fuente: (ECON, 2016)

Tabla 2.4.***Ventajas y desventajas del método Marshall.***

Ventajas	Desventajas
Presta atención a los vacíos de aire, estabilidad y durabilidad de la mezcla.	La compactación se realiza por medio de impacto.
Los equipos para el método no son costosos.	No considera esfuerzos de corte.
Comprende un fácil uso en el proceso de control	La carga es perpendicular al eje de impacto.

Fuente: (Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval, *Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*, 2005)

2.2.1. Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas.

En el método Marshall se elaboran tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

- 1) **Determinación de la Gravedad Específica:** la prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se hace de acuerdo con la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando parafina; o la ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas mediante superficies saturadas de especímenes secos. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizan pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se recurre a la norma ASTM D1188; en caso contrario, se emplea la norma ASTM D2726 (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).
- 2) **Prueba de Estabilidad y Flujo:** después de que la gravedad específica se ha determinado, se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Con el equipo de prueba listo se remueve el espécimen colocado en baño María y cuidadosamente se seca la superficie. Ubicando y centrando el espécimen en la mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga. Posteriormente, se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51 mm (5”) por minuto, hasta la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall. Mientras la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático, se deberá mantener el medidor de flujo sobre

la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir se deberá tomar la lectura, y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial, expresado en unidades de 0.25 mm (1/100”), será el valor del flujo Marshall (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

- 3) **Análisis de densidad-vacíos:** después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se lleva a cabo el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Se debe determinar la gravedad específica teórica máxima para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente los que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado, se calcula de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado, así como el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas, la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, contenido de vacíos (V_a), porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA), y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

2.3. Pavimentos.

El pavimento es definido como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados comprendidas entre el nivel superior de las terracerías y la superficie de rodadura, cuyas principales funciones son las de: proporcionar una superficie de rodadura uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, intemperismo y otros agentes perjudiciales, así como transmitir adecuadamente a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito. En otras palabras, el pavimento es la superestructura de la obra vial, que hace posible el tránsito expedito de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía previstos en el proyecto (Leal Rocha, 2012).

De acuerdo a los materiales y la estructura que conforman los pavimentos estos pueden ser:

- **Flexibles:** conformados por carpetas de rodaduras asfálticas, colocada sobre las capas base, sub-base y subrasante.
- **Rígidos:** poseen como carpeta de rodadura losas de concreto hidráulico, ubicadas por encima de capas sub-base y la subrasante.

- **Articulados:** contruidos con adoquines u otros elementos estructurales, colocados sobre el terreno natural estabilizado o sobre bases compactadas.
- **Mixtos:** principalmente combinan losas de concreto hidráulico con mezcla asfáltica.

2.3.1. Funciones y características de los pavimentos flexibles.

Los pavimentos flexibles o asfálticos cumplen con dos funciones específicas:

- Proporcionar una superficie segura y de comodidad para el usuario.
- Soportar y distribuir las cargas de los vehículos, mediante las capas que conforman su estructura, minimizando tanto los esfuerzos como las deformaciones que pueda experimentar la subrasante.

Además de estas dos funciones específicas, los pavimentos flexibles cumplen con otras características, que se pueden dividir en técnicas (propias del pavimento) y de seguridad y comodidad para el usuario de la vía.

- **Características técnicas:** son todas aquellas que hacen que los pavimentos sean durables, económicos y resistentes a los fenómenos climáticos y del tránsito.
- **Características de seguridad y comodidad:** los pavimentos flexibles deben ser drenantes, es decir, evacuar rápidamente el agua lluvia. Deben presentar una homogeneidad en la superficie para que el tránsito sea cómodo además, debe ser capaz de absorber el ruido excesivo y tener el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos.

2.3.2. Componentes de la estructura de los pavimentos flexibles.

La estructura de los pavimentos flexibles se muestra en la **Figura 2.5**. En orden descendente, la estructura está conformada por una carpeta de rodadura elaborada con mezcla asfáltica, colocada sobre una capa base y una capa sub-base. Este arreglo de capas es la estructura principal del pavimento, el cual protege el terreno natural o de terraplén, denominado capa subrasante.

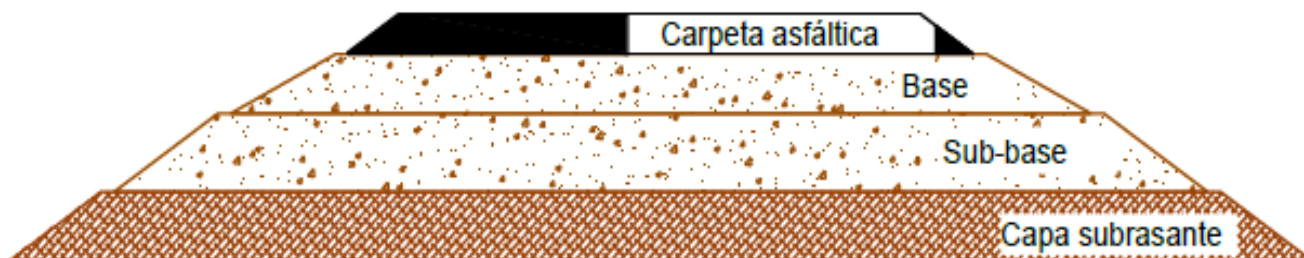


Figura 2.5. Estructura de un pavimento flexible.

Fuente: (Leal Rocha, 2012).

2.3.2.1. Carpeta de rodadura.

Proporciona una superficie estable, uniforme y antideslizante, todo lo cual se traduce en comodidad para el usuario de la vía. Soporta la mayor parte de las cargas vehiculares y efectos ambientales como la lluvia y la radiación solar, además de que funciona como capa impermeabilizante, impidiendo el paso de agua al interior del pavimento, al mismo tiempo que la drena evitando el deslizamiento de los vehículos (Leal Rocha, 2012).

2.3.2.2. Base.

Su función principal es resistir los esfuerzos inducidos por los vehículos y dar un soporte homogéneo a la carpeta de rodadura, transmitiendo a las capas inferiores que las soportan (sub-base y subrasante) una mínima porción de la carga. Es una capa semirrígida, que puede ser granular, granular estabilizada o asfáltica (Leal Rocha, 2012).

2.3.2.3. Sub-base.

Se construye con materiales más económicos que las capas superiores, debido a que debe soportar y distribuir cargas menores. Esta capa funciona como factor economizante del pavimento, además de que homogeniza la transferencia de carga a la subrasante (Leal Rocha, 2012).

2.3.2.4. Subrasante.

La subrasante es la capa que soporta, y que al mismo tiempo es protegida por, el pavimento. Las técnicas de mejoramiento o estabilización del suelo buscan mejorar las características del terreno, pues de estas depende, en gran medida, el espesor total del pavimento. Un suelo se puede mejorar o estabilizar por medios mecánicos (compactación) o con productos químicos especialmente diseñados para tal fin (cal, cemento, entre otros) (Leal Rocha, 2012).

2.3.3. Ventajas de los pavimentos flexibles.

- El costo de construcción es menor que en el pavimento rígido y con las nuevas tecnologías, los pavimentos flexibles requieren un mantenimiento mínimo.
- Por su color oscuro, evita reflejos y deslumbramientos causantes de accidentes.
- Es reciclable en un su totalidad, lo que trae importantes ventajas ambientales, ecológicas y económicas.
- El tiempo de restauración de una vía en concreto hidráulico puede tardar días, en mezcla asfáltica apenas unas pocas horas.
- La contaminación auditiva por el paso de los vehículos, es nueve decibeles menor si el vehículo rueda sobre una superficie de concreto asfáltico respecto al concreto hidráulico, esto equivale a 4 veces menos ruido.
- Ofrece gran suavidad durante el desplazamiento, lo que permite optimizar el consumo de combustible de los vehículos.

2.3.4. Comportamiento de los pavimentos ante la aplicación de cargas.

El comportamiento que exhiben los pavimentos flexibles y rígidos al aplicarles una carga es muy diferente, según se aprecia en la **Figura 2.6**. En un pavimento rígido, debido a la consistencia de la superficie de rodadura, se produce una buena distribución de las cargas, dando como resultado esfuerzos bajos en la subrasante. Lo contrario sucede en un pavimento flexible, la superficie de rodadura al tener menos rigidez, se deforma más y se producen mayores esfuerzos en la subrasante. De la **Figura 2.6** es posible notar una diferencia clave en cuanto a la distribución de esfuerzos de los pavimentos. En un pavimento flexible, todas las capas que lo conforman cumplen una función estructural y la carpeta de rodadura puede acomodarse a las deformaciones de una forma más dúctil que el concreto hidráulico, pero en un pavimento rígido la función estructural es atribuible casi por completo a la losa de concreto, la cual no permite grandes deformaciones en sí, volviéndola susceptible a las fracturas del tipo frágil.

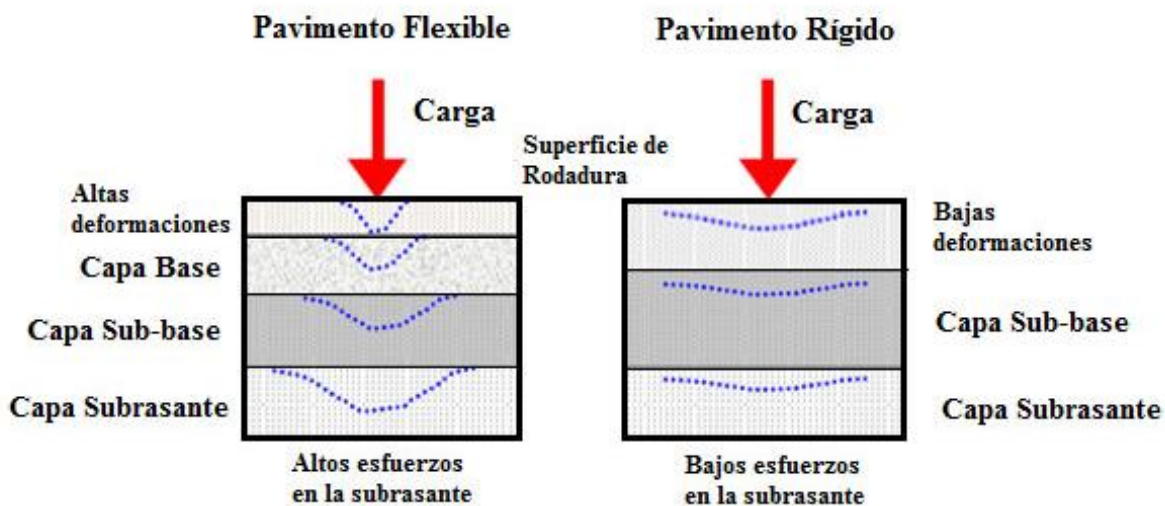


Figura 2.6. Comportamiento de los pavimentos flexibles y rígidos ante una carga.
Fuente: (Secretaría de Integración Económica Centroamericana [SIECA], 2002)

2.4. Comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas son consideradas como materiales visco-elástico. Por un lado la componente elástica permite que el material recupere parte de la condición inicial, mientras que la componente viscosa disipará parte de la energía produciendo una deformación irreversible o permanente.

La cohesión interna que poseen todos los materiales promueve resistencia ante las sollicitaciones de carga. El módulo de rigidez representa el grado de cohesión de un material, por consiguiente, es un indicador de su resistencia. Generalmente, los materiales regidos por un comportamiento elástico presentan una cohesión intermolecular estable, bajo condiciones térmicas y de carga normales. En estos casos, el comportamiento mecánico es representado correctamente por el módulo de elasticidad. Por otro lado, en los materiales visco-elásticos, dichas condiciones inciden notablemente en el grado de cohesión interna de las partículas. El estudio de la reología de los materiales visco-elásticos permite definir una relación entre el esfuerzo y la deformación bajo las diversas condiciones de temperatura y periodo de carga (Carter & Perraton, 2002).

Las fallas que ocurren en los pavimentos flexibles o asfálticos se clasifican en tres tipos:

- Deformación permanente.

- Agrietamiento térmico.
- Fisuración por fatiga.

Al respecto, se puede asumir que la deformación permanente y el agrietamiento térmico están orientados a una selección de materiales adecuados y a procedimientos de diseño de mezcla [(Gómez Achezar & Thompson, 1984); (Thomson, 1996) y (Thompson & Carpenter, 2004)]. Luego, el parámetro crítico para el diseño estructural es la deformación horizontal por tracción, la cual está asociada a la fatiga. De esta forma, mientras menor sea esta deformación, mayor será la vida de la estructura a la fatiga. La fisuración por fatiga se caracteriza porque no se generan tensiones superiores a la resistencia máxima del material a la rotura por tracción en su fibra inferior, sino más bien se produce una microfisuración inicial, y consecuente el deterioro va progresando hasta que finalmente se produce el fallo por fatiga del pavimento.

Los métodos de diseño estructural consideran el pavimento como un sistema multicapa elástico lineal, en el cual los materiales se caracterizan por su módulo de rigidez, o módulo de elasticidad, y por su razón de Poisson (Shell International Petroleum Company [Shell], 1978).

El módulo de elasticidad es uno de los parámetros fundamentales en el diseño estructural de pavimentos y se utiliza para calcular las tensiones y deformaciones que se producen en cada una de las capas (Ullidz, 1987). El valor de módulo puede obtenerse a través de ensayos de laboratorio a probetas y también midiendo directamente en terreno, mediante equipos especializados o instrumentación. Sin embargo, los valores obtenidos mediante estos métodos no siempre son comprables entre sí. Por otro lado otros métodos de diseño, como el Método Shell, estiman el valor de módulo de rigidez de la mezcla asfáltica a través de varias

gráficas, considerando las características del cemento asfáltico utilizado y de las propiedades volumétricas de la mezcla.

Para las mezclas asfálticas fabricadas en caliente, la determinación del módulo de rigidez presenta una serie de complicaciones ya que éste valor depende de una serie de parámetros, entre los cuales se encuentran la temperatura, la velocidad y la magnitud de la carga aplicada.

La elección del tipo de ensayo para determinar las características de una mezcla asfáltica, que sirvan para el diseño de pavimentos, resulta de un balance entre precisión obtenida con el mismo y la factibilidad de su empleo, con el fin de obtener un modelo tan representativo como sea posible del comportamiento en campo del pavimento; pero a la vez de fácil aplicación considerando la disponibilidad de tiempo, recursos económicos y equipamiento.

Los valores típicos de diseño de una mezcla, tales como los obtenidos con los ensayos Marshall o Hveem, tienen una pobre correlación con las propiedades comúnmente requeridas para evaluar el fallo y el comportamiento de una mezcla asfáltica colocada en campo, que suelen ser fluencia, resistencia a tracción indirecta, fatiga y deformación permanente.

Sería ideal contar con un ensayo capaz de inducir un estado de tensiones a las probetas, similar al que se produce en la capa real. La **Figura 2.7** esquematiza el estado de tensiones provocado por una carga simple en la estructura de un pavimento, donde se distinguen cuatro casos (Roque & Buttlar, 1992).

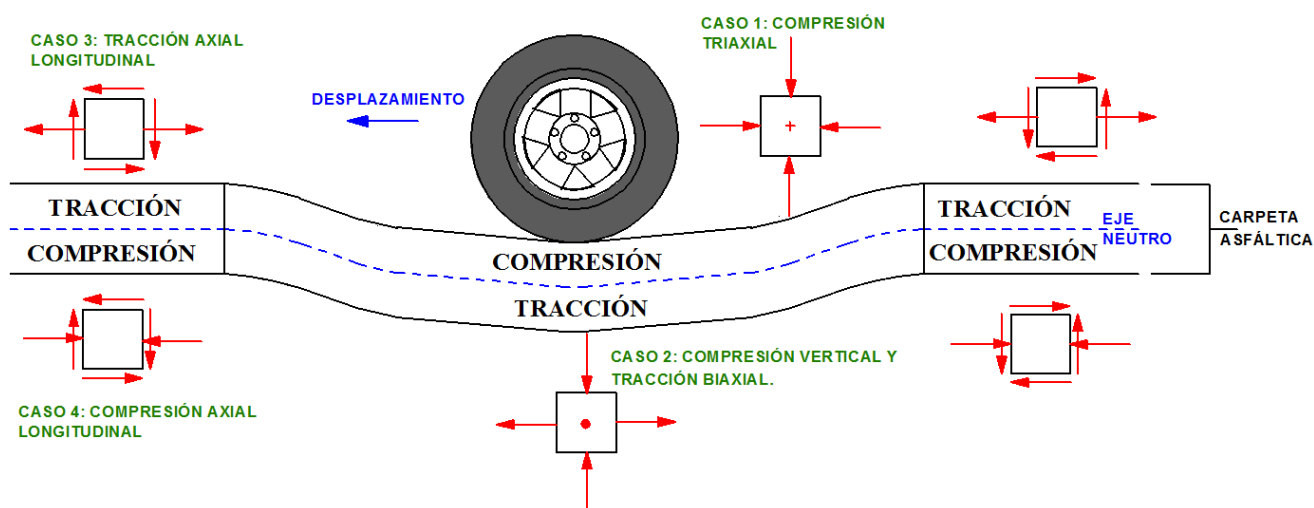
- Compresión triaxial en la superficie e inmediatamente bajo la rueda.
- Tracción longitudinal y transversal combinado con compresión vertical en la parte inferior de la capa asfáltica debajo de la rueda.
- Tracción longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.
- Compresión longitudinal o transversal en el fondo de la capa asfáltica a una cierta distancia de la carga.

Existen ensayos que representan alguno de estos cuatro estados, pero no hay uno que reúna todos. Sin embargo, tampoco es necesario analizar todas las situaciones, pues la

experiencia ya ha determinado que la zona más crítica de tensiones se produce en la fibra inferior de la capa asfáltica, bajo la carga.

El ensayo de tracción indirecta con carga repetida (módulo resiliente) reproduce este estado de tensión crítica para una mezcla asfáltica y permite determinar las características necesarias para conocer el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas compactadas a diferentes temperaturas.

La **Figura 2.7**, también permite visualizar que justo por debajo del punto donde se aplica la carga, los esfuerzos cortantes son nulos y únicamente actúan esfuerzos normales. Por otra parte los esfuerzos cortantes en las zonas contiguas en donde está aplicada la carga, dependen del sentido del desplazamiento, siendo la dirección de dichos esfuerzos contrarias entre sí.



*Figura 2.7. Estado de tensiones en las carpetas asfálticas bajo una carga simple.
Fuente: Elaboración propia.*

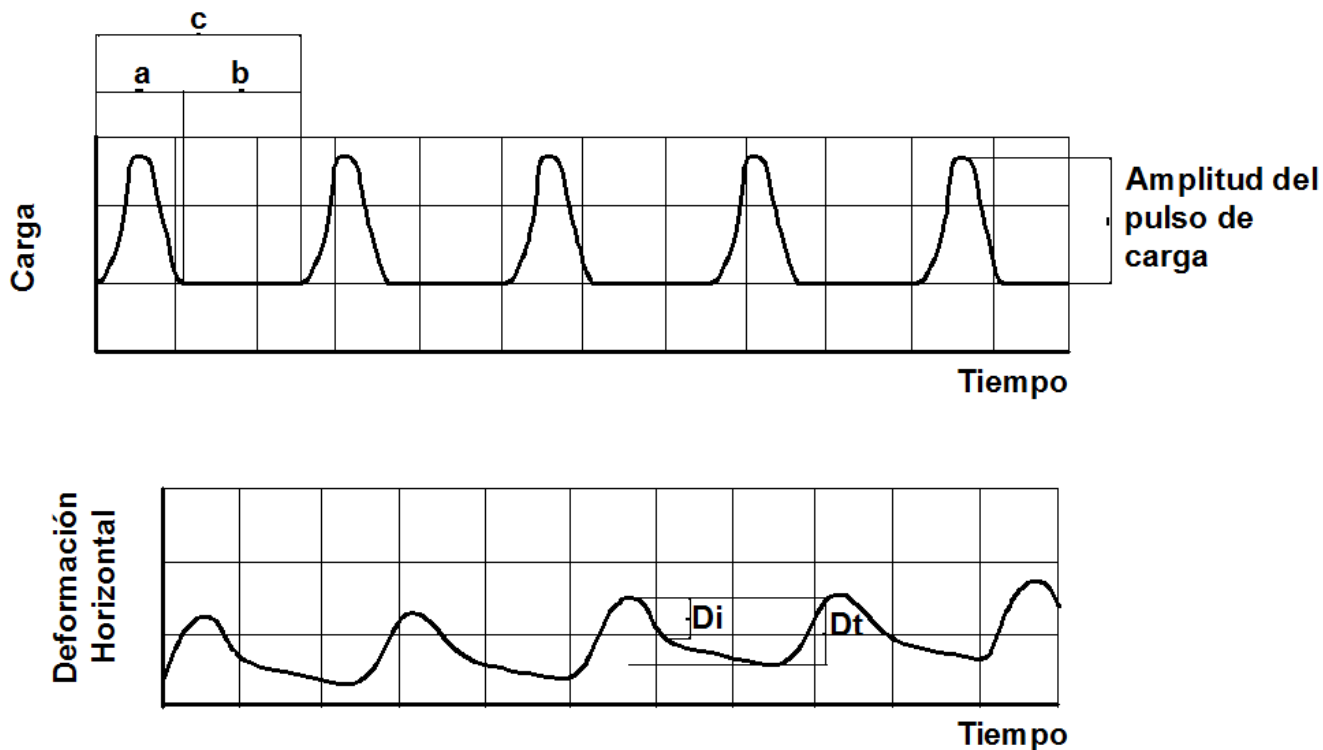
2.4.1. Módulo de resiliencia o módulo resiliente.

Al trabajar con mezclas asfálticas en pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del material puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama módulo resiliente.

En general, para la medición del módulo resiliente en laboratorio se aplica un pulso de carga haversine sobre el manto lateral de una probeta cilíndrica, y se mide la deformación axial que ésta sufre en cada ciclo de carga (**Figura 2.8**). Este pulso haversine está pensado

para replicar lo que ocurre en el pavimento: mientras una rueda del vehículo se encuentra a una distancia considerable de un punto en el pavimento, la tensión en ese punto es cero; cuando la rueda está exactamente en el punto considerado, la tensión es máxima. El tiempo de duración del pulso de carga depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad bajo la superficie del pavimento.

Existe una diferencia conceptual entre el módulo resiliente y el módulo de rigidez debido a que, para la determinación del módulo de rigidez se considera la deformación producida en el momento de aplicar la carga en cambio, en la determinación del módulo resiliente se considera la deformación recuperable luego de aplicar la carga. A este respecto, cabe mencionar que, dadas las características visco-elásticas de la mezcla asfáltica, la deformación recuperable se puede separar en dos componentes: una deformación recuperable en forma instantánea, luego de finalizar el pulso de carga y la deformación recuperable total, que se produce con un pequeño desfase luego de eliminada la carga, es decir, al terminar el período de relajación. Es por esto que en cuanto a módulo resiliente es posible hablar de módulo instantáneo y módulo total (**Figura 2.8**).



a = Duración del pulso de carga

b = Periodo de relajación

c = Duración del ciclo

Di, Dt = deformaciones resilientes instantanea y total, respectivamente

Figura 2.8. Pulso de carga "haversine" y deformaciones en mezclas asfálticas.

Fuente: Elaboración propia.

La expresión matemática del módulo resiliente está dada de la siguiente manera:

$$M_R = \frac{F*(u+0.27)}{(z*h)} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Dónde:

M_R : Módulo de Rigidez (MPa).

F: carga vertical axial aplicada (N).

u: coeficiente de Poisson.

h: altura de la probeta (mm).

z: Deformación de la probeta (mm).

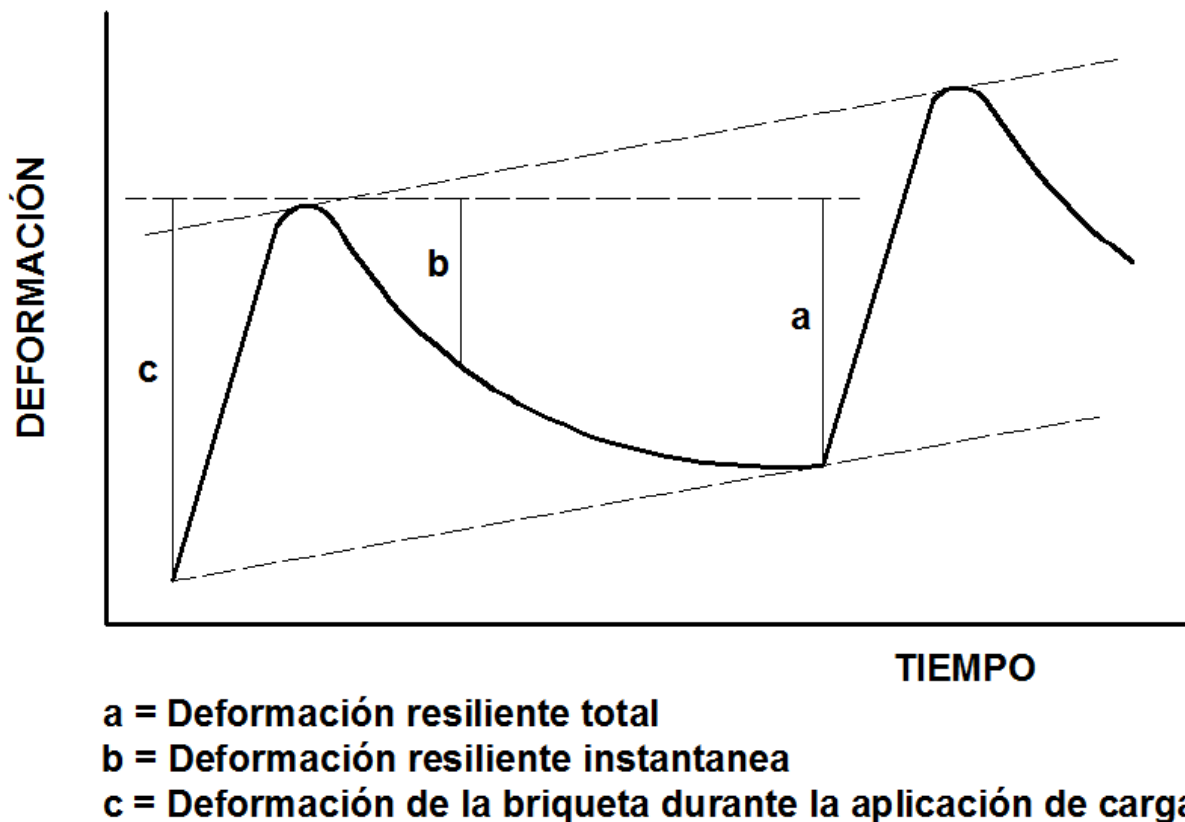


Figura 2.9. Representación gráfica de la deformación que sufre la mezcla asfáltica durante la aplicación de carga.

Fuente: Elaboración propia.

Se debe considerar que, si las cargas aplicadas son lo suficientemente pequeñas y las temperaturas de ensayo no son altas, las deformaciones producidas deben estar dentro del rango elástico, por lo cual teóricamente, la deformación producida durante la aplicación de la carga debe ser igual a la deformación recuperable, es decir, que no existe deformación permanente. En ese caso el módulo de rigidez sería igual al módulo resiliente. Cabe destacar que los métodos de medición de módulo resiliente y módulo de rigidez intentan trabajar con deformaciones elásticas, por lo que es válido asumir que en estas condiciones ambas deformaciones lo son. En el diseño y análisis de pavimentos asfálticos, el módulo resiliente suele ser utilizado como el módulo de rigidez y se basa en la deformación recuperable bajo cargas repetidas (Loulizi, AL-Qadi, Lahouar, & Freeman, 2002).

Para la determinación del módulo resiliente en mezclas asfálticas, se utiliza el método estandarizado bajo la Norma EN 12697-26 Anexo C, "Ensayo de Tracción Indirecta sobre Especímenes Cilíndricos". Esta norma es de uso común para poder determinar la rigidez de las

mezclas asfáltica. Existieron otros métodos para determinar módulo resiliente, tales como: AASHTO TP31 (2006), “Ensayo Estándar para la Determinación del Módulo Resiliente de Mezclas Asfálticas por Tensión Indirecta” y ASTM D4123-82 (1995), “Ensayo de Tracción Indirecta para el Módulo Resiliente de Mezclas Asfálticas”, los cuales eran ensayos más largos y utilizados para capas asfálticas muy gruesas sin embargo, estos han sido derogados y/o retirados.

2.4.2. Módulo dinámico.

El módulo resiliente es uno de los parámetros elásticos más utilizado en el diseño de pavimentos, pero no es el único. Este módulo evalúa un comportamiento solamente elástico del material. Es sabido que las mezclas asfálticas tienen un comportamiento visco-elástico, entonces es necesario también, considerar un parámetro visco-elástico, siendo este el principal motivo para dejar de lado un parámetro eminentemente elástico, entre otras limitaciones.

El comportamiento y consistencia del cemento asfáltico dependen de la temperatura. De este modo, a altas temperaturas se comporta como un fluido Newtoniano (viscoso), y a bajas temperaturas se comporta como un material elástico. Por otro lado, a temperaturas intermedias (comúnmente temperatura ambiente) este material presenta un comportamiento intermedio entre un fluido viscoso y un sólido elástico. Para facilitar el análisis, las mezclas asfálticas suelen ser consideradas como homogéneas, isotrópicas y lineales para ciertos rangos de esfuerzo-deformación (Naranjo Salazar & Rueda Zambrano, 2011). Esta suposición permite considerar las características y propiedades de fracciones de mezclas asfálticas, como representativas de una masa determinada de material, evitando discrepancias en el análisis de las propiedades medidas. La **Figura 2.10** muestra los diferentes rangos de comportamiento de una mezcla asfáltica, según las deformaciones y temperaturas a las cuales es sometida. En la **Figura 2.10** se visualiza que, en un amplio margen de temperaturas y bajas deformaciones, las mezclas asfálticas presentan un comportamiento visco-elástico lineal. Además, es notorio que el comportamiento de la mezcla depende de la temperatura. Para bajas temperaturas, el asfalto se comporta como un sólido elástico; razón por la cual, la mezcla hereda este comportamiento. Lo mismo ocurre a altas temperaturas, el asfalto se comporta como un fluido viscoso, proporcionado este comportamiento a la mezcla. Lo anterior demuestra que el componente que más influye en el comportamiento de la mezcla, es el asfalto.

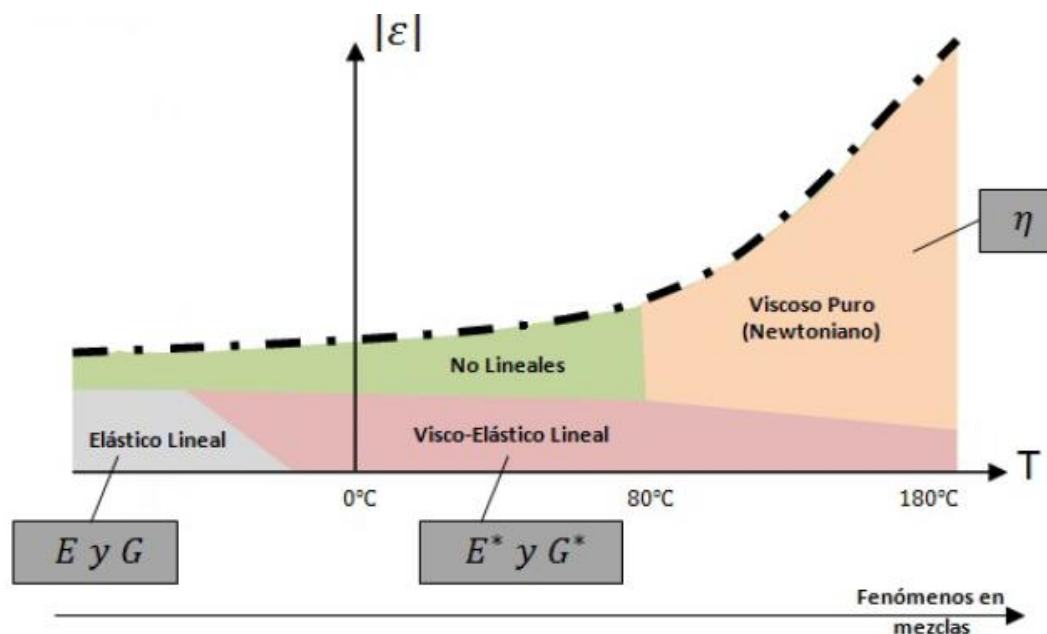


Figura 2.10. Comportamiento de la mezcla asfáltica
Fuente: (Naranjo Salazar & Rueda Zambrano, 2011)

El módulo complejo (E^*) corresponde a la relación entre el esfuerzo y la deformación para un material visco-elástico (como el asfalto), sujeto a una carga de forma sinusoidal en un tiempo “ t ”. La respuesta de un material visco-elástico lineal sometido a carga sinusoidal es también sinusoidal. Pero, debido a sus características visco-elásticas, la deformación se retrasa respecto del esfuerzo, generando un ángulo de desfase (Naranjo Salazar & Rueda Zambrano, 2011).

De esta manera, si se somete un material visco-elástico a un esfuerzo sinusoidal de amplitud (σ_0) y frecuencia (ω); la deformación tendrá una amplitud (ε_0), la misma frecuencia (ω) y un ángulo de desfase (ϕ).

La **Figura 2.11** muestra la respuesta del material visco-elástico dado el ensayo según la **Ecuación 2.2**.

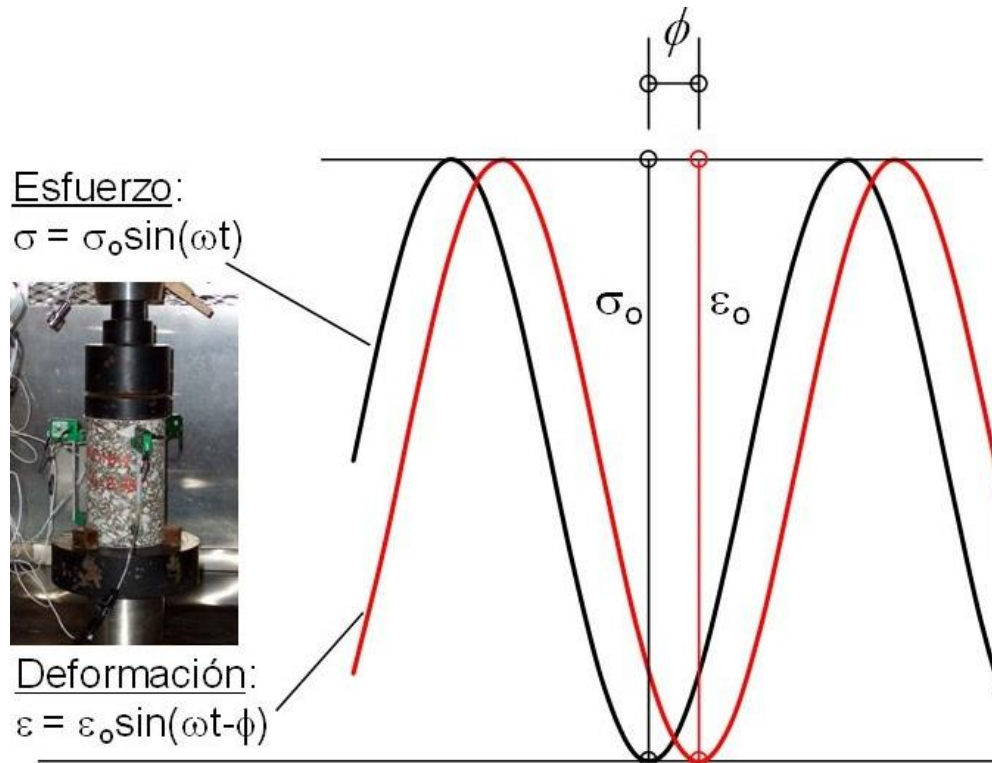


Figura 2.11. Respuesta del material visco-elástico según ensayo de módulo dinámico
Fuente: Elaboración propia.

La relación esfuerzo-deformación, que representa la rigidez del material, es en este caso el módulo complejo.

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)} \quad \text{(Ecuación 2.2)}$$

Dónde:

E^* = Módulo complejo.

σ_0 = esfuerzo pico (máximo)

ε_0 = deformación unitaria pico (máxima)

ϕ = ángulo de fase (grados)

ω = velocidad angular

t = tiempo, segundos

Matemáticamente, el módulo dinámico se define como el valor absoluto del módulo complejo:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{(Ecuación 2.3)}$$

Como se puede observar, el módulo complejo no es una función del tiempo sino que depende de la frecuencia (ω) para una temperatura determinada del material.

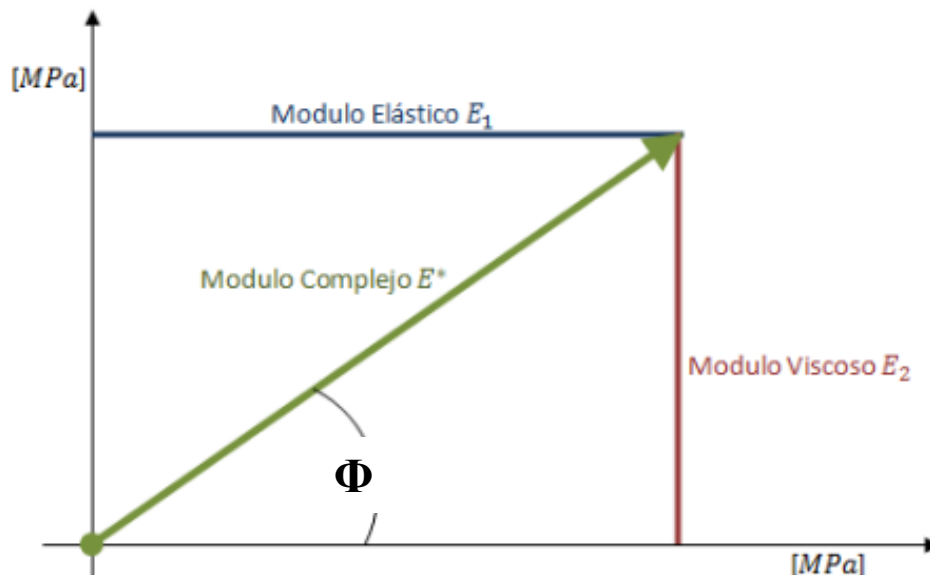


Figura 2.12. Representación gráfica del módulo dinámico
Fuente: (Naranjo Salazar & Rueda Zambrano, 2011)

De la **Figura 2.12** se aprecia que el módulo complejo está conformado por dos componentes:

- Una componente real: E_1 que corresponde a la componente elástica de la mezcla asfáltica:

$$E_1 = |E^*| \cos \varphi \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

- Una componente imaginaria: E_2 que corresponde a la componente viscosa (o plástica) del material:

$$E_2 = i|E^*| \sin \varphi \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

La componente descrita por la **Ecuación 2.4**, es a través de la cual se mide la deformación bajo el concepto de ahuellamiento o deformación permanente sin embargo, al ser considerada como como imaginaria es necesario utilizar funciones que la correlacionen con el módulo elástico.

El módulo dinámico $|E^*|$ de la mezcla es similar, en principio, al módulo complejo de corte del ligante asfáltico G^* . Ambos módulos están teóricamente relacionados por medio de la siguiente ecuación:

$$E^* = 2(1 + \mu)G^* \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Dónde:

E^* = Modulo dinámico de la mezcla.

G^* = Módulo de corte del asfalto.

μ = coeficiente de Poisson.

Para materiales puramente elásticos, el ángulo de fase es cero, y en ese caso el modulo complejo se hace igual al módulo de Young. Esto ocurre cuando los materiales asfálticos se encuentran a bajas temperaturas, y/o cuando el asfalto se encuentra envejecido. En este caso el módulo complejo alcanza su máximo valor posible. Este fenómeno condiciona la fisuración por fatiga de la mezcla asfáltica.

2.4.2.1. Curvas Maestras.

El módulo dinámico depende tanto de la temperatura de la mezcla asfáltica como de la frecuencia de la carga aplicada. Esta doble dependencia hace engorroso su manejo si no fuera porque, en realidad, ambas variables tienen un efecto equivalente sobre la rigidez: un aumento de la frecuencia es equivalente a una disminución de la temperatura y viceversa (Moreno & Soares, 2015). Esta equivalencia, recogida en el principio de superposición tiempo-temperatura, permite definir el módulo dinámico en términos de una única variable, la frecuencia reducida.

La superposición tiempo-temperatura es la base de una técnica para, sustancialmente, aumentar el rango de tiempo o frecuencia sobre el cual el comportamiento lineal puede ser determinado, mientras que para algunos puede proveer información adicional acerca de la estructura molecular. La esencia de la superposición tiempo-temperatura es que si todo el fenómeno de relajación tiene la misma dependencia con la temperatura, entonces cambiar la temperatura tendrá el mismo efecto al mover los valores horizontalmente en el eje de logaritmo de frecuencia o tiempo. Haciendo analogía a un reloj interno de la mezcla, el tiempo corre muy despacio a altas temperaturas y muy rápido a bajas temperaturas; por eso en el primer caso tiene más tiempo para deformarse que en el segundo, lo cual se interpreta como una menor rigidez (Moreno & Soares, 2015).

Las curvas maestras son muy útiles para comprender el comportamiento reológico de las mezclas. El proceso de superposición separa dos de las variables principales como lo son el tiempo (o frecuencia) y la temperatura de las cuales dependen las propiedades

viscoelásticas, expresándolos en términos de una función para cada una. La curva maestra muestra la dependencia con el tiempo del material a una temperatura constante de referencia (T_0); la dependencia con la temperatura de las propiedades viscoelásticas se muestra por la variación del factor desplazamiento con la temperatura. El principio de superposición tiempo-temperatura es aplicado sobre la frecuencia o el tiempo, por medio del factor de ajuste a_T , el cual provoca un desplazamiento horizontal en esos ejes (**Figura 2.13**), convirtiéndolas en frecuencia o tiempo reducido respectivamente. (**Ecuación 2.7**)

De esta manera es posible trazar la curva maestra de la mezcla asfáltica bajo la función sinusoidal:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta+\gamma \log f_r}} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Dónde:

$|E^*|$ = Módulo Dinámico (Mpa).

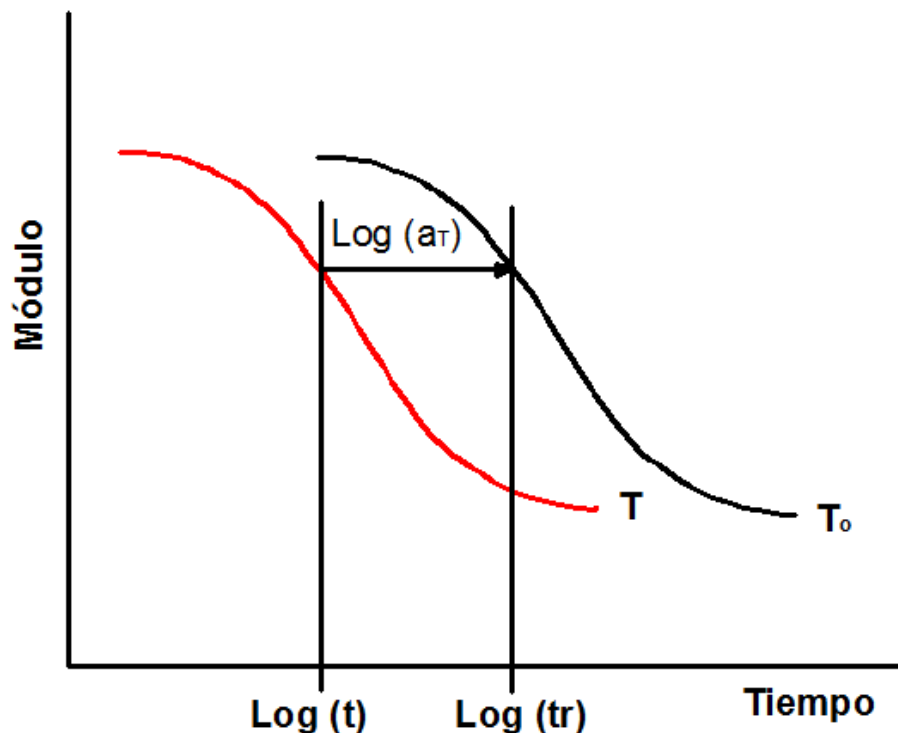
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = parámetros del modelo.

f_r o f_{red} = frecuencia reducida (Hz).

$$\log(f_{red}) = \log(f) + \log(a_T) \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

f = Frecuencia (Hz).

Log (a_T) = factor de ajuste.



T = Temperatura de ensayo
T₀ = Temperatura de referencia
t = tiempo de aplicación de carga
t_r = tiempo reducido a la temperatura de referencia
a_T = factor de ajuste (Shift factor)

Figura 2.13. Desplazamiento horizontal debido a la aplicación del factor de ajuste a curvas de módulo dinámico.

Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de los parámetros de la curva maestra tiene un significado físico (**Figura 2.14**). δ representa el módulo mínimo de la mezcla bituminosa, esto es, la asíntota inferior de la curva. $\delta + \alpha$ representa el módulo máximo, la asíntota superior. β , conocido como parámetro de localización, determina la posición horizontal del punto de inflexión de la curva sinusoidal. Finalmente, γ representa la pendiente máxima de la curva, que tiene lugar en el punto de inflexión.

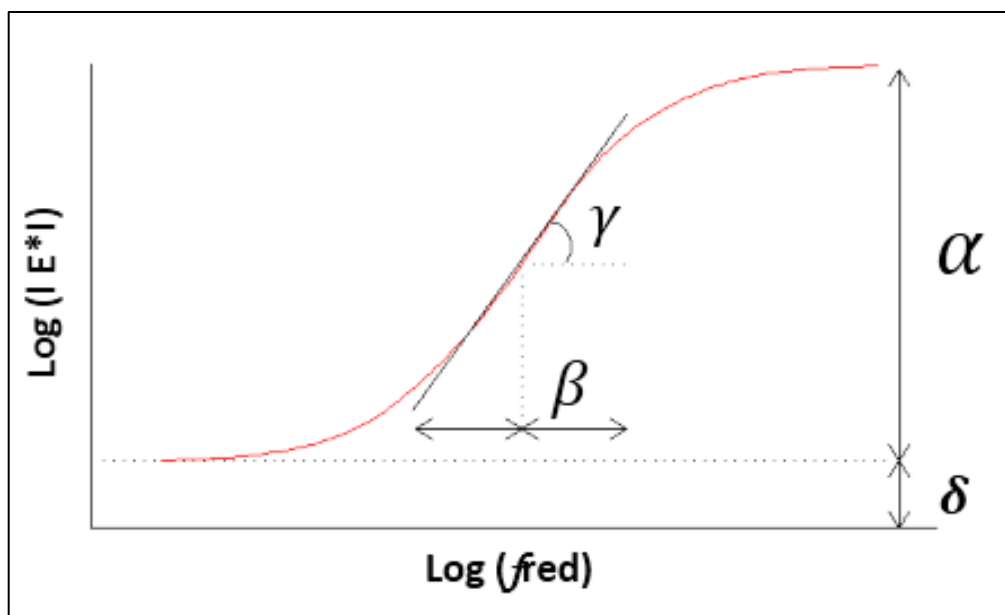


Figura 2.14. Representación gráfica de los parámetros del modelo según la Ecuación 2.6.
Fuente: Elaboración propia.

Respecto al factor $\text{Log}(a_T)$ se han propuesto diferentes expresiones algunas basadas en las fórmulas de Arrhenius y Williams-Landel-Ferry. La primera, es utilizada con la finalidad de comprobar la dependencia de la constante velocidad con respecto a la temperatura en reacciones químicas. La segunda expresión, considera la existencia de un volumen mínimo de vacíos (Meneses, 2012). Sin embargo, el modelo mayormente usado para determinar el factor de ajuste y que está incluido en la “Guía Empírico-Mecanicista para el Diseño de Pavimentos”, es la ecuación Susceptibilidad Viscosidad Temperatura (relación A-VTS) (AASHTO R 62, 2013). Según este método:

$$\log(a_T) = c(\log \eta - \log \eta_{TR}) \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Dónde:

$\text{Log}(a_T)$ = factor de ajuste.

η = viscosidad del asfalto a la temperatura de ensayo (cP).

η_{TR} = viscosidad del asfalto a la temperatura de referencia (cP).

c = constante.

La viscosidad en la ecuación anterior se determina utilizando la expresión siguiente:

$$\log \eta = 10^{(A+VTS \log(T))} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Dónde:

η = viscosidad del asfalto (cP).

A = intercepto de la regresión viscosidad-temperatura del asfalto.

VTS = pendiente de la curva de regresión viscosidad-temperatura del asfalto.

T = temperatura de ensayo (R)

Otro método, también presentado en la norma AASTHO R 62, es el polinomio de segundo orden el cual establece que:

$$\log(a_T) = a_1(T_R - T) + a_2(T_R - T)^2 \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Dónde:

Log (a_T) = factor de ajuste.

a_1 y a_2 = constantes del método.

T_R = temperatura de referencia (°C)

T = temperatura de ensayo (°C)

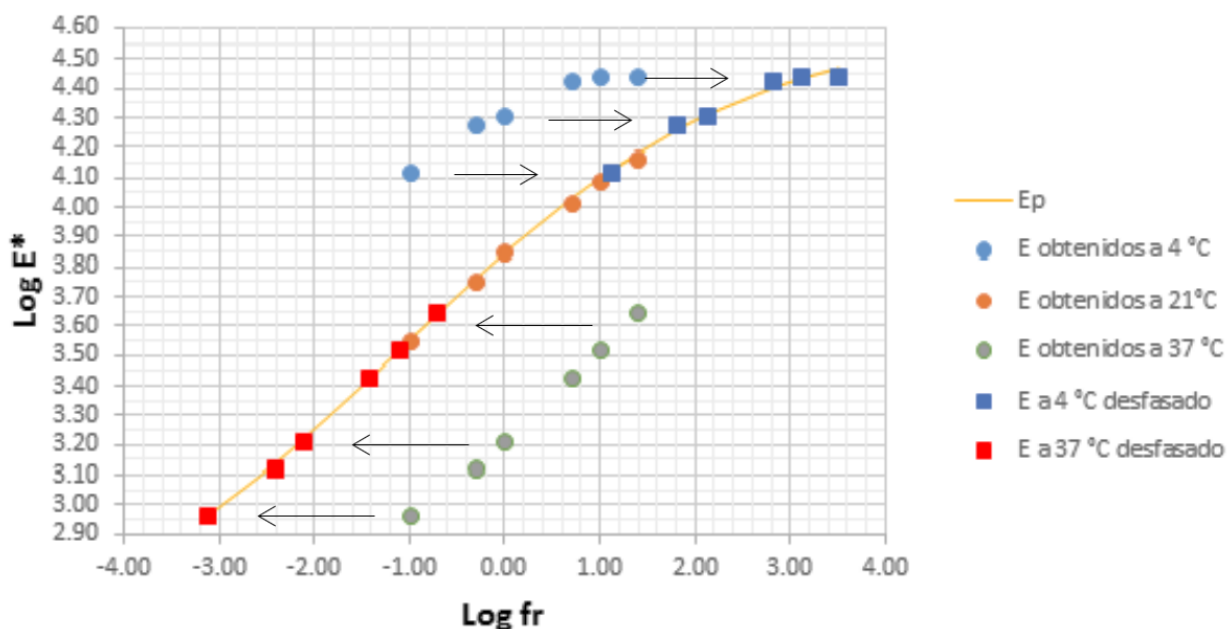


Figura 2.15. Ejemplo de Curva Maestra de Módulo Dinámico.

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Importancia del módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica en el diseño de pavimentos flexibles.

El módulo de elasticidad de una mezcla asfáltica es uno de los parámetros mecánicos básicos que deben conocerse para abordar el dimensionamiento de un pavimento nuevo o de su rehabilitación mediante métodos analíticos. Aunque las diferentes normativas al respecto suelen ofrecer los valores habituales para cada tipo de mezcla, en ocasiones es preferible, y

siempre recomendable (e incluso necesario) calcular dicho módulo para considerar las características específicas de una mezcla determinada o de las condiciones particulares del pavimento a dimensionar.

A continuación se presenta la importancia que tiene el módulo de rigidez, en el método para el diseño de espesores en pavimentos flexibles AASHTO 1993, debido a que es el de uso actual en El Salvador (OIR, 2016) y además se encuentra como primer método propuesto en el “Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimentos” (SIECA, 2002).

2.5.1. Método AASHTO 1993.

El método AASHTO 1993, describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y rígidos de carreteras. En el caso de los pavimentos flexibles, el método establece que la superficie de rodamiento se resuelve solamente con concreto asfáltico y tratamientos superficiales, pues asume que tales estructuras soportarán niveles significativos de tránsito dejando fuera pavimentos ligeros para tránsitos menores al citado, como son los caminos revestidos o de terracería.

Los procedimientos involucrados en el método, están basados en las ecuaciones originales de la AASHTO que datan de 1961, producto de las pruebas en Ottawa, Illinois, con tramos a escala natural y para todo tipo de pavimentos. La versión de 1986 y 1993 se han modificado para incluir factores o parámetros de diseño que no habían sido considerados y que son producto de la experiencia adquirida por ese organismo entre el método original y su versión más moderna, además de incluir experiencias de otras dependencias y consultores independientes.

El diseño está basado primordialmente en identificar o encontrar un “número estructural SN” para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para la determinación del número estructural requerido, el método proporciona la ecuación de diseño general siguiente:

$$\log W_{18} = Z_r * S_o + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + 1094} + 2.32 * \log M_r - 8.07$$

(Ecuación 2.11)

Dónde:

W_{18} = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN).

Z_r = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.

S_o = Desviación estándar de todas las variables.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.

M_r = Módulo de resiliencia de la subrasante.

SN = Número Estructural.

En los pavimentos de mezclas asfálticas por medio de la ecuación de diseño se obtiene el número estructural (SN) y en función del mismo se determinan los distintos espesores de las capas que conforman el paquete estructural; el diseño está basado en la identificación del número estructural del pavimento flexible y la cantidad de ejes de carga que transitarán.

Sin embargo el número estructural puede ser obtenido empleando el ábaco que se muestra en la **Figura 2.16**, aunque la forma convencional de obtener este valor es mediante la ecuación.

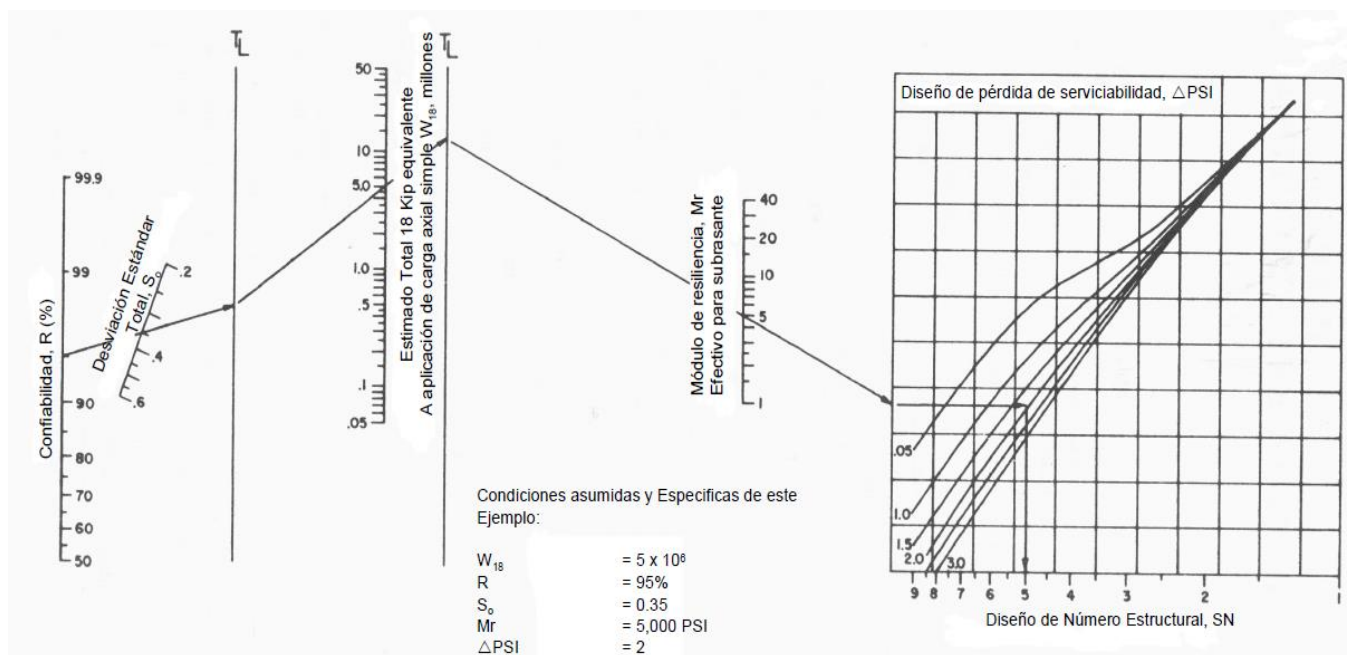


Figura 2.16. Abaco para determinación del Número Estructural.

Fuente: (SIECA, 2002)

Una vez que el diseñador ha obtenido el Número Estructural SN para la sección estructural del pavimento, utilizando el ábaco de la **Figura 2.16** o la ecuación general básica de diseño, se requiere ahora determinar una sección multicapa que en conjunto provea de suficiente capacidad de soporte equivalente al número estructural de diseño original. La

siguiente ecuación puede utilizarse para obtener los espesores de cada capa, haciéndose notar que el método AASHTO 1993, involucra coeficientes de drenaje particulares para la base y sub-base.

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3 \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

Dónde:

a_1, a_2, a_3 = coeficientes estructurales o de capa, de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente.

m_2, m_3 = coeficientes de drenaje para base y subbase

D_1, D_2, D_3 = espesores de capa (en pulgadas) para la superficie de rodadura, base y subbase.

2.5.1.1. Espesores de capa mínimos en función del número estructural.

El objeto de este concepto, está basado en que las capas granulares no tratadas, deben de estar perfectamente protegidas de presiones verticales excesivas, que lleguen a producir deformaciones permanentes. El proceso se indica en la **Figura 2.17**.

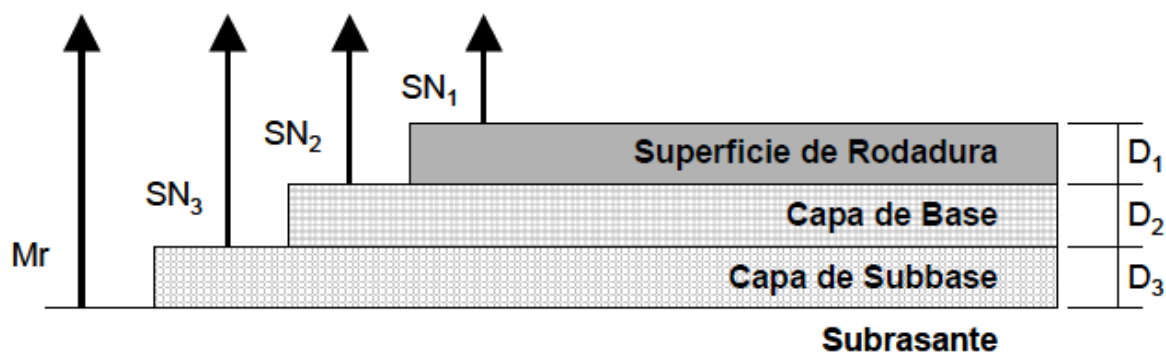


Figura 2.17. Procedimiento para determinar espesores.

Fuente: (SIECA, 2002)

Mediante la solución de la **Ecuación 2.11**, se pueden encontrar los números estructurales requeridos para proteger cada capa no tratada, reemplazando el módulo de resiliencia de la capa superior por el módulo de resiliencia de la capa que esta inmediatamente abajo; así, para determinar el espesor D_1 de la capa asfáltica se supone un Mr igual al de la base y así se obtiene el SN_1 , que debe ser absorbido por dicha capa. El espesor de D_1 debe ser:

$$D > SN_1 / a_1 \quad (\text{valor mínimo requerido para la carpeta asfáltica})$$

$$D_1^* \geq SN_1 / a_1 \quad (\text{valor real a utilizar})$$

$$SN_1^* = a_1 \times D_1^* \geq SN_1$$

Este procedimiento se repite para la capas base y subbase. Cabe mencionar que el asterisco “*” en D o SN indica y representa el valor actualmente usado durante el cálculo, que debe ser igual o mayor que el valor requerido.

Finalmente, como comprobación debe cumplirse que: $SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* \geq SN$ (SIECA, 2002)

2.5.1.2. Determinación del coeficiente estructural de la carpeta asfáltica.

Otro valor que es importante para el cálculo del espesor de cada capa es el coeficiente estructural (a_n). Según el método AASHTO 1993 estos valores son determinados en base a gráficas respectivas para cada capa. En este caso se le presta interés al coeficiente estructural de la capa asfáltica, ya que para su determinación se emplea el módulo de la mezcla asfáltica, también denominado módulo de elasticidad o rigidez.

La determinación del coeficiente estructural (a_1) para la carpeta asfáltica, es posible gracias a la curva mostrada en la **Figura 2.18**. Se ubica el valor de módulo de la mezcla en el eje horizontal, luego se traza una línea vertical hasta intersectar la línea pivote y desde este punto se prolonga una línea horizontal hacia la izquierda para encontrar el valor de a_1 .

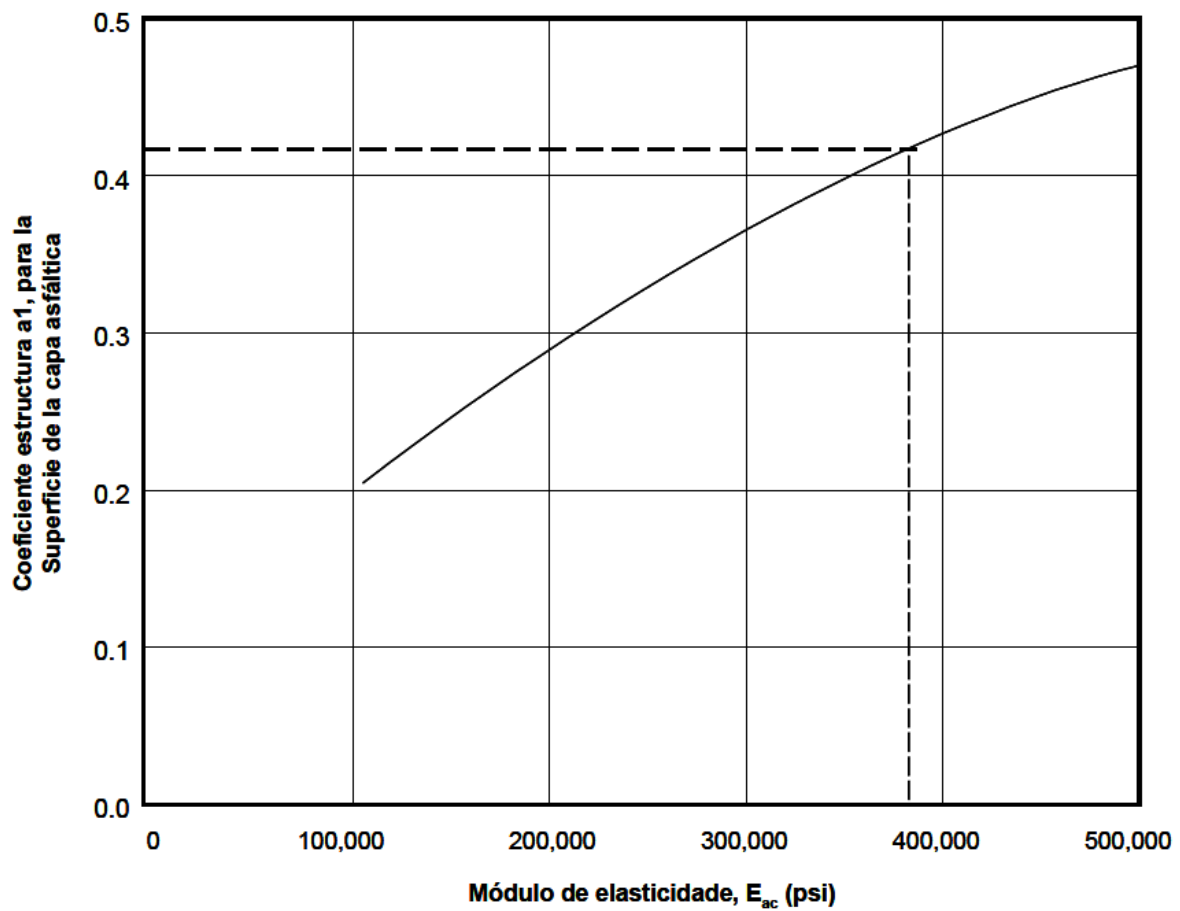


Figura 2.18. Determinación del coeficiente estructural para la capa asfáltica.
Fuente: (SIECA, 2002)

Capítulo III: Metodología de la investigación

3.1. Mezcla asfáltica utilizada para la investigación

El material utilizado para esta investigación fue mezcla asfáltica en caliente diseñada por metodología Marshall, con un tamaño máximo nominal de agregado pétreo de $\frac{3}{4}$ " y aglutinado con un asfalto tipo AC-30. El material fue muestreado en planta.

3.1.1. Lugar de procedencia.

La mezcla asfáltica muestreada fue obtenida en las instalaciones de la planta asfáltica de ECON (Empresa Constructora), Plantel San Andrés, ubicada en el km 27 $\frac{1}{2}$ de la carretera que conduce de Santa Tecla al desvío de San Juan Opico, La Libertad, El Salvador.



Figura 3.1. Ubicación de la planta asfáltica ECON en San Andrés.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Composición de la mezcla asfáltica

3.1.2.1. Agregado pétreo.

Para la dosificación del material pétreo a incorporar en la mezcla asfáltica, fueron determinados los porcentajes de mezcla de cuatro diferentes granulometrías, a fin de obtener una graduación de agregados que cumplan con lo establecido en el Instituto del asfalto de los Estados Unidos de Norte América. Los agregados utilizados fueron obtenidos, totalmente, mediante trituración de roca de mina.

Tabla 3.1
Procedencia y porcentaje de los agregados utilizados para la combinación del agregado pétreo.

Material	Lugar de procedencia	% utilizado en la combinación
Grava ¾"	Banco La Cantera San Diego	25%
Grava ½"	Banco La Cantera San Diego	26%
Grava CERO	Banco La Cantera San Diego	17%
Arena triturada	Banco La Cantera San Diego	32%
Sumatoria		100%

Fuente: (ECON, 2016).

Tabla 3.2
Análisis granulométrico de la combinación de agregados pétreo propuesta.

Malla	Abertura (mm)	Abertura elevada a 0.45	Proporción teórica	Granulometría de la combinación de materiales	Bandas de control	
			Bailey	Comprobación Bailey		
1"	25.00	4.76	100	100.0	100	100
¾"	19.00	3.76	98.5	100.0	92	100
½"	12.50	3.12	85.0	81.4	73	89
3/8"	9.50	2.75	69.0	64.3	57	71
#4	4.76	2.02	46.0	46.7	40	54
#8	2.36	1.47	34.0	30.1	24	36
#16	1.18	1.08	23.0	18.9	13	25
#30	0.60	0.79	15.0	12.0	7	17
#50	0.30	0.58	10.0	7.9	5	13
#100	0.15	0.43	7.0	5.4	3	9
#200	0.08	0.31	5.1	3.9	2	7

Los porcentajes para la granulometría de comprobación Bailey están en base a un peso de material combinado de 1929 gr.

Fuente: (ECON, 2016).

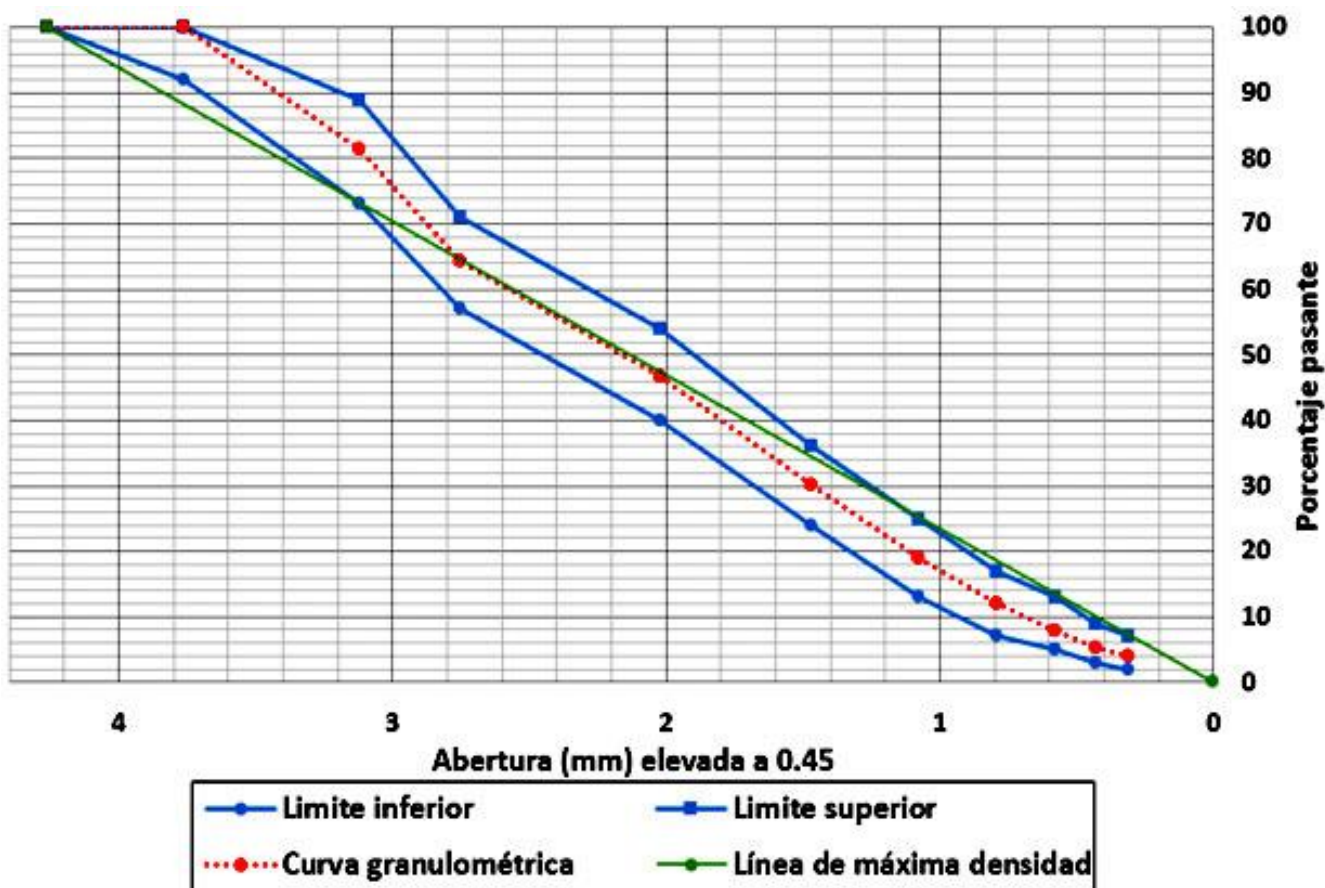


Figura 3.2. Análisis granulométrico para comprobación de porcentajes de formulación teórica Bailey.

Fuente: (ECON, 2016.)

En la **Tabla 3.3**, se presenta el resumen de los ensayos que fueron practicados sobre cada material pétreo, con lo cual es posible verificar su calidad en base al cumplimiento de los parámetros establecidos.

Tabla 3.3

Resumen de resultados de los ensayos practicados sobre los agregados pétreos.

Ensayo	Grava ¾"	Grava ½"	Grava CERO	Arena triturada	Parámetro
Gravedad específica seca (ASTM C 127)	2.564	2.537	2.523	2.525	N/A*
Absorción de agua (ASTM C 127)	1.63%	1.73%	2.38%	2.23%	N/A
Resistencia a la abrasión (ASTM C 131)	26.00%	24.70%	N/A	N/A	40.0% Máx.
Caras fracturadas (ASTM D 5821)	100%	100%	N/A	N/A	90.0% Mín.
Partículas planas y alargadas (ASTM D 4791)	3.24%	3.71%	N/A	N/A	10.0% Máx.
Sanidad (ASTM C 88)	1.26%	2.34%	2.14%	2.57%	12.0% Máx.
Índice de durabilidad (ASTM D 3744)	96.00%	96.00%	80.00%	N/A	35.0% Mín.
Equivalente de arena (ASTM D 2419)	N/A	N/A	90.90%	90.60%	45.0% Mín.
Índice de durabilidad en finos	N/A	N/A	N/A	71.00%	40.0% Mín.
Índice de plasticidad	N/A	N/A	NP	NP	NP**
Grupos de arcilla y partículas friables en la mezcla de agregados (ASTM C 142)	N/A	N/A	N/A	0.91%	1.0% Máx.
Peso volumétrico suelto	1387	1406	1555	1572	N/A
Peso volumétrico varillado	1494	1514	1725	1798	N/A

* No aplica

** No plástico.

Fuente: (ECON, 2016).

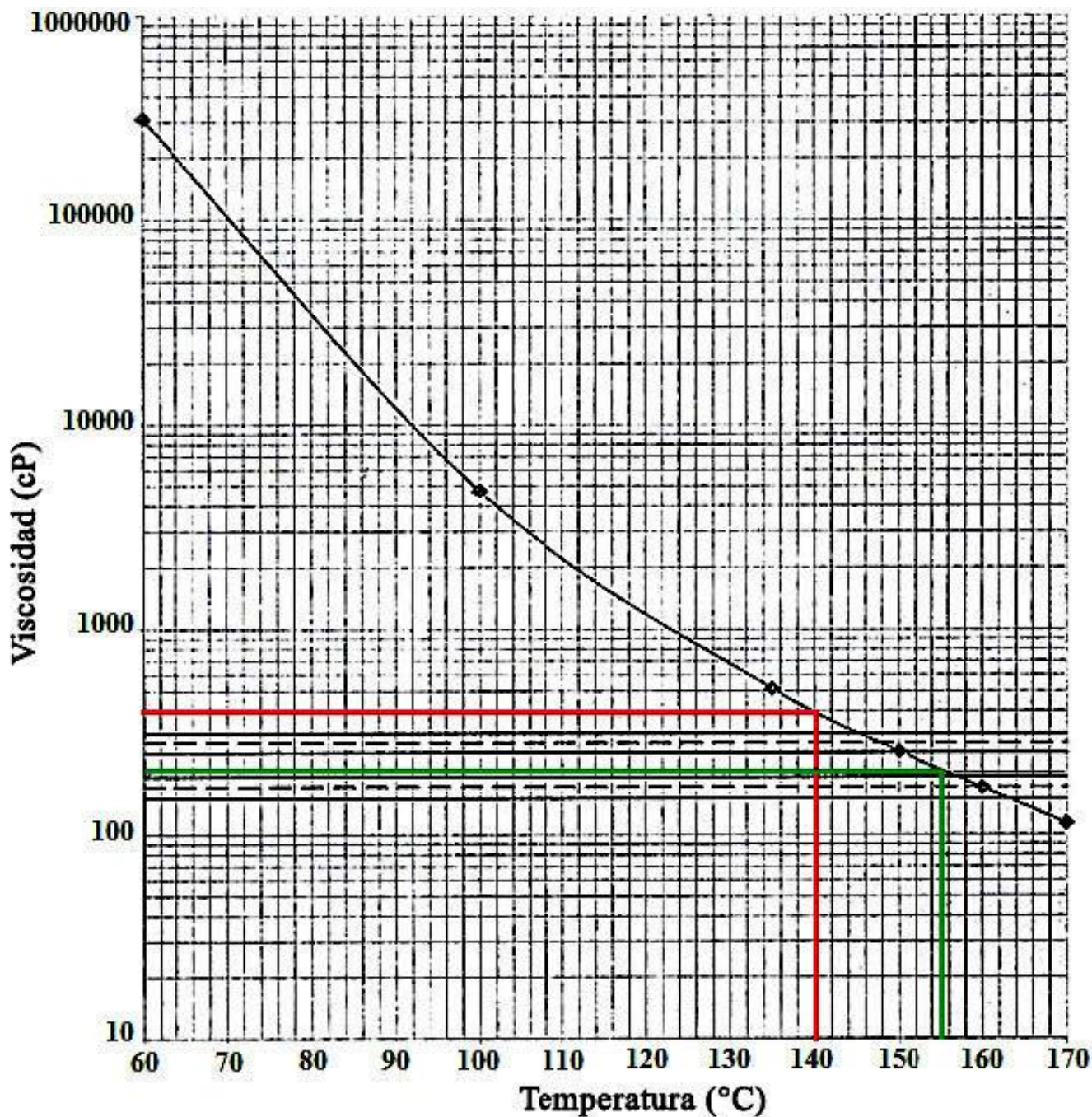
3.1.2.2. Asfalto.

El asfalto empleado para la mezcla es del tipo AC-30 Tabla II, producido por UNO PETROL y almacenado en el tanque de la planta asfáltica de ECON en San Andrés. La **Tabla 3.4**, presenta el resumen de los ensayos practicados al asfalto tanto por el laboratorio de control de calidad como por la empresa proveedora.

Tabla 3.4
Resumen de resultados de los ensayos practicados sobre el asfalto.

Ensayos al asfalto AC-30			
Índices evaluados	Valores obtenidos en ensayos		Parámetros AC-30 Tabla II
	Laboratorio de control de calidad	Proveedor	
Viscosidad absoluta a 60 °C antes de TFOT (poises)	2930	3100	2400 – 3600
Viscosidad absoluta a 60 °C después de TFOT (poises)	784	9000	15000 Máx.
Viscosidad cinemática a 135 °C (cSt)	562	515	350 Min.
Pérdida de masa (película delgada)	-0.1365	xxx	---
Punto de llama (°C)	314.1	294	---
Solubilidad en tricloroetileno (%)	99.93	---	---
Penetración (mm/10)	54	72	50 Min.
Ductilidad antes de TFOT (cm)	150	100	---
Ductilidad después de TFOT (cm)	150	100	40 Min.
Punto de blandamiento (°C)	52.5	55	---
Índice de susceptibilidad térmica	1.3	1.2	3.9 Máx.
Razón de viscosidades	0.3	2.9	4.0 Máx.
Índice de susceptibilidad térmica por penetración	0.4	0.4	---

Fuente: (ECON, 2016).



Temperatura (°C)	Viscosidad (cP)
Compactación	140
Mezclado	155

Figura 3.3. Curva reológica del asfalto AC-30 utilizado en la mezcla de producción.
Fuente: (ECON, 2016).

3.1.2.3. Parámetros finales del diseño de la mezcla asfáltica.

En la **Tabla 3.5** se presenta el resumen de los resultados obtenidos para cada parámetro establecido por el método Marshall además de los obtenidos, a través de ensayos de acuerdo al contenido óptimo de asfalto encontrado, para comprobación. Nótese que en ambos casos, se cumplen los requerimientos establecidos para el diseño Marshall.

Tabla 3.5
Resumen de resultados del diseño Marshall.

PARAMETRO	RESULTADOS DE DISEÑO	RESULTADOS PUNTO DE COMPROBACIÓN	ÍNDICES DE CONTROL
Contenido de asfalto	5.10%*	5.14%	4.8% a 5.4%
Estabilidad Marshall (lbs)	3425	3293	1800 a 4500
Flujo (0.01 in)	13.1	12.7	8 a 14
Gravedad Teórica Máxima	2.38	2.381	---
Vacíos de aire	4.00%	4.20%	3.0% a 5.0%
Vacíos agregado mineral (VMA)	14.20%	14.70%	13.0% mínimo
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	70.00%	71.30%	65% a 75%
Relación estabilidad (Kg) / Flujo (mm)	470	464	---
Relación Filler /Asfalto Efectivo	0.8	0.95	0.6 a 1.3
% TSR	---	80.80%	80% mínimo
Saturación de las muestras	---	69.10%	55.0% a 80%

* Este porcentaje es denominado “contenido óptimo de asfalto” y se obtiene en base a un porcentaje de vacíos de aire en la mezcla igual al 4.00%.

Fuente: (ECON, 2016).

3.1.3. Proceso de producción de la mezcla asfáltica en la planta.

La planta asfáltica utilizada para la producción de mezcla pertenece a la marca CIBER tipo UACF 19P2. Los principales componentes de la planta en operación son los siguientes:

- Silos o tolvas dosificadoras.
- Secador.
- Quemador.
- Mezclador.
- Precolector de finos.
- Filtro de mangas.

- Silo de descarga.

3.1.3.1. Silos o tolvas dosificadoras.

Son los componentes responsables del almacenamiento temporal y dosificación de los agregados. La planta cuenta con 4 silos, los cuales poseen aberturas superiores suficientemente grandes para recibir alimentación a través de palas cargadoras sin que un tipo de agregado contamine al otro. El orden en el cual se colocan los agregados en los silos, de derecha a izquierda en la **Figura 3.5**, es: arena triturada, grava $\frac{1}{2}$ "", grava cero y finalmente grava $\frac{3}{4}$ ".



Figura 3.4. Acopio de agregados pétreo.

Estos se encuentran junto a la planta para que la pala mecánica pueda abastecer los silos dosificadores.

Fuente: Registro propio.



Figura 3.5. Silos dosificadores.
 Permiten la adecuada separación de los agregados para evitar errores durante la descarga de dosificación.

Fuente: registro propio

La dosificación del agregado es individual a través del pesaje dinámico con celdas de carga, sensores de rotación y moto-reductores de velocidad variable. El sistema de pesaje es totalmente automatizado el cual opera con lógica de auto monitoreo, garantizando el perfecto control de dosificación de cada uno de los componentes.



Figura 3.6. Celda de carga de alta precisión.
 Garantiza el control en la dosificación de los agregados.
Fuente: Registro propio.

3.1.3.2. Secador.

Después de la dosificación del agregado, la banda transportadora lleva el agregado hacia el tambor secador, del tipo cilíndrico con aletas internas atornilladas. El tambor opera con proceso de contraflujo extrayendo los gases en sentido contrario al del desplazamiento de los agregados. La mayor ventaja de este proceso radica en que únicamente se secan y calientan los agregados, preservando las propiedades del asfalto a utilizar en la mezcla.

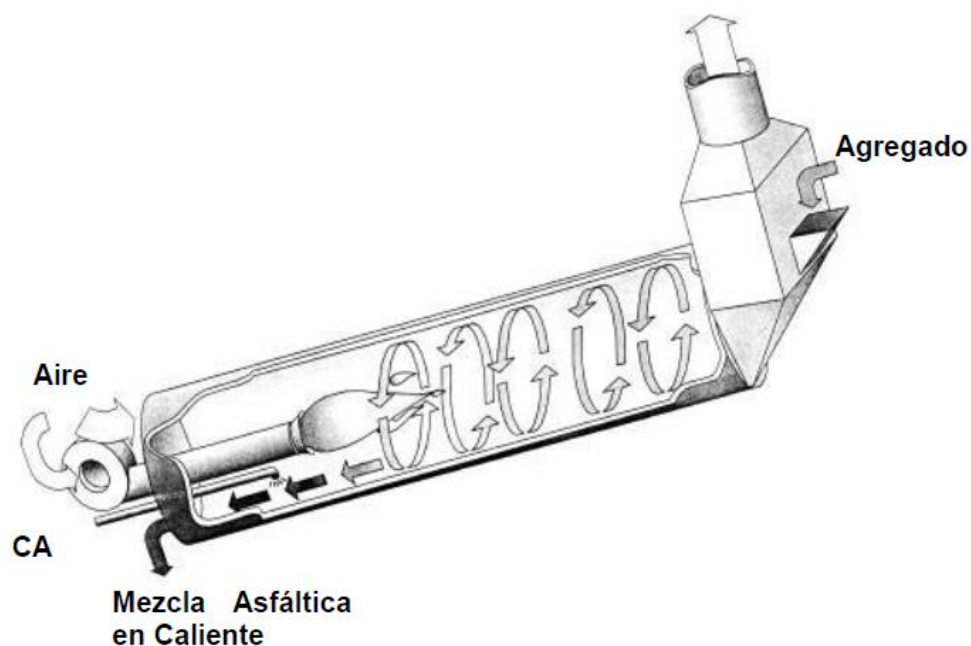


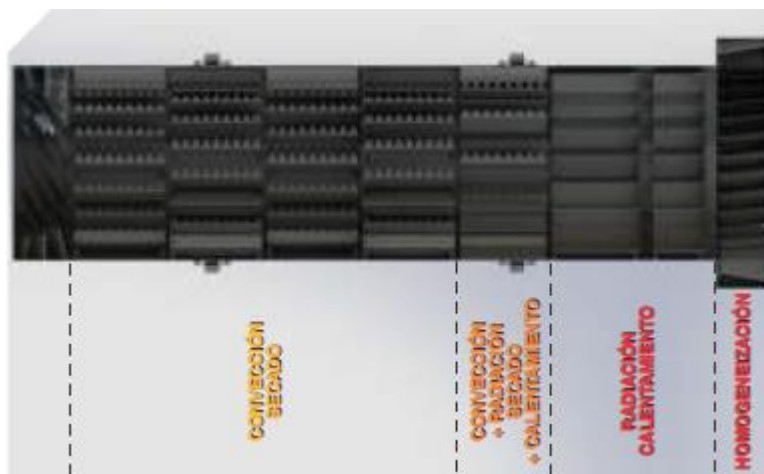
Figura 3.7. Operación de un tambor secador a contraflujo.

Fuente: (Cortez García, Guzmán Henríquez, & Reyes Rodríguez, 2007).



*Figura 3.8. Incorporación del agregado al tambor secador.
El tambor tiene la función exclusiva de secar y calentar los agregados.
Fuente: Registro propio.*

El calor se aplica gradualmente al agregado resultando en alta eficiencia de cambio térmico (ver **Figura 3.8**). Internamente el secador es hueco y las paredes están provistas con aletas dentadas, para homogenizar el calor a todo el agregado. Al finalizar el proceso de secado, el agregado debe salir con una temperatura aproximada de 165 °C y para lograrlo el secador debe operar a una temperatura de 175°C.



*Figura 3.9. Etapas del secado dentro del tambor.
Fuente: (CIBER, 2015).*

3.1.3.3. Quemador.

Es el componente responsable por la generación de energía para secado y calentamiento de los agregados a través de la combustión de aceites combustible y/o gases. Tiene sistema de ignición controlado por el operador desde el panel de mando: una llama piloto se acciona para iniciar la combustión la cual se estabiliza automáticamente. Las dosificaciones de aire y combustible son precisas, garantizando total aprovechamiento y máxima economía de combustible. El modelo de quemador que opera en la planta es CIBER MC-10.



Figura 3.10. Quemador CIBER.
Este opera bajo el principio de atomización a baja presión.
Fuente: (CIBER, 2015)

La cámara de combustión está construida de acero inoxidable, por lo cual el desgaste es mínimo sin embargo, presenta fácil acceso al quemador para su limpieza, mantenimiento y regulado.

3.1.3.4. Mezclador.

Es el componente responsable por la homogenización entre el agregado y el asfalto. Es un mezclador externo del tipo Pug-Mill el cual está constituido por una gran caja metálica con tapas superiores móviles, calentada a través de la circulación de aceite térmico que mantiene la temperatura de la mezcla durante el proceso, dos ejes paralelos sincronizados de rotación opuesta, con brazos aletas y protecciones internas construidos de acero de alta resistencia. El accionamiento se realiza directamente a través de dos motorreductoras sincronizados por dos cajas de reducción de angulares.



*Figura 3.11. Motorreductoras del mezclador.
El mezclador está completamente separado del secador.
Fuente: Registro propio.*

El asfalto es inyectado en el mezclador mediante 6 boquillas a una temperatura de 155°C, la cual es la temperatura de mezclado determinada en el diseño. El asfalto se mantiene a esta temperatura dentro de un tanque térmico (**Figura 3.12**)



*Figura 3.12. Tanque térmico para almacenamiento del asfalto.
Fuente: Registro propio.*

Para lograr la calidad del mezclado, este se realiza durante 30 segundos a 50 revoluciones/minuto.



*Figura 3.13. Vista interna del mezclador.
Fuente: (CIBER, 2015).*

3.1.3.5. Precolector de finos.

El precolector de finos o separador estático cumple la función de filtrar el material particulado fino, material que queda retenido en la malla #200, de los gases extraídos del tambor secador. El material fino que es separado es incorporado directamente en el mezclador.

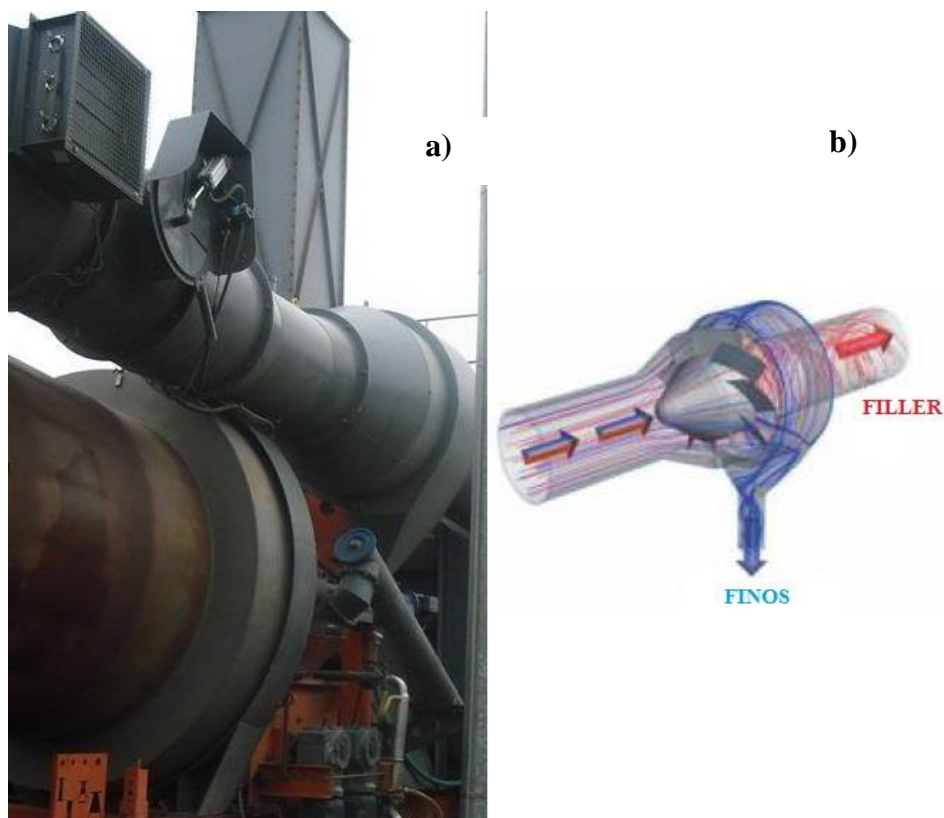


Figura 3.14. Separador estático.

a) Ubicación del separador estático en la planta San Andrés y b) esquema de operación.

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.6. Filtro de mangas.

Estos filtros son mangas plegadas de poliéster laminado construidas en forma de cartucho con gran área de filtrado y alta durabilidad. Las mangas de CIBER filtran en la superficie (no permiten la contaminación del tejido) lo que las hace totalmente lavables y minimizan la emisión de contaminantes a la atmósfera. El material colectado en estos filtros, filler, es incorporado directamente al mezclador.



Figura 3.15. Contenedor con los filtros de manga y chimenea
Fuente: Registro propio.

3.1.3.7. Silo de descarga.

Es un silo metálico con capacidad de 2 m^3 acoplado al elevador. Al alcanzar la capacidad del silo, se abre una compuerta inferior para producir la descarga del material en los camiones.



Figura 3.16. Silo descargando mezcla terminada en una pala cargadora para inspección inicial.
Fuente: Registro propio.

3.1.4. Muestreo de mezcla.

Se realizaron 4 toma de muestras de la mezcla asfáltica en el Plantel San Andrés, teniendo el cuidado de obtener la cantidad suficiente de material para los ensayos de laboratorio planteados. Sin embargo, los muestreos fueron realizados a fin de reabastecer el material a ensayar, razón por la cual se tomaron en diferentes fechas.

Tabla 3.6

Fecha y cantidad de muestra tomada en la planta San asfáltica Andrés.

Número de muestreo	Fecha	Cantidad de material muestreado
1	16/marzo/2016	48000 g
2	19/mayo/2016	50650 g
3	08/junio/2016	56800 g
4	12/julio/2016	51450 g

Los pesos presentados resultaron del pesaje en el laboratorio ocupado para la investigación.

Fuente: elaboración propia.

La **Tabla 3.7** presenta la cantidad necesaria de mezcla, por muestreo, para llevar a cabo el trabajo de laboratorio.

Tabla 3.7

Cantidades de material a utilizar en los ensayos de laboratorio por muestreo.

Uso	Cantidad de material	# de muestras para ensayos	Peso total de material
Determinación de Gravedad Teórica Máxima (Gmm) de la mezcla	2500 g	2	5000 g
Elaboración de briquetas Marshall	1200 g	12	14400 g
Elaboración de briquetas en Compactador Giratorio.	7200 g	4	28800 g
Cantidad de material mínima a utilizar por muestreo			48200 g

Las cantidades de materiales presentadas para las muestras de ensayos está sujetas a rangos de variación según el caso.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4.1. Procedimiento.

Las muestras fueron tomadas de camiones en los cuales se descargó la mezcla directamente de la planta asfáltica. Para subir al camión y hacer el muestreo es necesario usar botas con protección térmica, ya que la mezcla se mantiene a alta temperatura y además el proceso debe realizarse con rapidez para evitar una mayor pérdida térmica. Se tomó el material en 6 puntos diferentes a aproximadamente 305 mm (12 in.) por debajo de la

superficie, en un patrón geométrico que abarcó toda la superficie de la mezcla en el camión (AASHTO T 168, 2003). El material extraído se removió 3 veces para homogenizar y, posteriormente fue colocado en bandejas metálicas repitiendo el proceso hasta conseguir la cantidad de mezcla considerada suficiente.



Figura 3.17. Remoción de material para homogenizar la muestra.

Fuente: Registro propio.

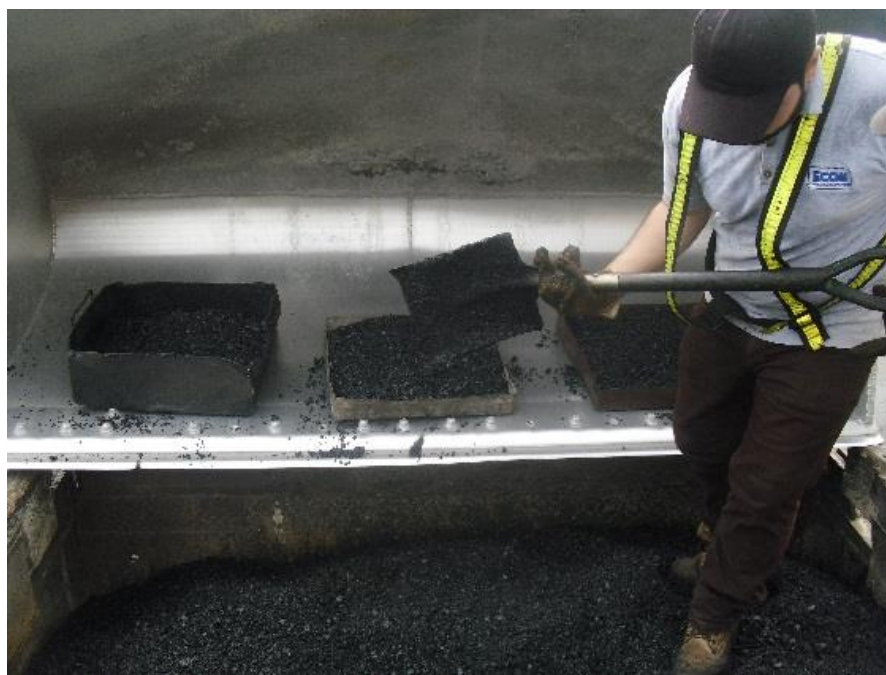


Figura 3.18. Llenado de bandejas con la mezcla muestreada.

Las bandejas de la izquierda de la fotografía pertenecen al grupo de investigación, la restante sirve para controles de calidad de la planta asfáltica.

Fuente: Registro propio.

Las bandejas con el material fueron bajadas con ayuda de una pala mecánica para, posteriormente, colocarlas en el vehículo usado como transporte a los laboratorios en la planta de Asfalca. Antes del transporte la mezcla fue protegida utilizando piezas de cartón y/o nylon para disminuir la excesiva pérdida de temperatura en la mezcla durante el traslado a los laboratorios (**Figura 3.20**).



Figura 3.19. Desalajo de bandejas con material en la pala mecánica.

Fuente: Registro propio.



*Figura 3.20. Preparación de bandejas con material a ser transportadas.
Fuente: Registro propio.*

3.2. Trabajo de laboratorio

3.2.1. Ubicación de los laboratorios

El trabajo de laboratorio fue realizado en las instalaciones de la planta de ASFALCA, ubicada en Carretera a Sonsonate km 39, Col. Palmero Tres Ceibas, Plta Armenia, Armenia, Sonsonate, El Salvador.



*Figura 3.21. Ubicación de las instalaciones de ASFALCA.
Fuente: Elaboración propia.*

3.2.2. Herramientas y equipos utilizados.

Los materiales y equipos que fueron utilizados para todo el trabajo de laboratorio se encontraban disponibles en las instalaciones de la planta de Asfalca, a excepción de las gabachas y los guantes, los cuales fueron obtenidos por el equipo de trabajo (**Anexo 1**).

3.2.3. Cuarteo y almacenamiento de la mezcla asfáltica muestreada.

En las instalaciones de la planta de Asfalca se procedió a cuartear la mezcla muestreada en tamaños apropiados para los ensayos de laboratorio. Previo al cuarteo se realizó el denominado “desmenuzamiento de la mezcla”, proceso mediante el cual se separaron las partículas aglutinadas debido al enfriamiento de la mezcla, minimizando la presencia de grumos en favor de la representatividad del material cuarteado. El desmenuzamiento se llevó a cabo en el momento que la mezcla logró una temperatura a la cual fue posible manipularla manualmente y con ayuda de espátulas, pero evitando el excesivo endurecimiento. En los

casos que la mezcla se endureció demasiado fue colocada, sobre una superficie limpia y de forma esparcida, al sol para ablandarla.

3.2.3.1 Finalidad del cuarteo.

Según la norma ASTM C702 (2011), el cuarteo tiene la finalidad de reducir las muestras obtenidas en el campo a los tamaños de muestras requeridas para los ensayos, empleando procedimientos que minimizan la variación en la medición de las características entre las muestras de ensayo y las muestras de campo.

La reducción de muestras se obtiene mediante los siguientes tres métodos:

Método A: Cuarteador mecánico.

Método B: Cuarteo manual.

Método C: Pilas cónicas (agregado fino húmedo).

Para la investigación fue utilizado el método B.

3.2.3.2. Procedimiento (ASTM C702, 2011).

Se colocó la muestra sobre una superficie dura, limpia y horizontal evitando cualquier pérdida de material o la adición de sustancias extrañas. Se mezcló bien la muestra hasta formar una pila en forma de cono; se mezcló nuevamente hasta formar un otro cono, repitiendo esta operación 3 veces. Cada palada tomada de la base se depositó en la parte superior del cono, de modo que el material cayera uniformemente por los lados del mismo.



Figura 3.22. Formación de pila cónica durante el cuarteo.

Fuente: Registro propio.

Cuidadosamente se aplanó y extendió la pila cónica hasta darle base circular, con espesor y diámetro uniforme presionando hacia abajo con la cuchara de la pala, de tal manera que cada cuarto del sector contuviera el material original.



Figura 3.23. Aplanado de pila cónica.

Con ayuda de la pala se enraso la superficie para lograr un espesor uniforme.

Fuente: registro propio.

Se procedió luego a dividir diametralmente el material en cuatro partes iguales, de las cuales se separaron dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino limpiando luego con cepillo o escoba los espacios libres. Los dos cuartos restantes se mezclaron sucesivamente y se repitió la operación hasta obtener la cantidad de muestra requerida.



Figura 3.24. División de la mezcla cuarteada en partes iguales.

a) Primera división de la muestra en cuatro partes iguales. b) División de los cuartos diagonalmente opuestos tomados del primer cuarteo.

Fuente: Registro propio.

3.2.3.3. Almacenamiento del material.

El material reducido a los tamaños estimados apropiados fue depositado en bolsas plásticas para pesarlo en una balanza análoga. Si el material no fue suficiente se tomó parte de otro cuarto hasta completar los pesos establecidos.



Figura 3.25. Pesaje de material cuarteado.
El peso de las bolsas plásticas fue tomado en cuenta.
Fuente: Registro propio.

En el laboratorio se suministró un espacio en donde colocar el material pesado y etiquetado para evitar desorden y equivocaciones en su uso. El etiquetado se hizo empleando páginas de papel bond cortadas o en sobre tiras de tirro, colocando el peso de material, UESOcc y la fecha de cuarteo.



Figura 3.26. Material etiquetado en el lugar suministrado para su colocación.
Fuente: Registro propio.

3.2.4. Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.

3.2.4.1. Significado y uso.

De acuerdo a la norma ASTM D2041 (2011), la gravedad específica es la relación de una masa dada de material a 25 °C a la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura. Se denomina “teórica máxima” ya que considera un contenido nulo de vacíos en la mezcla, por esta razón se utiliza para el cálculo de vacíos de aire en mezclas compactadas y para proveer valores referenciales en la compactación de mezclas empleadas en pavimentos. En esta investigación se utilizó la gravedad específica teórica máxima en el cálculo de vacíos de aire para todas las briquetas compactadas.

3.2.4.2. Procedimiento (ASTM D2041, 2011).

Se realizaron dos mediciones por muestreo utilizando, por cada una, 2500 g de mezcla secada en horno en condición suelta. Antes de colocar la muestra en el picnómetro, se revisó la presencia de grumos y la limpieza de la misma, además de los datos de calibración del picnómetro.

Asfalca CALIBRACION PICNOMETRO
ASTM D 2041

MARCA PICNOMETRO: GILSON
MODELO PICNOMETRO: SG-16A para muestras de 2000 g

FECHA DE CALIBRACION: 11/01/2016
CALIBRADO POR: Tec. R. Lopez
TEMPERATURA DEL AGUA: 25 °C

INFORMACION DE LA BALANZA UTILIZADA:

MARCA:	AE ADAM	MODELO:	PGL 20001
SERIE No.:	AE 774205	CAPACIDAD:	0 - 20,000 g
CERTIFICADO DE CALIBRACION:	IPPD2151116MC	INCERTIDUMBRE:	0.12 (5000 g)

	1	2	3	PROMEDIO
PESO PICNOMETRO + TAPADERA VACIO	3357.2	3357.5	3357.2	3357.3
PESO PICNOMETRO + TAPADERA + AGUA A 25 C (D)*	7642.5	7642.9	7643.8	7642.4
PESO DEL AGUA A 25 C	4285.3	4285.4	4284.6	4285.1

*Peso en aire

Por tanto, el valor de D para el calculo de la gravedad especifica maxima teorica sera:


D = 7642.4

Picnómetro en la determinación en aire:

$$G_{mm} = A / (A + D - E)$$

Donde:

G _{mm}	=	Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.
A	=	Peso de la muestra en el aire (gr)
D	=	Peso del picnómetro con agua + la tapadera a 25°C (gr)
E	=	Peso del picnómetro + la tapadera + la muestra + agua a 25°C (gr)

Revisado por: 
Ing. Karen de Vadillo
Gerente de Control de Calidad

Asfalca

Figura 3.27. Hoja de calibración del picnómetro para gravedad específica teórica máxima.

Fuente: Registro propio.

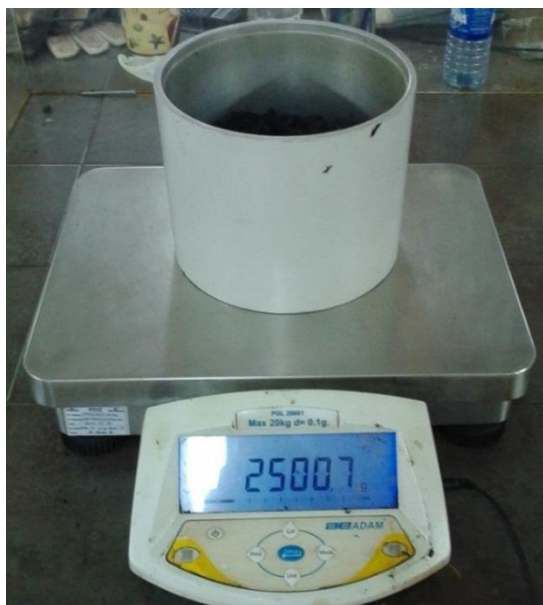


Figura 3.28. *Pesaje de material en el picnómetro.*
Fuente: Registro propio.

Luego se colocó la muestra en el picnómetro y se agregó agua a una temperatura de $(25 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ hasta sumergir completamente la muestra para colocar la tapa al recipiente.



Figura 3.29. *Temperización del agua para ensayo.*
Fuente: registro propio.

El vacío fue aplicado en un aparato agitador durante 15 min para reducir gradualmente la presión residual a (27.5 ± 2.5) mmHg, la cual es monitoreada a través de un manómetro de presión residual. Al final del período de vacío, este fue liberado gradualmente. Con cuidado se separó el picnómetro del aparato agitador para llenar completamente el picnómetro con agua temperada.

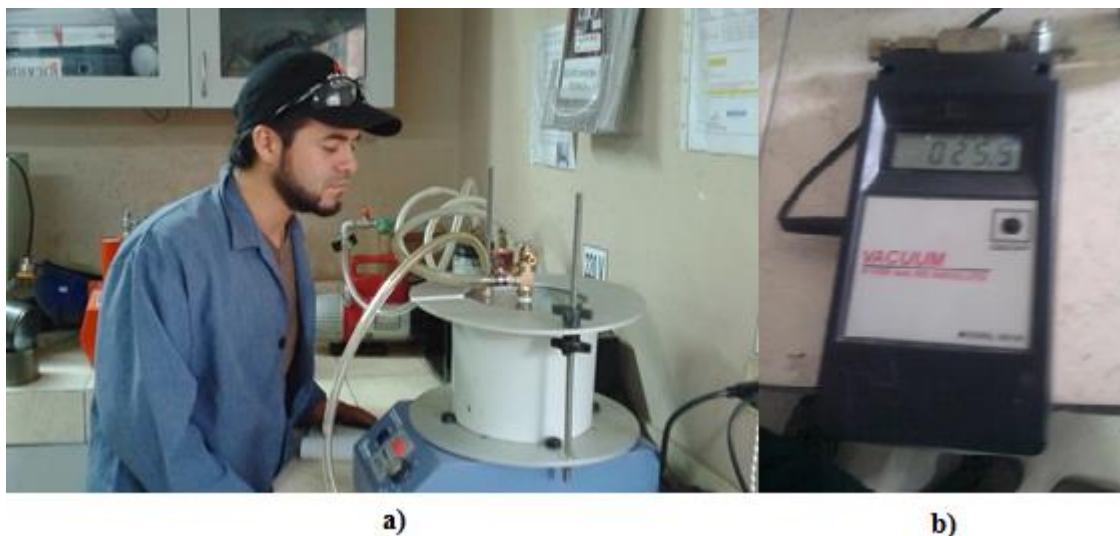


Figura 3.30. Desarrollo del ensayo de gravedad teórica máxima.
 a) Monitoreo del ensayo. b) Manómetro de presión residual. En todo momento es importante mantener la presión residual en 27.5 ± 2.5 mmHg.
 Fuente: Registro propio.



Figura 3.31. Aforo de picnómetro.
 a) Picnómetro listo para aforar. b) Picnómetro aforado. La colocación de la tapa debe hacerse con cuidado y despacio, permitiendo que el exceso de agua salga por el agujero de la tapa.
 Fuente: Registro propio.

Se colocó la tapa nuevamente para “aforar” el picnómetro, dejando que el exceso de agua salga por un agujero en la tapa. Si no ocurría el aforo era un indicador que el picnómetro no estaba lleno del todo, por lo tanto había que añadir más agua. Finalmente el picnómetro fue pesado en una balanza digital, registrando dicho valor y preparando el equipo para el próximo ensayo. Durante todo el proceso no se perdió de vista mantener una temperatura de 25 °C, ya que si no se realizaba el proceso a esta temperatura, era necesario aplicar un factor de corrección apropiado para las medidas tomadas.

La fórmula para obtener la gravedad específica teórica máxima es la siguiente:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+D-E} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

El valor del peso D, se muestra en la hoja de calibración en la fotografía de la **Figura 3.27**.

Tabla 3.8

Formato para recolección de datos del ensayo de gravedad teórica máxima.

Pesos	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3		Muestreo 4	
A: Peso seco muestra de mezcla suelta al aire (g)	1601.1	1602.9	2500.5	2500.6	2500.8	2500.4	2500.0	2500.0
D: Peso picnómetro calibrado + agua a 25°C (g)	7642.4	7642.4	7642.4	7642.4	7642.4	7642.4	7642.4	7642.4
E: Peso del picnómetro + agua a 25°C + muestra (g)	8576.6	8580.4	9100.8	9100.9	9100.5	9105.7	9103.6	9104.8
Gravedad específica teórica máxima de la mezcla	2.401	2.411	2.399	2.400	2.398	2.411	2.407	2.409
Gravedad específica teórica máxima promedio de la muestra	2.406		2.400		2.405		2.408	
Desviación estándar	0.0050		0.0001		0.0089		0.0020	
Gravedad específica teórica máxima (ECON) (Anexo 2)	2.388		2.382		2.389		2.385	
Gravedad específica teórica máxima promedio a utilizar	2.395							

Fuente: Elaboración propia.

Al finalizar los muestreos, se tenían 8 mediciones de gravedad teórica máxima promediados en pares. Para la posterior determinación de vacíos (ver Sección 3.2.9) en todas las briquetas elaboradas, se utilizó el promedio de las 4 medidas obtenidas de las mediciones realizadas por el grupo, añadiendo la medida suministrada para cada muestreo de la mezcla asfáltica proporcionado por la planta de procedencia. Además se comprobó que las desviaciones estándar de las medidas obtenidas en el laboratorio fueran menores a 0.042, en el caso que el ensayo sea realizado por 2 o más operadores.

3.2.5. Acondicionamiento de la mezcla asfáltica para elaboración de briquetas.

3.2.5.1. Significado y uso.

El rendimiento y las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente dependen, en gran medida, de la temperatura y estado de envejecimiento en que se encuentre el material. Mediante el acondicionamiento previo de las muestras de mezcla, es posible considerar las condiciones anteriormente mencionadas para predecir con mayor precisión sus propiedades (AASHTO R 30, 2015).

El acondicionamiento fue utilizado para la preparación de las muestras de mezcla a compactar con martillo Marshall y con compactador giratorio por tal razón, y en función de la cantidad de mezcla a compactar en cada método, se ejecutaron dos procesos diferentes de acondicionamiento (AASHTO R 30, 2015). Cabe mencionar que las bandejas y/o charolas en las que se depositó la mezcla se encontraban cebadas es decir, tenían residuos de la mezcla utilizada en la investigación para evitar que la mezcla que se acondicionaba se pegase, perdiendo material ya pesado para las briquetas.

3.2.5.2. Acondicionamiento para elaboración de briquetas con el martillo Marshall.

Debido a que solamente se disponía de bandejas grandes, en cada una se colocaron 2 muestras simultáneamente, procurando no mezclar el material, formando capas con espesores entre los 25 a 50 mm (AASHTO R 30, 2015). En otros casos, por la falta de bandejas desocupadas, la mezcla fue depositada en charolas de forma individual.



Figura 3.32. Preparación de mezcla a acondicionar para compactación Marshall.
 a) Mezcla depositada en charola. b) Mezcla colocada en bandeja. En ambos casos los recipientes deben estar cebados.

Fuente: Registro propio.

Las bandejas y/o charolas con la mezcla fueron colocadas en hornos durante 2 horas a una temperatura de 165 °C. Para optimizar el tiempo se colocaban en el horno diferentes muestras con desfases entre 30 a 60 minutos, pero sin provocar saturación de materiales dentro del horno. Se revolvió la mezcla transcurrida 1 hora para mantener acondicionado uniforme y verificar la temperatura de la mezcla. Para revolver el material se hizo uso de una cuchara grande y espátulas calientes, de esta manera se facilitó el manejo de la mezcla caliente y se minimizó la excesiva pérdida de material que quedase pegado en los utensilios. Completado el tiempo de acondicionamiento, se procedió a retirar la mezcla del horno para colocarla en los moldes Marshall, los cuales se calentaron antes para evitar pérdidas térmicas excesivas.

3.2.5.3. Acondicionamiento para la elaboración de especímenes con el Compactador Giratorio.

Se extendió la mezcla en bandejas formando una capa cuyo espesor fuese uniforme, en el rango de 25 a 50 mm (AASHTO R 30, 2015).



***Figura 3.33. Revisión de mezcla extendida en la bandeja.
Se desmenuzaron los grumos y enraso la superficie.
Fuente: Registro propio.***

Las bandejas con la mezcla fueron colocadas en hornos durante 4 horas a una temperatura de 160 °C. Se introducían dos bandejas con material, colocado sobre parrillas dentro del horno, pero con un desfase de 1 hora.



Figura 3.34. Acomodamiento de bandejas y molde de compactador giratorio dentro del horno.
Fuente: Registro propio.

Se revolvió la mezcla cada hora para mantener acondicionado uniforme y verificar la temperatura de la mezcla. Para la revoltura del material se hizo uso de espátulas y cucharón calientes, de esta manera se facilitó el manejo de la mezcla caliente y se minimizó la excesiva pérdida de material que quedase pegado en los utensilios.



Figura 3.35. Revoltura de mezcla.
Esta se hizo lo más rápido posible para evitar pérdida de calor.
Fuente: registro propio.

Completado el tiempo de acondicionamiento, se procedió a retirar la mezcla del horno para colocarla en el molde de compactador giratorio, el cual se calentó previamente.

3.2.6. Preparación y compactación de briquetas mediante martillo Marshall.

3.2.6.1. Significado y uso.

Las muestras de mezcla asfáltica compactadas por el procedimiento descrito en la norma ASTM D6926 (2016), pueden ser utilizadas para diversas pruebas físicas tales como: estabilidad, flujo, resistencia a la tracción indirecta, fatiga, fluencia y, además, para la determinación de densidad y vacíos de aire logrados durante la compactación por impacto que simula las cargas del tránsito.

En esta investigación se compactaron 9 briquetas, por muestreo de mezcla realizado, a las cuales se les aplicó los ensayos para determinación de gravedad específica Bulk, contenido de vacíos de aire y módulo de resiliencia bajo la designación de resistencia a la tracción indirecta (ver sección 3.2.9). Inicialmente se realizó la compactación a tres niveles diferentes según la **Tabla 3.9**. Posteriormente a la evaluación de los vacíos de las briquetas del primer muestreo, se optó por la cantidad de 75 golpes por cara, debido a que proporcionaba un rango confiable de vacíos.

Tabla 3.9

Número de golpes del martillo Marshall para la compactación de briquetas.

Nivel de tránsito	ESAL's diseño(x10⁶)	Número de golpes por cara
LIVIANO	0.3 - <3	35
MEDIO	3 - <30	50
PESADO	≥30	75

Fuente: (Crespin Molina, Santa Cruz Jovel, & Torres Linares, 2012).

3.2.6.2. Procedimiento.

Inmediatamente terminado el acondicionamiento de la mezcla, se procedió a realizar el enmoldado de la misma. El conjunto del molde, barra metálica y cucharas fueron limpiados y colocados en horno media hora antes. Se colocó un filtro de aluminio, cortado a la medida, en el fondo del molde antes de introducir la mezcla. El vertido de mezcla se realizó en 2 capas y por cada una se suministraron, con la barra metálica, 15 golpes alrededor del perímetro de la mezcla y 10 golpes en el centro para acomodar el material (ASTM D6926, 2016).



Figura 3.36. Enmoldado de mezcla.
Los golpes con la barra se aplicaron la fuerza suficiente para acomodar toda la mezcla.
Fuente: Registro propio.

Se verifico la temperatura de la mezcla enmoldada para decidir si, se realizaba en ese momento la compactación con el martillo o se colocaba nuevamente en el horno el tiempo suficiente para lograr la temperatura de $(140 \pm 2) ^\circ\text{C}$. El martillo fue colocado en un calentador a una temperatura de $165 ^\circ\text{C}$, 2 minutos antes de colocar el molde en el compactador.



Figura 3.37. Monitoreo de temperatura de la mezcla enmoldada.
a) Medición de temperatura de la mezcla. b) Moldes con mezcla puestos en el horno. El horno se cerraba inmediatamente.
Fuente: Registro propio.

Lograda la temperatura de compactación, se colocó otro filtro de aluminio en la parte superior de la mezcla. Rápidamente se aseguró el molde sobre el pedestal del equipo mediante

dos pines de seguridad y un anillo superior de presión, se ensambló el martillo y se aplicaron 75 golpes a la cara superior.



*Figura 3.38. Colocación del molde en el pedestal para compactación.
Los pines del pedestal se encajaron con los agujeros en la base del molde.
Fuente: Registro propio.*

Terminada la aplicación de golpes en la cara superior, se desmontó el molde para dar vuelta a la briqueta y repetir el procedimiento de compactación para la cara inferior, con el mismo número de golpes previamente utilizados (ASTM D6926, 2016).

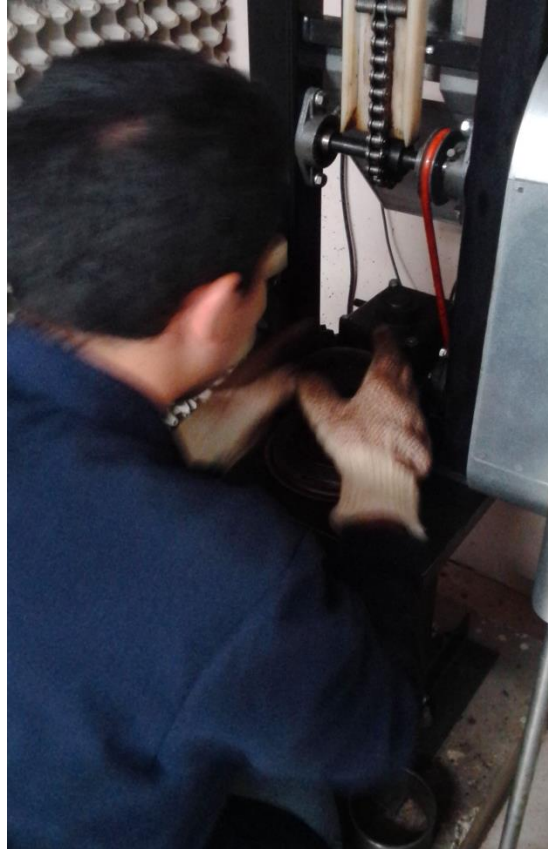


Figura 3.39. Colocación del molde en posición invertida para aplicar golpes en la cara inferior.
Fuente: Registro propio.

Finalizada la compactación se desmontó por completo el molde y se dejó que la muestra se enfriará, entre 1 a 2 horas, para evitar daños al momento de la extracción de la briqueta del molde. Para enfriar la briqueta se utilizó un ventilador o simplemente se dejó en reposo en un lugar con aire acondicionado.



*Figura 3.40. Disposición de los moldes para enfriamiento.
El lado expuesto de las briquetas fue el último en recibir golpes.
Fuente: Registro propio.*



*Figura 3.41. Desmoldado de briquetas.
Fuente: Registro propio*

Las briquetas fueron enumeradas y marcadas para, posteriormente, tomar las medidas de diámetro y altura mediante un pie de rey. La tabla formato para la recolección de estos datos se presenta en la **Tabla 3.10**.

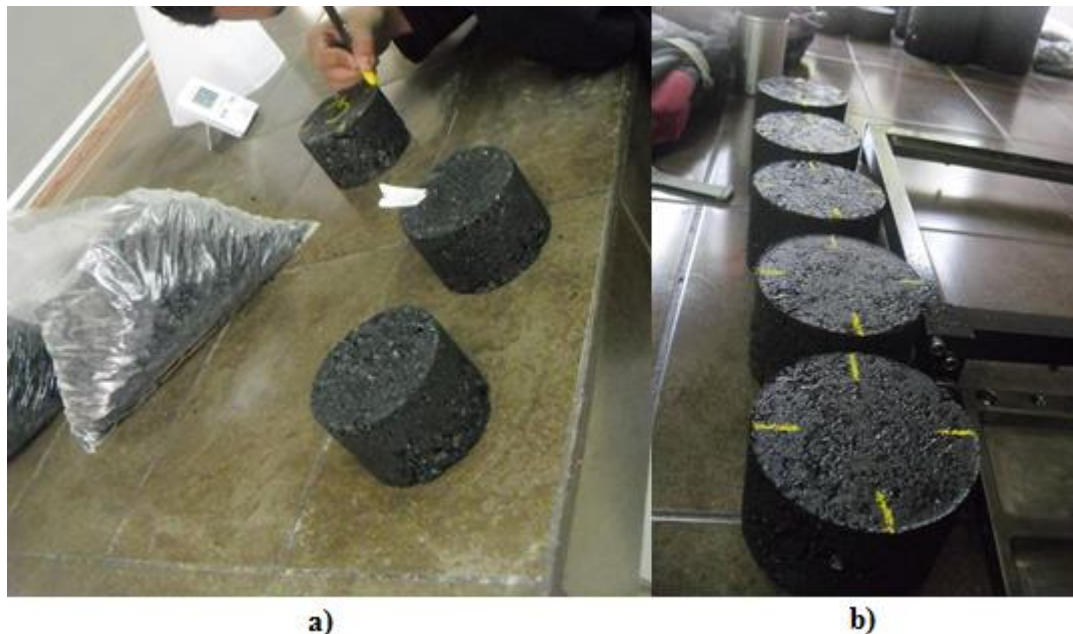


Figura 3.42. Preparación de briquetas.
a) Rotulado de briquetas. b) Briquetas con líneas guías trazadas. Las líneas guías fueron trazadas usando un pie de rey y sirven de referencia para tomar las medidas de diámetros a promediar.
Fuente: Registro propio.

Según la norma ASTM D6926 (2016), las medidas de las briquetas compactadas debían mantenerse en los rangos de (102 ± 0.5) mm de diámetro y (64 ± 2.5) mm de altura. Esto fue utilizado como criterio predictivo del contenido de vacíos.

Tabla 3.10

Formato para recolección de las medidas de briqueta.

Muestreo	# Briqueta	Φ_1	Φ_2	$\Phi_{prom.}$	h_1	h_2	h_3	h_4	$h_{prom.}$

“ Φ ” representa el diámetro y “h” la altura.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.7. Preparación y compactación de briquetas mediante compactador giratorio.

3.2.7.1. Significado y uso.

Las briquetas o especímenes compactados mediante el compactador giratorio pueden ser utilizadas para la determinación de propiedades mecánicas y volumétricas, aplicando

compactación por amasado, razón por la cual las briquetas pueden simular la densidad, orientación del agregado y características estructurales de la mezcla colocada en obra (AASHTO T 312, 2011).

En esta investigación se elaboraron 3 briquetas, por muestreo, con Compactador Giratorio aplicando 70, 100 y 125 giros. La variación de giros se debió a que, a diferencia de las briquetas Marshall, la determinación de la gravedad específica Bulk y el contenido de vacíos se llevó a cabo sobre núcleos extraídos de (93 ± 0.4) mm de diámetro y (150 ± 2.5) mm de altura. La extracción y descabezado de los núcleos se realizó como uno de los últimos procesos y se esperaba obtener un rango variado de contenidos de vacíos. Además a los núcleos se les practicó el ensayo para determinación de módulo dinámico de mezclas según designación AASTHO (ver Sección 3.2.10).

Tabla 3.11
Número de giros aplicados para la compactación.

Nivel de tránsito	ESAL's diseño($\times 10^6$)	Número de giros de diseño
LIVIANO	0.3 - <3	75
MEDIO	3 - <30	100
PESADO	≥ 30	125

Fuente: (AASHTO R 35, 2015).

3.2.7.2. Procedimiento.

Previo al enmoldado de la mezcla acondicionada, se realizaron dos procesos complementarios. El primero fue el corte de filtros circulares, en páginas de papel bond, utilizando de plantilla la tapa del molde. Lo segundo fue el aceitado del molde para evitar que la mezcla se adhiriera a las paredes del mismo y facilitar su extracción. Se colocó un poco de aceite en una franela pequeña y se esparció cuidadosamente en todo el interior del molde caliente.



Figura 3.43. Corte de filtros.
 Los filtros se cortaron en hojas de papel bond usando la tapa superior del molde como guía, para encajar perfectamente dentro del molde.
 Fuente: Registro propio.

Con el molde aceitado, se colocó un primer filtro en el fondo y posteriormente se agregó la mezcla en dos capas, lo más similares posibles, para varillar de forma similar a la aplicada en las briquetas Marshall y acomodar todo el material.



Figura 3.44. Enmoldado de mezcla para Compactador Giratorio.
 a) Colocación de mezcla en el molde. b) Varillado de mezcla enmoldada.
 Fuente: Registro propio.

Con la mezcla enmoldada, se introdujo nuevamente en el horno el tiempo suficiente para adquirir la temperatura de compactación de $(140 \pm 2) ^\circ\text{C}$. El control de temperatura, en este caso, fue más difícil que para las briquetas Marshall debido a que las instalaciones del laboratorio en donde se encontraba el compactador giratorio se mantenían, permanentemente, a una temperatura de $25 ^\circ\text{C}$. Así que en el momento de alcanzar la temperatura de compactación deseada se colocó el molde dentro del compactador, junto con un termómetro para comprobar lo mayormente posible la temperatura, se puso el filtro de papel junto con la tapa superior y se cerró la cámara del compactador.



***Figura 3.45. Colocación de molde con mezcla en el horno para recuperación de temperatura.
Fuente: Registro propio.***

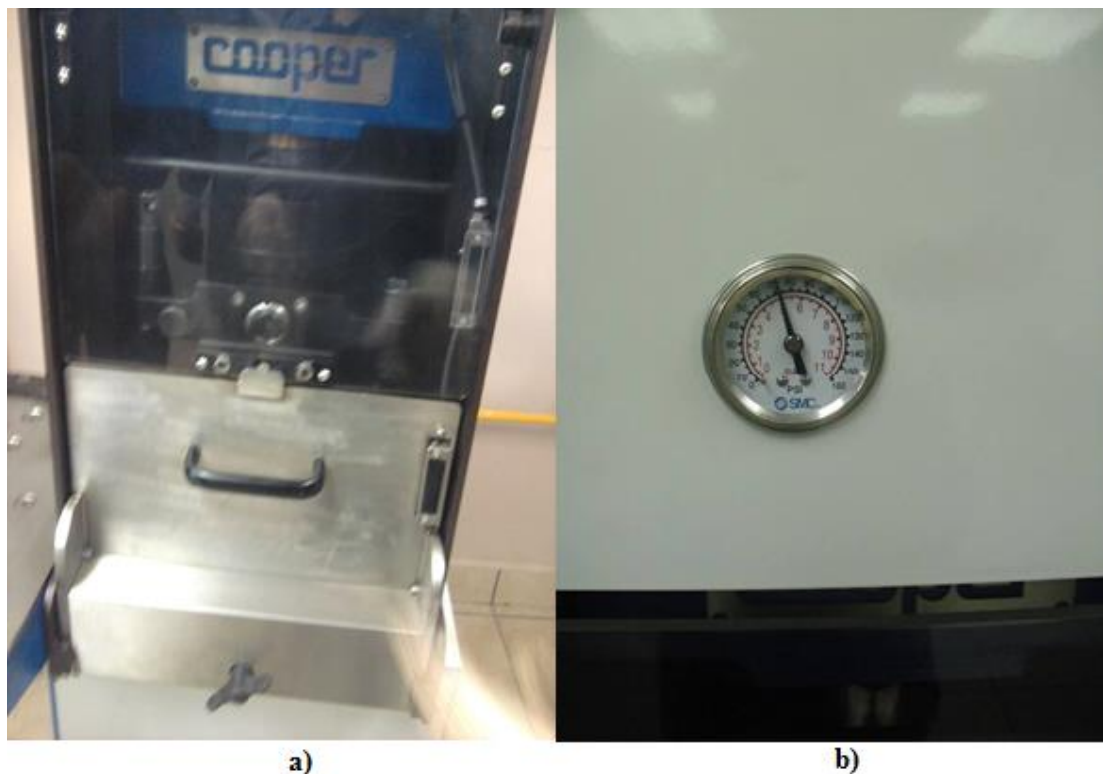


Figura 3.46. Compactador Giratorio en operación.
 a) Molde asegurado en el compactador. b) Manómetro de control de presión aplicada durante el amasado. Fuente: Registro propio.

Al mismo tiempo que se aseguró el molde en el compactador, se ingresó el número de giros a aplicar y se aseguró que la presión aplicada fuera de 5 bares (500 kPa) durante la compactación (**Figura 3.46b**).

Terminada la compactación, el molde fue desplazado a un pistón hidráulico ubicado a la derecha de la cámara y se dejó reposar de 3 a 4 minutos para desmoldar. Para lograr manipular la briqueta, fue necesario un ventilador que acelerase su enfriamiento y poder reutilizar o limpiar el molde, ya que solo se contaba con un molde de 6 in. de diámetro. La **Figura 3.48b** muestra un ejemplo de lo ocurrido al intentar transportar la briqueta sin suministrar el tiempo de enfriamiento suficiente. La briqueta estaba aún demasiado caliente y no tenía la consolidación suficiente, por lo cual está se partió.

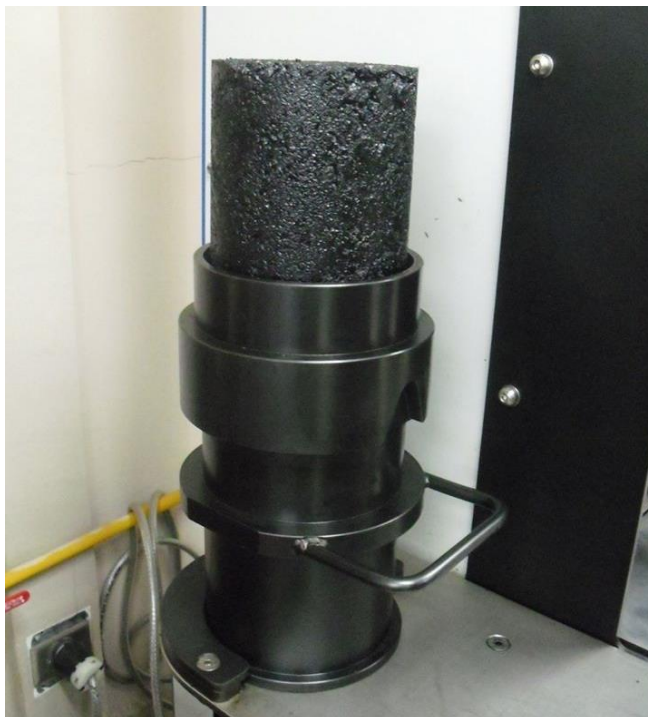


Figura 3.47. Desmoldado de briqueta.
Se realizó utilizando un pistón hidráulico que posee el compactador.
Fuente: Registro propio

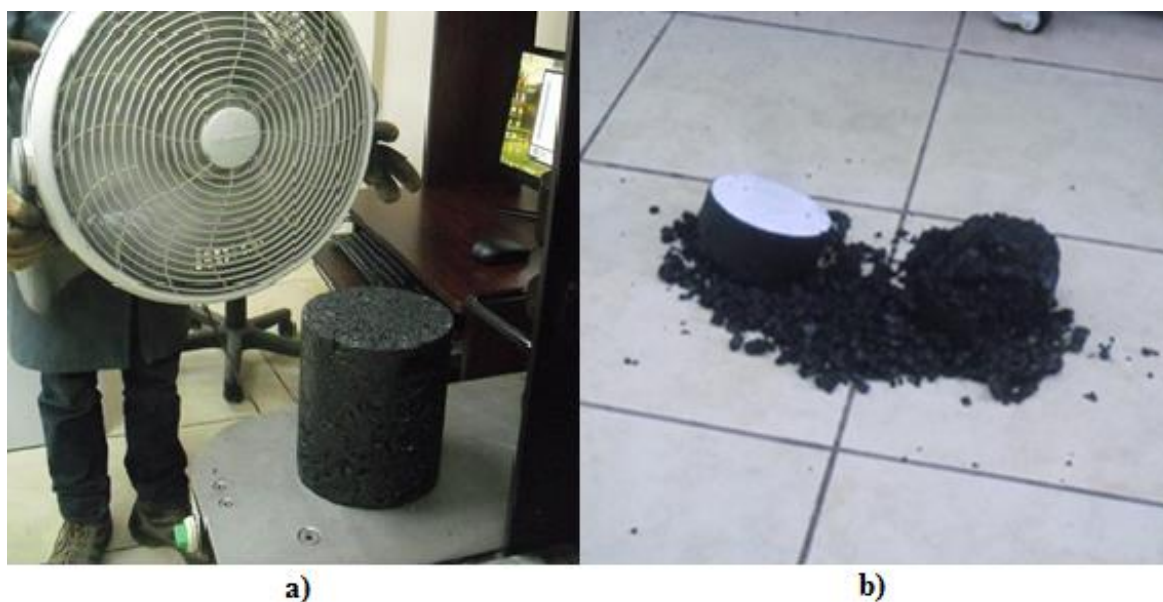


Figura 3.48. Enfriamiento de briqueta.
a) Uso del ventilador. b) Consecuencia de manipular briquetas sin aplicar el tiempo de enfriamiento suficiente.
Fuente: Registro propio

Las briquetas fueron identificadas con filtros sobrantes, colocando la información siguiente: UESOcc, número de giros y presión aplicada y fecha de compactación.

3.2.7.3. Extracción de núcleos.

La extracción de los núcleos se realizó en dos grupos de 6 briquetas y fue de los últimos procesos realizados ya que en las instalaciones de ASFALCA, si bien poseen la estructura principal de un extractor, no mantienen consigo la broca de diamante para realizar el corte y está debe ser solicitada.

La extracción se realizó humedeciendo las briquetas a medida que se bajaba la broca por medio de una palanca. Este movimiento se realizó lentamente y de forma constante, para minimizar el efecto de ensanchamiento de la parte media del núcleo. Los núcleos extraídos fueron medidos y se les colocó una marca para cortarlos a 150 mm de altura en una mesa cortadora, a este proceso se le denomina descabezado de núcleos. El resto del material o el cascarón, fue desechado.



Figura 3.49. . Extracción de núcleo.
a) Perforación de briqueta de 6" para obtener núcleo de 4" de diámetro. b) Núcleo extraído. El material sobrante de la extracción fue desechado debido a su contacto con el aceite al momento de la compactación.

Fuente: Registro propio.



**Figura 3.50. Medición de altura en núcleo extraído.
Se colocó marcas a los 150 mm.
Fuente: Registro propio**



**Figura 3.51. Descabezado de núcleos para lograr alturas de 150 mm
. Esta tarea se realizó con la ayuda de un laboratorista.
Fuente: Registro propio.**

Para finalizar, los núcleos descabezados fueron llevados al taller de la planta y se les realizó el correspondiente pulido, minimizando las imperfecciones producidas durante el corte. Tanto la cara superior e inferior debían encontrarse lo más niveladas posibles.



Figura 3.52. Pulido de núcleos para reducir las imperfecciones de los bordes. Se contó con ayuda del personal del taller de la planta.
Fuente: Registro propio.

A los núcleos preparados se les tomaron las medidas de diámetro y altura mediante un pie de rey y cinta métrica.

Tabla 3.12

Formato para recolección de las medidas de núcleos.

Muestreo	# Núcleo	Φ_1	Φ_2	$\Phi_{prom.}$	h_1	h_2	h_3	h_4	$h_{prom.}$

“ Φ ” representa el diámetro y “h” la altura.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.8. Gravedad específica Bulk de briquetas compactadas.

3.2.8.1. Significado y uso.

Los resultados obtenidos a partir del método de ensayo, para gravedad específica Bulk de briquetas compactadas, fueron utilizados para la determinación de la densidad de todas las briquetas compactadas (ASTM D2726, 2014) y, en complemento con el método de ensayo de la norma ASTM D 3203 (ver Sección 3.2.9), obtener los porcentajes de vacíos logrados.

Para determinar la densidad de las briquetas se multiplicó la gravedad específica Bulk obtenida en los ensayos, a 25 °C, por la densidad de agua a la misma temperatura, la cual se asume que tiene un valor de 0.997 g/cm³ (ASTM D2726, 2014).

3.2.8.2. Procedimiento (ASTM D2726, 2014).

La determinación de los pesos necesarios para el cálculo de la gravedad específica Bulk, fue realizada en una balanza digital, por lo cual, las briquetas fueron llevadas a la zona del laboratorio en donde dicha balanza se encontraba. Las briquetas fueron ensayadas al día siguiente de haber sido compactadas y aprovechando su estado seco, lo primero que se registró fueron sus pesos secos al aire (A). Luego se colocó una cubeta con agua, dentro de la cual se introdujo una canastilla enganchada a la parte inferior de la balanza. La cubeta con agua fue aforada y temperada para mantener $(25 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$. Para controlar la temperatura se utilizó un termómetro de mercurio o una termocupla.



Figura 3.53. Temperado del agua en la cubeta.
En todo momento tanto el agua de la cubeta como el agua a agregar para lograr los aforos, debían cumplir con el rango de temperatura.
Fuente: Registro propio.



Figura 3.54. Equipo preparado para determinación de pesos sumergidos y saturado superficialmente seco (SSS).

Fuente: Registro propio

Cada una de las briquetas fue colocada dentro de la canastilla sumergida durante 4 minutos. Al cumplirse el tiempo sumergido se registró el peso aparente o peso sumergido de la briqueta (C), se extrajo la briqueta de la canastilla y se secó superficialmente con una toalla. Finalmente fue registrado el peso de la briqueta en condición saturada superficialmente seca (B).



*Figura 3.55. Briqueta sumergida en agua.
Fuente: Registro propio.*



*Figura 3.56. Secado de briqueta para obtener condición saturada superficialmente seca (SSS).
Fuente: Registro propio.*

La gravedad específica Bulk fue calculada según la fórmula:

$$G_{mb} = \frac{A}{B-C} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

El término “B – C”, representa el peso del volumen para el volumen de la briqueta a 25°C.

La densidad fue calculada de la siguiente manera:

$$\text{Densidad} = G_{mb} \times 0.997 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Tabla 3.13

Resumen del cálculo de gravedad específica Bulk y densidad de briquetas Marshall.

Muestreo	# Briqueta	A (g)	B (g)	C (g)	Gmb	Densidad del agua a (25 °C)	Densidad (gr/cm ³)
1	3	1160.0	1175.3	651.4	2.214	0.997	2.208
	4	1164.6	1176.6	652.1	2.220	0.997	2.214
	5	1153.2	1163.0	644.6	2.225	0.997	2.218
	6	1144.0	1149.6	640.5	2.247	0.997	2.240
	7	1162.2	1165.3	657.2	2.287	0.997	2.280
	8	1163.0	1165.6	653.8	2.272	0.997	2.266
	9	1163.6	1167.2	654.5	2.270	0.997	2.263
2	10	1160.8	1166.0	653.9	2.267	0.997	2.260
	11	1167.1	1172.0	657.0	2.266	0.997	2.259
	12	1162.8	1165.8	657.9	2.289	0.997	2.283
	13	1169.3	1170.7	661.4	2.296	0.997	2.289
	14	1170.8	1172.6	663.6	2.300	0.997	2.293
	15	1161.2	1166.6	655.6	2.272	0.997	2.266
	16	1158.3	1160.4	655.0	2.292	0.997	2.285
	17	1169.7	1173.7	657.5	2.266	0.997	2.259
	18	1168.6	1170.5	658.4	2.282	0.997	2.275
3	19	1168.2	1172.2	656.8	2.267	0.997	2.260
	20	1169.4	1170.9	659.7	2.288	0.997	2.281
	21	1163.6	1165.7	655.4	2.280	0.997	2.273
	22	1164.4	1164.9	653.8	2.278	0.997	2.271
	23	1165.5	1168.3	655.8	2.274	0.997	2.267
	24	1164.2	1167.7	653.6	2.265	0.997	2.258
	25	1165.7	1171.3	658.8	2.275	0.997	2.268
	26	1168.5	1170.5	664.0	2.307	0.997	2.300
	27	1165.2	1165.9	660.5	2.306	0.997	2.299
4	28	1175.4	1176.9	668.1	2.310	0.997	2.303
	29	1170.2	1173.6	665.9	2.305	0.997	2.298
	30	1167.7	1169.8	661.6	2.298	0.997	2.291
	31	1164.4	1166.0	658.4	2.294	0.997	2.287
	32	1163.2	1164.4	658.6	2.300	0.997	2.293
	33	1171.0	1174.2	663.2	2.292	0.997	2.285
	34	1164.1	1166.8	657.6	2.286	0.997	2.279
	35	1163.5	1176.3	659.0	2.249	0.997	2.242
	36	1156.5	1160.5	653.7	2.282	0.997	2.275
	37	1162.8	1167.9	659.7	2.288	0.997	2.281
	38	1163.2	1165.3	660.7	2.305	0.997	2.298

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.14**Resumen del cálculo de gravedad específica Bulk y densidad de núcleos extraídos.**

Muestreo	# Núcleo	A (g)	B (g)	C (g)	Gmb	Densidad del agua a (25 °C)	Densidad (gr/cm ³)
1	1	2282.8	2295.9	1281.3	2.250	0.997	2.243
	2	2298.8	2313.6	1297.1	2.261	0.997	2.255
	3	2345.0	2353.1	1337.7	2.309	0.997	2.303
2	4	2385.8	2391.5	1371.6	2.339	0.997	2.332
	5	2365.8	2372.4	1357.6	2.331	0.997	2.324
	6	2393.0	2397.4	1380.7	2.354	0.997	2.347
3	7	2352.4	2370.5	1354.3	2.315	0.997	2.308
	8	2366.7	2371.2	1356.5	2.332	0.997	2.325
	9	2375.3	2378.7	1369.3	2.353	0.997	2.346
4	10	2242.6	2253.4	1246.3	2.227	0.997	2.220
	11	2250.4	2258.1	1248.7	2.229	0.997	2.223
	12	2296.8	2302.3	1296.6	2.284	0.997	2.277

Fuente: Elaboración propia.

3.2.9. Contenido de vacíos de aire en las briquetas y núcleos a ensayar.

La determinación de los contenidos de vacíos de aire de todas las briquetas, tanto Marshall como de compactador giratorio, se realizó según la metodología expuesta en las normas ASTM. Para el cálculo únicamente fueron necesarios la gravedad teórica máxima promedio de todos los muestreos (G_{mm}) y las gravedades específicas Bulk (G_{mb}) de cada una de las briquetas (ASTM D3203, 2011), aplicando la fórmula siguiente:

$$\%Vacíos = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Tabla 3.15
Cálculo del contenido de vacíos de aire en las briquetas Marshall.

Muestreo	# Briqueta	Gmm	Gmb	Densidad (gr/cm³)	% Vacíos	Golpes/cara	
1	3	2.395	2.214	2.208	7.56	35	
	4	2.395	2.220	2.214	7.30	50	
	5	2.395	2.225	2.218	7.13		
	6	2.395	2.247	2.240	6.18		
	2	7	2.395	2.287	2.280	4.50	75
		8	2.395	2.272	2.266	5.13	
		9	2.395	2.270	2.263	5.25	
10		2.395	2.267	2.260	5.36		
3	11	2.395	2.266	2.259	5.39	75	
	12	2.395	2.289	2.283	4.42		
	13	2.395	2.296	2.289	4.15		
	14	2.395	2.300	2.293	3.97		
	15	2.395	2.272	2.266	5.13		
	16	2.395	2.292	2.285	4.32		
	17	2.395	2.266	2.259	5.40		
	18	2.395	2.282	2.275	4.73		
4	19	2.395	2.267	2.260	5.37	75	
	20	2.395	2.288	2.281	4.50		
	21	2.395	2.280	2.273	4.80		
	22	2.395	2.278	2.271	4.89		
	23	2.395	2.274	2.267	5.06		
	24	2.395	2.265	2.258	5.46		
	25	2.395	2.275	2.268	5.04		
	26	2.395	2.307	2.300	3.68		
	27	2.395	2.306	2.299	3.75		
5	28	2.395	2.310	2.303	3.55	75	
	29	2.395	2.305	2.298	3.77		
	30	2.395	2.298	2.291	4.07		
	31	2.395	2.294	2.287	4.23		
	32	2.395	2.300	2.293	3.99		
	33	2.395	2.292	2.285	4.33		
	34	2.395	2.286	2.279	4.56		
	35	2.395	2.249	2.242	6.10		
	36	2.395	2.282	2.275	4.73		
	37	2.395	2.288	2.281	4.47		
	38	2.395	2.305	2.298	3.76		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.16
Cálculo del contenido de vacíos de aire en los núcleos extraídos.

Muestreo	# Núcleo	Gmm	Gmb	Densidad (gr/cm ³)	% Vacíos	# Giros
1	1	2.395	2.250	2.243	6.07	75
	2	2.395	2.261	2.255	5.58	100
	3	2.395	2.309	2.303	3.58	125
2	4	2.395	2.331	2.332	2.67	75
	5	2.395	2.339	2.324	2.34	100
	6	2.395	2.354	2.347	1.73	125
3	7	2.395	2.315	2.308	3.35	75
	8	2.395	2.332	2.325	2.62	100
	9	2.395	2.353	2.346	1.76	125
4	10	2.395	2.227	2.220	7.03	75
	11	2.395	2.229	2.223	6.92	100
	12	2.395	2.284	2.277	4.65	125

Fuente: Elaboración propia.

Las briquetas y núcleos considerados para la comparación estadística de los módulos de mezcla a evaluar, fueron aquellos que poseían un contenido de vacíos de aire menor al 8 %, sin embargo se trató de utilizar, en el análisis final de los módulos, la mayor cantidad de datos posibles entre 3% al 5% de vacíos.

3.2.10. Ensayo para determinación del Módulo de Resiliencia.

3.2.10.1. Significado y uso.

La norma europea 12697-26 establece una serie de ensayos por medio de los cuales es posible medir la rigidez de las mezclas asfálticas. Se utilizó el anexo “C” correspondiente a la aplicación de tracción indirecta sobre especímenes cilíndricos, para determinar el módulo de resiliencia o resiliente a 3 temperaturas diferentes: 4 °C, 21 °C y 37 °C y a una frecuencia de aplicación de carga de (0.33 ± 0.03) Hz (BSEN126976-26, 2012). Con este ensayo es posible replicar el estado de esfuerzos más crítico que ocurre en la fibra inferior de la carpeta asfáltica sometida bajo una carga.

Se ensayaron un total de 12 briquetas Marshall a cada una de las temperaturas seleccionadas, calculando el módulo resiliente al cual se le aplicó un ajuste de área según la

norma. Además se verificó el cumplimiento de algunas condiciones para la aceptación o rechazo de los resultados.

3.2.10.2. Procedimiento.

Antes de realizar los ensayos sobre las briquetas, fue necesario brindarles un acondicionamiento de acuerdo a la temperatura requerida para el ensayo. La **Tabla 3.17** muestra los tiempos dados según las temperaturas.

Tabla 3.17

Tiempos de acondicionamiento de briquetas según temperatura de ensayo.

Temperatura de ensayo (°C)	Tiempo de acondicionamiento (horas)
4	Toda la noche
21	3
37	2

Las briquetas a ensayar a 4 °C, se dejaban en la cámara toda la noche y se ensayaron a primera hora el día siguiente.

Fuente: (BSEN126976-26, 2012).

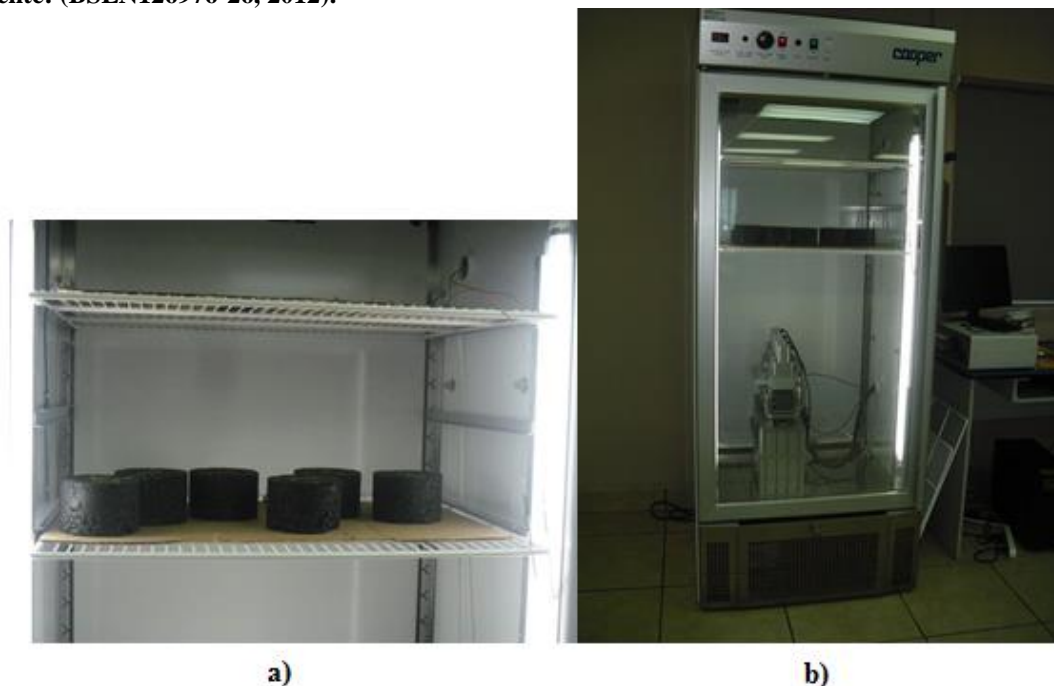
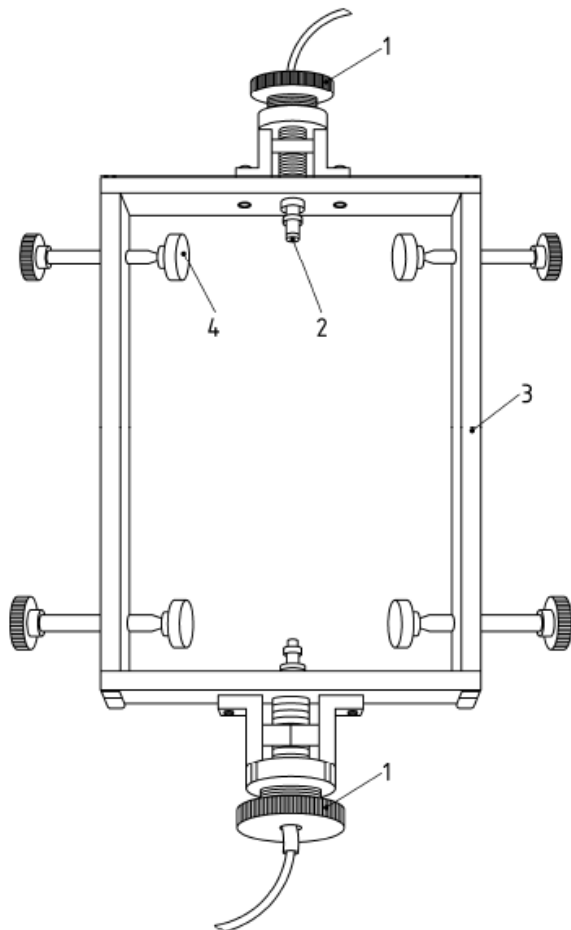


Figura 3.57. Ensayo de módulo resiliente por tracción indirecta.
 a) Briquetas en acondicionamiento para ensayo a tracción indirecta. b) Cámara de acondicionamiento. Fuente: Registro propio.

Antes de montar el ensayo, tanto el marco de soporte como el marco para los LVDT's fueron introducidos en la misma cámara para su temperización.



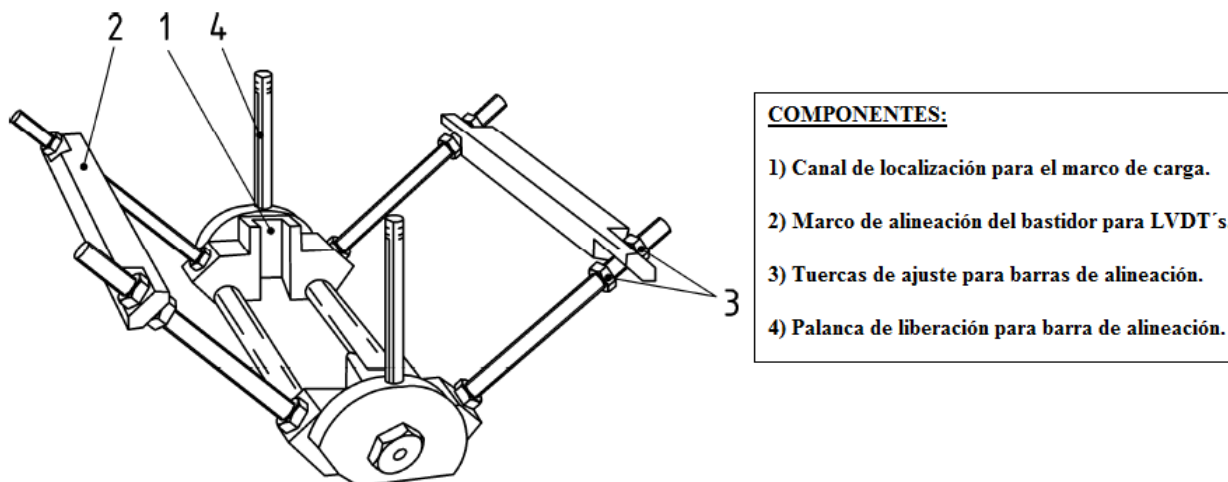
Figura 3.58. Marco de carga del equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) tipo NU.
Fuente: Registro propio.



COMPONENTES:

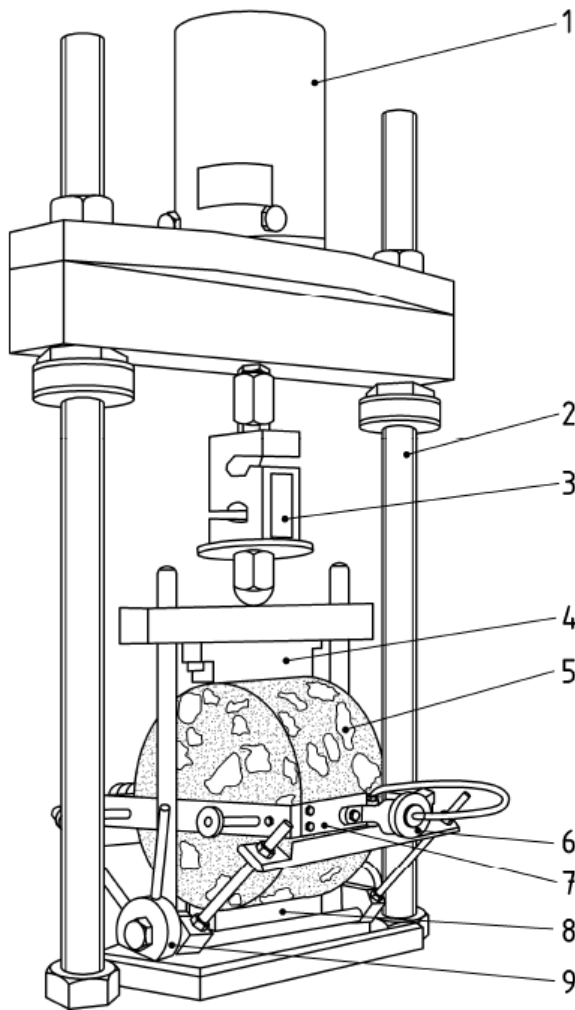
- 1) Ajustador de LVDT.
- 2) LVDT.
- 3) Marco de montaje para LVDT's.
- 4) Abrazaderas de sujeción.

Figura 3.59. Esquema de montaje de LVDT's para el ensayo.
Fuente: (BSEN126976-26, 2012).



*Figura 3.60. Soporte para marco de montaje de los LVDT's.
Fuente: (BSEN126976-26, 2012).*

El ensamblaje del equipo se realizó con el apoyo del ingeniero encargado del equipo, colocando el marco de los LVDT's sobre su soporte y alineándolos con el marco de carga del equipo NAT. Seguidamente se colocaron y aseguraron los LVDT's en el marco. Inmediatamente se extrajo una briqueta de la cámara para colocarla en el soporte, fijándola con las abrazaderas a modo de lograr el contacto de los bordes de la briqueta con los LVDT's. Finalmente se colocó la tira superior de carga, verificando su alineación respecto a la celda de carga.



COMPONENTES DEL EQUIPO:

- 1) Actuador.
- 2) Marco de carga.
- 3) Celda de carga.
- 4) Tira superior de carga.
- 5) Briqueta a ensayar.
- 6) Ajustador de LVDT.
- 7) Marco de montaje de LVDT's.
- 8) Tira inferior de carga.
- 9) Plantilla para alineación de LVDT's

*Figura 3.61. Esquema final del montaje para el ensayo.
Fuente: (BSEN126976-26, 2012).*



*Figura 3.62. Montaje del marco para LVDT's sobre el marco de alineación.
Fuente: Registro Propio.*



*Figura 3.63. Briqueta preparada para comenzar el ensayo.
Fuente: Registro propio.*

Los datos de entrada suministrados al equipo fueron: las dimensiones de las briquetas y la temperatura de ensayo. Se ajustaron los LVDT's de forma digital y se procedió al ensayo. El equipo aplicó 10 pulsos de acondicionamiento seguidos de 5 pulsos los cuales fueron registrados. Terminada esta fase del ensayo se desensambló la estructura para girar, aproximadamente, 90° la briqueta y volver a realizar el ensayo (BSEN126976-26, 2012).

La fórmula que utiliza el equipo NAT para el cálculo del módulo, en cada serie de pulsos, es la presentada en la Sección 2.5.1.

3.2.10.3. Criterios de aceptación de resultados.

Respecto a este ensayo se tuvo mucho cuidado ya que pequeñas variaciones no normadas, pudiesen propiciar datos erróneos que atentarian contra la validez de los mismos. En la **Tabla 3.18** se exponen los criterios de aceptación utilizados.

Tabla 3.18

Criterios tomados para la aceptación de resultados.

Criterio	Rango de aceptación
Tiempo de carga máxima	(124 ± 4) ms
Periodo del ciclo	(3±0.1) s
Deformación horizontal	(5 ± 2) um
Factor de área de carga	(0.60 ± 0.10)
Módulo Resiliente	El valor medio del módulo registrado en la segunda medición, debe estar entre +10% o -20% del valor medio registrado en la primera medición.

Fuente: (BSEN126976-26, 2012).

El valor de módulo al cual se aplicó el criterio de aceptación, fue al suministrado por el equipo NAT considerando el ajuste por factor de área de carga, según la fórmula siguiente:

$$M_R' = M_R(1 - 0.322(\log(M_R) - 1.82)(0.60 - k)) \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

La evaluación del periodo del ciclo de aplicación de carga, fue realizada como último punto para considerar la frecuencia aplicada válida para 0.33 Hz (BSEN126976-26, 2012).

Tabla 3.19
Evaluación de módulos resilientes a 4°C y 0.33 Hz.

Temperatura (°C)	# Briqueta	Periodo (s)			Frecuencia (Hz)	Mr' (Mpa)	%Vacíos
		Valor menor	Promedio medido	Valor mayor			
4	4	2.90	3.04	3.10	0.33	7407	7.30
	5		3.11		NC	NC	7.13
	10		3.05		0.33	11327	5.36
	11		3.00		0.33	10817	5.39
	12		3.03		0.33	11828	4.42
	17		3.03		0.33	10571	5.40
	18		3.03		0.33	11698	4.73
	19		3.01		0.33	11079	5.37
	27		3.04		0.33	11114	3.75
	28		3.03		0.33	12440	3.55
	29		3.04		0.33	13040	3.77
	30		3.03		0.33	12928	4.07

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.20
Evaluación de módulos resilientes a 21°C y 0.33 Hz.

Temperatura (°C)	# Briqueta	Periodo (s)			Frecuencia (Hz)	Mr' (Mpa)	%Vacíos
		Valor menor	Promedio medido	Valor mayor			
21	3	2.90	3.04	3.10	0.33	1409	7.56
	7		4.64		NC	NC	4.50
	8		4.65		NC	NC	5.13
	9		3.90		NC	NC	5.25
	20		3.00		0.33	2620	4.50
	21		3.03		0.33	2472	4.80
	22		3.04		0.33	2314	4.89
	26		2.88		NC	NC	3.68
	31		3.03		0.33	2161	4.23
	32		2.91		0.34	2256	3.99
	33		2.45		NC	NC	4.33
	34		2.95		0.34	2573	4.56

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.21
Evaluación de módulos resilientes a 37°C y 0.33 Hz.

Temperatura (°C)	# Briqueta	Periodo (s)			Frecuencia (Hz)	Mr' (Mpa)	% Vacíos
		Valor menor	Promedio medido	Valor mayor			
37	6	2.90	5.96	3.10	NC	NC	6.18
	13		5.15		NC	NC	4.15
	14		2.55		NC	NC	3.97
	15		3.52		NC	NC	5.13
	16		4.46		NC	NC	4.32
	23		5.05		NC	NC	5.06
	24		3.38		NC	NC	5.46
	25		2.99		0.33	NC	5.04
	35		5.25		NC	NC	6.10
	36		2.74		NC	NC	4.73
	37		4.73		NC	NC	4.47
	38		4.60		NC	NC	3.76

Fuente: Elaboración propia.

3.2.11. Determinación del Módulo Dinámico de la mezcla asfáltica.

3.2.11.1. Significado y uso.

Los valores de módulo dinámico medidos sobre un rango de temperaturas y frecuencias de carga, pueden ser desplazados en una curva maestra para caracterizar mezclas asfálticas y poder realizar el diseño de espesores de pavimento y análisis de desempeño. Por otra parte, los valores de módulo dinámico y ángulo de fase también pueden utilizarse como criterios de rendimiento para el diseño de las mezclas asfálticas en caliente (AASHTO T 342, 2011).

En esta investigación se realizaron los ensayos de módulo dinámico a todos los núcleos extraídos de briquetas elaboradas con el compactador giratorio, 12 núcleos en total, a las temperaturas de 4 °C, 21 °C y 37 °C. Además, por cada temperatura, fueron aplicadas las frecuencias de 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz y 0.1 Hz. Con los valores de módulos obtenidos, se realizó el ajuste de la curva maestra de cada núcleo y se determinó el valor del módulo a cada una de las temperaturas de ensayo, a una frecuencia de 0.33 Hz. El último arreglo fue necesario ya que el ensayo de módulo de resiliencia se aplicó, en el rango de aceptación establecido, a la frecuencia de 0.33 Hz.

3.2.11.2. Procedimiento.

Los núcleos extraídos y preparados fueron llevados a las instalaciones del laboratorio en donde se encuentran tanto la cámara de acondicionamiento como el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT). Debido a que el ensayo completo del módulo dinámico puede realizarse, sin sobrecarga de equipo y con facilidad, durante una jornada, se ensayó un núcleo diariamente. El ensayo completo de módulo dinámico suministra valores de módulos a todas las combinaciones de temperatura y frecuencia establecidas (AASHTO T 342, 2011).

Previo a la ejecución del ensayo sobre cada núcleo, se les colocó un juego de 4 pines a los costados. La función de los pines es sujetar las almohadillas o soportes entre los cuales se colocan los deformímetros o LVDT's. A la unión de los pines y soportes se les denomina pernos de montaje. Los pines se adhirieron a los núcleos utilizando pegamento en gel y aplicando presión con un equipo conocido como "pinera".

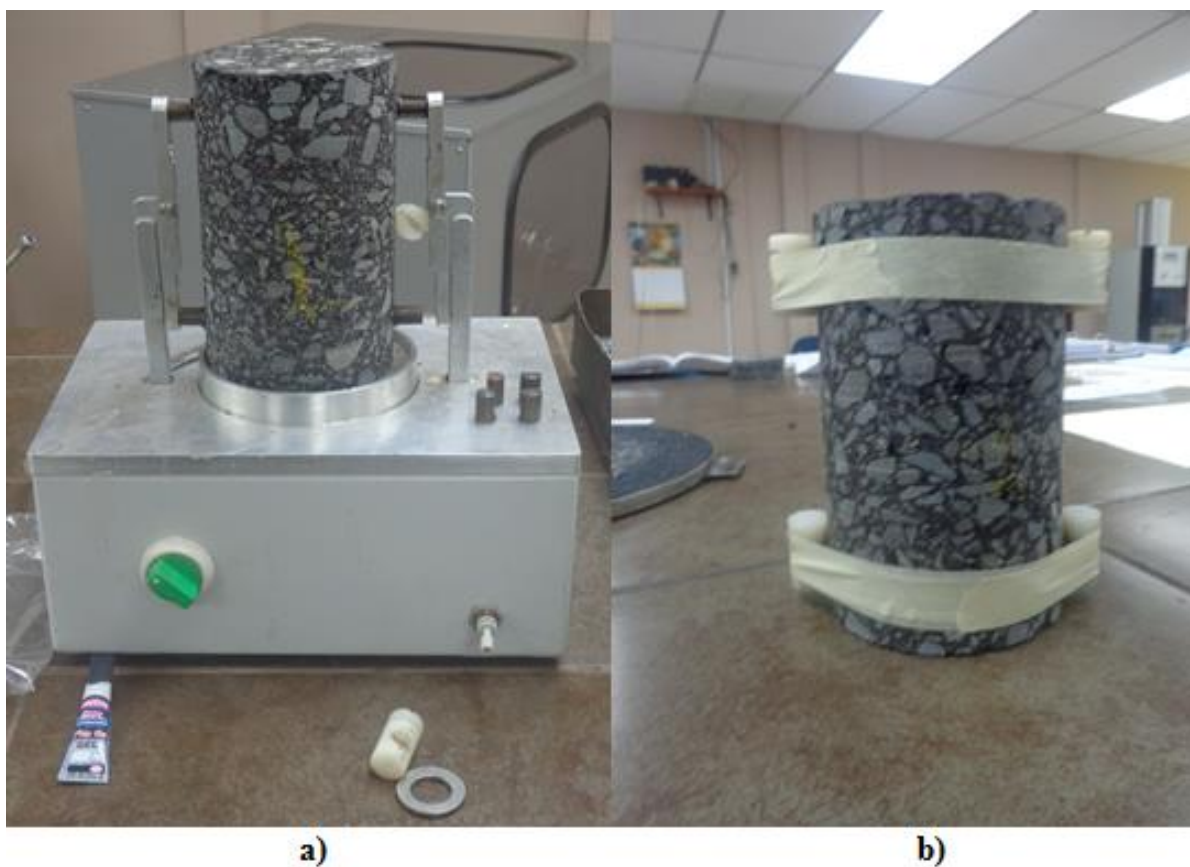


Figura 3.64. Preparación de núcleo a ensayar.
 a) Colocación de pines en un núcleo a ensayar. b) Núcleo con soportes fijos para evitar desplazamientos vertical y lateral.

Fuente: Registro propio.

Luego de la fijación de los pernos de montaje, los núcleos fueron colocados en la cámara de acondicionamiento a la temperatura correspondiente. Los tiempos aplicados son los mismos descritos en la **Tabla 3.17** para módulo de resiliencia la diferencia reside en que, para módulo dinámico, un solo núcleo fue acondicionado para ensayar a tres temperaturas diferentes. Al terminar el ensayo a una temperatura, el núcleo fue puesto a acondicionamiento para el ensayo a la temperatura siguiente. Los ensayos se realizaron en orden creciente en función de la temperatura.

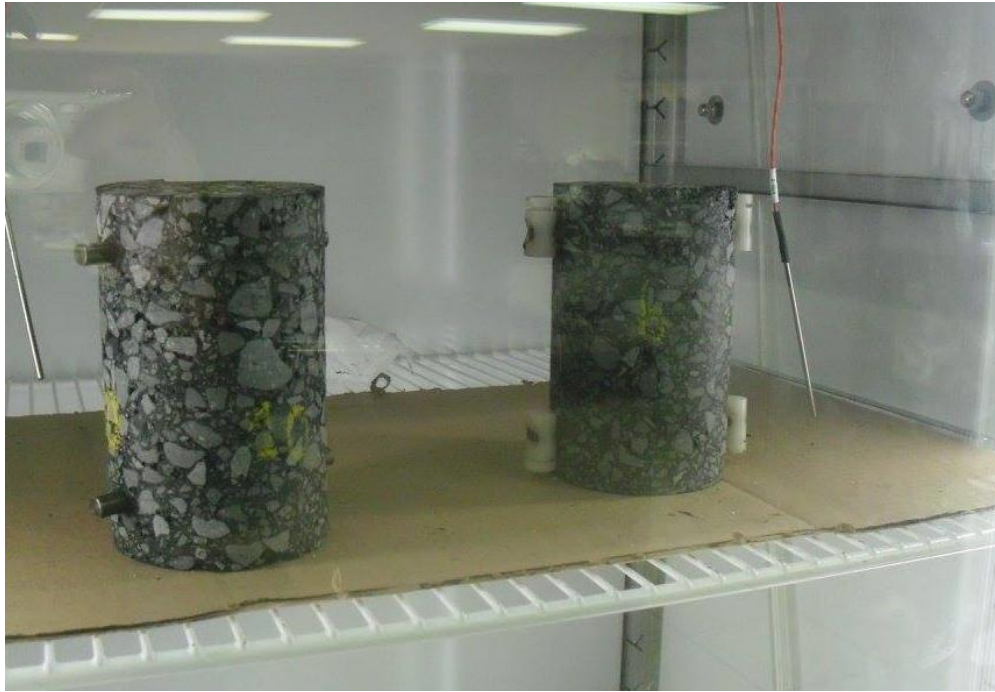
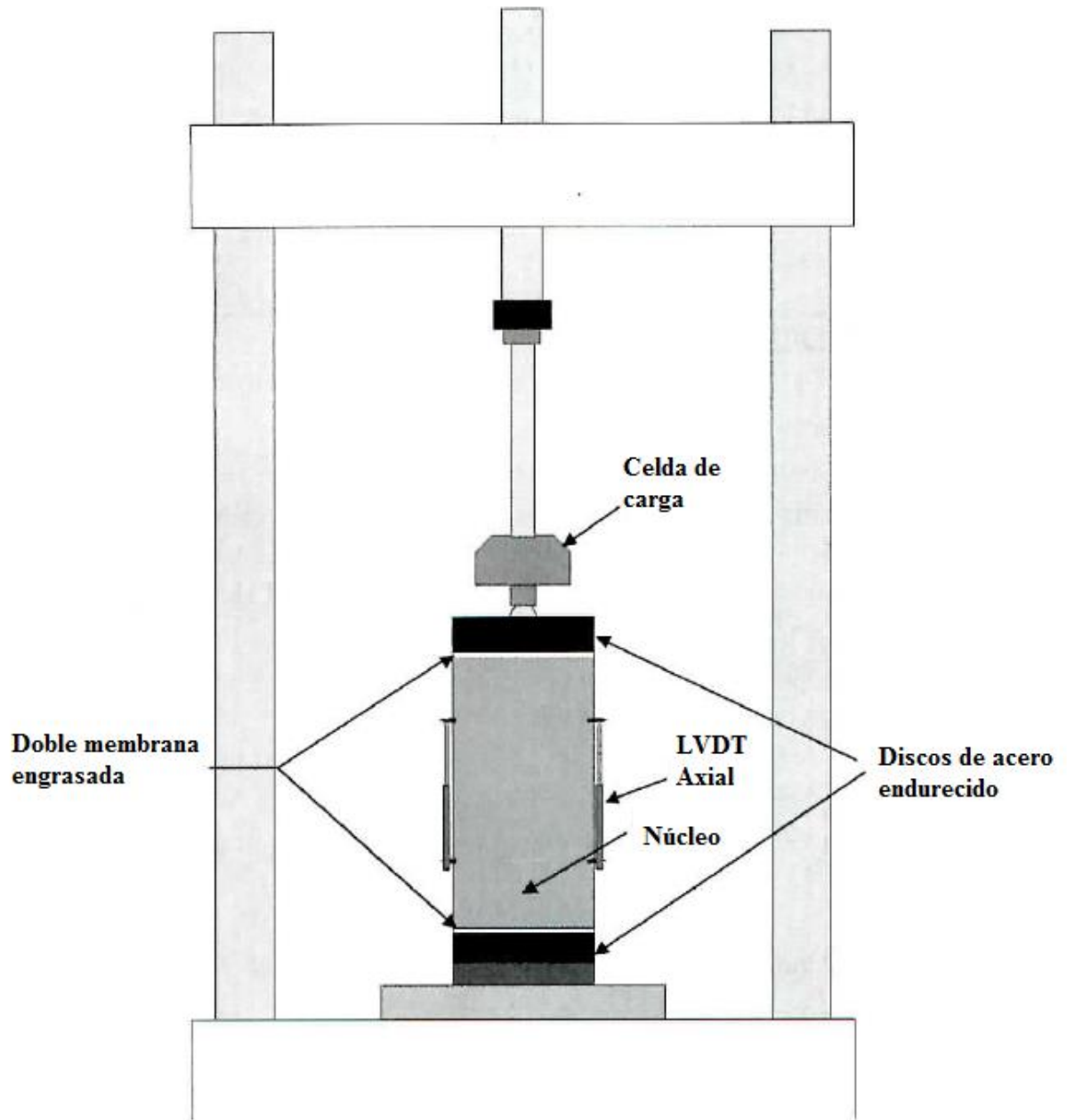
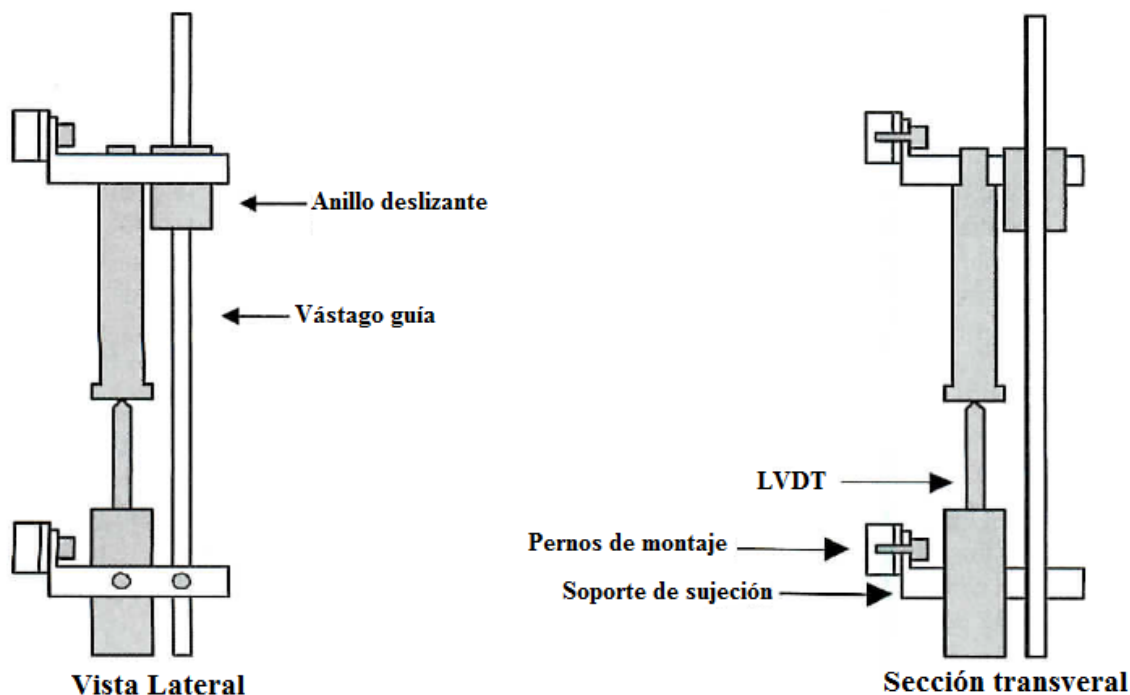


Figura 3.65. Acondicionamiento de núcleos.
Fuente: Registro propio.

El montaje del ensayo consistió en centrar el núcleo respecto la celda de carga y colocar las estructuras laterales de los LVDT's. La **Figura 3.66** muestra el esquema del montaje del ensayo para módulo dinámico y en la **Figura 3.67** se pueden visualizar los componentes de las estructuras de los LVDT's.



*Figura 3.66. Esquema general del ensayo de módulo dinámico.
Fuente: (AASHTO T 342, 2011).*



Vista Lateral
Sección transversal
 Figura 3.67. Detalles de las estructuras de montaje.
 Fuente: (AASHTO T 342, 2011).

El ajuste de los valores de módulos obtenidos para la construcción de las curvas maestra y la determinación del valor de ajuste $\text{Log}(a_T)$, se realizó aplicando la función sigmoïdal y el método del polinomio de segundo orden, respectivamente, descritos en la sección 2.5.2.1. Los parámetros α , β , δ , γ , a_1 y a_2 fueron obtenidos con ayuda de la herramienta SOLVER de Microsoft Excel, para lograr curvas lo más suavizadas posibles. El ajuste de las curvas se realizó mediante la minimización de los errores cuadrados entre el módulo predicho y el módulo medido en el ensayo (AASHTO R 62, 2013).

$$\sum \text{error}^2 = \sum_1^n (\log E^*_p - \log E^*)^2 \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

Dónde:

$\sum \text{error}^2$ = sumatoria de errores cuadrados;

n = número de combinaciones de temperatura/frecuencia usados en el ensayo;

$\log E^*_p$ = valor predicho por la función sigmoïdal para cada combinación de temperatura/frecuencia; y

$\log E^*$ = logaritmo del módulo dinámico medido para cada combinación de temperatura/frecuencia aplicada.

Además se calcularon los parámetros establecidos en la norma AASHTO R 62 (2013), para comprobar la “bondad del ajuste de curvas maestras”, los cuales fueron: desviación

estándar del logaritmo del módulo dinámico medido para todas las combinaciones de temperatura/frecuencia (S_y), error estándar de estimación (S_e) y la varianza (R^2).

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\log E^* - \overline{\log E^*})^2}{n-1}} \quad \text{(Ecuación 3.7)}$$

Dónde:

S_y = desviación estándar del logaritmo del módulo dinámico medido para todas las combinaciones de temperatura/frecuencia;

$\log E^*$ = logaritmo del módulo dinámico medido para cada combinación de temperatura/frecuencia;

$\overline{\log E^*}$ = promedio de logaritmo de módulos dinámicos medidos; y

n = número de combinaciones de temperatura/frecuencia usados en el ensayo.

$$S_e = \left[\frac{1}{n-p-1} * \sum_1^n (\log E^*_p - \log E^*)^2 \right]^{0.5} \quad \text{(Ecuación 3.8)}$$

Donde:

S_e = error estándar de estimación;

n = número de combinaciones de temperatura/frecuencia usados en el ensayo;

p = número de parámetros de ajuste;

$\log E^*_p$ = valor predicho por la función sigmoideal para cada combinación de temperatura/frecuencia; y

$\log E^*$ = logaritmo del módulo dinámico medido para cada combinación de temperatura/frecuencia aplicada.

$$R^2 = 1 - \frac{(n-p-1)S_e^2}{(n-1)S_y^2} \quad \text{(Ecuación 3.9)}$$

Dónde:

R^2 = varianza;

n = número de combinaciones de temperatura/frecuencia usados en el ensayo;

p = número de parámetros de ajuste;

S_e = error estándar de estimación de la ecuación 3.8; y

S_y = desviación estándar del logaritmo del módulo dinámico medido para todas las combinaciones de temperatura/frecuencia de la ecuación 3.7.

Para comprobar la bondad de ajuste de las curvas, se tomaron los criterios dados tal como siguen (AASHTO R 62, 2013):

- La relación de S_e y S_y debe ser menor o igual a 0.05.
- La varianza debe de exceder del 0.99.

Tabla 3.22

Resultados del ajuste de curvas maestras de módulos dinámicos a 4°C y 0.33 Hz.

# Núcleo	E* (MPa)	%Vacíos
1	6339.4	6.07
2	16300.8	5.58
3	27948.2	3.58
4	6651.1	2.67
5	12104.1	2.34
6	21342.3	1.73
7	11705.3	3.35
8	18859.2	2.62
9	17193.5	1.76
10	11907.7	7.03
11	14891.5	6.92
12	14748.4	4.65

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.23

Resultados del ajuste de curvas maestras de módulos dinámicos a 21°C y 0.33 Hz.

# Núcleo	E* (MPa)	%Vacíos
1	3166.5	6.07
2	6872.3	5.58
3	5272.4	3.58
4	2435.7	2.67
5	3491.0	2.34
6	6027.3	1.73
7	7775.9	3.35
8	5293.3	2.62
9	5039.7	1.76
10	4199.7	7.03
11	4390.5	6.92
12	3860.6	4.65

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.24*Resultados del ajuste de curvas maestras de módulos dinámicos a 37°C y 0.33 Hz.*

# Núcleo	E* (MPa)	%Vacíos
1	1289.7	6.07
2	2535.1	5.58
3	1033.9	3.58
4	954.3	2.67
5	1042.5	2.34
6	1409.1	1.73
7	2513.5	3.35
8	1524.9	2.62
9	1219.9	1.76
10	933.0	7.03
11	1286.7	6.92
12	1077.1	4.65

Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV: Tratamiento y análisis de resultados

Las mediciones de módulo resiliente, que cumplen con los criterios de aceptación según norma (BSEN126976-26, 2012), y los valores calculados de módulo dinámico a partir del ajuste de curvas maestras fueron ordenados, de forma ascendente en función de los contenidos de vacíos, en grupos tal y como se presentan en las **Tabla 4.1** hasta la **Tabla 4.5**.

Tabla 4.1

Resumen del ensayo de Módulo Resiliente a 4 °C y 0.33 Hz.

Mr' (MPa)	%vacíos	densidad (g/cm ³)
12440	3.55	2.303
11114	3.75	2.299
13040	3.77	2.298
12928	4.07	2.291
11828	4.42	2.283
11698	4.73	2.275
11327	5.36	2.260
11079	5.37	2.260
10817	5.39	2.259
10571	5.40	2.259
7407	7.30	2.214

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2

Resumen del ensayo de Módulo Resiliente a 21 °C y 0.33 Hz.

Mr' (MPa)	%vacíos	densidad (g/cm ³)
2256	3.99	2.293
2161	4.23	2.287
2620	4.50	2.281
2573	4.56	2.279
2472	4.80	2.273
2314	4.89	2.271
1409	7.56	2.208

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3**Resumen del ajuste de Módulo Dinámico a 4 °C y 0.33 Hz.**

E* (MPa)	%vacíos	densidad (g/cm³)
21342	1.73	2.347
17194	1.76	2.346
12104	2.34	2.324
18859	2.62	2.325
6651	2.67	2.332
11705	3.35	2.308
27948	3.58	2.303
14748	4.65	2.277
16301	5.58	2.255
6339	6.07	2.243
14891	6.92	2.223
11908	7.03	2.220

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4**Resumen del ajuste de Módulo Dinámico a 21 °C y 0.33 Hz.**

E* (MPa)	%vacíos	densidad (g/cm³)
6027	1.73	2.347
5040	1.76	2.346
3491	2.34	2.324
5293	2.62	2.325
2436	2.67	2.332
7776	3.35	2.308
5272	3.58	2.303
3861	4.65	2.277
6872	5.58	2.255
3166	6.07	2.243
4390	6.92	2.223
4200	7.03	2.220

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.5**Resumen del ajuste de Módulo Dinámico a 37 °C y 0.33 Hz.**

E*(MPa)	%vacíos	densidad (g/cm³)
1409	1.73	2.347
1220	1.76	2.346
1043	2.34	2.324
1525	2.62	2.325
954	2.67	2.332
2513	3.35	2.308
1034	3.58	2.303
1077	4.65	2.277
2535	5.58	2.255
1290	6.07	2.243
1287	6.92	2.223
933	7.03	2.220

Fuente: Elaboración propia.

4.1. Comprobación de normalidad y homocedasticidad de los datos.

Previo a la comparación estadística de las series de módulos registradas, se comprobó el cumplimiento de los supuestos de distribución normal y homocedasticidad de los datos. De esta manera se seleccionó los métodos de comparación y correlación adecuados. Los resultados estadísticos fueron obtenidos con ayuda del software IBM SPSS y se plantearon dos hipótesis para cada caso: una hipótesis nula (designada como H_0) y la hipótesis alternativa o de investigación (designada como H_1).

4.1.1. Prueba de normalidad de series.

Las hipótesis planteadas, para verificar si el comportamiento de los datos de las muestras se asemeja a la distribución normal, fueron las siguientes:

H_0 : Las series de datos se asemejan a distribuciones normales.

H_1 : Las series de datos no se asemejan a distribuciones normales.

Para la aceptación de la hipótesis nula, se realizó la evaluación de 4 criterios los cuales fueron:

- La media, la mediana y la moda de la serie deben de ser similares.
- Los valores de asimetría y curtosis deben de estar en el rango de ± 0.5 .
- La significancia obtenida mediante la prueba estadística de Shapiro-Wilk, debe de ser mayor a 0.05, debido a que se trabajó con un 95% de confiabilidad.

- Gráficamente, la mayor cantidad de puntos de la serie deben de estar sobre la recta trazada en los gráficos Q-Q Normal.

Para el valor de la significancia fue elegido el método Shapiro-Wilk, ya que se tienen muestras cuyo tamaño es menor a 30 observaciones o mediciones.

Tabla 4.6

Prueba de normalidad para los valores de módulos medidos.

	Mr-4°C	Mr-21°C	E*-4°C	E*-21°C	E*-37°C
Media	11295.4	2257.9	14999.2	4818.7	1401.7
Mediana	11327.0	2314.0	14819.5	4715.0	1253.5
Moda	---	---	---	---	---
Asimetría	-1.634	-1.771	0.579	0.434	1.598
Curtosis	4.094	3.643	0.753	-0.240	1.484
Estadístico Shapiro-Wilk	0.846	0.820	0.956	0.978	0.748
Grados de libertad	11	7	12	12	12
Significancia	0.038	0.065	0.726	0.976	0.003

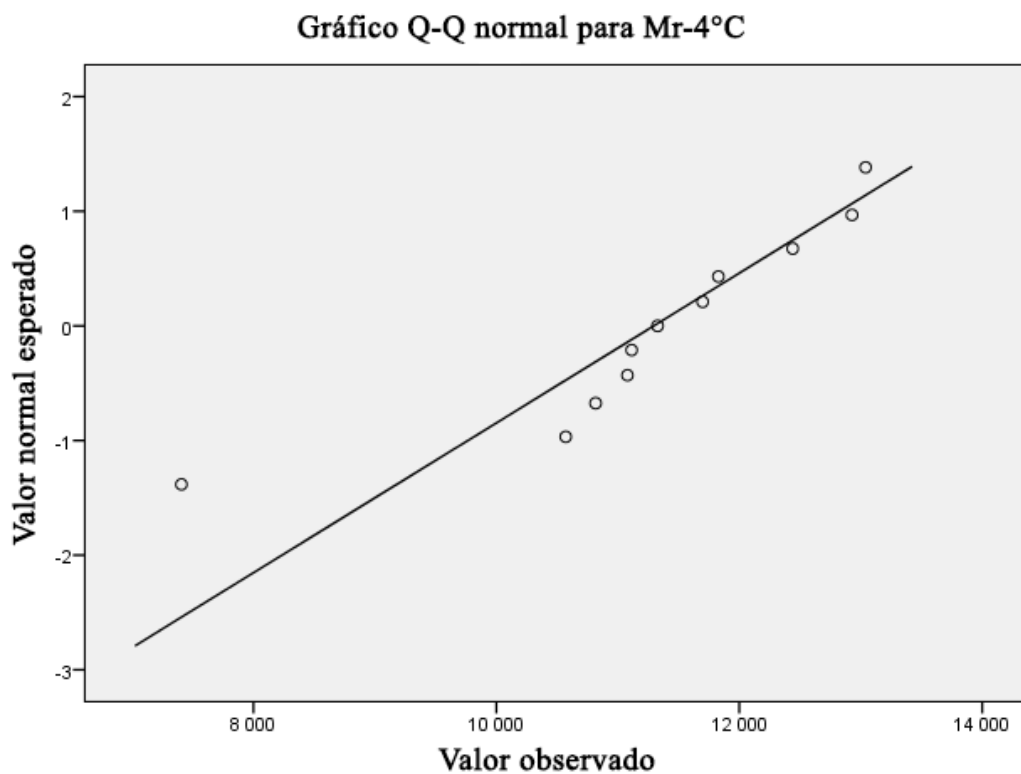
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7

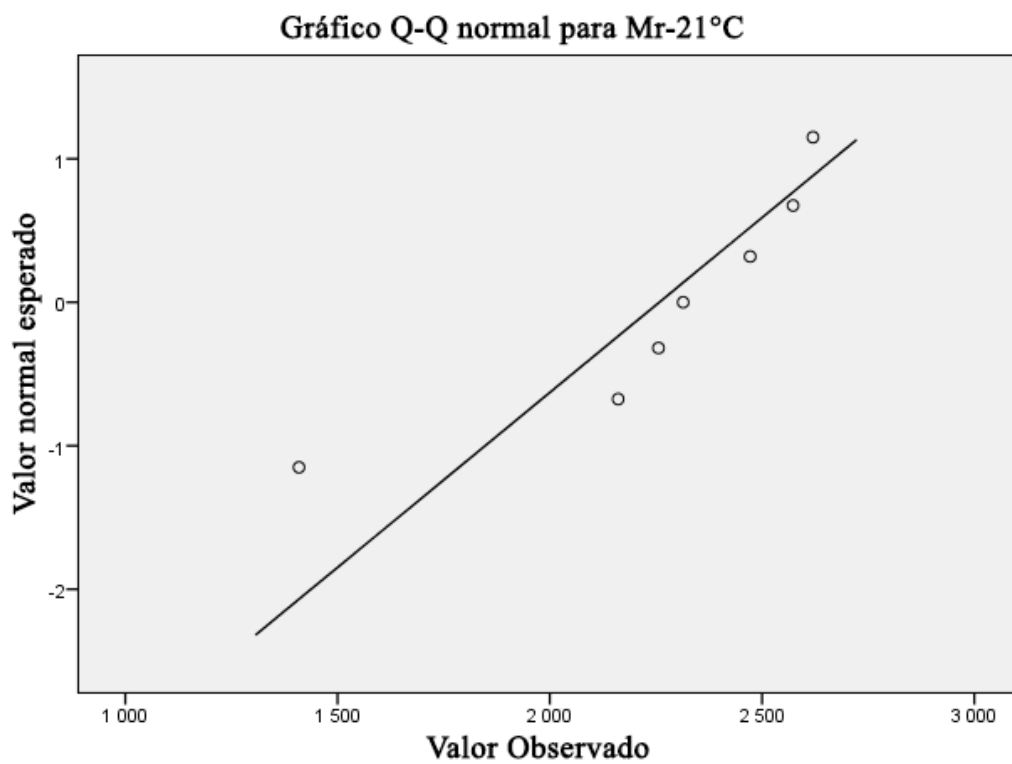
Prueba de normalidad para los valores de densidad y vacíos calculados.

	Densidad Mr-4°C	Densidad Mr-21°C	Densidad E*	%Vacíos Mr-4°C	%Vacíos Mr-21°C	%Vacíos E*
Media	2.273	2.270	2.292	4.09	4.93	4.03
Mediana	2.275	2.279	2.306	4.73	4.56	3.47
Moda	---	---	---	---	---	---
Asimetría	-0.987	-2.251	-0.435	1.000	2.274	0.434
Curtosis	1.288	5.503	-1.391	1.354	5.589	-1.399
Estadístico Shapiro-Wilk	0.889	0.713	0.900	0.889	0.705	0.899
Grados de libertad	11	7	12	11	7	12
Significancia	0.134	0.005	0.161	0.134	0.004	0.154

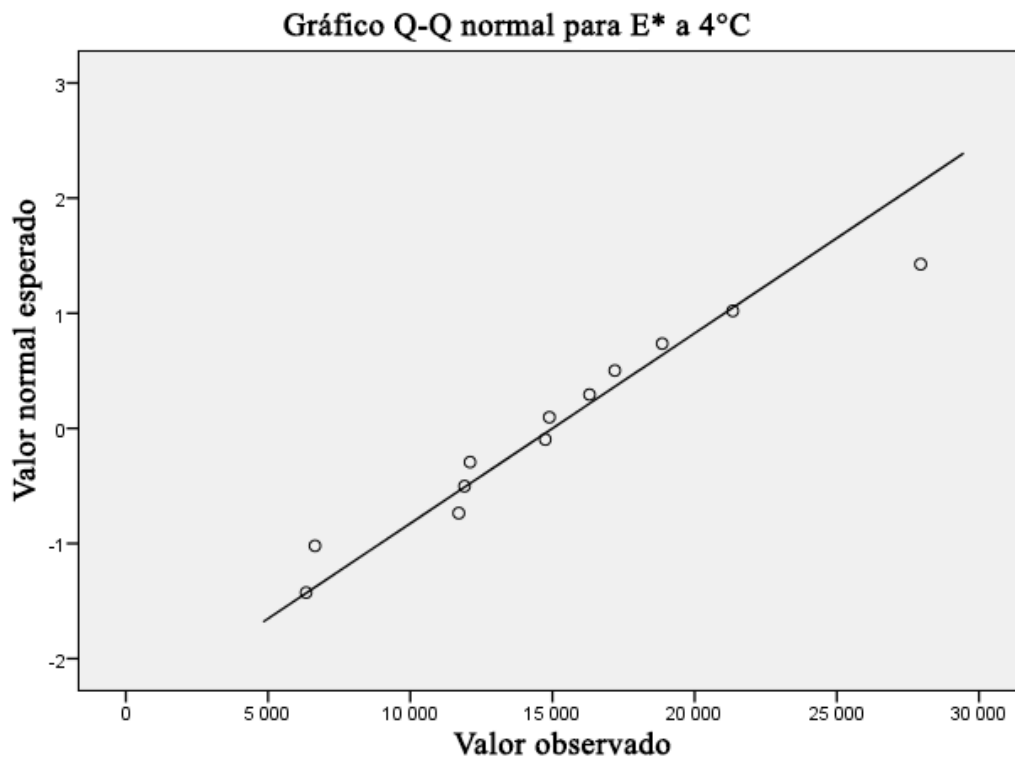
Fuente: Elaboración propia.



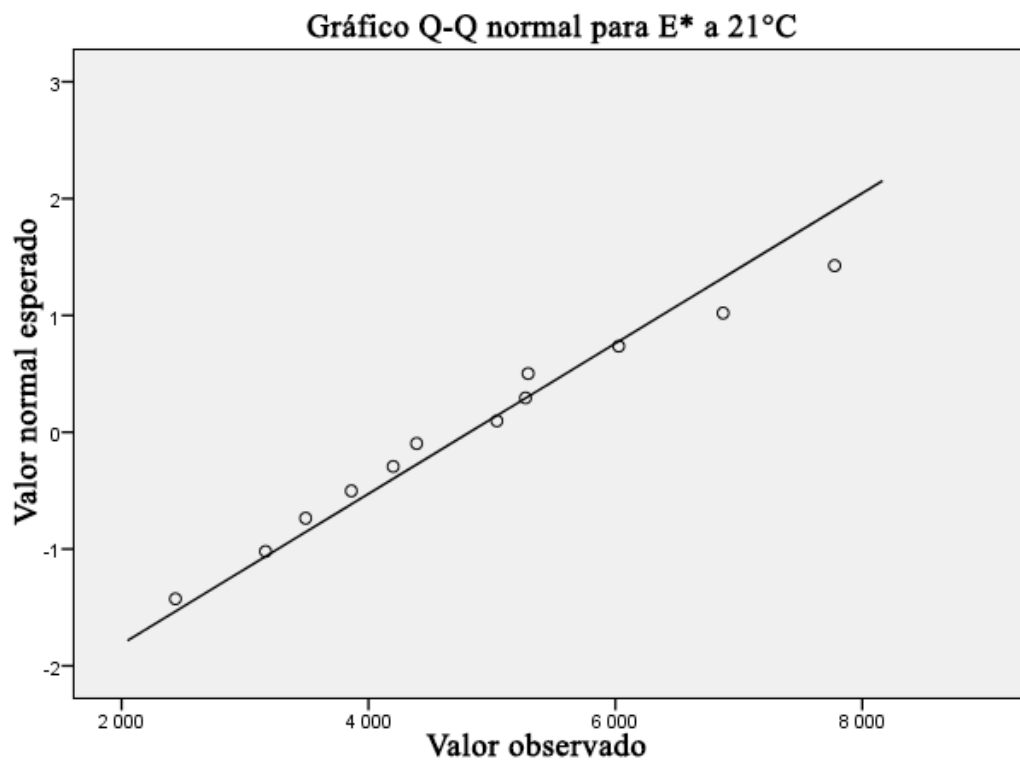
*Figura 4.1. Gráfico de normalidad para módulos resilientes a 4°C.
Fuente: Software IBM SPSS.*



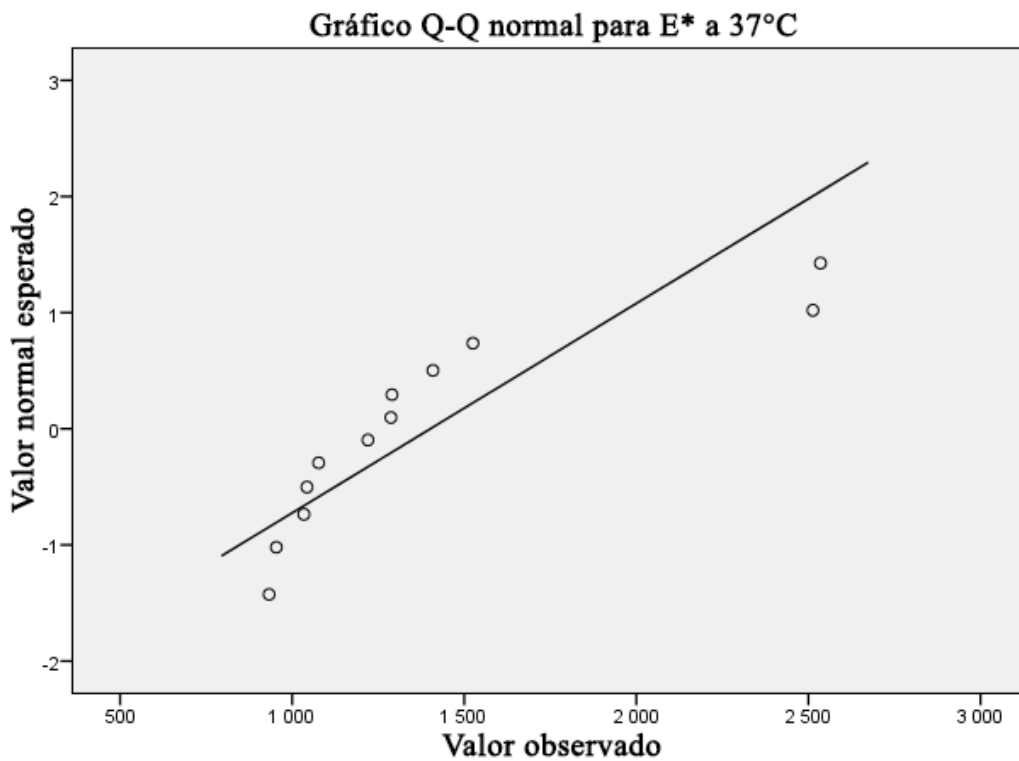
*Figura 4.2. Gráfico de normalidad para módulos resilientes a 21°C.
Fuente: Software IBM SPSS.*



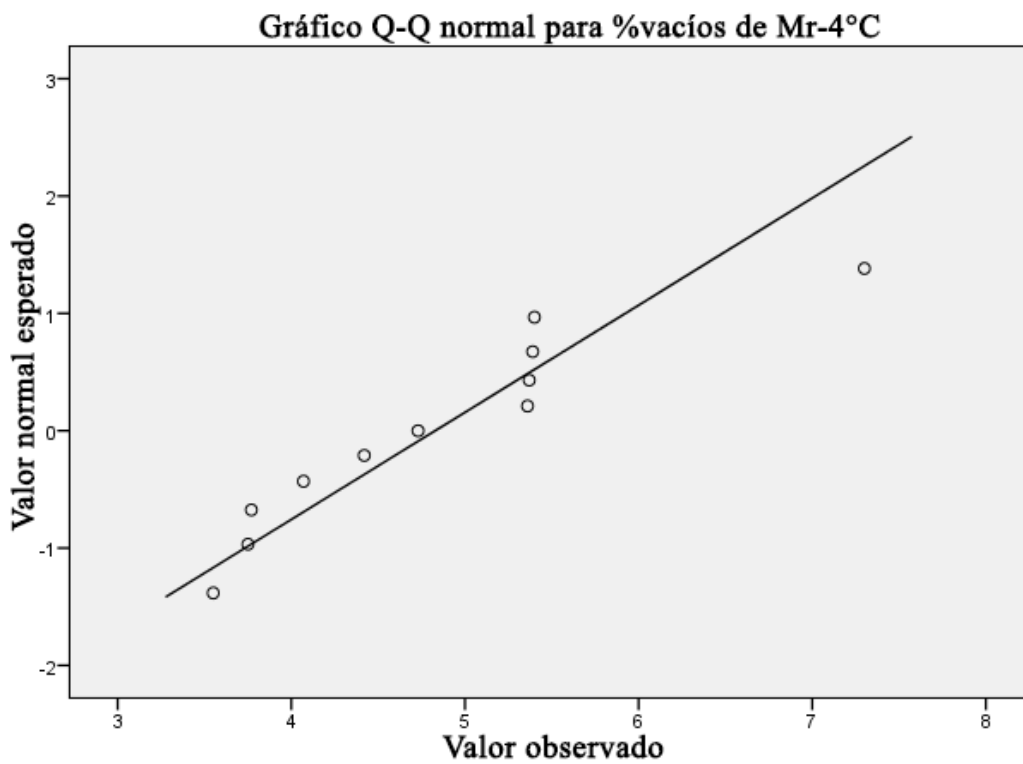
*Figura 4.3. Gráfico de normalidad para módulos dinámicos a 4°C.
Fuente: Software IBM SPSS.*



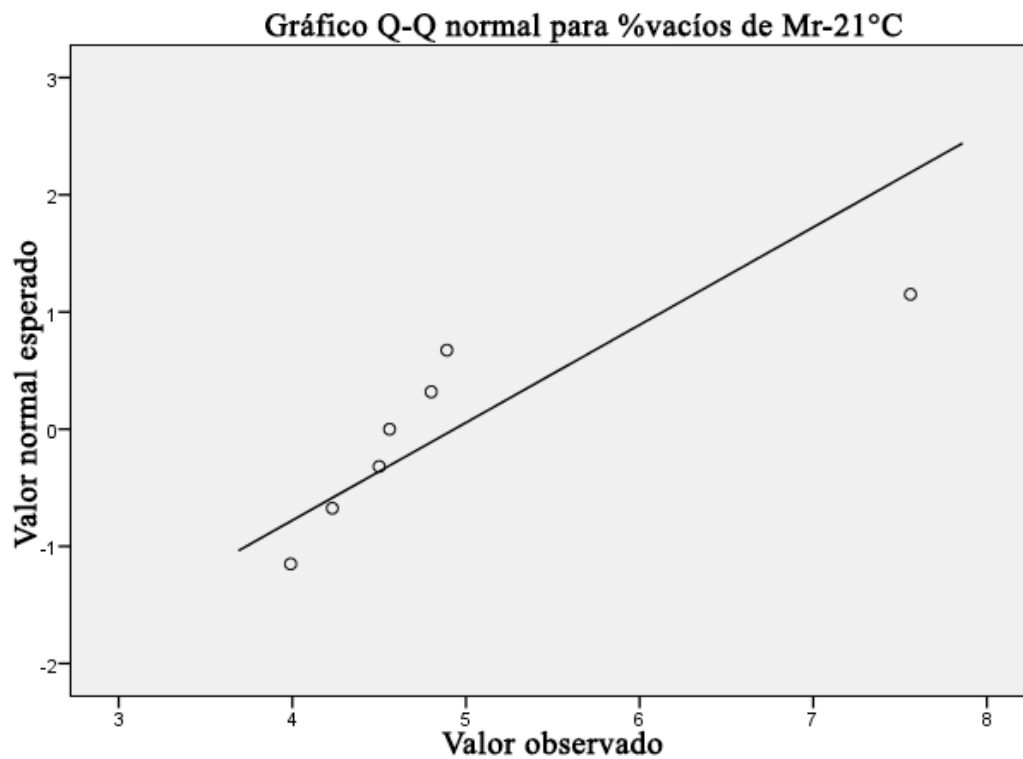
*Figura 4.4. Gráfico de normalidad para módulos dinámicos a 21°C.
Fuente: Software IBM SPSS.*



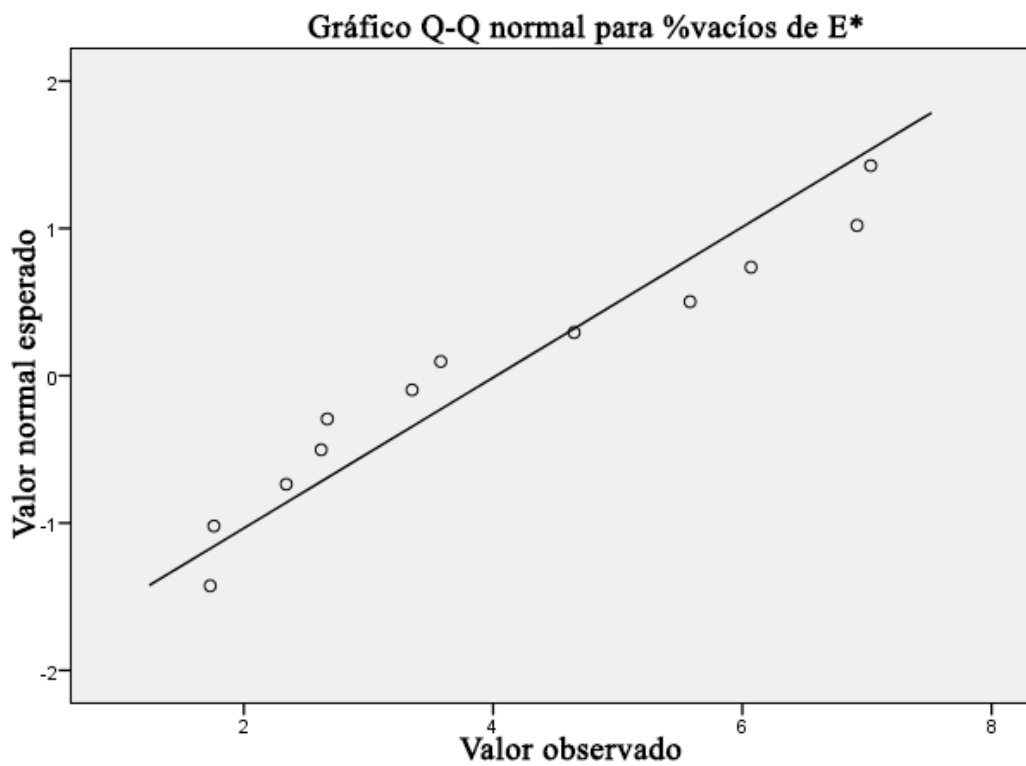
*Figura 4.5. Gráfico de normalidad para módulos dinámicos a 37°C.
Fuente: Software IBM SPSS.*



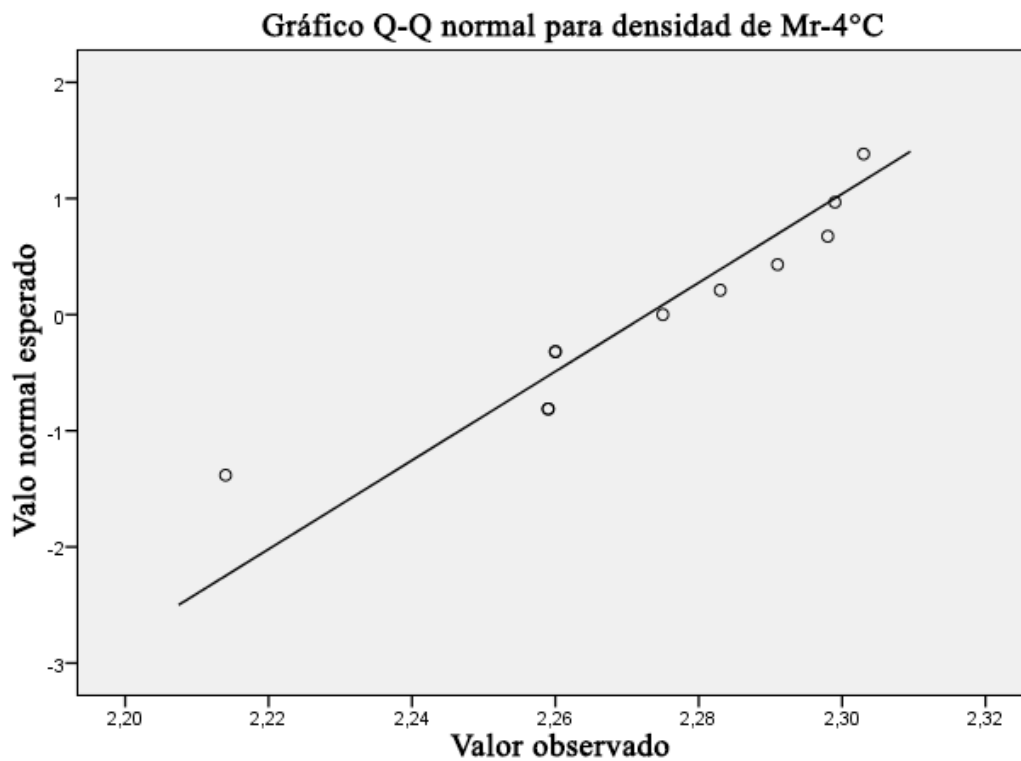
*Figura 4.6. Gráfico de normalidad para el porcentaje de vacíos de módulos resilientes a 4°C.
Fuente: Software IBM SPSS.*



*Figura 4.7. Gráfico de normalidad para el porcentaje de vacíos de módulos resilientes a 21°C.
Fuente: Software IBM SPSS.*



*Figura 4.8. Gráfico de normalidad para el porcentaje de vacíos de módulos dinámicos.
Fuente: Software IBM SPSS.*



*Figura 4.9. Gráfico de normalidad para densidades de módulos resilientes a 4°C.
Fuente: Software IBM SPSS.*

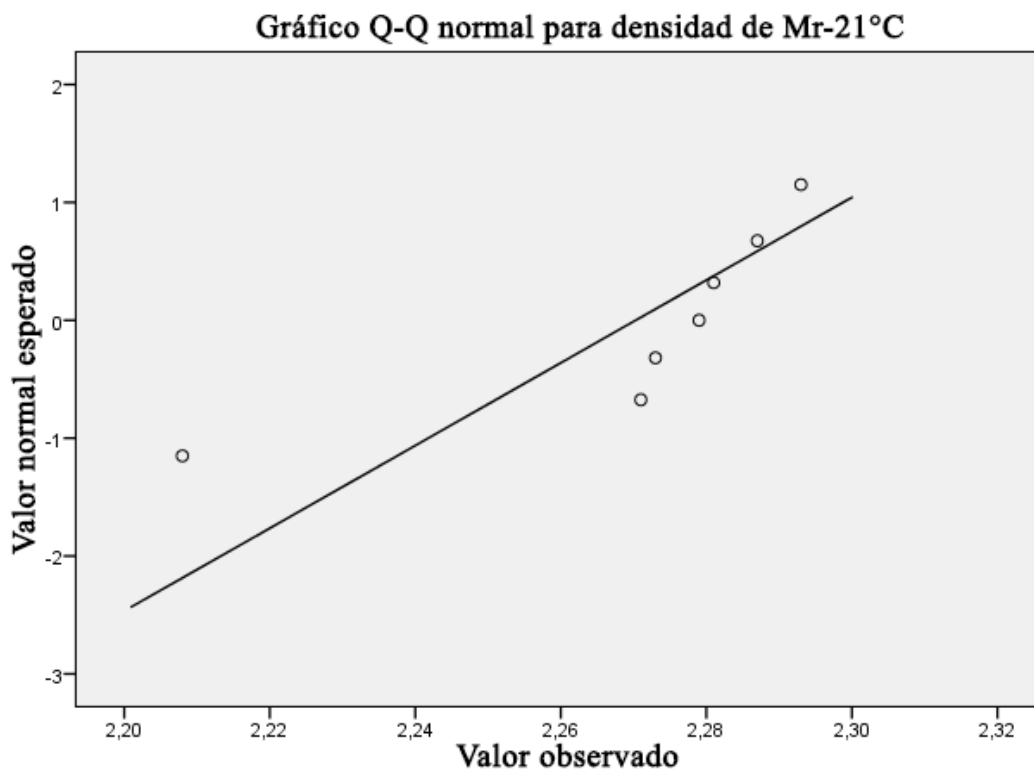


Figura 4.10. Gráfico de normalidad para densidades de módulos resilientes a 21°C.

Fuente: Software IBM SPSS.

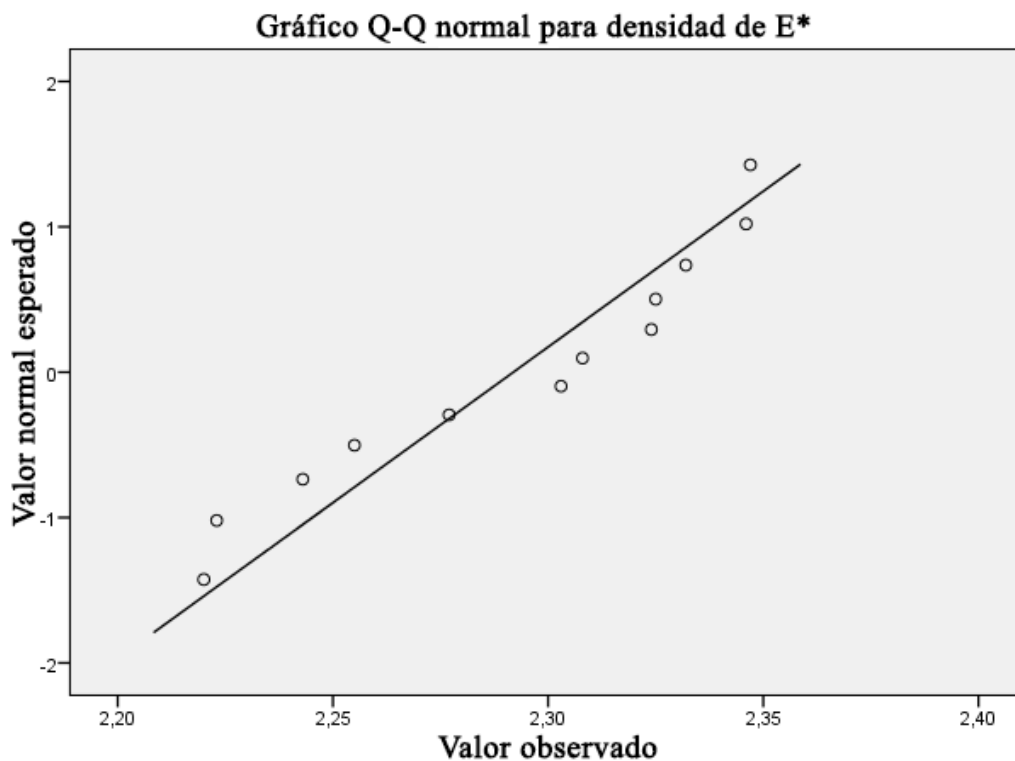


Figura 4.11. Gráfico de normalidad para densidades de módulos dinámicos.

Fuente: Software IBM SPSS.

Tabla 4.8

Resumen de criterios de normalidad para cada muestra.

Serie o grupo	Media, mediana y moda	Asimetría y curtosis	Significancia Shapiro-Wilk	Gráfico Q-Q normal
Mr-4°C	N.C*	N.C	N.C	N.C
Mr-21°C	N.C	C**	C	N.C
E*-4°C	N.C	N.C	C	N.C
E*-21°C	N.C	N.C	C	N.C
E*-37°C	N.C	N.C	N.C	N.C
Densidad Mr-4°C	N.C	N.C	C	N.C
Densidad Mr-21°C	N.C	N.C	N.C	N.C
Densidad E*	N.C	N.C	C	N.C
% Vacíos Mr-4°C	N.C	N.C	C	N.C
% Vacíos Mr-21°C	N.C	N.C	N.C	N.C
% Vacíos E*	N.C	N.C	C	N.C

*No cumple.

**Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Comprobando los resultados mostrados en la **Tabla 4.8**, ninguna muestra cumplió con el primer criterio debido, principalmente, a la inexistencia de moda es decir, la falta de datos repetidos en cada muestra. Respectivamente, los valores de asimetría y curtosis indican que los datos se distribuyen de forma no uniforme alrededor de la media y con un grado de concentración que varía la forma de la curva posible entre platicúrtica a leptocúrtica. .

Según la **Tabla 4.8**, cuatro muestras no cumplen con el criterio de significancia del test Shapiro-Wilk esto se interpreta, estadísticamente, como sigue: con un 95% de confiabilidad las series Mr-4°C, E*-37°C, Densidad Mr-21°C y % Vacíos Mr-21°C no se asemejan su a una distribución normal. Sin embargo, para decidir si aceptar o no la hipótesis nula previamente establecida para cada muestra, se consideró los cuatro criterios de forma conjunta.

La **Tabla 4.8** muestra también que ninguna muestra cumple con la distribución de valores sobre las rectas trazadas en los gráficos Q-Q normal, los cuales se presentan desde la **Figura 4.1** hasta la **Figura 4.11**. Es notable que son pocos los puntos que se superponen a las rectas, no existe un número equitativo de puntos por encima y por debajo de las rectas de cada muestra y en algunos casos, la dispersión de valores respecto a las rectas es alta. Tomando los resultados de los cuatro criterios, aplicada cada muestra, se ha decidido aceptar la hipótesis alternativa que plantea:

H₁: Las series de datos no se asemejan a distribuciones normales.

4.1.2. Prueba de homocedasticidad para las series de módulos.

Otro supuesto que se evaluó fue la homocedasticidad o igualdad de varianzas mediante la prueba estadística de Levene. Debido a que se pretende comparar los módulos medidos, está evaluación fue aplicada, exclusivamente, sobre las muestras de módulos medidos.

Las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

H₀: Las series de módulos medidos poseen varianzas similares.

H₁: Las series de módulos medidos no poseen varianzas similares.

Tabla 4.9

Resultados de prueba Levene para homocedasticidad.

Estadístico Levene	Grados de libertad (INTER)	Grados de libertad (INTRA)	Significancia
8.570	4	49	0.000

Fuente: Software IBM SPSS.

Ya que la significancia de la **Tabla 4.9** es menor a 0.05, es posible afirmar con un 95% de confiabilidad que se debe de aceptar la hipótesis alternativa:

H₁: Las series de módulos medidos no poseen varianzas similares.

4.2. Correlaciones de las series

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Sección 4.1.1., para correlacionar las series de datos de interés, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman como modelo no paramétrico. Se evaluó la correlación entre la densidad y el porcentaje de vacíos para, posteriormente, correlacionar los módulos medidos con una o ambas variables. Las hipótesis a evaluar fueron:

H₀: No existe correlación entre las variables evaluadas.

H₁: Existe correlación entre las variables evaluadas.

4.2.1. Correlación de densidad y porcentajes de vacíos en las briquetas.

Tabla 4.10

Correlaciones entre densidades y vacíos.

	Vacíos Mr-4°C	Vacíos Mr-21°C	Vacíos E*	Vacíos (general)
Densidad Mr-4°C	-0.995*			
	0.000**			
Densidad Mr-21°C		-1.000		
		0.000		
Densidad E*			-0.944	
			0.000	
Densidad (general)				-0.992
				0.000

* Coeficiente de correlación de Spearman.

**Significancia de la correlación.

Fuente: Software IBM SPSS.

La **Tabla 4.10**, presenta el resumen de las correlaciones obtenidas para las densidades y porcentajes de vacíos. No se especificó la correlación para la densidad y porcentaje de vacíos de los módulos dinámicos calculados a cada temperatura, ya que son los mismos valores para las tres series de datos. Según la **Tabla 4.10**, entre la densidad y el porcentaje de vacíos existe una fuerte relación inversa es decir, que con altos porcentajes de vacíos las briquetas exhiben menores densidades y viceversa. Además debido a que la significancia, en todos los casos, resultó inferior a 0.05 se aceptó la hipótesis alternativa afirmando que, con una confiabilidad del 95%, si existe correlación entre las variables “porcentaje de vacíos y densidad”. La gráfica de la **Figura 4.12** corrobora los resultados. Por otra parte, como se

aprecia en la **Figura 4.13** y **Figura 4.14**, la relación inversa porcentaje de vacíos-densidad no se ve afectada por el método de compactación empleado, sin embargo se obtuvo menores porcentajes de vacíos con el compactador giratorio que con el martillo Marshall. Esto último sugiere que al aplicar compactación por medio de amasado, el agregado pétreo logra un “mejor acomodo” propiciando un incremento en la densificación de la mezcla. Sin embargo, se debe considerar que las briquetas elaboradas mediante el compactador giratorio típicamente presentan densidades no uniformes dentro de las mismas. De la extracción de núcleos a partir de briquetas de 150 mm, se ha logrado determinar que tienen 1.5 % menos vacíos de aire en relación con el porcentaje de vacíos de las briquetas de 150 mm de diámetro (Jiménez Acuña, 2012).

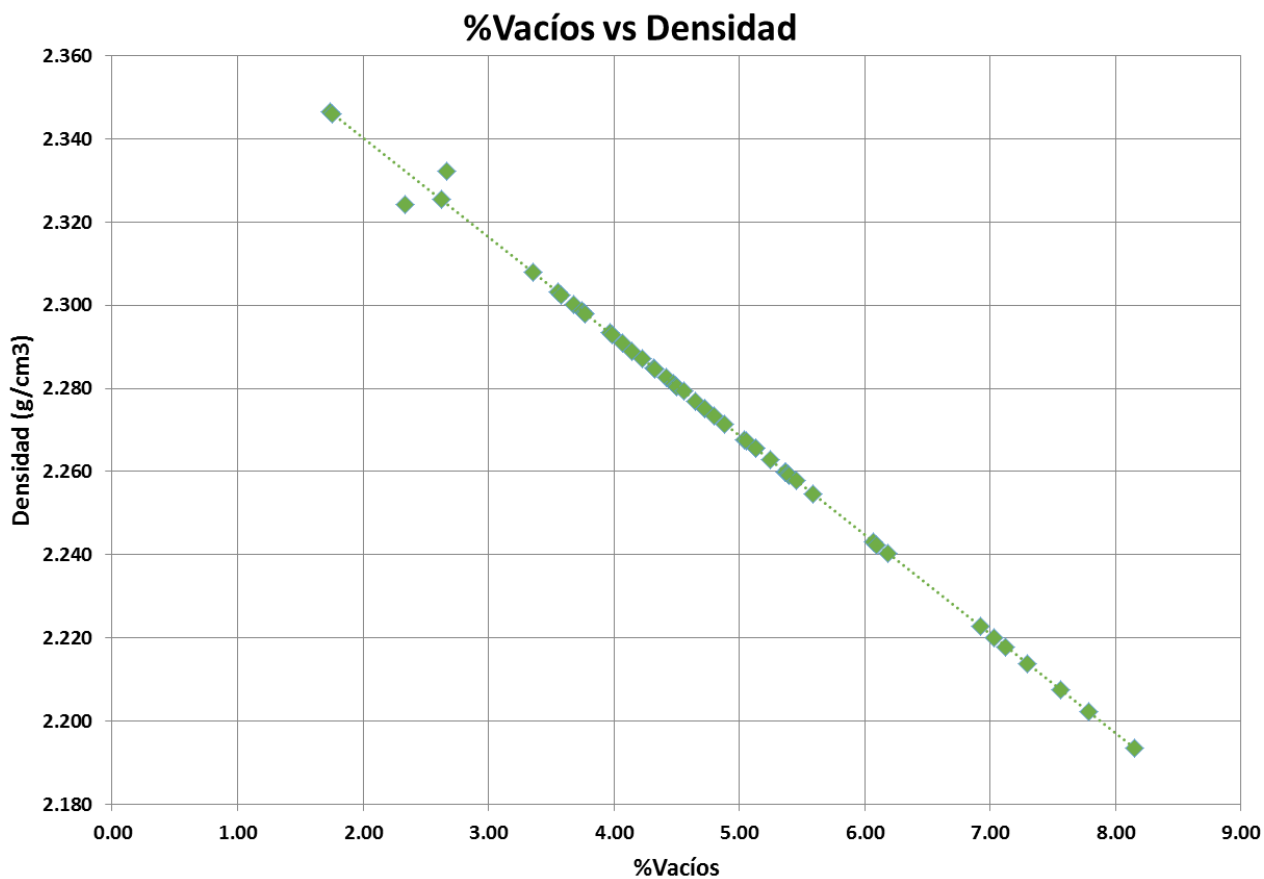
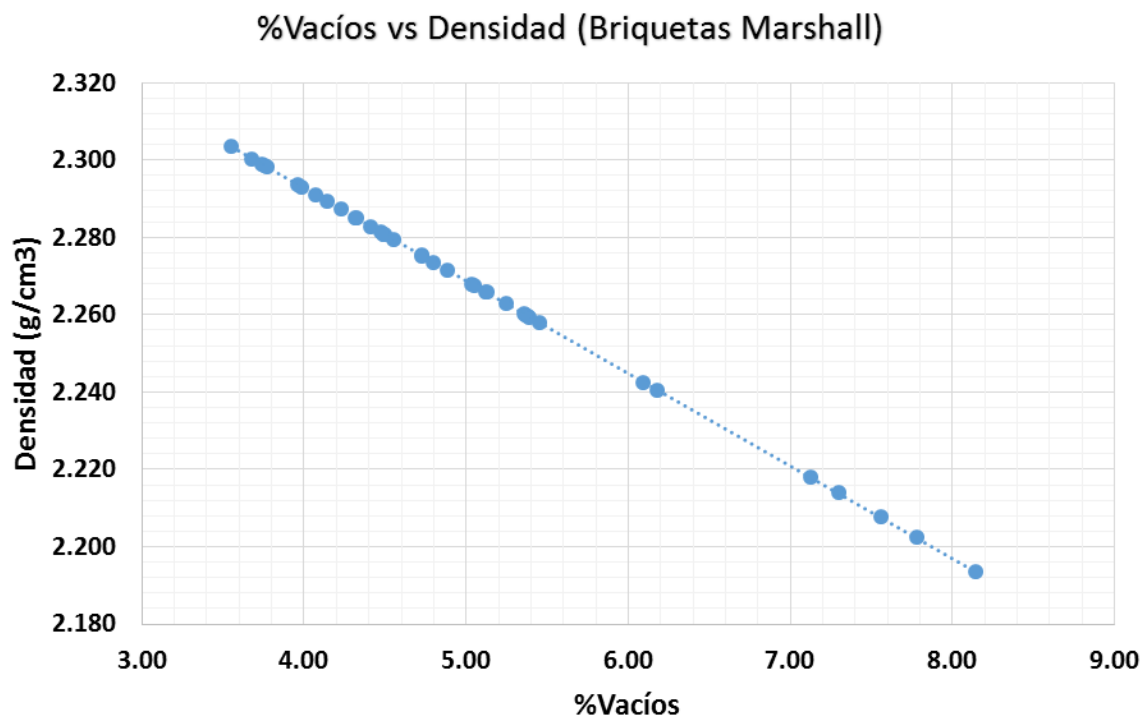
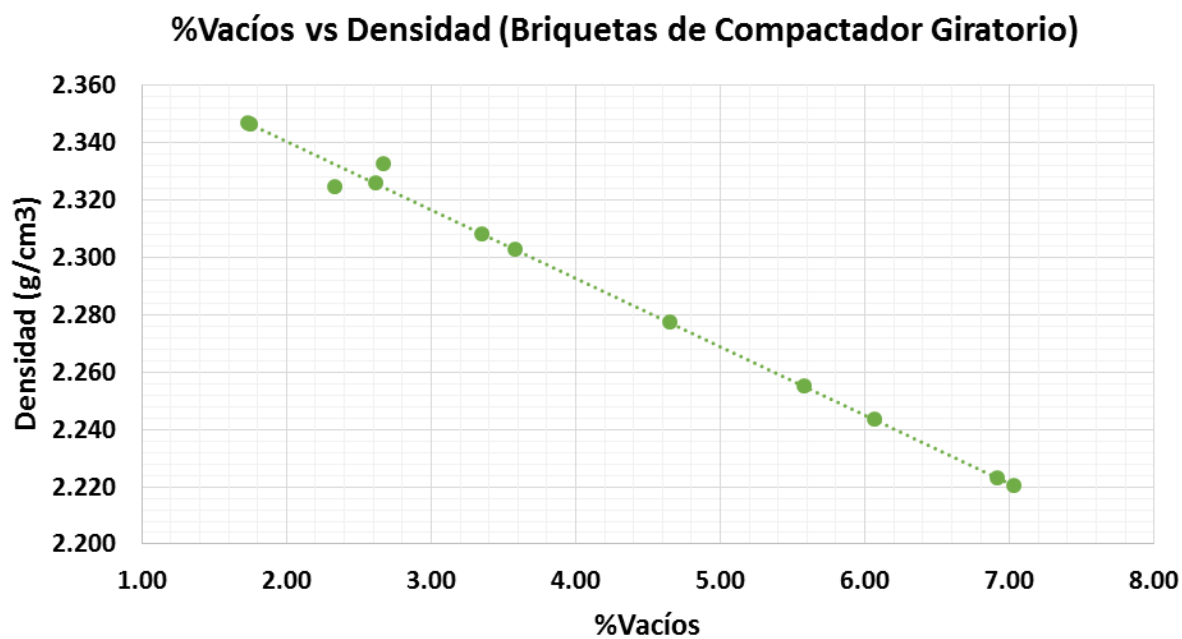


Figura 4.12. Dispersión general de puntos "porcentaje de vacíos vs densidad".

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 4.13. Dispersión "porcentaje de vacíos vs densidad" para compactación Marshall.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 4.14. Dispersión "porcentaje de vacíos vs densidad" para compactación por amasado.
Fuente: Elaboración propia.*

4.2.2. Correlación de módulos con densidades y vacíos.

Tabla 4.11

Correlaciones de Módulos con densidades y vacíos.

	Vacíos Mr-4°C	Densidad Mr-4°C	Vacíos MR-21°C	Densidad MR-21°C	Vacíos E*	Densidad E*
Mr-4°C	-0.818*	0.808				
	.002**	.003				
Mr-21°C			-0.143	0.143		
			.760	.760		
E*-4°C					-0.392	0.406
					.208	.191
E*-21°C					-0.196	0.231
					.542	.471
E*-37°C					-0.140	0.203
					.665	.527

* Coeficiente de correlación de Spearman.

**Significancia de la correlación.

Fuente: Software IBM SPSS.

De acuerdo a la **Tabla 4.11**, características tales como la densidad y el contenido de vacíos no son apropiados para predecir el comportamiento mecánico de la mezcla, debido a que los coeficientes de correlación y las significancias indican que existen relaciones débiles y poco confiables entre los módulos y las variables anteriormente mencionadas. Aun con la fuerte correlación resultante entre los módulos resilientes a 4°C respecto a la densidad y el contenido de vacíos, un análisis de densificación de la mezcla no provee información suficientemente confiable para caracterizar el comportamiento mecánico de la misma.

Un aspecto que se puede observar, en base a los coeficientes de correlación de la **Tabla 4.11**, es la tendencia directa e inversa que los módulos tienen con la densidad y el contenido de vacíos, respectivamente. Al tener mayores densidades, se producen menores porcentajes de vacíos, lo que provoca que la deformabilidad de las briquetas y/o núcleos sea menor, por lo cual los valores de módulos son mayores.

Las gráficas de la **Figura 4.15** y **Figura 4.16**, presentan las dispersiones obtenidas de cada módulo respecto a la densidad de las briquetas y/o núcleos.

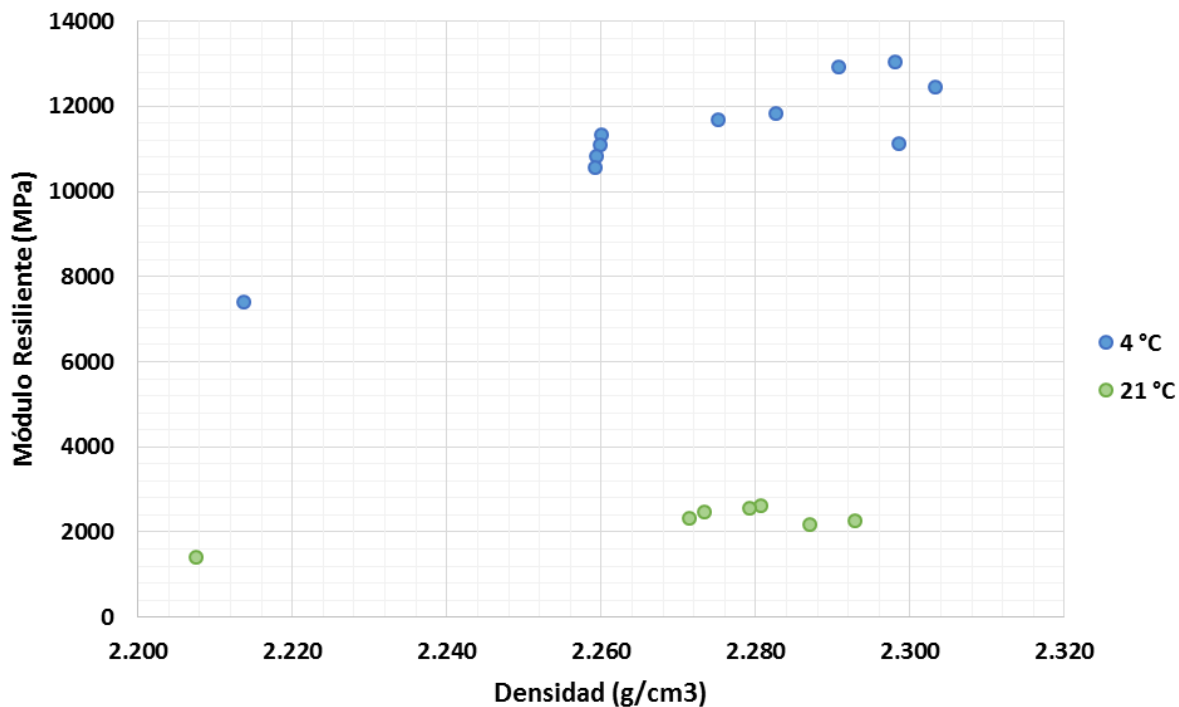


Figura 4.15. Desarrollo del módulo resiliente según la temperatura de ensayo.
Fuente: Elaboración propia.

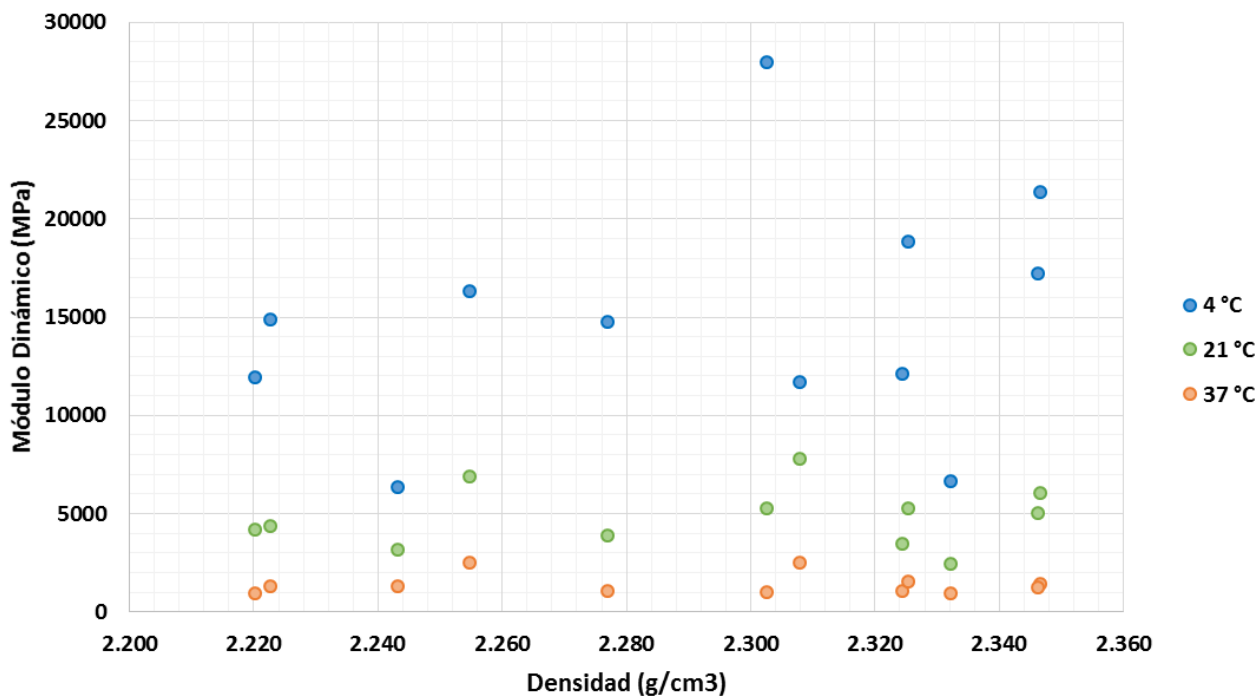


Figura 4.16. Desarrollo del módulo dinámico según la temperatura de ensayo.
Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 4.15** se puede apreciar que los valores de módulo resiliente medidos a 4°C reflejan una tendencia directa respecto a las densidades tal como se presenta en la **Tabla 4.11**, sin embargo los puntos no se distribuyen de manera uniforme, por lo que no es posible

asumir que la correlación sea confiable. Además se puede observar que el rango de variación del módulo resiliente resulto mucho más amplio para la temperatura de 4°C que para 21°C, obteniendo las medidas más altas a la menor temperatura. Al aumentar la temperatura del ensayo de 4°C a 21°C, se tuvo un decremento promedio del 80% en los valores de módulo resiliente, lo cual manifiesta la gran dependencia térmica de la mezcla.

La **Figura 4.16**, permite visualizar la inexistente tendencia de los módulos dinámicos calculados para cada temperatura y frecuencia uniforme. Los valores de módulo dinámico, de forma similar al módulo resiliente, son mucho mayores entre más baja es la temperatura de ensayo, generando decrementos promedios del 68% al cambiar la temperatura a 21°C y del 91% a 37°C.

4.3. Comparación estadística de módulos

La comparación entre las series de módulos recopilados, se desarrolló mediante las pruebas estadísticas de Kruskal-Wallis y la propuesta por Siegel y Castellan, las cuales se encuentran designadas como pruebas no paramétricas que comparan los grupos o muestras mediante el “rango medio” como parámetro de centralización.

4.3.1. Prueba estadística Kruskal-Wallis.

El objetivo de la comparación fue conocer si el valor del módulo de rigidez de la mezcla asfáltica, presenta diferencias significativas de acuerdo al método y temperatura de ensayo. El contraste se realizó según las hipótesis siguientes:

H_0 : No existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de módulo de rigidez de la mezcla asfáltica según el método y temperatura de ensayo.

H_1 : Existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de módulo de rigidez de la mezcla asfáltica según el método y temperatura de ensayo.

Tabla 4.12
Resumen de resultados prueba Kruskal-Wallis.

Ensayo	N	Suma de Rangos	Rango Medio	Chi cuadrado	Grados de libertad	Significancia
Mr-4 °C	11	438.0	39.8	46.373	4	0.000
Mr-21 °C	7	103.5	14.8			
E*-4 °C	12	546.0	45.5			
E*-21 °C	12	306.0	25.5			
E*-37 °C	12	91.5	7.6			

Fuente: Software SPSS 21.

El estadístico H de Kruskal-Wallis se distribuye aproximadamente como el chi cuadrado con $k-1$ grados de libertad. Esta aproximación es mucho mejor cuanto mayor es el número de grupos y el tamaño de las mismas. Debido a que la significancia resultó menor a 0.05, se acepta la hipótesis alternativa:

H_1 : Existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de módulo de rigidez de la mezcla asfáltica según el método y temperatura de ensayo.

Los valores de módulos de mezcla asfáltica registrados en los ensayos de módulo resiliente a 4°C (Mr-4°C) y módulo dinámico a 4 °C (E*-4°C) fueron mucho mayores a los demás ensayos. Esto confirma la gran dependencia del comportamiento de la mezcla respecto a la temperatura. Sin embargo, se hace hincapié en la posibilidad de variación en los módulos dinámicos calculados debido al menor diámetro de los núcleos, generando una menor área de contacto con la carga aplicada.

4.3.2. Análisis Post Hoc bajo propuesta de Siegel y Castellan.

La prueba Kruskal-Wallis únicamente permite concluir si existen diferencias significativas entre los valores de módulos obtenidos por medio de las diferentes condiciones de ensayo. Sin embargo, no es posible conocer cuales condiciones de ensayo producen diferencias significativas en los valores medidos. Para identificar las diferencias significativas entre ensayos, se hizo uso de la prueba post hoc propuesta por Siegel y Castellan, la cual evalúa y compara las diferencias en los rangos medios respecto a un valor crítico. El valor crítico de comparación es un puntaje corregido por el número de comparaciones que se hace y una constante basada en el tamaño de los grupos total y el tamaño de los grupos a comparar. La prueba a evaluar es:

$$|RM_1 - RM_2| \geq z_{\left(\frac{0.05}{5(4)}\right)} * \sqrt{\frac{54*55}{12} * \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)} \quad \text{(Ecuación 4.1)}$$

$$z_{\left(\frac{0.05}{5(4)}\right)} = z_{(0.0025)} = 2.81 \quad \text{(Ecuación 4.2)}$$

Dónde:

RM_1, RM_2 = Rangos medios de cada grupo a evaluar.

N_1, N_2 = Tamaños de grupos.

El valor de z fue obtenido mediante el software Microsoft Excel, con la fórmula “=inv.norm.estand (0.0025)”.

Tabla 4.13

Análisis de diferencias entre ensayos de módulos.

N_1	N_2	RM^*_1	RM_2	$ RM_1 - RM_2 $	Valor crítico	Diferencia**
Mr-4°C	Mr-21°C	39.8	14.8	25.0	21.4	Significativa
Mr-4°C	E*-4°C	39.8	45.5	5.7	18.4	no significativa
Mr-4°C	E*-21°C	39.8	25.5	14.3	18.4	no significativa
Mr-4°C	E*-37°C	39.8	7.6	32.2	18.4	Significativa
Mr-21°C	E*-4°C	14.8	45.5	30.7	21.0	Significativa
Mr-21°C	E*-21°C	14.8	25.5	10.7	21.0	no significativa
Mr-21°C	E*-37°C	14.8	7.6	7.2	21.0	no significativa
E*-4°C	E*-21°C	45.5	25.5	20.0	18.0	Significativa
E*-4°C	E*-37°C	45.5	7.6	37.9	18.0	Significativa
E*-21°C	E*-37°C	25.5	7.6	17.9	18.0	no significativa

*Rango medio

**Según comparación con el valor crítico para cada par de ensayos.

Fuente: Elaboración propia.

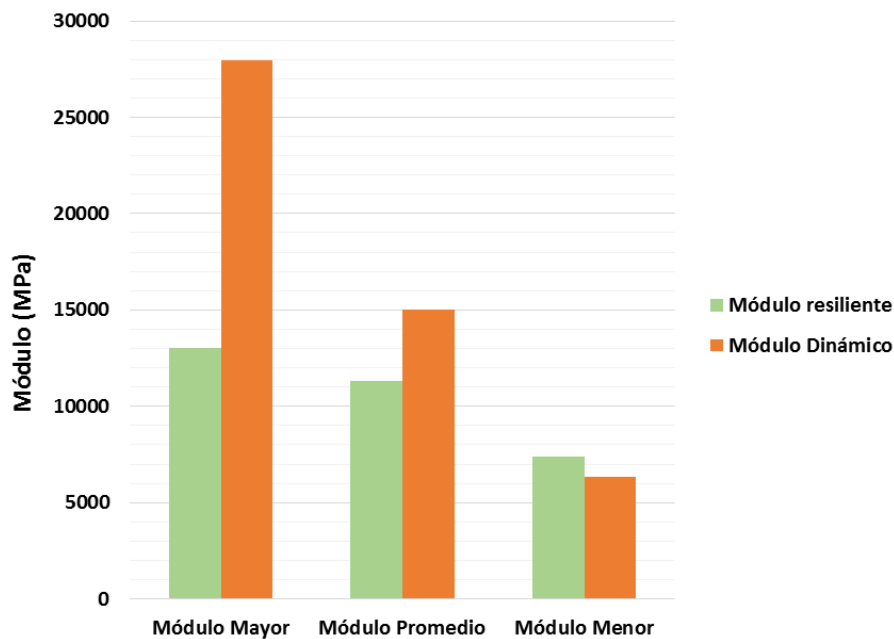


Figura 4.17. Comparación de módulos resiliente y dinámico a 4 °C
Fuente: Elaboración propia.

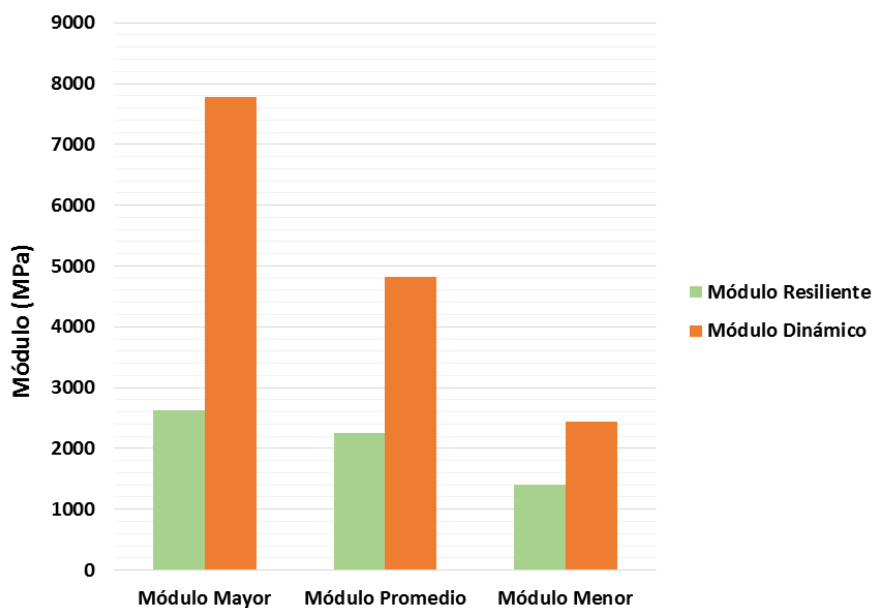


Figura 4.18. Comparación de módulos resiliente y dinámico a 21 °C.
Fuente: Elaboración propia.

Según las gráficas de la **Figura 4.17** y **Figura 4.18**, los valores calculados para módulos dinámicos resultan mucho mayores que los valores de módulos resilientes medidos, esto contrasta con las dispersiones de la **Figura 4.15** y **Figura 4.16**. Cabe mencionar que los valores de módulos dinámicos utilizados fueron obtenidos mediante el ajuste de curva maestra y no de forma directa.

Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.

5.1. Conclusiones

El módulo resiliente considera un comportamiento elástico en base a las deformaciones resilientes o recuperables que se producen en el material, mientras que el módulo dinámico reproduce, con un enfoque más realista, los efectos que la aplicación de carga a diferente frecuencia (velocidad de tránsito) genera en la mezcla asfáltica como un material visco-elástico.

Mediante el módulo dinámico es posible determinar la rigidez de las mezclas asfálticas para cualquier combinación de temperatura y frecuencia de aplicación de carga, considerando los efectos del envejecimiento del asfalto, la fatiga y la densificación posterior, realizada por el tránsito, durante el tiempo de servicio de la mezcla asfáltica como capa de rodadura de un pavimento flexible.

La densidad y contenido de vacíos de la mezcla asfáltica, presentan una tendencia lineal muy alta sin importar el método de compactación aplicado.

El módulo de resiliencia y el módulo dinámico no presentan tendencia alguna respecto a la densidad y/o contenido de vacíos; reflejando únicamente, que el nivel de densificación conlleva a un aumento o disminución de módulo en la mezcla asfáltica de forma aleatoria.

Los criterios de aceptación para el ensayo de módulo de resiliencia, limitan el análisis a una frecuencia de aplicación de la carga demasiado baja.

Existen diferencias estadísticamente significativas en los valores de módulo de rigidez de la mezcla asfáltica según el método y temperatura de ensayo; siendo los valores de módulos dinámicos mayores que los de módulos de resiliencia.

5.2. Recomendaciones

Utilizar tanto el módulo de resiliencia como el módulo dinámico como descriptores de la rigidez de las mezclas asfálticas, abordando la evaluación desde comportamientos diferentes.

Utilizar en el diseño de pavimentos, los módulos dinámicos de mezclas asfálticas obtenidos mediante las denominadas “curvas maestras de módulo dinámico” según las condiciones de interés para cada mezcla y proyecto. Además se deben realizar mediciones de módulos de resiliencia para ejecutar los controles de calidad apropiados sobre las mezclas puestas en obras.

Emplear la compactación mediante martillo Marshall o compactador giratorio según los parámetros y propiedades a evaluar.

Verificar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas puestas en obras, a través de la medición del módulo de resiliencia y no mediante indicadores del grado de densificación.

Realizar el estudio con una mayor gama de frecuencias de aplicación de la carga, dando relevancia a los intervalos entre los 10 a 25 Hz.

Utilizar en el diseño de espesores de carpetas asfálticas según método AASHTO 1993, cualquiera de los dos módulos siempre y cuando la temperatura de diseño sea mayor o igual a 21°C.

Bibliografía

- AASHTO R 30. (2015). *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*. (AASHTO, Ed.) Washington, DC.
- AASHTO R 35. (2015). *Standard Practice for Volumetric Design of Asphalt Mixtures*. (AASHTO, Ed.) Washington, DC.
- AASHTO R 62. (2013). *Standard Practice for Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures*. (AASHTO, Ed.) Washington, DC.
- AASHTO T 168. (2003). *Standard Method of Test for Sampling Bituminous Paving Mixtures*. (AASHTO, Ed.) Washington, DC.
- AASHTO T 312. (2011). *Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor*. (AASHTO, Ed.) Washington, DC.
- AASHTO T 342. (2011). *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt Concrete Mixtures*. (AASHTO, Ed.) Washington, DC.
- Acosta Vera, 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 (Disertación de maestría)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- ASTM C702. (2011). *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. (ASTM International, Ed.) West Conshohocken, PA, 2011. doi:10.1520/C0702-11, www.astm.org
- ASTM D2041. (2011). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. (ASTM Internacional, Ed.) West Conshohocken, PA, 2011. doi:10.1520/D2041-11, www.astm.org
- ASTM D2726. (2014). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures*. (ASTM International, Ed.) West Conshohocken, PA, 2014. doi:10.1520/D2726-14, www.astm.org
- ASTM D3203. (2011). *Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures*. (ASTM International, Ed.) West Conshohocken, PA, 2011. doi:10.1520/D3203-11, www.astm.org.

- ASTM D6926. (2016). *Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*. (ASTM International, Ed.) West Conshohocken, PA, 2016. doi:0.1520/D6926-16, www.astm.org
- BSEN126976-26. (2012). *Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt- Part 26: Stiffness*. (British Standar Institution (BSI), Ed.) Chiswick High Road London, UK: BSI Standards Limited.
- Bustamante, F. O. (2002). *Estructuración de vías terrestres: vías terrestres y pavimentos*. México D.F.: Compañía Editorial Continental.
- Camargo Moreno, E., & González Pérez, M. (2007). *Diseño de mezclas asfálticas en caliente*. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- Carter, A., & Perraton, D. (2002). La mesure du module complexe des enrobés bitumineux. *Segunda Conferencia Especializada en Ingeniería de los Materiales de la Sociedad Canadiense de Ingeniería Civil*. Montréal, Quebec, Canada.
- Cepeda, J. (2002). *Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa (Tesis de doctorado)*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- CIBER. (2015). *PLANTA DE ASFALTO CONTRAFLUJO Serie ADVANCED*. (Autor, Ed.) Recuperado el 15 de Noviembre de 2016, de Ciber.com.br: http://media.wirtgen-group.com/media/06_sasww/_local_content/06_ciber/informative_material/products_6/hot_mix_asphalt_plants_1/uacf/counterflow_span.pdf
- Cortez García, J. M., Guzmán Henríquez, H. W., & Reyes Rodríguez, A. (2007). *Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente (Tesis de pregrado)*. Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/4474/1/Gu%C3%ADa%20b%C3%A1sica%20de%20dise%C3%B1o,%20control%20de%20producci%C3%B3n%20y%20colocaci%C3%B3n%20de%20mezclas%20asf%C3%A1lticas%20en%20caliente.pdf>
- Crespin Molina, R., Santa Cruz Jovel, I., & Torres Linares, P. (2012). *Aplicación del método Marshall y granulometría SUPERPAVE en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño (Tesis de postgrado)*. Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador. Obtenido de http://ri.ues.edu.sv/1796/1/TESIS_FULL_CORR.pdf

- Empresa Constructora [ECON]. (Enero de 2016). Diseño de mezcla asfáltica en caliente.
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, C. (2005). Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. *Instituto Mexicano del Transporte*(271). Obtenido de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt271.pdf>
- Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Gómez López, J., & Delgado Alamilla, H. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. *Instituto Mexicano del Transporte*(267). Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt267.pdf>
- Gómez Achecar, M., & Thompson, M. R. (1984). Mechanistic Design Concepts for Full-Depth Asphalt Concrete Pavements. *Civil Engineering Series, 41*(207).
- Jiménez Acuña, M. (2012). Consideraciones generales sobre la compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente (MAC) en el Compactador Giratorio Superpave. *LanammeUCR, 2*. Obtenido de revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/download/13468/13364
- Leal Rocha, C. (2012). *Estudio del comportamiento a tensión indirecta en carpetas asfálticas (Tesis de pregrado)*. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- Loulizi, A., AL-Qadi, I., Lahouar, S., & Freeman, E. (2002). Measurement of Vertical Compressive Stress Pulse in Flexible Pavements. *81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Paper No 02-2376*. Washington D.C.
- Moreno, Á., & Soares, J. (2015). El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación. *ASFALTO Y PAVIMENTACIÓN, V*(16). Obtenido de http://www.asefma.es/wp-content/uploads/2015/04/asfalto_16.pdf
- Naranjo Salazar, F. A., & Rueda Zambrano, J. A. (2011). *IMPLEMENTACIÓN DE UN ENSAYO PARA MEDIR EL MÓDULO DE RIGIDEZ COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS (Tesis de pregrado)*. Universidad Industrial de Santander.
- Oficina de Información y Respuesta del Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Viviendo y Desarrollo Urbano [OIR]. (2016). *Resolución y Respuesta 252-2016 [Archivo PDF]*. San Salvador: Oficina de Información y Respuesta.

- Roque, R., & Buttlar, W. G. (1992). The development of a measurement and analysis system to accurately determine asphalt concrete properties using the indirect tensile mode (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 61.
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana [SIECA]. (2002). *Manual Centroamericano para el Diseño de pavimentos*. Guatemala: Autor.
- Shell International Petroleum Company [Shell]. (1978). Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic. *Shell Pavement Design Manual*, 2-5.
- Thenoux, G. (1988). Aplicaciones y limitaciones de los ensayos para medir consistencia y propiedades reológicas del asfalto. *Ingeniería de Construcción*(5), 80-114. Obtenido de <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10054>
- Thompson, M. R., & Carpenter, S. H. (2004). Design Principles for Long Lasting HMA Pavements. *International Society for Asphalt Pavements, International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements*. Auburn, AL.
- Thomson, M. R. (1996). Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design. *Transportation Research Board*(1539).
- Ullidz, P. (1987). Pavemente Analysis. *Elsevier Science Publishers*.

ANEXOS.



Balanza digital



Balanzas análogas



Martillo Marshall



Compactador Giratorio

Anexo 1. Materiales, herramientas y equipos utilizados en el laboratorio.



Base, collarín y molde Marshall



Moldes para compactador giratorio



Hot plate (Calentadores)



Nevera.

Anexo I. Materiales, herramientas y equipos utilizados en el laboratorio (continuación).



Termocupla



Termómetros



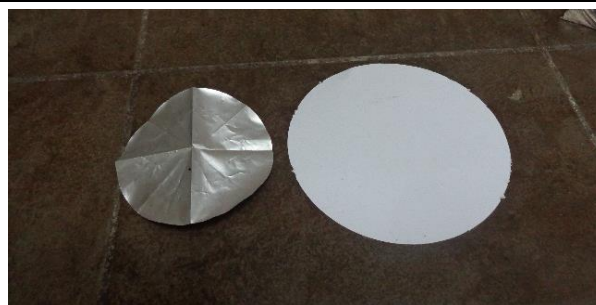
Cuchara y cucharón



Espátulas



Cuchillas



Filtros

Anexo 1. Materiales, herramientas y equipos utilizados en el laboratorio (continuación).



Pie de rey



Gato hidráulico



Balde y cubeta



Canastilla



Barra metálica



Bolsas plásticas

Anexo 1. Materiales, herramientas y equipos utilizados en el laboratorio (continuación).



Equipo para determinación de gravedad máxima teórica (Bomba de vacío, agitador mecánico, picnómetro, calibrador de vacío y manómetro de presión residual)



Horno



Marco para briquetas Marshall y LVDT



LVDT (deformimetro)



Palas



Cronometro

Anexo I. Materiales, herramientas y equipos utilizados en el laboratorio (continuación).



Franelas*



Toallas



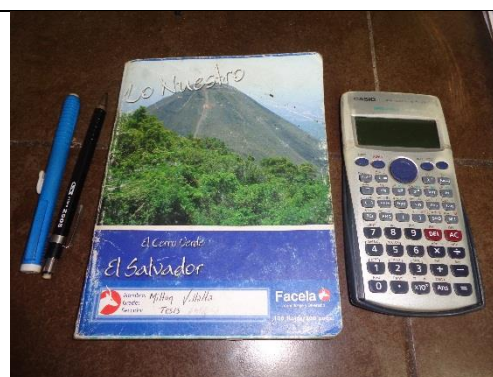
Equipo NAT tipo UN**



Ventilador



Yeso y marcador



Herramientas para recolección de datos

Anexo I. Materiales, herramientas y equipos utilizados en el laboratorio (continuación).



Mesa para cortar



Utensilios de limpieza*



Bandeja



Charola



Pintera, pines, pegamento gel y soportes para deformímetros



Deformímetros para ensayo de módulo dinámico

Anexo 1. Materiales, herramientas y equipos utilizados en el laboratorio (continuación).



Gabacha



Guantes



Pulidora



Extractor de núcleos

Anexo I. Materiales, herramientas y equipos utilizados en el laboratorio (continuación).

Pesos	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
	16/marzo/2016	19/mayo/2016	08/junio/2016	12/julio/2016
A: Peso seco muestra de mezcla suelta al aire (g)	2501.6	2501.11	2505.3	2502.4
D: Peso picnómetro calibrado + agua a 25°C (g)	7214.4	7214.4	7214.4	7214.4
E: Peso del picnómetro + agua a 25°C + muestra (g)	8668.3	8665.4	8670.0	8667.3
Gravedad específica teórica máxima de la mezcla	2.388	2.382	2.389	2.385

Anexo 2. Calculo de gravedades teóricas máximas suministrados por ECON.

Muestreo	# Briqueta	Φ_1	Φ_2	$\Phi_{prom.}$	h_1	h_2	h_3	h_4	$h_{prom.}$
1	1	101.90	102.10	102.00	67.70	67.80	67.50	67.60	67.65
	2	102.15	102.60	102.38	64.70	65.00	64.80	64.80	64.83
	3	101.70	101.90	101.80	67.80	67.20	67.10	68.00	67.53
	5	101.70	101.90	101.80	67.30	67.10	67.00	67.20	67.15
	6	101.65	101.90	101.78	68.50	68.50	68.40	68.30	68.43
	7	102.35	102.60	102.48	63.00	63.20	63.10	62.80	63.03
	8	102.55	102.35	102.45	63.30	63.10	63.10	63.20	63.18
	9	101.80	102.15	101.98	64.00	64.10	63.80	63.80	63.93
	2	10	102.20	101.98	102.09	64.80	64.30	64.50	64.40
11		102.03	101.67	101.85	65.50	65.50	65.40	65.20	65.40
12		102.13	101.90	102.02	64.00	63.90	63.90	63.90	63.93
13		102.05	102.28	102.17	63.40	63.50	63.50	63.50	63.48
14		101.70	101.90	101.80	63.80	63.70	63.70	63.70	63.73
15		101.63	101.98	101.81	65.10	65.10	65.10	65.10	65.10
16		102.27	102.45	102.36	62.40	62.40	62.40	62.40	62.40
17		102.00	102.00	102.00	65.00	65.00	65.00	65.50	65.13
18		102.07	102.45	102.26	64.10	64.10	64.20	64.30	64.18
3	19	102.00	102.00	102.00	65.90	65.50	65.50	66.00	65.73
	20	102.40	102.40	102.40	63.80	64.10	63.80	63.70	63.85
	21	102.10	102.17	102.14	64.30	64.50	64.50	64.20	64.38
	22	102.00	102.00	102.00	64.30	64.00	63.90	63.90	64.03
	23	102.10	101.90	102.00	64.40	64.50	63.90	63.90	64.18
	24	101.80	101.80	101.80	65.40	65.40	65.40	65.30	65.38
	25	102.17	102.35	102.26	65.50	65.30	65.30	65.20	65.33
	26	101.65	101.80	101.73	64.40	64.40	64.30	64.40	64.38
	27	101.90	102.10	102.00	63.20	63.20	63.10	63.10	63.15
4	28	102.15	102.60	102.38	63.00	63.10	63.10	63.10	63.08
	29	101.70	101.90	101.80	64.80	64.80	64.70	65.00	64.83
	30	101.90	102.10	102.00	63.30	63.30	63.40	63.30	63.33
	31	101.70	101.90	101.80	64.70	64.60	64.70	64.60	64.65
	32	101.65	101.90	101.78	64.30	64.00	64.00	64.00	64.08
	33	101.70	101.95	101.83	64.30	64.60	64.80	64.60	64.58
	34	101.90	101.75	101.83	64.30	64.20	64.30	64.40	64.30
	35	102.15	101.90	102.03	64.60	64.70	64.60	65.00	64.73
	36	102.05	102.30	102.18	63.90	63.80	63.70	63.60	63.75
	37	101.90	102.10	102.00	64.40	64.30	64.40	63.60	64.18
	38	102.20	101.80	102.00	62.90	62.80	63.10	63.00	62.95

Anexo 3. Dimensiones de las briquetas para módulo resiliente.

Muestreo	# Núcleo	Φ_1	Φ_2	$\Phi_{prom.}$	h_1	h_2	h_3	h_4	$h_{prom.}$
1	1	93.20	92.82	93.01	149.50	149.69	149.75	151.05	150.00
	2	92.90	93.05	92.98	150.00	149.80	149.90	150.15	149.96
	3	92.77	93.13	92.95	149.60	150.15	150.35	149.77	149.97
2	4	93.18	92.81	93.00	149.40	149.90	150.20	150.38	149.97
	5	92.93	93.20	93.07	150.00	150.27	149.87	150.00	150.04
	6	92.88	93.30	93.09	150.34	150.10	149.90	149.77	150.03
3	7	92.00	93.03	92.52	149.40	149.80	149.87	150.00	149.77
	8	92.94	93.21	93.08	149.95	150.26	150.35	150.42	150.25
	9	93.07	93.30	93.19	149.35	149.60	149.71	149.77	149.61
4	10	93.10	93.35	93.23	150.24	150.00	150.00	149.80	150.01
	11	93.17	93.40	93.29	150.00	150.04	150.10	150.00	150.04
	12	93.15	93.37	93.26	150.12	150.10	149.93	149.87	150.01

Anexo 4. Dimensiones de los núcleos para módulo dinámico.

# Briqueta	Z			t			K			Mr1'	0.8Mr1'	Mr2'	1.10Mr1'	Cumplimiento de criterios para aceptación	Mr'			
	Deformación horizontal (um)			Tiempo de carga (ms)			Factor de área de carga			Módulo ajustado 1 (MPa)	Límite inferior de módulo (MPa)	Módulo ajustado 2 (MPa)	Límite superior de módulo (MPa)		Módulo de Resiliencia ajustado (MPa)			
	L.I	Promedio medido		L.S	L.I	Promedio medido		L.S	L.I							Promedio medido		L.S
		1	2			1	2									1	2	
4	3	4.11	4.99	7	120	125	126	128	0.5	0.7	0.66	0.65	7164	5731	7649	7880	VERDADERO	7407
5		5.08	5.70			133	124				0.64	0.65	9046	7237	6602	9951	FALSO	N/A
10		5.24	4.77			125	127				0.64	0.64	11839	9471	10815	13023	VERDADERO	11327
11		5.08	5.07			124	124				0.64	0.64	11185	8948	10449	12304	VERDADERO	10817
12		4.78	4.92			126	124				0.64	0.64	11984	9587	11673	13182	VERDADERO	11828
17		5.15	5.31			126	124				0.64	0.63	10720	8576	10422	11792	VERDADERO	10571
18		5.25	5.32			126	124				0.64	0.63	11852	9481	11545	13037	VERDADERO	11698
19		5.27	5.29			125	124				0.63	0.64	11152	8922	11007	12267	VERDADERO	11079
27		5.16	5.42			126	125				0.64	0.64	11312	9049	10917	12443	VERDADERO	11114
28		4.79	5.01			125	125				0.64	0.64	12424	9939	12457	13666	VERDADERO	12440
29		5.13	4.90			126	125				0.63	0.63	13220	10576	12859	14542	VERDADERO	13040
30		4.89	4.95			125	125				0.64	0.63	13092	10474	12764	14401	VERDADERO	12928

Anexo 5. Evaluación del cumplimiento de criterios para aceptación de módulos resilientes a 4°C y 0.33 Hz.

# Briqueta	Z			t			k			Mr1'	0.8Mr1'	Mr2'	1.10Mr1'	Cumplimiento de criterios para aceptación	Mr'			
	Deformación horizontal (um)			Tiempo de carga (ms)			Factor de área de carga			Módulo ajustado 1 (MPa)	Límite inferior de módulo (MPa)	Módulo ajustado 2 (MPa)	Límite superior de módulo (MPa)		Módulo de Resiliencia ajustado (MPa)			
	L.I	Promedio medido		L.S	L.I	Promedio medido		L.S	L.I							Promedio medido		L.S
		1	2			1	2									1	2	
3	3	5.06	5.29	7	120	124	127	128	0.5	0.68	0.68	0.7	1452	1162	1365	1597	VERDADERO	1409
7		5.06	0.19			127	256			0.69	4.47		2467	1974	5823	2714	FALSO	N/A
8		0.22	5.06			256	128			3.34	0.69		4396	3517	2020	4836	FALSO	N/A
9		5.13	8.61			126	196			0.7	0.73		1825	1460	1476	2007	FALSO	N/A
20		5.15	4.98			125	123			0.68	0.68		2609	2087	2631	2870	VERDADERO	2620
21		4.86	4.95			124	126			0.68	0.68		2469	1975	2475	2716	VERDADERO	2472
22		5.06	4.98			127	124			0.68	0.68		2292	1833	2336	2521	VERDADERO	2314
26		2.92	5.10			112	126			1.75	0.67		267	213	2679	293	FALSO	N/A
31		5.09	5.26			125	125			0.68	0.68		2145	1716	2178	2359	VERDADERO	2161
32		4.93	5.33			122	118			0.69	0.69		2227	1782	2284	2450	VERDADERO	2256
33		5.19	5.45			124	78			0.69	0.72		2170	1736	670	2387	FALSO	N/A
34		4.81	4.91			127	117			0.68	0.69		2514	2011	2631	2766	VERDADERO	2573

Anexo 6. Evaluación del cumplimiento de criterios para aceptación de módulos resilientes a 21°C y 0.33 Hz.

# Briqueta	Z			t			k			Mr1'	0.8Mr1'	Mr2'	1.10Mr1'	Cumplimiento de criterios para aceptación	Mr'			
	Deformación horizontal (um)			Tiempo de carga (ms)			Factor de área de carga			Módulo ajustado 1 (MPa)	Límite inferior de módulo (MPa)	Módulo ajustado 2 (MPa)	Límite superior de módulo (MPa)		Módulo de Resiliencia ajustado (MPa)			
	L.I	Promedio medido		L.S	L.I	Promedio medido		L.S	L.I							Promedio medido		L.S
		1	2			1	2									1	2	
6	3	0.36	0.50	7	120	219	273	128	0.5	0.7	3.26	3.11	2637	2109	1516	2901	FALSO	N/A
13		1.14	0.20			285	140				2.59	4.63	705	564	4842	775	FALSO	N/A
14		36.22	1.66			73	138				0.66	0.89	444	355	552	488	FALSO	N/A
15		3.53	2.11			147	144				0.71	0.89	487	390	494	536	FALSO	N/A
16		0.32	1.46			146	222				6.30	4.29	3977	3182	475	4375	FALSO	N/A
23		3.87	2.11			270	147				0.75	0.82	384	308	545	423	FALSO	N/A
24		0.54	1.37			122	157				5.07	0.89	1761	1409	682	1937	FALSO	N/A
25		0.18	41.30			175	72				3.59	0.66	3562	2850	516	3918	FALSO	N/A
35		1.84	0.76			165	269				0.82	1.37	606	484	840	666	FALSO	N/A
36		0.52	5.26			117	109				4.70	0.76	1465	1172	441	1611	FALSO	N/A
37		1.94	4.07			134	257				0.77	0.71	676	541	457	743	FALSO	N/A
38		0.43	0.48			173	207				3.37	3.18	1093	874	2105	1202	FALSO	N/A

Anexo 7. Evaluación del cumplimiento de criterios para aceptación de módulos resilientes a 37°C y 0.33 Hz.

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulos Dinámicos medidos (MPa)											
		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
4	25	10290.3	26185.2	41145.5	11432.8	20993.3	31524.4	24634.7	28603.4	27921.5	20543.5	21727.1	21968.9
	10	9976.5	24772.1	41183.0	10653.7	20709.4	34051.7	22039.5	29481.5	27693.5	19741.0	20855.8	21199.8
	5	9407.6	24397.1	38476.6	9975.7	19068.1	31324.1	19024.8	29400.6	26811.3	17999.8	20107.8	20584.5
	1	7649.3	19578.6	33773.7	8153.4	15348.1	25670.0	13667.1	25848.9	20151.1	14707.1	17056.8	16994.2
	0.5	6849.6	18161.8	30092.3	7169.7	13325.8	23920.4	12112.4	20348.3	18930.9	12355.6	15272.8	15368.3
	0.1	5219.2	12320.2	21975.8	5110.6	8923.0	16068.6	9506.7	13525.4	13275.9	9344.6	12659.5	12226.6
21	25	6946.3	15338.6	18009.2	6516.3	10274.5	18544.1	16709.2	14784.8	14724.6	11995.2	10614.9	10260.6
	10	6200.5	13573.5	15054.0	5808.3	8808.0	15876.9	15374.0	13048.9	12328.6	10228.6	9594.4	8866.3
	5	5553.7	11944.9	12622.1	5105.1	7531.4	13363.0	13882.3	11043.4	10430.2	8912.5	8485.7	7897.9
	1	3947.8	8868.3	7628.8	3324.1	4793.1	8665.9	10134.2	7395.9	7065.8	5852.1	5871.7	5246.3
	0.5	3375.9	7563.1	6136.7	2737.0	4085.3	6873.9	8560.7	6027.5	5697.5	4791.4	4858.8	4266.3
	0.1	2326.3	5179.2	3541.5	1744.9	2457.8	4093.3	5889.8	3790.5	3548.2	2888.2	3170.0	2814.3
37	25	3350.3	6193.2	4368.6	3170.5	3470.1	5529.4	7389.4	5363.6	4415.7	3459.5	4497.4	4041.1
	10	2812.2	5311.3	3020.3	2466.3	2641.1	4078.3	6155.5	4158.9	3337.4	2611.1	3568.7	2989.2
	5	2415.0	4641.8	2334.4	2020.1	2150.0	3229.2	5187.4	3372.4	2688.4	2087.2	2894.5	2349.3
	1	1645.8	3184.3	1361.1	1231.8	1332.5	1911.0	3339.5	2005.2	1619.6	1249.1	1762.4	1426.1
	0.5	1395.0	2721.3	1121.3	1030.0	1118.4	1568.5	2728.4	1655.5	1332.2	1024.4	1429.2	1178.7
	0.1	1026.2	1970.6	804.0	741.1	826.5	1058.5	1829.3	1155.2	924.5	707.7	917.4	801.1

Anexo 8. Módulos dinámicos registrados para cada núcleo ensayado.

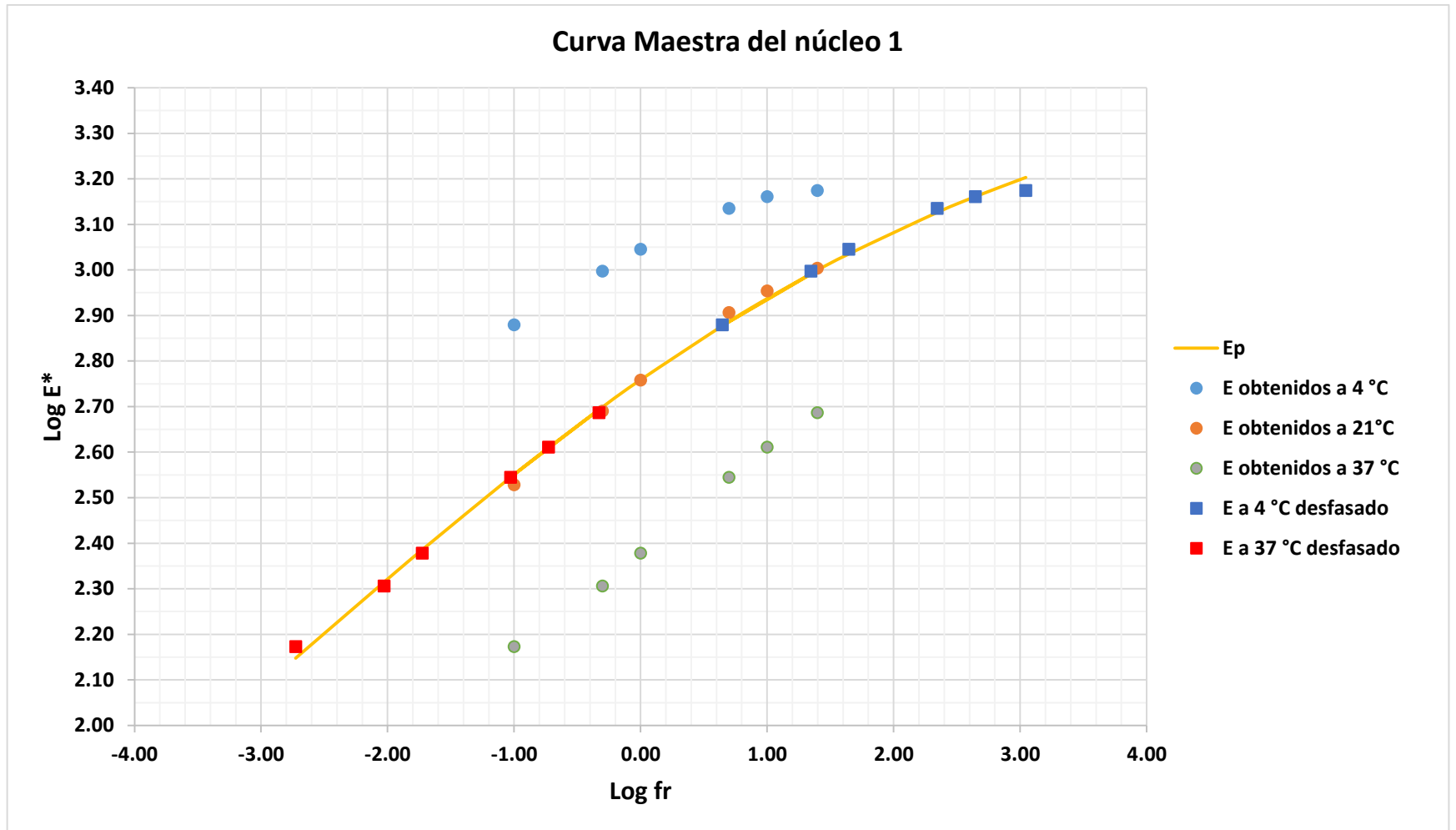
	# Núcleo											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	2.72058	3.22666	2.28024	1.74186	2.03553	2.03064	3.80551	2.14676	2.23403	2.11094	2.61438	2.36439
B	-0.93811	-0.93037	-0.53888	-0.49582	-0.38410	-0.64156	-1.14567	-0.55625	-0.61938	-0.70873	-0.97247	-0.74175
Δ	0.80337	0.77818	1.60603	1.59920	1.63343	1.76368	0.26854	1.65899	1.55055	1.51103	1.02779	1.27728
Γ	-0.35266	-0.28887	-0.61680	-0.65742	-0.58073	-0.66193	-0.29830	-0.56023	-0.54913	-0.60115	-0.46040	-0.50582
a1	0.05697	0.06974	0.08334	0.05488	0.06765	0.06959	0.04856	0.06969	0.07209	0.06708	0.07645	0.07725
a2	-0.00010	0.00002	0.00027	0.00012	0.00005	0.00001	-0.00068	0.00017	-0.00001	-0.00027	0.00043	0.00040
Sy	0.30480	0.34841	0.57421	0.36153	0.45080	0.48081	0.31702	0.44985	0.47434	0.46211	0.42411	0.45578
Se	0.01688	0.02383	0.01554	0.01133	0.01600	0.01765	0.01728	0.03073	0.01383	0.00925	0.01030	0.01471
R2	0.99801	0.99697	0.99953	0.99936	0.99919	0.99913	0.99808	0.99698	0.99945	0.99974	0.99962	0.99933
Se/Sy	0.05539	0.06840	0.02707	0.03134	0.03548	0.03672	0.05449	0.06831	0.02916	0.02001	0.02428	0.03227

Anexo 9. Parámetros de ajuste y comprobación de las curvas maestras de módulo dinámico.

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores	E*p (ksi)
--------	--------	----------	-------	-----------	--------	--------	---------	---------	-----------

								cuadrados	
39.2	25	1492.1	1.3979	1.6465998	3.0445	3.1738	3.2030	0.000852921	1595.9
	10	1446.6	1.0000		2.6466	3.1603	3.1611	5.61583E-07	1449.1
	5	1364.1	0.6990		2.3456	3.1348	3.1264	7.14429E-05	1337.8
	1	1109.1	0.0000		1.6466	3.0450	3.0352	9.5308E-05	1084.5
	0.5	993.2	-0.3010		1.3456	2.9970	2.9912	3.39265E-05	980.0
	0.1	756.8	-1.0000		0.6466	2.8790	2.8777	1.70792E-06	754.5
69.8	25	1007.2	1.3979	0	1.3979	3.0031	2.9991	1.63621E-05	997.9
	10	899.1	1.0000		1.0000	2.9538	2.9371	0.000280133	865.1
	5	805.3	0.6990		0.6990	2.9060	2.8867	0.00036975	770.4
	1	572.4	0.0000		0.0000	2.7577	2.7587	9.50123E-07	573.7
	0.5	489.5	-0.3010		-0.3010	2.6898	2.6990	8.50357E-05	500.0
	0.1	337.3	-1.0000		-1.0000	2.5280	2.5509	0.000520781	355.5
98.6	25	485.8	1.3979	-1.7265738	-0.3286	2.6865	2.6934	4.79008E-05	493.6
	10	407.8	1.0000		-0.7266	2.6104	2.6103	2.28657E-08	407.6
	5	350.2	0.6990		-1.0276	2.5443	2.5448	2.26814E-07	350.6
	1	238.6	0.0000		-1.7266	2.3777	2.3856	6.13137E-05	243.0
	0.5	202.3	-0.3010		-2.0276	2.3059	2.3147	7.74994E-05	206.4
	0.1	148.8	-1.0000		-2.7266	2.1726	2.1477	0.000619101	140.5
Sumatoria de errores cuadrados								0.003134944	

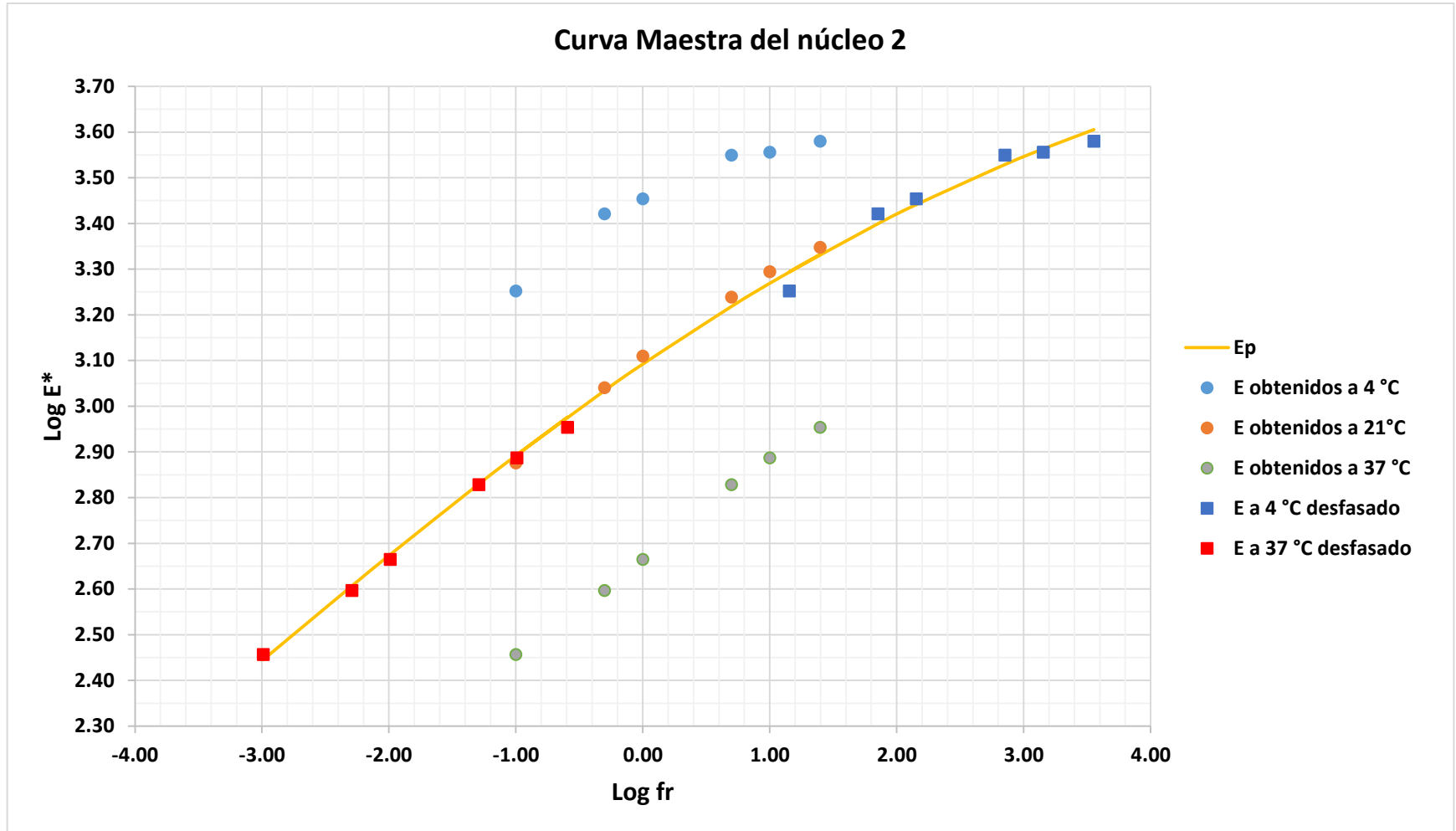
Anexo 10. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo I.



Anexo 11. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 1.

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	3796.9	1.3979	2.15489782	3.5528	3.5794	3.6053	0.000669195	4029.9
	10	3592.0	1.0000		3.1549	3.5553	3.5633	6.31995E-05	3658.3
	5	3537.6	0.6990		2.8539	3.5487	3.5291	0.000385205	3381.3
	1	2838.9	0.0000		2.1549	3.4531	3.4412	0.000142145	2762.0
	0.5	2633.5	-0.3010		1.8539	3.4205	3.3996	0.000436814	2509.7
	0.1	1786.4	-1.0000		1.1549	3.2520	3.2940	0.001769122	1968.1
69.8	25	2224.1	1.3979	0	1.3979	3.3472	3.3322	0.000223862	2148.8
	10	1968.2	1.0000		1.0000	3.2941	3.2689	0.000631091	1857.5
	5	1732.0	0.6990		0.6990	3.2386	3.2184	0.000406976	1653.4
	1	1285.9	0.0000		0.0000	3.1092	3.0922	0.000289767	1236.5
	0.5	1096.6	-0.3010		-0.3010	3.0401	3.0342	3.42821E-05	1082.0
	0.1	751.0	-1.0000		-1.0000	2.8756	2.8919	0.000266275	779.7
98.6	25	898.0	1.3979	-1.9902901	-0.5924	2.9533	2.9762	0.000523526	946.6
	10	770.1	1.0000		-0.9903	2.8866	2.8940	5.51129E-05	783.4
	5	673.1	0.6990		-1.2913	2.8281	2.8298	3.12735E-06	675.8
	1	461.7	0.0000		-1.9903	2.6644	2.6753	0.00011826	473.4
	0.5	394.6	-0.3010		-2.2913	2.5961	2.6068	0.000113551	404.4
	0.1	285.7	-1.0000		-2.9903	2.4560	2.4452	0.000115937	278.7
Sumatoria de errores cuadrados								0.006247448	

Anexo 12. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 2.

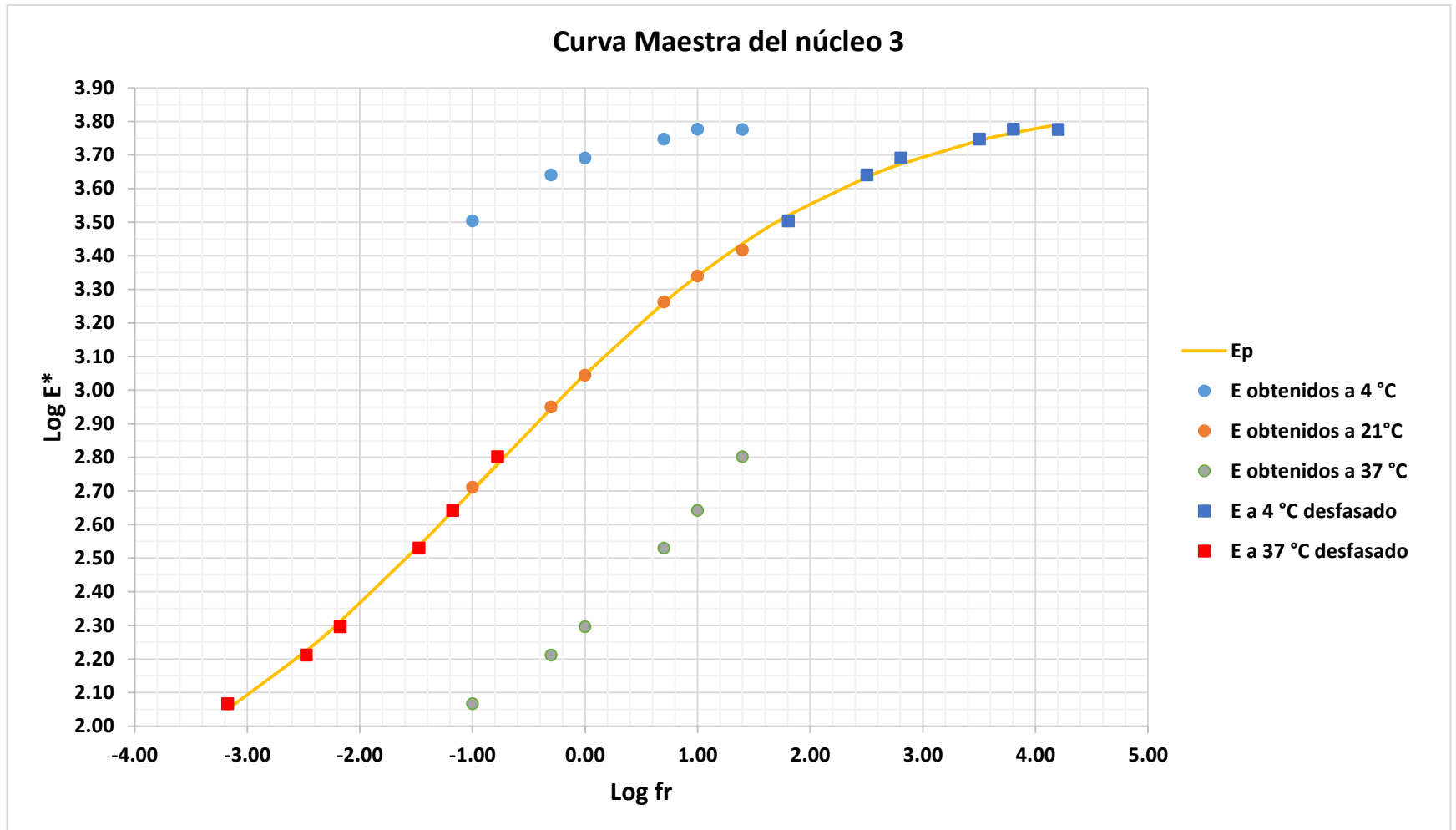


Anexo 13. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 2.

T (°F)	f	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores	E*p (ksi)
--------	---	----------	-------	-----------	--------	--------	---------	---------	-----------

	(Hz)							cuadrados	
39.2	25	5966.1	1.3979	2.80517427	4.2031	3.7757	3.7909	0.000230997	6178.6
	10	5971.5	1.0000		3.8052	3.7761	3.7658	0.000106721	5831.2
	5	5579.1	0.6990		3.5041	3.7466	3.7427	1.483E-05	5529.9
	1	4897.2	0.0000		2.8052	3.6899	3.6726	0.000301361	4705.3
	0.5	4363.4	-0.3010		2.5041	3.6398	3.6338	3.61036E-05	4303.4
	0.1	3186.5	-1.0000		1.8052	3.5033	3.5196	0.000265961	3308.4
69.8	25	2611.3	1.3979	0	1.3979	3.4169	3.4356	0.000351705	2726.6
	10	2182.8	1.0000		1.0000	3.3390	3.3403	1.54949E-06	2189.1
	5	1830.2	0.6990		0.6990	3.2625	3.2595	9.09788E-06	1817.5
	1	1106.2	0.0000		0.0000	3.0438	3.0461	5.28275E-06	1112.0
	0.5	889.8	-0.3010		-0.3010	2.9493	2.9454	1.4981E-05	881.9
	0.1	513.5	-1.0000		-1.0000	2.7106	2.7018	7.74786E-05	503.2
98.6	25	633.4	1.3979	-2.1742307	-0.7763	2.8017	2.7804	0.000454975	603.1
	10	437.9	1.0000		-1.1742	2.6414	2.6408	4.20128E-07	437.3
	5	338.5	0.6990		-1.4753	2.5295	2.5370	5.58329E-05	344.4
	1	197.4	0.0000		-2.1742	2.2953	2.3119	0.000276747	205.1
	0.5	162.6	-0.3010		-2.4753	2.2111	2.2247	0.000186186	167.8
	0.1	116.6	-1.0000		-3.1742	2.0666	2.0503	0.000267657	112.3
Sumatoria de errores cuadrados								0.002657886	

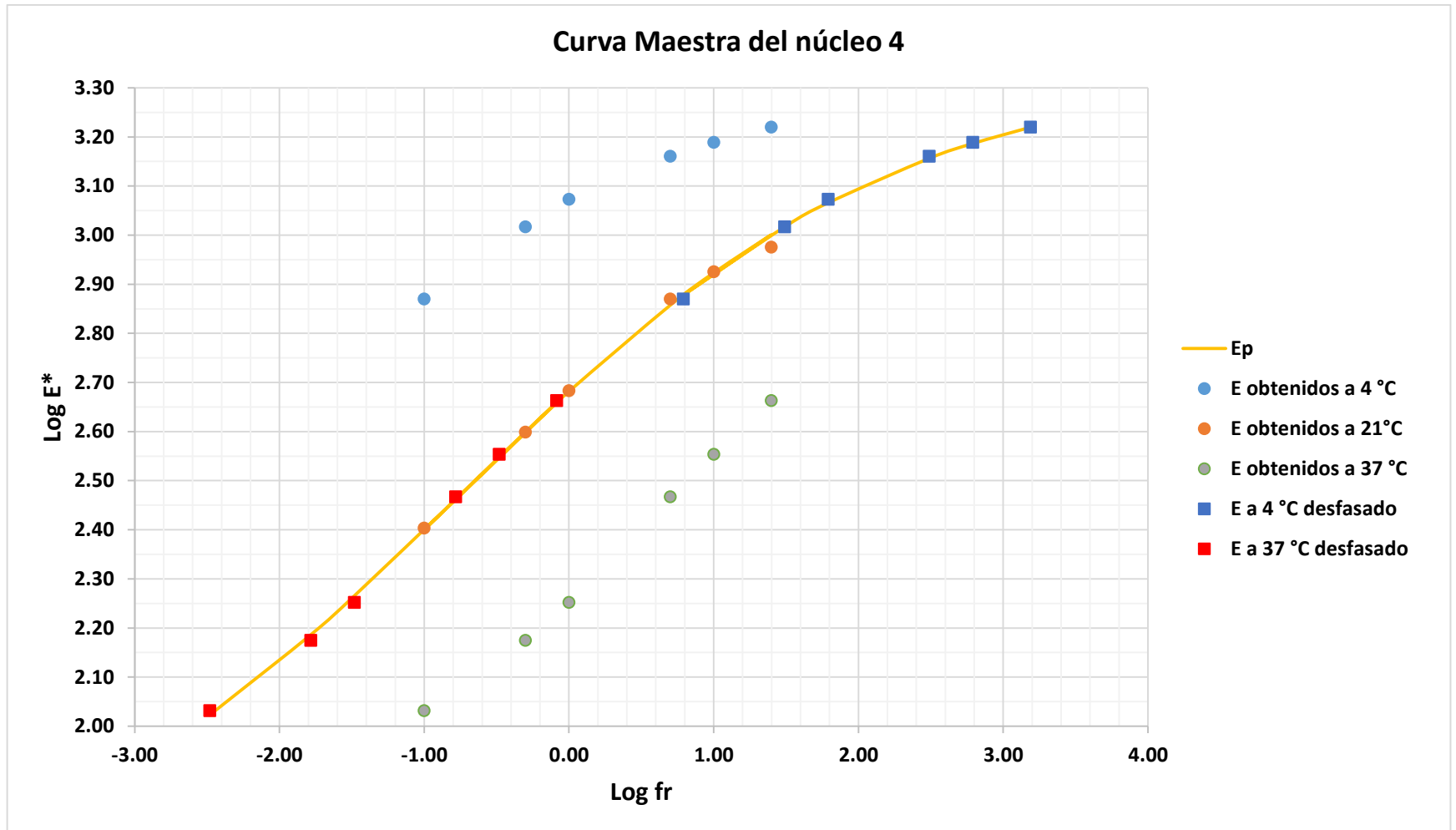
Anexo 14. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 3.



Anexo 15. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 3.

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	1657.8	1.3979	1.79038324	3.1883	3.2195	3.2197	3.92961E-08	1658.5
	10	1544.8	1.0000		2.7904	3.1889	3.1867	4.91669E-06	1536.9
	5	1446.5	0.6990		2.4894	3.1603	3.1564	1.49799E-05	1433.6
	1	1182.2	0.0000		1.7904	3.0727	3.0658	4.81146E-05	1163.5
	0.5	1039.6	-0.3010		1.4894	3.0169	3.0167	1.62219E-08	1039.3
	0.1	741.0	-1.0000		0.7904	2.8698	2.8779	6.44626E-05	754.9
69.8	25	944.9	1.3979	0	1.3979	2.9754	3.0006	0.000635594	1001.3
	10	842.2	1.0000		1.0000	2.9254	2.9232	4.95005E-06	837.9
	5	740.2	0.6990		0.6990	2.8694	2.8571	0.000149402	719.7
	1	482.0	0.0000		0.0000	2.6830	2.6817	1.73607E-06	480.5
	0.5	396.9	-0.3010		-0.3010	2.5986	2.5989	7.1524E-08	397.1
	0.1	253.0	-1.0000		-1.0000	2.4031	2.3999	1.04267E-05	251.1
98.6	25	459.7	1.3979	-1.4820779	-0.0841	2.6625	2.6589	1.28477E-05	455.9
	10	357.6	1.0000		-0.4821	2.5534	2.5478	3.12587E-05	353.0
	5	292.9	0.6990		-0.7831	2.4667	2.4618	2.39211E-05	289.6
	1	178.6	0.0000		-1.4821	2.2519	2.2656	0.000188361	184.3
	0.5	149.4	-0.3010		-1.7831	2.1742	2.1863	0.000146416	153.6
	0.1	107.5	-1.0000		-2.4821	2.0312	2.0226	7.50448E-05	105.3
Sumatoria de errores cuadrados								0.001412559	

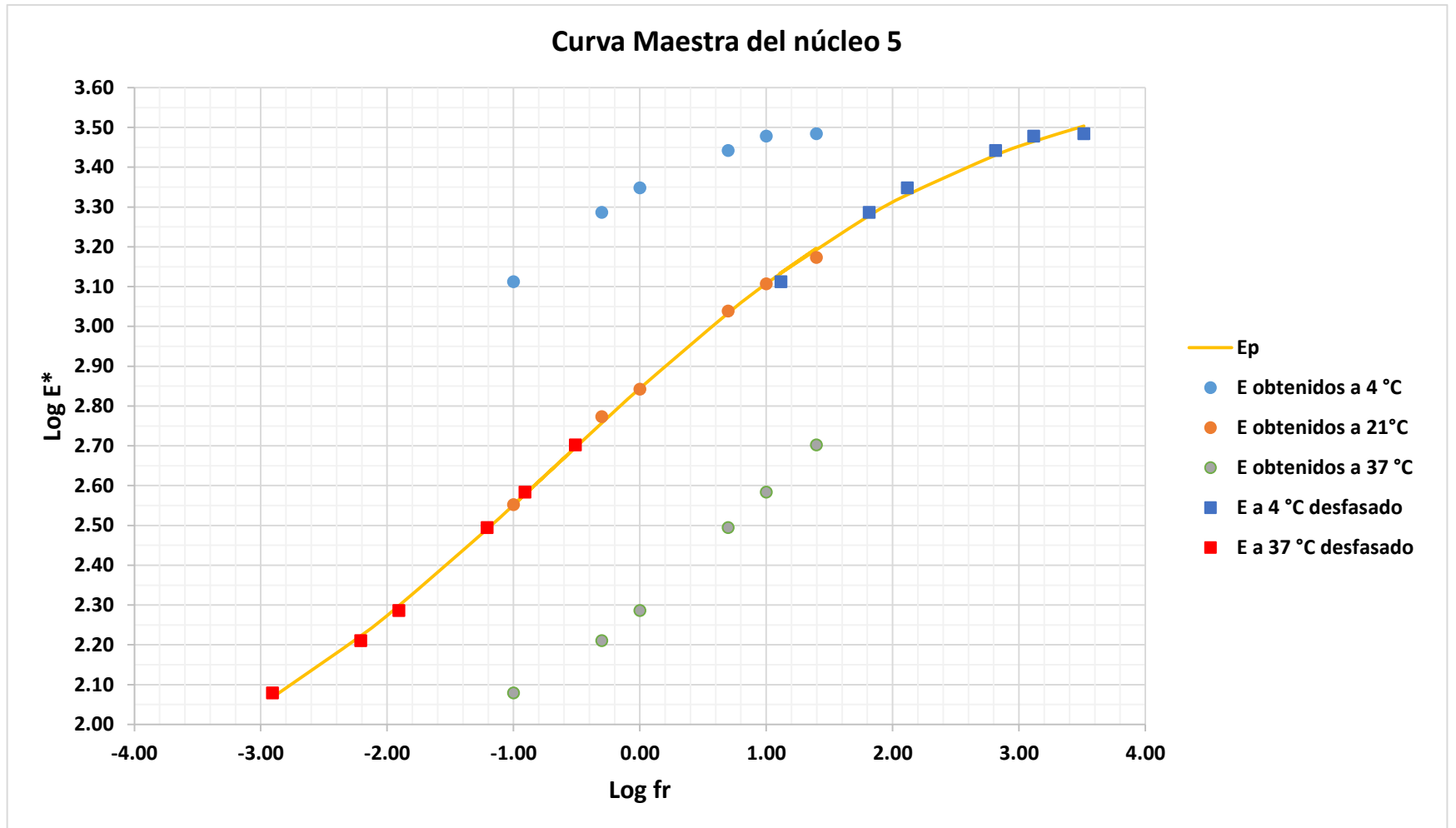
Anexo 16. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 4.



Anexo 17. *Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 4.*

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	3044.0	1.3979	2.11588431	3.5138	3.4834	3.5035	0.000400143	3187.5
	10	3002.9	1.0000		3.1159	3.4775	3.4647	0.00016372	2915.7
	5	2764.9	0.6990		2.8149	3.4417	3.4303	0.00012935	2693.4
	1	2225.5	0.0000		2.1159	3.3474	3.3307	0.000280622	2141.3
	0.5	1932.2	-0.3010		1.8149	3.2861	3.2784	5.79956E-05	1898.7
	0.1	1293.8	-1.0000		1.1159	3.1119	3.1343	0.000501993	1362.3
69.8	25	1489.8	1.3979	0	1.3979	3.1731	3.1963	0.000537309	1571.5
	10	1277.2	1.0000		1.0000	3.1062	3.1073	1.18325E-06	1280.4
	5	1092.1	0.6990		0.6990	3.0382	3.0335	2.2145E-05	1080.3
	1	695.0	0.0000		0.0000	2.8420	2.8443	5.31829E-06	698.7
	0.5	592.4	-0.3010		-0.3010	2.7726	2.7573	0.000233509	571.9
	0.1	356.4	-1.0000		-1.0000	2.5519	2.5515	2.07894E-07	356.0
98.6	25	503.2	1.3979	-1.9079926	-0.5101	2.7017	2.6959	3.37728E-05	496.5
	10	383.0	1.0000		-0.9080	2.5832	2.5785	2.20993E-05	378.8
	5	311.8	0.6990		-1.2090	2.4938	2.4907	9.54455E-06	309.5
	1	193.2	0.0000		-1.9080	2.2860	2.2981	0.000145417	198.7
	0.5	162.2	-0.3010		-2.2090	2.2100	2.2223	0.000152933	166.9
	0.1	119.8	-1.0000		-2.9080	2.0786	2.0678	0.000117262	116.9
Sumatoria de errores cuadrados								0.002814526	

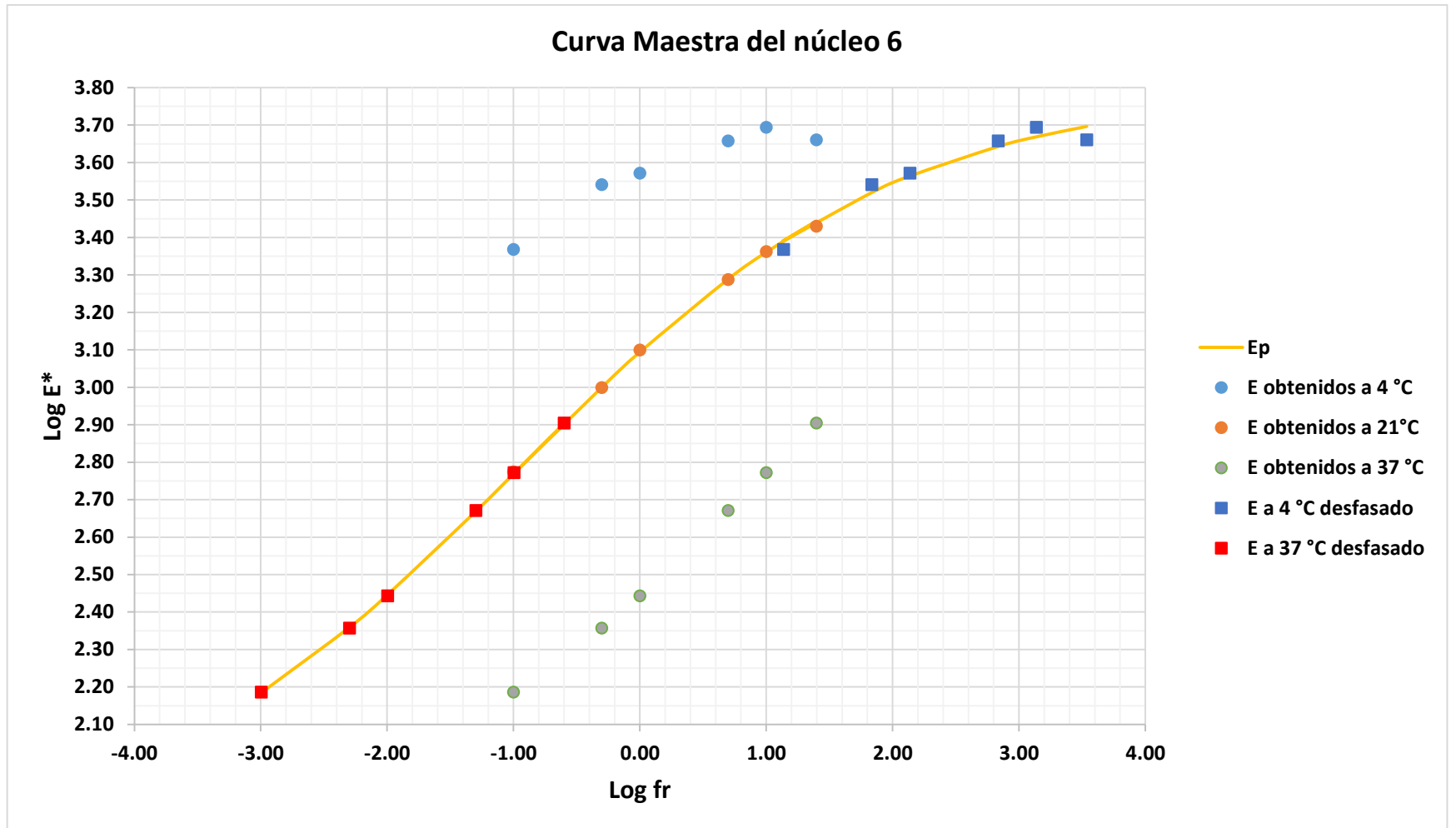
Anexo 18. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 5.



Anexo 19. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 5.

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	4571.0	1.3979	2.13797826	3.5359	3.6600	3.6964	0.001320551	4970.0
	10	4937.5	1.0000		3.1380	3.6935	3.6687	0.000617387	4662.9
	5	4542.0	0.6990		2.8369	3.6572	3.6430	0.000202488	4395.6
	1	3722.2	0.0000		2.1380	3.5708	3.5641	4.48361E-05	3665.2
	0.5	3468.5	-0.3010		1.8369	3.5401	3.5202	0.00039795	3312.7
	0.1	2329.9	-1.0000		1.1380	3.3673	3.3910	0.000557218	2460.1
69.8	25	2688.9	1.3979	0	1.3979	3.4296	3.4437	0.000199762	2777.8
	10	2302.2	1.0000		1.0000	3.3621	3.3606	2.3048E-06	2294.1
	5	1937.6	0.6990		0.6990	3.2873	3.2888	2.31053E-06	1944.4
	1	1256.6	0.0000		0.0000	3.0992	3.0940	2.72464E-05	1241.5
	0.5	996.7	-0.3010		-0.3010	2.9986	2.9999	1.88787E-06	999.9
	0.1	593.5	-1.0000		-1.0000	2.7734	2.7687	2.28799E-05	587.0
98.6	25	801.8	1.3979	-1.9965001	-0.5986	2.9040	2.9029	1.23609E-06	799.7
	10	591.4	1.0000		-0.9965	2.7718	2.7698	4.05183E-06	588.6
	5	468.2	0.6990		-1.2975	2.6705	2.6691	1.83103E-06	466.8
	1	277.1	0.0000		-1.9965	2.4426	2.4465	1.50886E-05	279.6
	0.5	227.4	-0.3010		-2.2975	2.3569	2.3593	6.17063E-06	228.7
	0.1	153.5	-1.0000		-2.9965	2.1861	2.1844	2.68795E-06	152.9
Sumatoria de errores cuadrados								0.003427888	

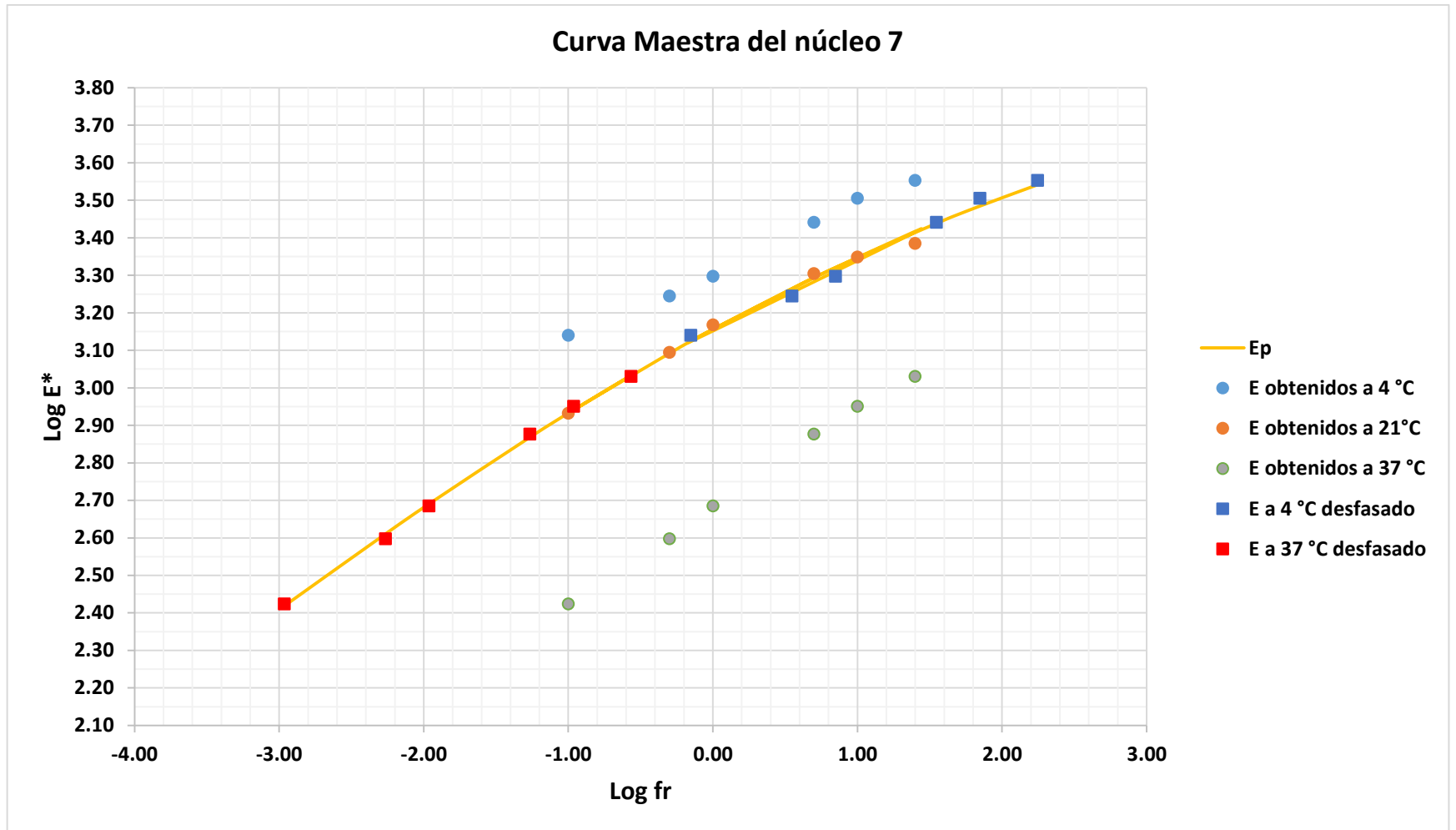
Anexo 20. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 6.



Anexo 21. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 6.

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	3572.0	1.3979	0.84748519	2.2454	3.5529	3.5414	0.000133441	3478.3
	10	3195.7	1.0000		1.8475	3.5046	3.4846	0.000397824	3052.3
	5	2758.6	0.6990		1.5465	3.4407	3.4385	4.8089E-06	2744.7
	1	1981.7	0.0000		0.8475	3.2970	3.3203	0.00054251	2090.9
	0.5	1756.3	-0.3010		0.5465	3.2446	3.2646	0.000399506	1839.0
	0.1	1378.5	-1.0000		-0.1525	3.1394	3.1238	0.000243706	1329.8
69.8	25	2422.8	1.3979	0	1.3979	3.3843	3.4147	0.000922363	2598.3
	10	2229.2	1.0000		1.0000	3.3482	3.3475	4.86101E-07	2225.7
	5	2012.9	0.6990		0.6990	3.3038	3.2932	0.000112982	1964.3
	1	1469.5	0.0000		0.0000	3.1672	3.1559	0.000127795	1431.7
	0.5	1241.3	-0.3010		-0.3010	3.0939	3.0919	4.10321E-06	1235.5
	0.1	854.0	-1.0000		-1.0000	2.9315	2.9325	9.73293E-07	856.0
98.6	25	1071.5	1.3979	-1.9639286	-0.5660	3.0300	3.0332	1.01719E-05	1079.4
	10	892.5	1.0000		-0.9639	2.9506	2.9410	9.20844E-05	873.0
	5	752.2	0.6990		-1.2650	2.8763	2.8683	6.40688E-05	738.4
	1	484.2	0.0000		-1.9639	2.6850	2.6904	2.88231E-05	490.3
	0.5	395.6	-0.3010		-2.2650	2.5973	2.6104	0.000172767	407.8
	0.1	265.2	-1.0000		-2.9639	2.4237	2.4187	2.4509E-05	262.2
Sumatoria de errores cuadrados								0.003282924	

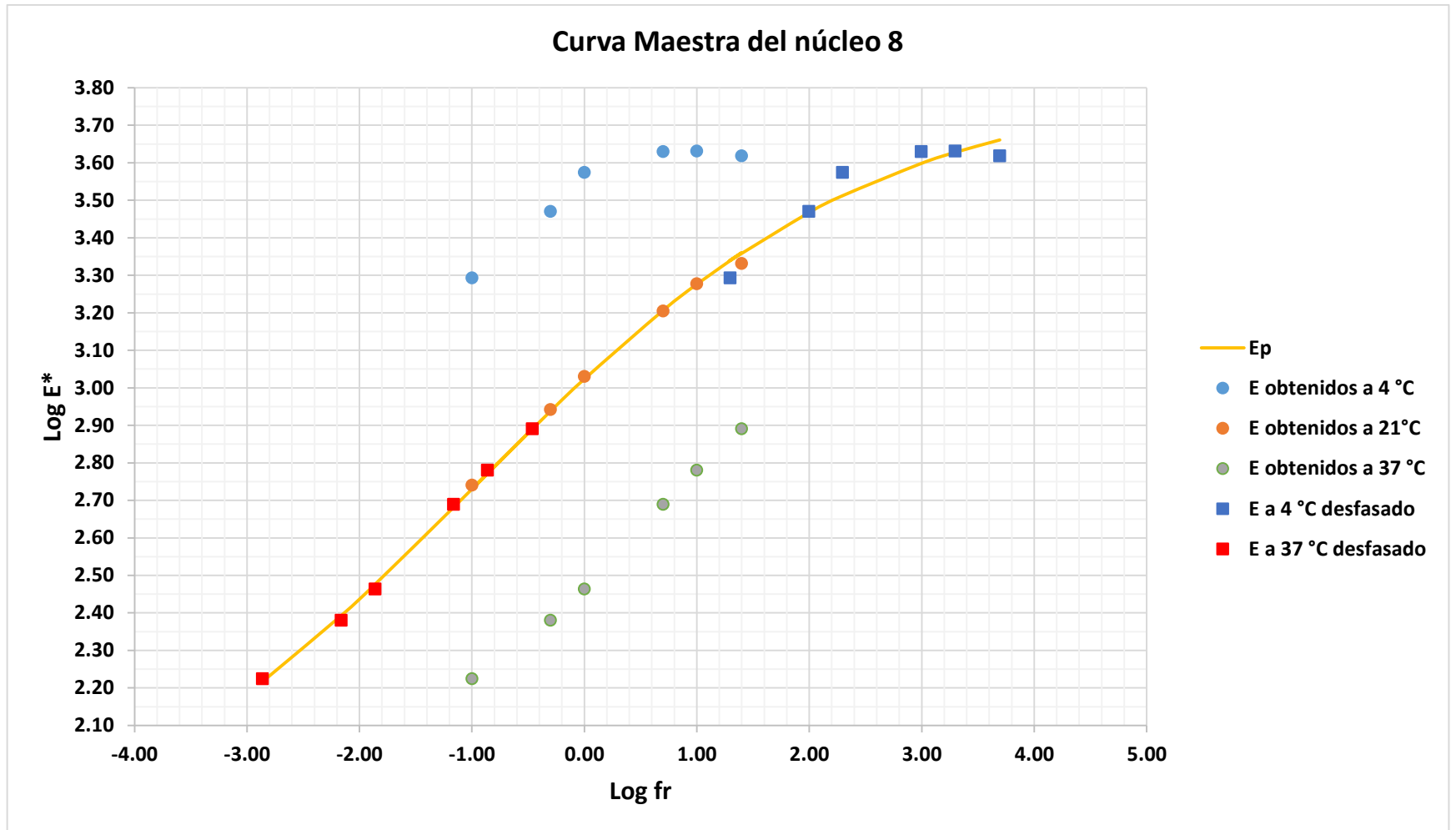
Anexo 22. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 7.



Anexo 23. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 7.

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	4147.5	1.3979	2.29596416	3.6939	3.6178	3.6608	0.001853407	4579.7
	10	4274.8	1.0000		3.2960	3.6309	3.6276	1.06895E-05	4242.8
	5	4263.1	0.6990		2.9949	3.6297	3.5981	0.001000396	3963.6
	1	3748.1	0.0000		2.2960	3.5738	3.5122	0.003799153	3252.2
	0.5	2950.5	-0.3010		1.9949	3.4699	3.4668	9.84586E-06	2929.3
	0.1	1961.2	-1.0000		1.2960	3.2925	3.3396	0.002212714	2185.5
69.8	25	2143.8	1.3979	0	1.3979	3.3312	3.3601	0.000834453	2291.2
	10	1892.1	1.0000		1.0000	3.2769	3.2762	5.2103E-07	1888.9
	5	1601.3	0.6990		0.6990	3.2045	3.2061	2.70621E-06	1607.4
	1	1072.4	0.0000		0.0000	3.0304	3.0234	4.79049E-05	1055.5
	0.5	874.0	-0.3010		-0.3010	2.9415	2.9378	1.35221E-05	866.6
	0.1	549.6	-1.0000		-1.0000	2.7401	2.7302	9.66156E-05	537.3
98.6	25	777.7	1.3979	-1.8620205	-0.4641	2.8908	2.8902	3.69182E-07	776.6
	10	603.0	1.0000		-0.8620	2.7803	2.7717	7.46972E-05	591.2
	5	489.0	0.6990		-1.1631	2.6893	2.6812	6.49218E-05	480.0
	1	290.8	0.0000		-1.8620	2.4635	2.4761	0.000158006	299.3
	0.5	240.0	-0.3010		-2.1631	2.3803	2.3926	0.00015193	247.0
	0.1	167.5	-1.0000		-2.8620	2.2240	2.2167	5.41441E-05	164.7
Sumatoria de errores cuadrados								0.010385997	

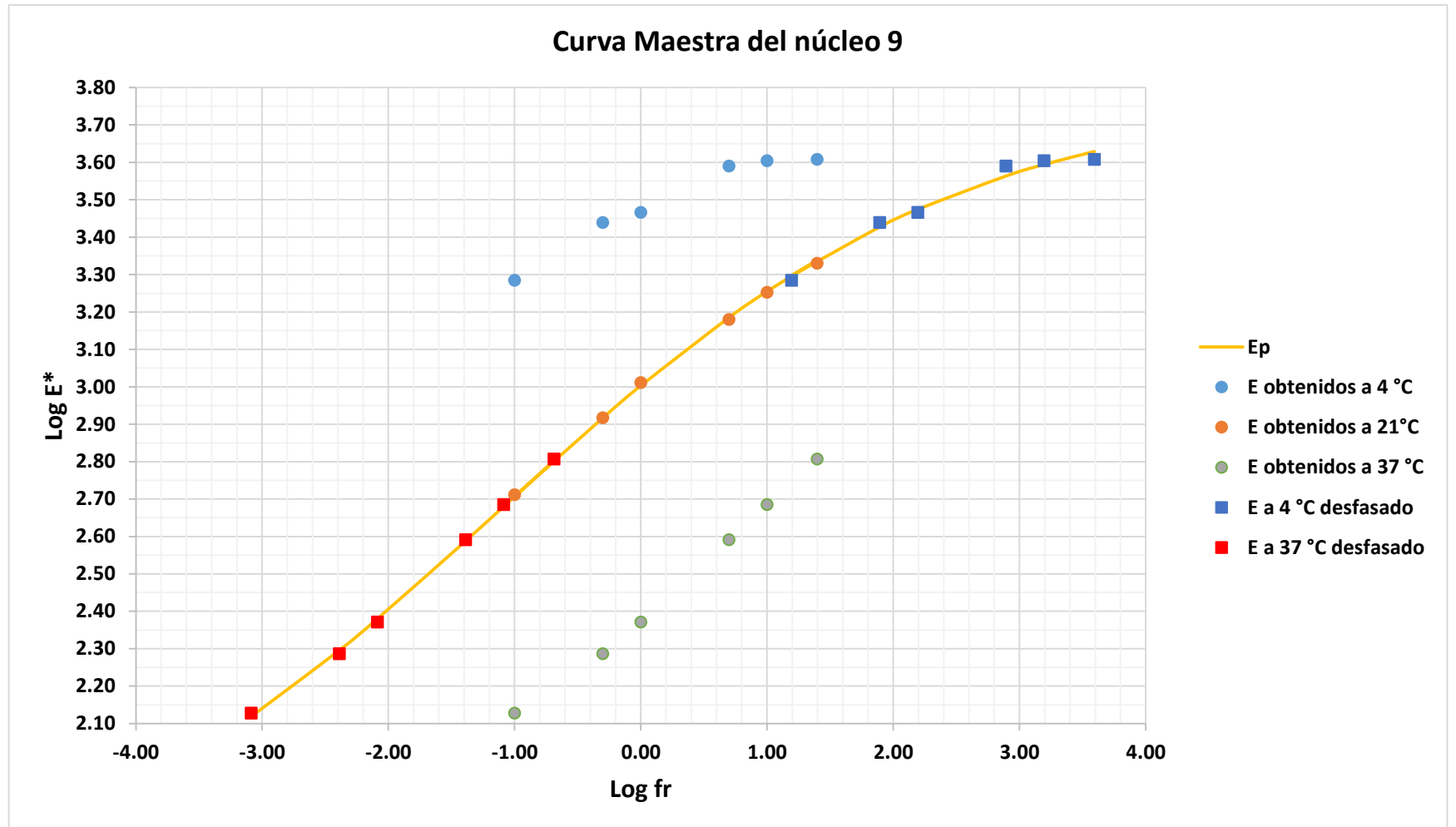
Anexo 24. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 8.



Anexo 25. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 8.

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	4048.6	1.3979	2.19483473	3.5928	3.6073	3.6290	0.000471423	4256.2
	10	4015.6	1.0000		3.1948	3.6037	3.5943	8.99729E-05	3928.8
	5	3887.6	0.6990		2.8938	3.5897	3.5634	0.000689102	3659.6
	1	2921.9	0.0000		2.1948	3.4657	3.4743	7.50477E-05	2980.8
	0.5	2745.0	-0.3010		1.8938	3.4385	3.4275	0.000122427	2675.9
	0.1	1925.0	-1.0000		1.1948	3.2844	3.2969	0.000154511	1980.9
69.8	25	2135.1	1.3979	0	1.3979	3.3294	3.3380	7.45711E-05	2177.9
	10	1787.6	1.0000		1.0000	3.2523	3.2548	6.57644E-06	1798.2
	5	1512.4	0.6990		0.6990	3.1797	3.1852	3.038E-05	1531.7
	1	1024.5	0.0000		0.0000	3.0105	3.0028	5.89752E-05	1006.6
	0.5	826.1	-0.3010		-0.3010	2.9171	2.9169	2.13167E-08	825.9
	0.1	514.5	-1.0000		-1.0000	2.7114	2.7068	2.10498E-05	509.1
98.6	25	640.3	1.3979	-2.0860991	-0.6882	2.8064	2.8018	2.09263E-05	633.6
	10	483.9	1.0000		-1.0861	2.6848	2.6804	1.91747E-05	479.1
	5	389.8	0.6990		-1.3871	2.5909	2.5882	7.04802E-06	387.4
	1	234.8	0.0000		-2.0861	2.3708	2.3803	9.06892E-05	240.0
	0.5	193.2	-0.3010		-2.3871	2.2859	2.2961	0.000102522	197.7
	0.1	134.1	-1.0000		-3.0861	2.1273	2.1189	7.04215E-05	131.5
Sumatoria de errores cuadrados								0.00210484	

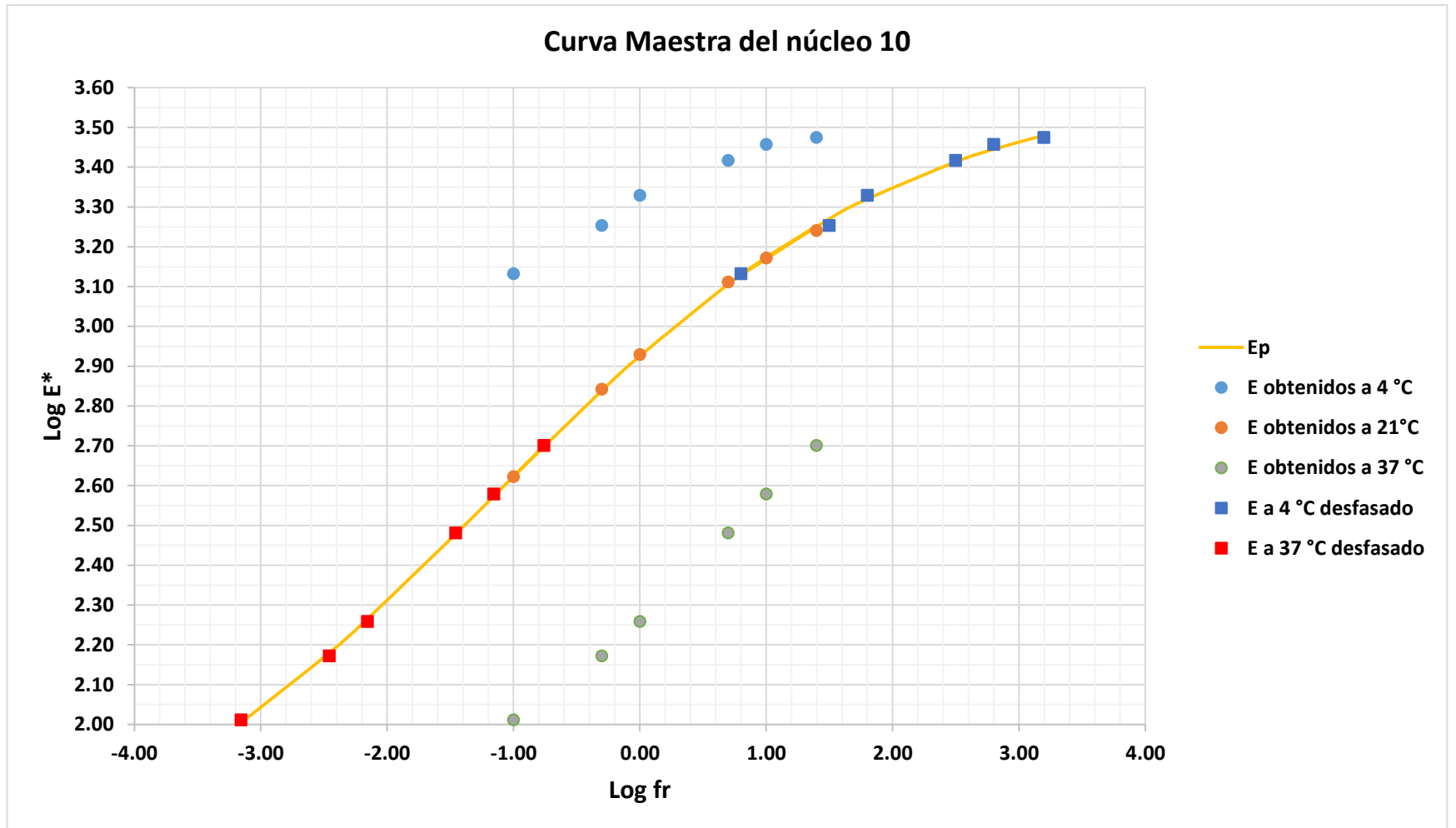
Anexo 26. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 9.



Anexo 27. *Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 9.*

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	2978.8	1.3979	1.79941063	3.1974	3.4740	3.4802	3.73868E-05	3021.0
	10	2862.4	1.0000		2.7994	3.4567	3.4450	0.000136771	2786.4
	5	2610.0	0.6990		2.4984	3.4166	3.4134	1.03932E-05	2590.7
	1	2132.5	0.0000		1.7994	3.3289	3.3201	7.78912E-05	2089.6
	0.5	1791.6	-0.3010		1.4984	3.2532	3.2702	0.000286606	1862.8
	0.1	1355.0	-1.0000		0.7994	3.1319	3.1293	6.86048E-06	1346.8
69.8	25	1739.3	1.3979	0	1.3979	3.2404	3.2521	0.000137491	1786.9
	10	1483.1	1.0000		1.0000	3.1712	3.1734	4.83005E-06	1490.7
	5	1292.3	0.6990		0.6990	3.1114	3.1061	2.73379E-05	1276.8
	1	848.6	0.0000		0.0000	2.9287	2.9256	9.40022E-06	842.6
	0.5	694.8	-0.3010		-0.3010	2.8418	2.8387	9.61393E-06	689.8
	0.1	418.8	-1.0000		-1.0000	2.6220	2.6232	1.4915E-06	420.0
98.6	25	501.6	1.3979	-2.156299	-0.7584	2.7004	2.6992	1.33591E-06	500.3
	10	378.6	1.0000		-1.1563	2.5782	2.5737	2.03061E-05	374.7
	5	302.6	0.6990		-1.4573	2.4809	2.4784	6.4663E-06	300.9
	1	181.1	0.0000		-2.1563	2.2580	2.2651	5.03002E-05	184.1
	0.5	148.5	-0.3010		-2.4573	2.1718	2.1798	6.3111E-05	151.3
	0.1	102.6	-1.0000		-3.1563	2.0112	2.0039	5.32581E-05	100.9
Sumatoria de errores cuadrados								0.000940851	

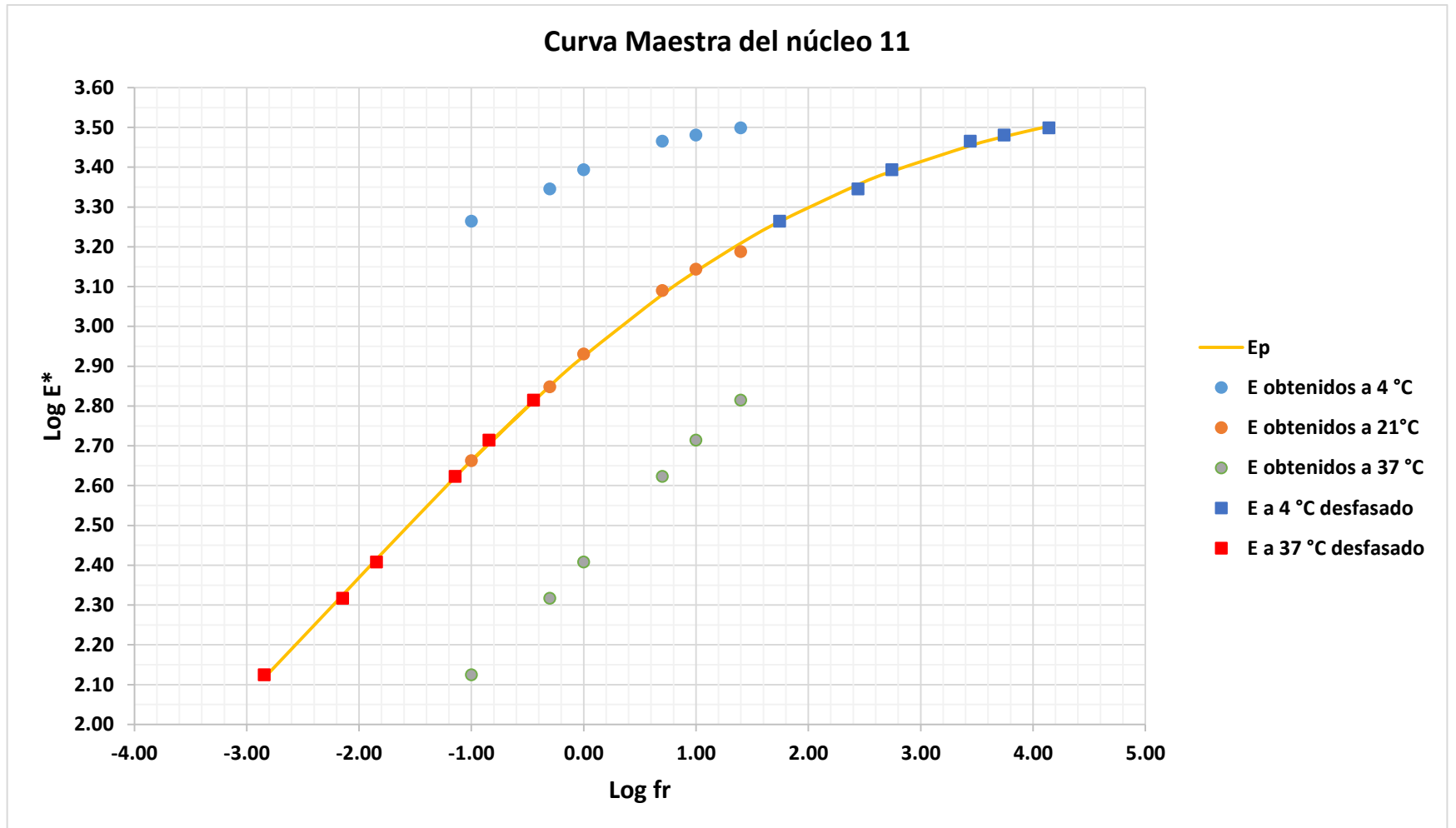
Anexo 28. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 10.



Anexo 29. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 10.

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	3150.4	1.3979	2.74333371	4.1413	3.4984	3.5031	2.23641E-05	3184.9
	10	3024.1	1.0000		3.7433	3.4806	3.4769	1.36296E-05	2998.5
	5	2915.6	0.6990		3.4423	3.4647	3.4541	0.000113015	2845.1
	1	2473.2	0.0000		2.7433	3.3933	3.3896	1.34064E-05	2452.5
	0.5	2214.6	-0.3010		2.4423	3.3453	3.3562	0.000118345	2270.7
	0.1	1835.6	-1.0000		1.7433	3.2638	3.2633	2.10496E-07	1833.7
69.8	25	1539.2	1.3979	0	1.3979	3.1873	3.2089	0.000465127	1617.5
	10	1391.2	1.0000		1.0000	3.1434	3.1385	2.37834E-05	1375.7
	5	1230.4	0.6990		0.6990	3.0901	3.0797	0.000106344	1201.6
	1	851.4	0.0000		0.0000	2.9301	2.9248	2.82071E-05	841.0
	0.5	704.5	-0.3010		-0.3010	2.8479	2.8505	6.64429E-06	708.7
	0.1	459.7	-1.0000		-1.0000	2.6624	2.6625	1.49503E-08	459.8
98.6	25	652.1	1.3979	-1.8440823	-0.4461	2.8143	2.8131	1.46044E-06	650.3
	10	517.5	1.0000		-0.8441	2.7139	2.7061	6.03359E-05	508.3
	5	419.7	0.6990		-1.1451	2.6229	2.6213	2.70964E-06	418.1
	1	255.5	0.0000		-1.8441	2.4075	2.4156	6.57233E-05	260.4
	0.5	207.2	-0.3010		-2.1451	2.3165	2.3251	7.46057E-05	211.4
	0.1	133.0	-1.0000		-2.8441	2.1239	2.1168	5.03686E-05	130.9
Sumatoria de errores cuadrados								0.001166295	

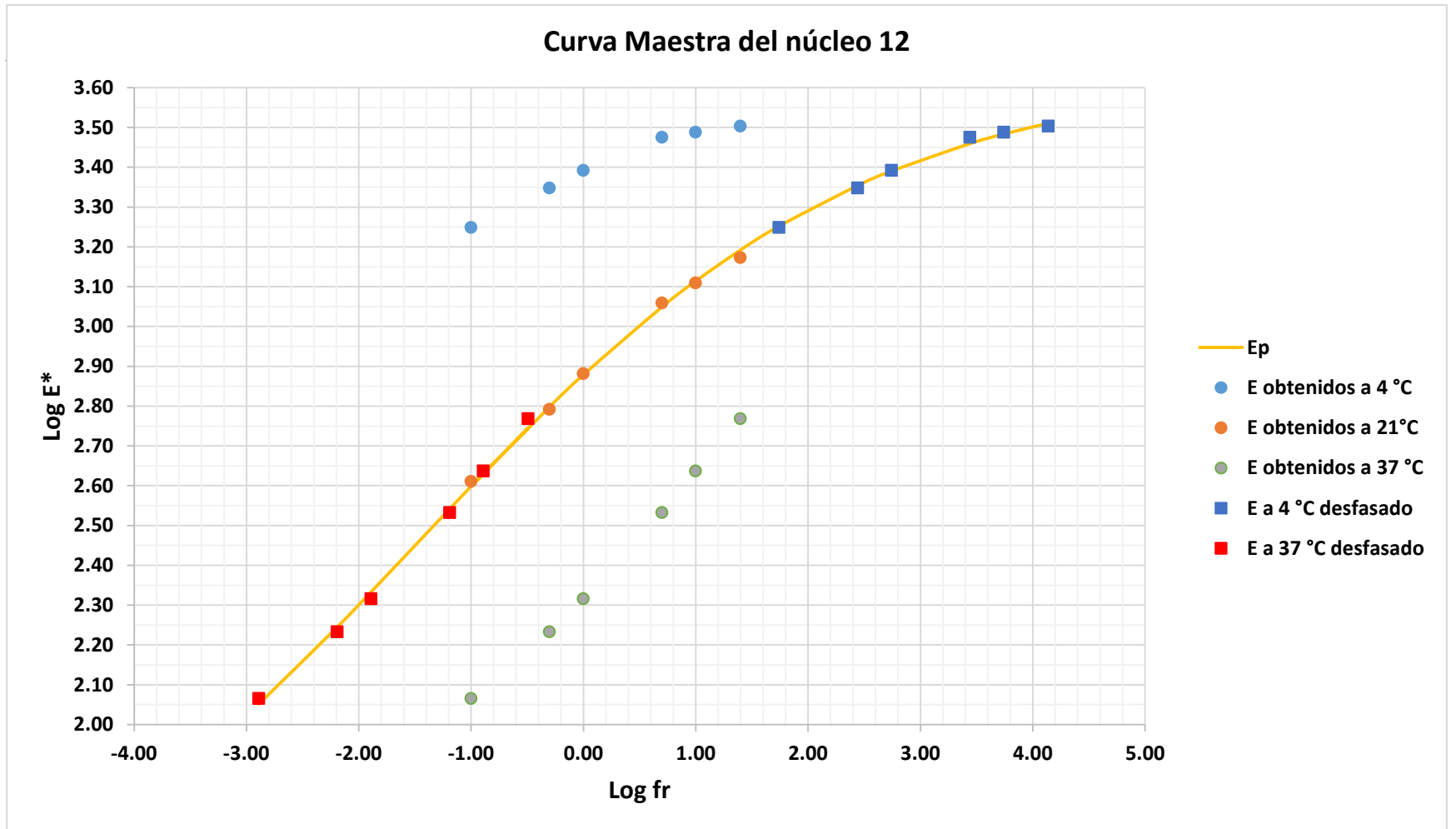
Anexo 30. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo II.



Anexo 31. Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 11.

T (°F)	f (Hz)	E* (ksi)	Log f	Log[a(T)]	Log fr	Log E*	Log E*p	Errores cuadrados	E*p (ksi)
39.2	25	3185.5	1.3979	2.74245903	4.1404	3.5032	3.5107	5.61277E-05	3240.9
	10	3074.0	1.0000		3.7425	3.4877	3.4834	1.83807E-05	3043.8
	5	2984.8	0.6990		3.4414	3.4749	3.4594	0.000240822	2880.0
	1	2464.2	0.0000		2.7425	3.3917	3.3903	1.87463E-06	2456.4
	0.5	2228.4	-0.3010		2.4414	3.3480	3.3540	3.59117E-05	2259.4
	0.1	1772.9	-1.0000		1.7425	3.2487	3.2521	1.15934E-05	1786.8
69.8	25	1487.8	1.3979	0	1.3979	3.1725	3.1920	0.000379313	1556.0
	10	1285.6	1.0000		1.0000	3.1091	3.1141	2.51558E-05	1300.5
	5	1145.2	0.6990		0.6990	3.0589	3.0491	9.55294E-05	1119.7
	1	760.7	0.0000		0.0000	2.8812	2.8789	5.53059E-06	756.6
	0.5	618.6	-0.3010		-0.3010	2.7914	2.7982	4.55564E-05	628.3
	0.1	408.1	-1.0000		-1.0000	2.6107	2.5983	0.000154851	396.5
98.6	25	586.0	1.3979	-1.8895435	-0.4916	2.7679	2.7452	0.000514905	556.1
	10	433.4	1.0000		-0.8895	2.6369	2.6307	3.81158E-05	427.3
	5	340.6	0.6990		-1.1906	2.5323	2.5418	9.06092E-05	348.2
	1	206.8	0.0000		-1.8895	2.3155	2.3335	0.000321817	215.5
	0.5	170.9	-0.3010		-2.1906	2.2328	2.2454	0.00015851	175.9
	0.1	116.2	-1.0000		-2.8895	2.0651	2.0515	0.000184861	112.6
Sumatoria de errores cuadrados								0.002379465	

Anexo 32. Datos para ajuste de la curva maestra del núcleo 12.



Anexo 33. *Dispersión y ajuste de la curva maestra para el núcleo 12.*