



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS
DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

“EVALUACIÓN DEL MODULO DINÁMICO EN UNA
MEZCLA ASFÁLTICA”

TESIS PRESENTADA PARA CUMPLIR CON LOS REQUISITOS
FINALES PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

P.I.C. JULIO CÉSAR BUCIO PÉREZ

ASESOR

DR. MARIO SALAZAR AMAYA

Morelia, Mich. Enero 2013



AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios por darme la vida, por mandarme a la mejor familia que existe, colmarme de bendiciones, fortaleza, dedicación, habilidad y obstinación para lograr esta gran meta que me propuse desde hace 18 años y que hoy cumpliré.

A mis padres José Luis y Margarita por brindarme su apoyo, comprensión y consejos desde mi crecimiento educacional y personal hasta hoy que concluyo mis estudios de licenciatura y espero nunca lo dejen de hacer. Además les agradezco sus sacrificios para que yo lograra esta meta tan importante ya que sin ellos nada de esto seria posible "gracias".

A mis hermanos Marisol, José Luis, Venecia por los momentos en los que mas los e necesitado y me han apoyaron incondicionalmente, por ser esos hermanos de los que tanto e aprendido; a Marisol por ser mi mayor ejemplo a seguir, ser esa amiga y madre que siempre haz sido; a Pepe por ser ese hermano con quien pelear y divertirme a la misma vez; a Veni por ser esa persona tan bondadosa, gran mujer y gran madre. A los tres les agradezco por darme algo para mi formación de vida, ser como soy y quien soy.

A Dioce por ser esa persona tan especial en mi vida y mi corazón, por estar en esos momentos alegres y tristes de mi vida, por darme esa razón mas para concluir esta meta y sobre todo por apoyarme siempre que lo e necesitado.

A mis asesores, directivos y personal del Instituto Mexicano del Transporte el Dr. Paul Garnica Anguas, Dr. Horacio Delgado Alamilla, Dr. Mario Salazar Amaya por darme la oportunidad de formar parte de este proyecto de investigación, darme esta parte de su extenso conocimiento, brindarme toda la información y disipar todas mis dudas en todo momento de forma amable y cortés.

A mis amigos y compañeros que e tenido a lo largo de mi vida, por esos momentos de alegría y tristeza que vivimos juntos y logramos superar a lo largo de toda mi formación académica y en especial la facultad.

Por ultimo agradezco a todas esas personas que estuvieron en algún momento de mi vida y me brindaron alegrías, consejos, amistad y conocimiento, todas estas personas mencionadas en estos agradecimientos tienen un lugar especial en mi corazón.





RESUMEN

La mezcla asfáltica es un material que es fuertemente influenciado por el comportamiento viscoelástico del asfalto. Por lo cual la correcta determinación de sus propiedades reológicas, modulo complejo E^* y ángulo de fase δ , es primordial en el diseño de un pavimento asfáltico.

La determinación de estas propiedades no solo requiere de equipo especializado de laboratorio si no que también una correcta fabricación y preparación de la probeta de ensayo, y así reducir las dispersiones asociadas a este ensayo. Sin dejar de tomar en cuenta que el análisis de resultados y su apropiada modelización no es un trabajo muy simple a realizar.

La presente tesis presenta los criterios utilizados por la AASHTO, ASTM Y NCHRP para la determinación de los módulos dinámicos, ángulos de fase y con estos formar su representación final llamada "Curva Maestra" para conocer las propiedades viscoelásticas de una mezcla asfálticas. Se presentan diversas representaciones clásicas como son las isotermas, isócronas, el plan de Cole-Cole y el diagrama de Black. Algunas de las modelaciones y análisis de resultados con las ecuaciones de predicción y los modelos reológicas para conocer cual es la modelación mas apropiada según sea la mezclas asfáltica en estudio.

PALABRAS CLAVES

Modulo complejo, ángulo de fase, mezclas asfálticas, curva maestra





ABSTRACT

The asphalt mix is a material that is strongly influenced by the viscoelastic behavior of the bitumen. Therefore the correct determination of rheological properties, complex modulus E^* and phase angle δ , is paramount in the design of an asphalt pavement.

The determination of these properties not only requires specialized laboratory equipment but also the correct manufacture and preparation of the test specimen, and thus reduces the dispersions associated with this trial. While taking into account that the analysis of results and appropriate modeling is not a very simple to perform.

This thesis presents the criteria used by the AASHTO, ASTM and NCHRP for determining dynamic modules, phase angles and these form the final representation called "Master Curve" for the viscoelastic properties of asphalt mixture. We present various classical performances such as isotherms, isochronous, the Cole-Cole plan and diagram Black. Some of the modeling and analysis of results with the prediction equations and rheological models to know what is the most appropriate modeling as the asphalt mixtures under study.

KEYWORDS

Dynamic modulus, asphalt mix, phase angle, master curve





INDICE

PÁG.

CAPITULO I "ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN"

1.1 Historia del Asfalto	1
1.2 Mezclas ASFálticas	2
1.3 Clasificación de las Mezclas ASFálticas	3
1.3.1 Mezclas ASFálticas en Caliente	4
1.3.1.1 Evolución de los diseños de las Mezclas ASFálticas en Caliente	4
1.3.2 Mezclas ASFálticas en Frio	5
1.3.3 Mezclas ASFálticas Tibias	6
1.4 Tipologías de Deterioros de los Pavimentos ASFálticos	7
1.4.1 Degradaciones principales de los pavimentos asfálticos	7
1.4.1.1 Deformación permanente en mezclas asfálticas	7
1.4.1.2 Agrietamiento por baja temperatura	9
1.4.1.3 Agrietamiento por fatiga	10
1.5 Introducción	13

CAPITULO II "PROTOCOLO AMAAC"

2.1 Antecedentes del Protocolo	14
2.2 Criterios de selección del Nivel de Evaluación Requerido	14
2.2.1 Diseño Volumétrico de una Mezcla ASFáltica(Nivel I)	16
2.2.1.1 Selección del Agregado	16
2.2.1.1.1 Granulometría de la Mezcla	16
2.2.1.1.2 Calidad de los Agregados	20
2.2.1.2 Determinación de los Parámetros Volumétricos	23
2.2.1.3 Seguimientos para el cálculo de contenido óptimo y diseño de M.A. hasta el nivel II	27
2.2.1.4 Susceptibilidad de la M. A al daño inducido por humedad	27
2.2.1.4.1 Descripción del ensayo TSR	27
2.2.2. Susceptibilidad a la Deformación Permanente (Nivel II)	28
2.2.2.1 Especificaciones con rueda cargada de Hamburgo	28
2.2.2.2 Especificaciones con el APA	29
2.2.2.3 Especificaciones con el Ensayo de Pista Española	30
2.2.3 Módulo Dinámico (Nivel III)	31
2.2.4 Diseño por Fatiga (Nivel IV)	32

CAPITULO III "MÓDULO COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS"

3.1 Tipos de Comportamiento de las Mezclas ASFálticas	33
3.2 Módulo Complejo: Viscoelasticidad Lineal	34
3.2.1 Medio continuo	34
3.2.2 Isotropía	34
3.2.3 Viscoelasticidad lineal y linealidad	34

V





3.3 Influencia de la Temperatura	35
3.4 Tipos de Cargas en Materiales Viscoelásticos	36
3.5 Modulo Complejo en mezclas asfálticas	37
3.6 Módulo Reológicos de Base	39
3.6.1 Cuerpos elásticos	39
3.6.2 Cuerpo Viscoso	40
3.5.3 Modelos Viscoelásticos	42
3.5.3.1 Modelo de Maxwell	42
3.5.3.2 Modelo de Kelvin-Voigt	44
3.5.3.3 Modelo de Burgers	45
3.5.3.4 Modelo de Generalizado	46
3.5.3.5 Módulo de deformación	47

CAPITULO IV "ENSAYOS DEL MÓDULO COMPLEJO EN LABORATORIO"

4.1 Ensayos de Módulo Complejo	48
4.1.1 Ensayos Homogéneos	49
4.1.1.1 Tensión Directa	49
4.1.1.2 Método de Ensayo de Tensión-Compresión	50
4.1.1.3 Ensayo Triaxial	51
4.1.2 Ensayos No Homogéneos	52
4.1.2.1 Métodos de Ensayo en Viga de 2 Puntos	52
4.1.2.2 Método de Ensayo en Viga de 3 Puntos	53
4.1.2.3 Método de Ensayo en Viga de 4 Puntos	54
4.1.2.4 Flexión con Apoyo	55

CAPITULO V "ANÁLISIS DE MÓDULO COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS"

5.1 Presentaciones Clásicas	56
5.1.1 Curvas Isotérmicas	57
5.1.2 Curvas Isócronas	58
5.1.3 Curva en el Plano Cole-Cole (o Plano Complejo)	58
5.1.4 Curva en el Espacio de Black	59
5.2 Principio de Equivalencia Tiempo-Temperatura (curva maestra)	60
5.2.1 Formula WLF (WILLIAM/LANDEL/FERRY)	63
5.2.2 Formula de Tipo ARRHÉNIUS	64
5.2.3 Formula del LCPC, FRANCIA	64
5.3 Predicción y Modelización del Ensayo del Módulo Complejo	65
5.3.1 Ecuaciones de Predicción del Módulo Complejo	65
5.3.1.1 Modelo de Hirsch	66
5.3.1.2 Ecuación sigmoidal (Witzack)	66
5.3.2 Modelos Reológicos	67
5.3.2.1 Espectros continuos	67
5.3.2.2 Modelo Huet	68





5.3.2.3 Modelo Huet-Sayegh	69
5.3.2.4 Modelo 2S2P1D	70
CAPITULO VI "EJEMPLO PRÁCTICO"	
6.1 Ejemplo Práctico	71
6.1.1 Curvas Isotérmicas	76
6.1.2 Curvas Isócronas	78
6.1.3 Curva en el Plano Cole-Cole (o Plano Complejo)	79
6.1.4 Curva en el Espacio de Black	80
6.1.5 Curva Maestra del Módulo Complejo	81
6.1.6 WILLIAM/LANDEL/FERRY (WLF)	84
6.1.7 Ecuación Sigmoidal Witzack	85
6.1.8 Ecuación de Olard 2S2P1D	91
6.1.9 Comprobación de Modelación de Datos	99
6.2 Comentarios Finales	103
ANEXO A "NORMA AASHTO TP 62-07"	104
BIBLIOGRAFIA	126





CAPITULO I "ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN"

1.1 HISTORIA DEL ASFÁLTO

La utilización del asfalto como material de construcción se remonta en la historia de la humanidad a tiempos muy anteriores a la Era cristiana.

En la época de los reyes babilónicos encontramos ya testimonios históricos de la utilización del asfalto como elemento para la construcción de carreteras. Entre los años 700 y 500 A. de J. C. se construyeron en el Imperio babilónico calzadas de ladrillo, cuyas juntas se rellenaban con un mortero a base de asfalto, muy especialmente durante el reinado de Nabucodonosor.

Después cayó en el olvido el conocimiento de las propiedades del asfalto, y la historia no nos vuelve a hablar de este material hasta comienzos del siglo XIX. En los comienzos del siglo XVIII se descubrieron canteras de calizas impregnadas de asfalto en Francia, en Suiza y en Alemania. En el año 1802 comenzó la explotación de las canteras de rocas asfálticas francesas en Seyssel, en el valle del Ródano. Este material se utilizó como ligante de revestimiento en puentes y aceras.

El primer pavimento construido con rocas asfálticas en la forma de asfalto fundido fue dado al tránsito en París en 1854. Pocos años después se generalizó su empleo en la forma poco más o menos en que se utiliza en la actualidad.

La construcción de los pavimentos de asfalto se desarrolló pronto en América. Hasta el año 1870 las materias primas empleadas únicamente fueron las calizas asfálticas europeas, que debían ser importadas. El buen éxito obtenido con el asfalto fundido y el descubrimiento de grandes yacimientos de asfalto en el continente americano, unido al elevado coste de los transportes del material europeo, dieron lugar a numerosas investigaciones encaminadas a aprovechar los yacimientos de asfalto como material para la construcción de carreteras. En el año 1870 el químico belga De Smedt realizó el primer revestimiento asfáltico con mezcla artificial, que recibió el nombre de «Sandasphalt», el cual es en principio el mismo sistema que se emplea en la actualidad. El primer asfalto explotado para estos fines fue el del lago de la isla Trinidad. El asfalto natural, tal como se extrae de la isla Trinidad, es sometido a diversas operaciones para darle las propiedades más convenientes para su empleo, las cuales se reducen a fusiones, decantaciones, destilaciones fraccionadas y mezclas con aceites ligeros procedentes de la destilación del petróleo. Por este procedimiento se consigue obtener diversas calidades de asfalto, de dureza y tenacidad distintas.

Rápidamente aparecieron y se desarrollaron numerosos tipos de revestimientos asfálticos sintéticos como consecuencia del buen éxito del Sandasphalt o cemento asfáltico.

El enorme incremento adquirido en el primer decenio del siglo actual por las industrias petroleras y las enormes cantidades de asfalto obtenidas como subproducto de la destilación del petróleo bruto dieron gran impulso a los estudios para buscarles aplicación, y pronto lo encontraron en la construcción de carreteras. En la actualidad el consumo de asfalto en todo el mundo para estos fines crece de día en día.



1.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas es una combinación exacta de **agregados, asfalto** y en algunas ocasiones con algunos **aditivos**. De manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. La composición del asfalto le confiere una propiedad viscoelástica a la mezcla asfáltica que le da un comportamiento difícil analizar por lo cual sus propiedades reológicas (módulo dinámico y ángulo de fase) juegan un papel importante en el diseño y comportamiento de los pavimentos flexibles. La calidad de la mezcla asfáltica está ligada con las propiedades y dosificación de los agregados y del cemento asfáltico. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

De forma práctica la esquematización de una mezcla asfáltica es:



Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráficos pesados intensos o en pavimentos de alto rendimiento. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Las mezclas asfálticas proporcionan un medio de distribución de carga y de impermeabilización que protege la estructura de pavimento de los efectos adversos del agua y de la acción del tránsito.

a. Agregados. Es una mezcla, natural o no, de roca o gravas trituradas, escorias, arenas finas, arenas gruesas y filler. Puede contener todos o algunos de estos materiales. Los agregados deben ser limpios, duros y durables. Los agregados son los responsables de la capacidad de carga o resistencia de la mezcla y constituyen entre el 90% y 96% en peso de la mezcla y entre el 82% y 87% en volumen de la misma. Con referencia al protocolo AMAAC para poder seleccionar el tipo de agregado a utilizar, se deben realizar una serie de pruebas a los agregados minerales para cumplir con un estándar de calidad. Las pruebas a realizar para que el agregado se considere de calidad son las siguientes:





- Reducción de muestras (ASTM C702-98(03)).
- Análisis granulométrico (ASTM C136-06).
- Densidad y absorción de agregados gruesos (ASTM C127-07).
- Densidad y absorción de agregados finos (ASTM C128-07a)
- Determinación del valor equivalente de arena (ASTM D2419-09).
- Determinación de partículas planas y alargadas (ASTM D4791-05).
- Azul de metileno (Filler) (RA 05/10).
- Determinación del % de partículas fracturadas en agregados gruesos (ASTM D5821-01).
- Intemperismo acelerado (ASTM C88-05).
- Desgaste de los ángeles (ASTM C131-06).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Ebullición (ASTM D 3625-96).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. (RA 07/08).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. (MMP 4.04.009/03).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. (RA 08/08).
- Angularidad del agregado fino (AASHTO T304-08).
- Desgaste Micro Deval (AASHTO T327-09).

b. Asfalto. El asfalto es un material altamente impermeable, adherente, termodinámico y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, este esta ligado directamente a su temperatura ya que puede encontrarse en estado liquido, semisólido y solido. Como aplicación de estas propiedades el asfalto puede cumplir, en la construcción de pavimentos, las siguientes funciones: Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación. Proporciona una íntima unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente mejora la capacidad portante de la estructura, permitiendo disminuir su espesor y confiriendo una propiedad viscoelástica a las mezclas asfálticas.

c. Aditivos. Son materiales utilizados para mejorar las características reológicas, elasticidad, adherencia, resistencia a la tensión, susceptibilidad térmica, entre otras propiedades de las mezclas asfálticas. Pueden ser polímeros como son polímeros termoplásticos, polietileno, cloruro de polivinilo, o pueden ser aditivos no polímeros que son cualquier otro material ajeno a ser polímero que mejore las características iniciales de la mezclas.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Existen diferentes clasificaciones de las mezclas asfálticas, pero la más utilizada en México es la clasificación por temperatura que es la que se divide en 3 tipos de mezclas asfálticas y estas a su vez tienen otra subdivisión.

- Mezclas Asfálticas en Caliente





- Mezclas Asfálticas en Frio
- Mezclas Asfálticas Tibias

1.3.1 Mezcla Asfáltica en Caliente.

Se podría decir que son las más utilizadas en la construcción de vías terrestres, ya que tiene mayor resistencia, es más flexible, más durable.

Se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante asfáltico, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados a temperaturas de 150-160 °C para su correcto mezclado y su tendido en obra debe realizarse a temperaturas del orden de 140-145 °C y por último su compactación debe realizarse a temperaturas de 135-140 °C. Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los pavimentos.

Las mezclas asfálticas en caliente se subdividen de acuerdo a la granulometría que la conforme en tres tipos:

Mezcla asfáltica de granulometría densa: Son las más comúnmente usadas en las carreteras de nuestro país, se obtienen de la combinación de cementos asfálticos y materiales pétreos bien graduados de tamaño nominal $\frac{3}{8}$ de pulgada y $1\frac{1}{2}$ pulgadas. Comúnmente son usados en construcción de pavimentos nuevos que requieren alta resistencia estructural, renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

Mezcla asfáltica de granulometría abierta: Son mezclas con alto porcentaje de vacíos con tamaños nominales desde $\frac{1}{2}$ pulgada hasta $\frac{1}{4}$ de pulgada, son usadas para formar la capa de rodadura sobre una capa de granulometría densa, ya que esta última es la que cumple la función estructural. La ventaja de las mezclas abiertas radica en permitir que el agua de lluvia sea desplazada por los vehículos ocupando los vacíos en la carpeta, evitando así el problema de hidroplaneo.

Mezcla asfáltica de granulometría discontinua tipo SMA: Son mezclas formadas por granulometrías discontinuas, es decir materiales gruesos y finos, eliminando parte de las arenas; tienen un tamaño nominal entre $\frac{3}{4}$ de pulgada y $\frac{1}{4}$ de pulgada. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional. Al tener una elevada macrotextura se evita que el agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento, con lo que se incrementa la fricción de las llantas; se minimiza el hidroplaneo; se reduce la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes; se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura.

1.3.1.1 Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente.

A continuación se muestra la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente.

1. The Hubbard-Field (1920's). Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó





adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.

2. Método Marshall (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.

3. Método Hveem (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial

4. Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. 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. Con FHWA.

5. Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987). La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía 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 a las grietas a baja temperatura. Con NCHRP.

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 en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Tiene su resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiado a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

7. Protocolo de la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. AMAAC (2008) En México se a desarrollado una nueva forma de diseñar pavimentos de alto rendimiento, con ayuda de los cuatro niveles de diseño del Protocolo AMAAC, cada nivel dependerá de la designación del nivel de transito, puede ser bajo, medio, alto, muy alto. Para el nivel de transito **bajo** se asigna el nivel 1 del protocolo "Diseño volumétrico, susceptibilidad a la humedad y selección del asfalto por grado PG". Para el nivel de transito **medio** se asigna el nivel 1 y 2 del protocolo, Nivel 1 + "Susceptibilidad a la deformación permanente". Para el nivel de transito **alto** se asigna el nivel 1,2 y 3 del protocolo, Nivel 1 + Nivel 2 + "Modulo Dinámico". Para el nivel de transito **muy alto** se asigna el nivel 1,2, 3 y 4 del protocolo, Nivel 1 + Nivel 2 + Nivel 3 + "Diseño por Fatiga".

1.3.2 Mezcla Asfáltica en Frío.

Este tipo de mezclas en frio es mas utilizada para caminos secundarios o de bajo transito y como capas de base, sub- base de carreteras de alto desempeño.

Se define como las mezclas constituidas por la combinación de agregados pétreos, un relleno mineral (filler), y con un asfalto emulsionado catiónico o diluido con solvente, cuyo mezclado, aplicación y compactación se realizan en frío (condiciones ambientales).





Las emulsiones se definen como las suspensiones de pequeñas partículas de un producto asfáltico en agua o en una solución acuosa, con un agente emulsionante de carácter aniónico o catiónico, lo que determina la denominación de la emulsión.

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de emulgente usado. En este caso podemos hablar de dos tipos, aniónicas y catiónicas:

Emulsiones Aniónicas:

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga negativa.

Emulsiones Catiónicas:

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga positiva.

Respecto a la estabilidad de las emulsiones asfálticas, éstas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

De Rompimiento Rápido:

Estas se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos (con excepción de la emulsión conocida como ECR-60)

De Rompimiento Medio:

Estas normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos es menor o igual al 2%, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.

De Rompimiento Lento:

Estas se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.

Para Impregnación:

Estas se utilizan para impregnaciones de sub-bases y/o bases hidráulicas.

Súper Estables:

Estas se emplean en la estabilización de materiales y en la recuperación de pavimentos.

1.3.3 Mezcla Asfáltica Tibias.

El aumento de la conciencia ambiental y una regulación más estricta de las emisiones atmosféricas han llevado a un desarrollo de producción de mezclas asfálticas tibias.

Las mezcla asfáltica tibias son aquellas que se producen a una temperatura menor que las mezclas en calientes (temperaturas entre 120 y 140 °C), pretende reducir la





viscosidad del asfalto hasta lograr una adecuada recubrimiento de los agregados y el asfalto. Su principal objetivo es igualar las características de las mezclas en caliente a temperaturas inferiores y esto se logra con diferentes tecnologías, entre ellas se dispone de aditivos orgánicos, de agentes que aportan agua, de sistemas emulsificados, o bien por medio de procesos que incorporan asfalto espumado en planta. Su colocado en campo es el mismo que se utiliza para una mezclas en caliente a diferencia que las temperaturas son muy inferiores.

Entre los beneficios de utilizar mezclas tibias en la pavimentación se pueden mencionar los siguientes:

- Facilidad para compactar empleando menos esfuerzos y menor temperatura obteniendo valores de densidades muy cercanos a la densidad de diseño, lo cual ocasiona que tengamos mezclas asfálticas de alto desempeño.
- Menor porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compactada, con lo cual evitamos la oxidación del asfalto e incrementamos la densidad.

1.4 TIPOLOGIAS DE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

La durabilidad de las mezclas asfálticas es una propiedad básica de los pavimentos, deben presentar resistencia al agotamiento, a la acción del agua y a los cambios de temperatura bruscos. La durabilidad potencial es la resistencia de la mezcla asfáltica a las combinaciones de cambios de temperatura y efectos de agua, por lo tanto, la baja durabilidad potencial de las capas de la carpeta asfáltica es una de las principales razones que más influyen en el deterioro y el agotamiento de las buenas condiciones de servicio de los pavimentos.

Los deterioros de los pavimentos asfálticos se deben a una serie de factores como lo pueden ser el medioambiente (lluvia, gradientes de temperatura), tráfico (cargas por eje, presión de inflado de los neumáticos, intensidad), materiales inadecuados, procesos de elaboración de las mezclas inapropiados, técnicas de construcción deficientes (transporte, extensión y compactación), fórmula de trabajo deficiente.

Estos factores de deterioro a su vez pueden ser minimizados con ayuda de una correcta caracterización del material, un correcto diseño en laboratorio, así como una rigurosa supervisión de tendido y compactación de la mezcla asfáltica. A continuación se menciona cuales son las degradaciones principales de los pavimentos asfálticos.

1.4.1 DEGRADACIONES PRINCIPALES DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS

- *Deformación permanente*
- *Agrietamiento por Fatiga*
- *Agrietamiento por Bajas temperaturas*

1.4.1.1 Deformación permanente en mezclas asfálticas

La deformación permanente en pavimentos flexibles equivale a la acumulación de pequeñas deformaciones generadas con cada aplicación de carga. Esta deformación es irre recuperable. La aparición de roderas en un pavimento flexible se debe principalmente a dos causas: deformación permanente en las capas subyacentes, y/o deformación permanente en la carpeta asfáltica.



La deformación se produce por la aplicación repetida de carga a la subrasante, la sub-base, o la base por debajo de la carpeta asfáltica (figura 1), y aunque el empleo de materiales más rígidos reduce parcialmente este tipo de deformación, el fenómeno normalmente se considera más como un problema estructural de materiales.

Frecuentemente es el resultado de una sección de pavimento demasiado delgada, y sin la suficiente profundidad para reducir a niveles tolerables la tensión sobre la subrasante cuando las cargas se aplican. Podría ser también producto de una subrasante debilitada por el ingreso inesperado de humedad.

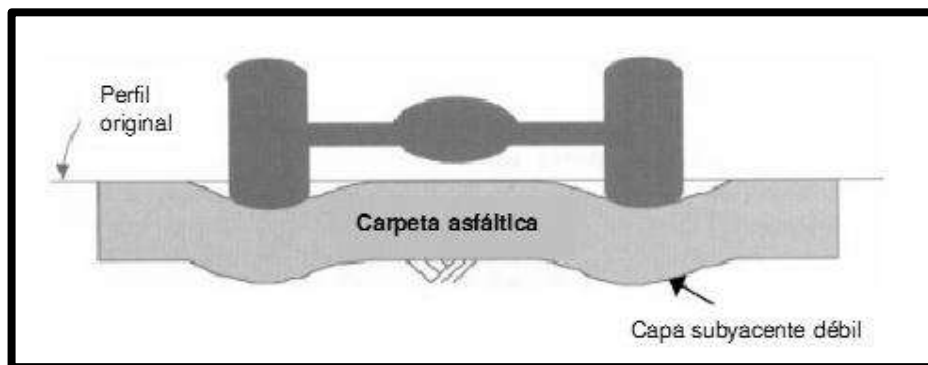


Figura 1. Deformación permanente debido a una capa subyacente débil.

Cuando una mezcla asfáltica presenta roderas, es evidente que su resistencia al corte es demasiado baja para resistir las cargas pesadas repetidas a las que está sujeta (Figura 2). La deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente. Las superficies de rodamiento que presentan este tipo de problema representan un peligro para el usuario, ya que los surcos que se forman retienen suficiente agua como para provocar hidroplaneo o acumulación de hielo.

El hidroplaneo se define como el problema cuando los neumáticos de un vehículo pierden contacto con el pavimento por una película de agua y por consiguiente disminuye o se elimina el poder de adherencia de las ruedas.



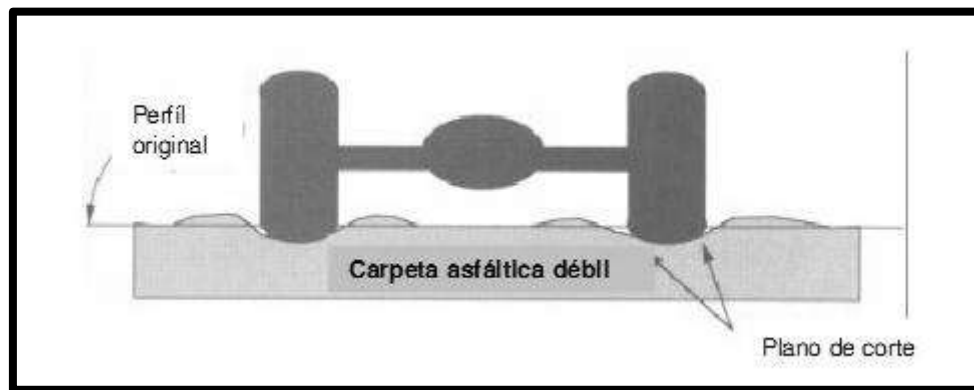


Figura 2. Deformación permanente debido a una mezcla asfáltica débil.

1.4.1.2 Agrietamiento por baja temperatura

Este tipo de deterioro se caracteriza por la aparición de fisuras transversales que se producen con un espaciamiento notablemente uniforme. La fisuración perpendicular al eje del camino, por lo general no se asocia a las cargas del tránsito. Cuando la carpeta se encuentra sobre una losa de concreto asfáltica, el fenómeno puede atribuirse a la reflexión de las grietas que existen en la losa.

La carpeta se contrae debido a las bajas temperaturas, originando esfuerzos de tensión dentro de la capa; en algún lugar a lo largo de la carpeta se excede la resistencia a la tensión, y la capa asfáltica se fisura. El ligante asfáltico juega un papel importante en la fisuración por baja temperatura. Las mezclas asfálticas elaboradas con un cemento asfáltico de naturaleza dura o propensa a la oxidación, serán más susceptibles a presentar este tipo de deterioro.

Se ha visto que el empleo de ligantes blandos y resistentes al envejecimiento, reducen notablemente la fisuración por baja temperatura; también es importante lograr mezclas asfálticas impermeables con un contenido de vacíos de aire adecuado, con el propósito de que el cemento asfáltico que constituye la mezcla no resulte excesivamente oxidado.





Figura 3. Agrietamiento por baja temperatura.

1.4.1.3 Agrietamiento por fatiga

La fisuración por fatiga es un deterioro que con frecuencia se produce en la huella donde las cargas pesadas se aplican. La aparición de fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo prematuro de la fisuración por fatiga (Figura 4); en algún momento estas fisuras iniciales se unirán con otras (Figura 5), causando un estado intermedio de la fisuración por fatiga dando lugar a lo que se conoce como "piel de cocodrilo".

Un estado de severidad más avanzado de la fatiga, resulta con la dislocación y desprendimiento de bloques de carpeta asfáltica, bajo la acción del tránsito, con llevando a la formación de baches en la superficie de rodamiento (Figura 6). Una mezcla asfáltica muy rígida tiende a oponer baja resistencia a la fatiga cuando la estructura del pavimento permite deflectar a la carpeta asfáltica. Materiales muy rígidos, altas deflexiones y altos niveles de tensiones conducen a vidas útiles, reducidas por la fatiga.

El mecanismo de fatiga no puede enfocarse como un problema de los materiales exclusivamente, ya que este mecanismo se produce generalmente por un número de factores que deben generarse simultáneamente; obviamente un factor trascendental son las cargas pesadas repetidas en el pavimento.

La estructura del pavimento juega un rol central en este tipo de deterioro, ya que una subrasante con un drenaje pobre, resulta en pavimentos blandos con altas deflexiones, pobres diseños y/o deficiente construcción de las capas del pavimento; así como espesores de pavimento muy delgados y rígidos, son también propensos a sufrir altas deflexiones.





Figura 4. Fisuración moderada por fatiga.



Figura 5. Fisuración media por fatiga.



Figura 6. Fisuración excesiva por fatiga.

En otros casos, la fisuración por fatiga es sólo un signo de que un pavimento ha alcanzado el número de cargas para el cual fue diseñado; esto no sería



necesariamente una falla, sino la progresión natural de una estrategia de diseño del pavimento. A continuación se enuncian algunas medidas a tomar para evitar la fisuración por fatiga:

- Estimación adecuada del número de ejes equivalentes en la etapa de diseño.
- Mantener por todos los medios posibles seca la subrasante.
- Pavimentos con espesores adecuados de tal forma que no permitan grandes deflexiones en la estructura.
- Utilizar materiales que no sean excesivamente débiles ante la presencia de humedad.
- Emplear materiales en el pavimento lo suficientemente resilientes para resistir deflexiones normales.

En el momento de la aplicación de la carga, produce deformaciones de tensión horizontales cerca del fondo de la carpeta asfáltica; el material en esa zona debe ser lo suficientemente resistente para soportar estas tensiones, ya que es ahí donde se presentan las mayores concentraciones e inicia la fisuración en caso de sobrepasarse la resistencia a la tensión de la carpeta. No obstante, para superar el fisuramiento por fatiga, dicho material debe ser también resiliente. En este contexto, resiliente significa que el material puede resistir, sin fisurarse.

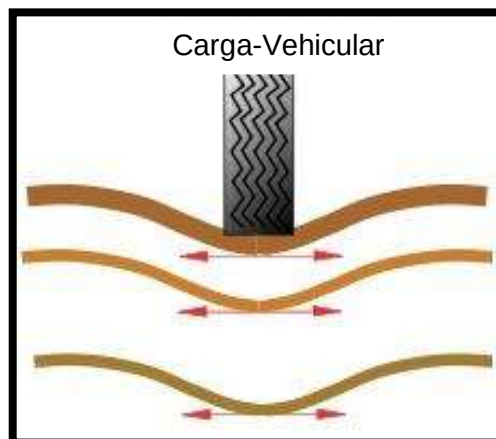


Figura 7. Tensiones en la parte inferior de la carpeta asfáltica





Desde el punto de vista de la fisuración por fatiga, es deseable que la carpeta se comporte como un material elástico blando; para lograr lo anterior, y dado que el comportamiento a la tensión de la mezcla asfáltica está fuertemente influido por el ligante asfáltico, se deben seleccionar cementos asfálticos cuyos límites superiores se ubiquen en la parte elástica en lo que se refiere a sus propiedades de rigidez.

1.5 INTRODUCCION

En los pavimentos, la carpeta asfáltica está sometida a solicitaciones climáticas y de carga que son variables en el tiempo. Por lo cual, el comportamiento de la mezcla asfáltica puede definirse como complejo, ya que depende tanto de la temperatura como de la duración y velocidad de las cargas que le son aplicadas. Por lo que la evaluación de su desempeño debe ser realizada a partir de la medición de sus propiedades reológicas.

Esta dependencia (temperatura-carga) de la mezcla asfáltica es debida al carácter viscoelástico que le proporciona el asfalto. Por lo cual la correcta determinación de sus propiedades reológicas, módulo complejo E^* y su ángulo de fase δ , es primordial en el diseño de un pavimento asfáltico.

La determinación de estas propiedades requiere de equipo especializado, y análisis minucioso de los datos recabados.

Se debe prestar una rigurosa atención en la magnitud de las solicitaciones aplicadas, para que la mezcla se mantenga dentro del comportamiento viscoelástico lineal (deformaciones inferiores a 10^{-4}).

El tratamiento de la señales, forma una parte primordial en la correcta determinación de los valores de $|E^*|$ y δ . Por lo que la correcta selección de curva de regresión es fundamental en el análisis de los datos. La curva de regresión sinusoidal utilizando el método de mínimos cuadrados para señales armónicas otorga una aproximación bastante precisa en este ensayo.

Cuando se calcula correctamente el módulo dinámico en una mezcla asfáltica será un parámetro esencial para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos asfálticos.

Se recomienda determinarlo con el procedimiento ASTM D3497, AASHTO TP62 o UNE-EN 12697-25, debiendo reportarlo sistemáticamente. No hay especificaciones de aceptación o rechazo en el parámetro de diseño.

Por lo tanto el diseño de una mezcla asfáltica de alto rendimiento deberá ser analizado con este nivel de desempeño, calculando su módulo dinámico y ángulo de fase para conocer el la susceptibilidad a la deformación recuperable y no recuperable y prevenir las posibles roderas en las carreteras de baja y alta vialidad vehicular.





CAPITULO II "PROTOCOLO AMAAC"

2.1 ANTECEDENTES DEL PROTOCOLO AMAAC

El Protocolo AMAAC se desarrolló en el año 2008 por la Asociación Mexicana de Asfalto A.C. al ver la necesidad de contar en nuestro país con un método que contemple las condiciones prevalecientes para el territorio nacional. No es necesario realizar mucha investigación para determinar que los pavimentos en México tienen muchos problemas, basta con realizar observaciones por vías de circulación cotidiana para darnos cuenta que la mayoría de las carreteras estatales, federales, autopistas, calles, etc., tienen una gran cantidad de deficiencias que se ven reflejados en los costos de operación.

Se espera que con la implementación del Protocolo AMAAC aproveche de manera más razonable el asfalto, pues el 95% de las carreteras del mundo están hechas de este material. Las mezclas asfálticas diseñadas con el Protocolo AMAAC tienen un comportamiento superior a los construidos tradicionalmente y las diseñadas con el método Marshall. En los próximos años, se tendrá en México una inversión en infraestructura carretera de gran importancia, por lo tanto es necesario que se realicen diseños adecuados que aseguren el objetivo de un pavimento; seguro, confortable, duradero y económico que satisfaga las necesidades del usuario.

Por estas razones se creo una certificación de laboratorios de todo el país para mejorar los estándares de calidad de los materias y las mezclas asfálticas utilizados en la construcción de obras civiles, para así mejorar y prolongar los tiempos de conservación, mantenimientos y uso de todas las obras construidas en toda la Republica Mexicana

Para que los laboratorios en México sean acreditados deberán cumplir con las especificaciones del Protocolo AMAAC cubriendo 3 etapas fundamentales: 1) Selección de los agregados Pétreos, 2) Selección del Cemento Asfáltico y 3) diseño de la mezcla Asfáltica.

Uno de los puntos críticos fue definir los mecanismos para que los laboratorios siguieran los lineamientos que deben cumplir para contar con un control de calidad en equipos, conocimientos y habilidades del personal para poder evaluar los materiales involucrados en la construcción de la carpeta asfáltica.

2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL NIVEL DE EVALUACIÓN REQUERIDO

El método de diseño propuesto por AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función del nivel de tránsito o el desempeño deseado para la infraestructura que se requiere.

En la tabla 1 se presenta la recomendación para la selección del nivel de diseño de la mezcla asfáltica en función del tránsito vehicular. Es importante revisar las columnas 2 y 3 de la tabla 1, para ajustar el criterio. El criterio que resulte más exigente de estas dos columnas será el nivel para el cual se evaluara la mezcla.

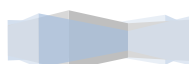
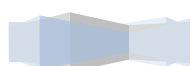




Tabla 1. Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 t y el tipo de carretera.

Designación del nivel de tránsito	Numero de ejes equivalentes	Tipo de carreteras usuales	Ensayos recomendados
Nivel I Transito Bajo	Menor a 1,000,000	• Carreteras federales tipo D • Carreteras alimentadoras • Carreteras estatales y municipales • Calles urbanas	• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Transito medio	De 1,000,000 a 10,000,000	• Carreteras estatales • Carreteras federales tipo B y C • Vialidades urbanas	• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Transito alto	De 10,000,000 a 30,000,000	• Carreteras federales tipo A • Autopistas de cuota	• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente • Modulo Dinámico
Nivel IV Transito muy alto	Más de 30,000,000	• Carreteras federales troncales • Autopistas de cuota importantes • Vialidades suburbana en ciudades muy grandes	• Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad • Susceptibilidad a la deformación permanente • Modulo Dinámico • Fatiga



La figura 8 ilustra los diferentes niveles de evaluación para que la mezcla asfáltica cumpla con el nivel de desempeño deseado:



2.2.1 DISEÑO VOLUMÉTRICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA (NIVEL I)

La filosofía del protocolo es que el diseño de la mezcla asfáltica se realice de la manera más adecuada. Teniendo en cuenta que la mezcla asfáltica está compuesta de agregados pétreos + asfalto + contenido de vacíos, no se puede tener un buen desempeño de la mezcla si primero no se verifica que los materiales cumplen con la calidad requerida.

2.2.1.1 Selección del agregado.

Para poder seleccionar el tipo de agregado a utilizar, se deben realizar una serie de pruebas a los agregados minerales para cumplir con un estándar de calidad.

2.2.1.1.1 Granulometría de la mezcla.

La granulometría a utilizar en una mezcla asfáltica se debe seleccionar de acuerdo a la función requerida para la capa asfáltica en la estructura de un pavimento. Con base en las necesidades del proyecto se podrán fabricar cinco tipos de mezcla asfáltica cuya designación es la que muestra la Tabla 2.





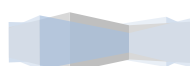
Designación de la mezcla	Tamaño Nominal	Tamaño Máximo
mm	mm	mm
37,5	37,5	50,0
25,0	25,0	37,5
19,0	19,0	25,0
12,5	12,5	19,0
9,5	9,5	12,5

Tabla 2. Designación del tipo de mezcla en función del Tamaño Nominal

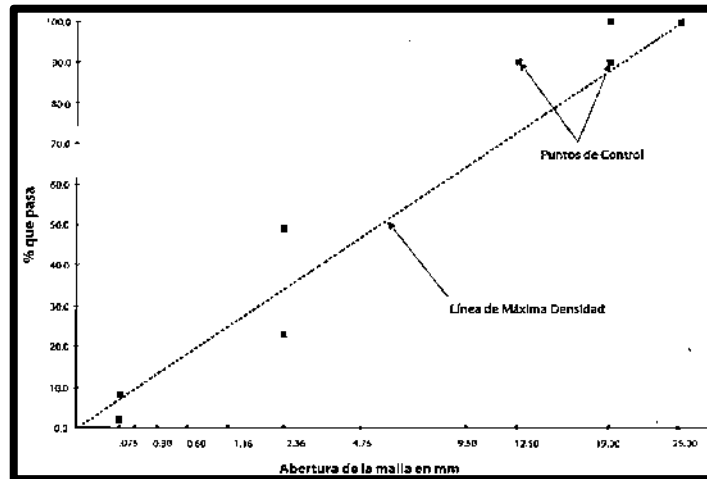
Los requisitos recomendados de granulometría para el caso de una carpeta asfáltica de granulometría densa son los que muestra la Tabla 3.

Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg)						
Designación	Abertura mm	37,5	25	19	12,5	9,5
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
		Porcentaje que pasa				
2"	50	100 - 100	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	90 - 100	100 - 100	-	-	-
1"	25	90	90 - 100	100 - 100	-	-
3/4"	19	-	90	90 - 100	100 - 100	-
1/2"	12,5	-	-	90	90 - 100	100 - 100
3/8"	9,5	-	-	-	90	100 - 100
4	4,75	-	-	-	-	90
8	2,36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67
16	1,18	-	-	-	-	-
30	0,60	-	-	-	-	-
50	0,30	-	-	-	-	-
100	0,15	-	-	-	-	-
200	0,075	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

Tabla 3. Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa (puntos de control)



A manera de ejemplo, la Gráfica 1 ilustra los límites establecidos para una mezcla con tamaño nominal de 19 mm. La escala de la abertura de la malla esta elevada a la potencia 0,45. En todos los demás casos se debe construir la gráfica correspondiente. La línea de máxima densidad de los agregados pétreos va desde el origen (0,0) hasta el tamaño máximo de la distribución granulométrica que se desee representar.



Gráfica 1. Granulometría para Mezclas con Tamaño Máximo Nominal 19 mm (3/4")

Recomendaciones generales para la selección del tipo de granulometría requerida por el proyecto.

Tamaño Nominal de Mezcla	Graduación Gruesa	Graduación Fina
37,5 mm (1 1/2")	< 47% Pasando malla de 9,5	> 47% Pasando malla de 9,5
25,0 mm (1")	< 40% Pasando malla de 4,75	> 40% Pasando malla de 4,75
19,0 mm (3/4")	< 47% Pasando malla de 4,75	> 47% Pasando malla de 4,75
12,5 mm (1/2")	< 39% Pasando malla de 2,36	> 39% Pasando malla de 2,36
9,5 mm (3/8")	< 47% Pasando malla de 2,36	> 47% Pasando malla de 2,36
4,75 mm (Malla número 4)	N/A (Graduación Superpave no estándar)	

Tabla 4. Definición de Mezclas de Graduación Densa, Gruesa y Fina

Granulometría Gruesa	Granulometría Fina
Menor permeabilidad	Permite espesores gruesos «25 mm TN)
Trabajabilidad (<25 mm TN)	Incrementa la Macrotextura «25 mm TN)
Espesores delgados «25 mm TN)	Mejor estructura interna (friccionante)
Mayor durabilidad en carreteras de tránsito bajo a medio	Elevada durabilidad en todos los tipos de proyecto
Textura lisa «25 mm TN)	

Tabla 5. Ventajas de las Mezclas de Granulometría Densa, Gruesa y Fina

Durante el proceso de diseño se debe verificar que el espesor de la capa asfáltica donde se va a colocar la mezcla se encuentre dentro del rango establecido en la tabla 2. En caso de no cumplir con lo estipulado en dicha tabla, se debe cambiar el tamaño máximo de la mezcla.

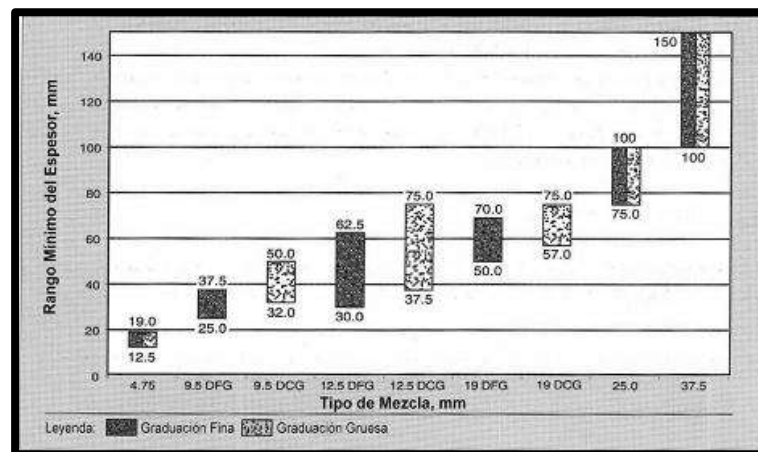


Figura 9. Recomendaciones para el rango mínimo del espesor para mezclas de graduación densa (DFG - Mezcla densa de granulometría fina, DCG - Mezcla densa de granulometría gruesa).

Una mezcla de granulometría densa se puede utilizar para cumplir cualquiera o todas las necesidades de los diseñadores de pavimento siguientes:

- **Estructural** (Mezclas finas y gruesas de 37,5, 25 y 19 mm). Este es el propósito principal de las mezclas de granulometría densa y es ante todo una función del espesor de la capa. Sin embargo, los materiales seleccionados pueden mejorar el valor estructural de las mezclas.
- **Fricción** (Mezclas gruesas de 19, 12,5 y 9,5 mm). Esto es una consideración importante para las carpetas de superficie. La fricción es una función de las propiedades del agregado y mezcla.
- **Nivelación** (Mezclas finas de 12,5 y 9,5 mm). Esta mezcla puede utilizarse en capas delgadas o gruesas para rellenar depresiones de las carreteras.
- **Bacheo** (Mezclas finas y gruesas de 12,5 y 9,5 mm). La mezcla debe reunir los mismos requerimientos que la utilizada para una nueva.





Las mezclas con función estructural de granulometría fina se recomiendan para caminos de tránsito bajo y/o moderado donde no se colocará ningún tipo de tratamiento superficial o capa de desgaste. Para caminos de tránsito de moderado a alto, donde será colocado algún tipo de tratamiento superficial, se recomienda el uso de mezclas con función estructural usando granulometrías gruesas. Sin embargo, se debe evaluar ambos tipos de mezclas densas para colocar la que tenga mejores propiedades volumétricas y de desempeño óptimo en las pruebas de simulación que se describen más adelante.

Para la selección adecuada del tipo de mezcla y los espesores mínimos y máximos, se recomienda consultar la serie informativa 1285 "Guía para seleccionar el tipo de Mezcla Asfáltica en caliente (HMA) para pavimentos" disponible en las publicaciones traducidas por AMAAC de la NAPA (National Asphalt Pavement Association).

2.2.1.1.2 Calidad de los agregados pétreos

Las características físicas básicas que deben cumplir las fracciones gruesa y fina del agregado pétreo seleccionado son las que se indican en las Tablas 6 y 7, respectivamente.

Característica	Norma	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx. (Capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO TP 58-99	18 máx. (Capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado	AASHTO T 104	15 máx. Para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08/2008	90 mín.

Tabla 6. Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa





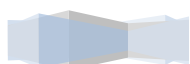
Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 min. (capas estructurales) 55 min. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	Recomendación AMAAC RA-05/2008	15 máx. (Capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

Tabla 7. Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa

Se recomienda considerar al menos tres granulometrías diferentes para dosificación y diseño de la mezcla. Las tres granulometrías pueden corresponder a las variaciones esperadas durante la producción en un cierto banco de materiales.

Este debe cumplir como ya se mencionó anteriormente con ciertas especificaciones, para esto es necesario realizar diversas pruebas a nuestro material seleccionado para verificar que se encuentra en condiciones de ser utilizado en nuestra mezcla asfáltica así como para poder determinar sus características particulares. Las pruebas que se le realizan a los agregados minerales se citan a continuación, estas son por recomendación de la AMAAC.

- Reducción de muestras (ASTM C702-98(03)).
- Análisis granulométrico (ASTM C136-06).
- Densidad y absorción de agregados gruesos (ASTM C127-07).
- Densidad y absorción de agregados finos (ASTM C128-07a)
- Determinación del valor equivalente de arena (ASTM D2419-09).
- Determinación de partículas planas y alargadas (ASTM D4791-05).
- Azul de metileno (Filler) (RA 05/10).
- Determinación del % de partículas fracturadas en agregados gruesos (ASTM D5821-01).
- Intemperismo acelerado (ASTM C88-05).
- Desgaste de los ángeles (ASTM C131-06).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Ebullición (ASTM D 3625-96).
- Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos e las mezclas asfálticas por acción del agua. (RA 07/10).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. (MMP 4.04.009/03).
- Desprendimiento por fricción en la fracción gruesa de materiales pétreos para mezclas asfálticas. (RA 08/08).
- Angularidad del agregado fino (AASHTO T304-08).
- Desgaste Micro Deval (AASHTO T327-09).





En esta sección se presentan los requerimientos que debe cumplir una mezcla asfáltica que se indica en la tabla 3. El contenido de asfalto óptimo será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire (V_a) en la mezcla entre 3 y 5 % cumpliéndose además los requerimientos indicados en la tabla 4.

b) Material asfáltico.- Adicionalmente se determinan las temperaturas de mezclado y compactación utilizando el viscosímetro rotacional

La fabricación de los especímenes debe realizarse en el compactador giratorio de acuerdo con la recomendación AMAAC- RA-06/2011.

Tabla 8. Valores de los parámetros volumétricos necesarios para el diseño óptimo de una mezcla asfáltica.

Requerimientos para el diseño volumétrico de la mezcla										
Nivel de transito	Densidad requerida (% de la gravedad especifica teórica máxima (Gmm))			Vacíos de agregado mineral mínimo en % - VMA					Vacíos llenos de asfalto en %	Relación filler asfalto
	Nivel de compactación giratoria			Tamaño Nominal (mm)						
	N _{ini}	N _{dis}	N _{max}	37.5	25	19	12.5	9.5		
I Bajo	≤ 91,5	96	≤ 98	11	12	13	14	15	70-80	0.6-1.2
II Medio	≤ 90,5								65-78	
III Alto	≤ 90,5								65-78	
IV Muy Alto	≤ 89								65-75	

Tabla 9. Esfuerzo requerido para la compactación giratoria según el tránsito esperado en el carril de diseño.

Ejes equivalentes	Parámetros de Compactación		
	N_{ini}	N_{dis}	N_{max}
$< 0,3$	6	50	75
$0.3 < 3$	7	75	115
$3 < 30$	8	100	160
≥ 30	9	125	205



2.2.1.2 Determinación de los parámetros volumétricos

Para la determinación de los parámetros volumétricos de la mezcla se deben emplear los formulas mostradas a continuación:

- a) **Gravedad Específica Bruta.-** Se determina midiendo la masa seca y el volumen bruto de una muestra de agregados (ASTM e-127 o ASTM C-128). El volumen bruto incluye el volumen del sólido del agregado más el volumen de agua contenida en los poros superficiales. El volumen bruto se mide para la condición del agregado saturado y superficialmente seco.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$

G_{sb} = Gravedad específica neta (total)

P_1, P_2, P_N = Porcentaje individuales por masa de agregado

G_1, G_2, G_N = Gravedad específica neta individual del agregado

- b) **% de Absorción del Material (finos y gruesos).-** Podemos definir la absorción, como la cantidad de agua absorbida por el agregado sumergido en el agua durante 24 horas.

$$Abs_{indv} = \frac{(P_1 * A_1) + (P_2 * A_2)}{100}$$

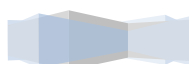
Abs_{indv} = Agua absorbida para cada material analizado

P_1 = % retenido en la malla 4 (4.75 mm)

A_1 = Agua absorbida en el material retenido en la malla 4 (4.75 mm)

P_2 = % que pasa la malla 4 (4.75 mm)

A_2 = Agua absorbida en el material que pasa la malla 4 (4.75 mm)



- c) **% de Vacíos de Aire.**- Es la concentración, en volumen, del aire en la muestra de mezcla asfáltica compactada. Los vacíos de aire se expresan siempre como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

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

V_a = % de vacíos de aire en la mezcla.

G_{mb} = Gravedad específica total de la mezcla compactada

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

- d) **Vacíos en el Agregado Mineral.**- Es el espacio intergranular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla asfáltica compactada y se expresa como porcentaje del volumen total. Usualmente, no se considera como parte del VAM, el volumen de asfalto absorbido. El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen de asfalto efectivo y el volumen de aire necesarios en la mezcla. Valores mínimos de VAM son necesarios para asegurar un adecuado espesor de película de asfalto que contribuya a la durabilidad de la mezcla.

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

VMA = Vacíos en el agregados minerales

G_{mb} = Gravedad específica total de la mezcla

P_s = Porcentaje de agregado en el espécimen

G_{sb} = Gravedad específica total del agregado

- e) **Vacíos Llenos con Asfalto.**- Es el porcentaje de VAM que contienen asfalto. El concepto de VFA es utilizado para asegurar que el porcentaje de asfalto efectivo (P_{be}) no sea demasiado pequeño como para producir una mezcla poco durable, o demasiado alto como obtener una mezcla demasiado inestable. El rango aceptable de VFA depende del nivel de tránsito. Altos niveles de tránsito requieren menores porcentajes de VFA, debido a que en estas condiciones la resistencia y estabilidad de las mezclas es la mayor preocupación. Bajos niveles de tránsito requieren porcentajes de VFA mayores para garantizar la durabilidad de la mezcla asfáltica. Si los porcentajes de VFA



son demasiados altos, la mezcla asfáltica se vuelve susceptible a presentar deformaciones plásticas

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

VFA = % de volumen de VMA lleno con asfalto

VMA = % de vacíos en el agregado mineral

Va = % de vacíos de aire del volumen total de la mezcla

- f) **Gravedad Específica Efectiva.-** Se calcula usando la masa seca y volumen efectivo del agregado (Figura 2). El volumen efectivo incluye el volumen de los sólidos del agregado y el volumen de los poros de superficie llenos con agua pero no con asfalto. La gravedad específica del agregado no se mide directamente, a diferencia de las gravedades específicas bruta y aparente. Esta se calcula conociendo la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) y el contenido de asfalto (P_b). Solo las gravedades específicas bruta y efectiva son utilizadas para el cálculo de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. Los volúmenes calculados para cada uno tendrán diferentes significados, y por ende, diferentes valores numéricos.

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado

P_b = Porcentaje de asfalto

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

G_b = Gravedad específica del asfalto





- g) **Contenido de Asfalto Absorbido.-** Es la concentración de masa del cemento asfáltico absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como porcentaje de la masa del agregado.

$$Pba = 100 * \left[\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} \right] * G_b$$

Pba = % de asfalto absorbido

G_{se} = Gravedad especifica efectiva del agregado

G_{sb} = Gravedad especifica total del agregado

G_b = Gravedad especifica del asfalto

- h) **Contenido de Asfalto Efectivo.-** Es la cantidad de masa de cemento asfáltico no absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como porcentaje.

$$Pbe = P_b - \left(\frac{Pba}{100} * P_s \right)$$

Pbe = % de asfalto efectivo

P_b = % de asfalto

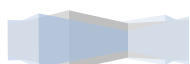
Pba = % de asfalto absorbido

P_s = % del agregado

- i) **Relación Filler/ Asfalto.-** Es la relación que existe entre el filler con respecto al porcentaje de asfalto efectivo (P_{be}).

$$\text{Relación Filler/ Asfalto} = \frac{\% \text{ Pasa la malla \# 200}}{P_{be}}$$

Pbe = % de asfalto efectivo



2.2.1.3 Seguimientos para el cálculo de contenido óptimo y diseño de mezclas asfálticas hasta el nivel II

Se realiza la revisión de la calidad de los materiales pétreos, después de seleccionada la distribución granulométrica ideal para el proyecto, preestablecido el grado de desempeño que se utiliza en la mezcla y revisada la relación de adherencia pétreo-asfalto, se procede a calcular el contenido óptimo para la granulometría propuesta.

2.2.1.4 Susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad

El ensayo se debe realizar aplicando la Recomendación AMAAC RA-04/2010 "Resistencia de las mezclas asfálticas al daño inducido por humedad" y para todos los niveles de diseño el valor mínimo aceptable es de TSR = 80%.

2.2.1.4.1 Descripción del ensayo de TSR

El objetivo del ensayo es determinar la resistencia al daño inducido por la humedad, también conocida como resistencia retenida, de una mezcla asfáltica compactada. La resistencia retenida es importante para establecer si una mezcla asfáltica es susceptible a la acción de la humedad.

Para realizar el ensayo se preparan 6 especímenes la mitad para ser ensayados en seco y el resto para ser ensayados después de un acondicionamiento que consiste en la saturación parcial del espécimen acompañado de un ciclo de congelamiento y deshielo, el tamaño del espécimen cilíndrico deberá ser de 100 mm de diámetro por 63.5 ± 2.5 mm de altura o de 150 mm de diámetro por 95 ± 5 mm de altura. Esta preparación de la muestra dependerá donde sea realizada si en planta o laboratorio.

El ensayo del espécimen consiste en la determinación del esfuerzo máximo que es capaz de soportar la mezcla compactada, bajo el ensayo de tensión indirecta a una temperatura de 25 °C, para los especímenes acondicionados y los no acondicionados, se colocan en las mordazas de Lottman y se ensayan a tensión indirecta.

La configuración de carga es la que se ilustra en las figuras 10a y 10b. Es importante todos los cuidados necesarios para asegurar que la carga es aplicada a través del diámetro del espécimen, a una velocidad de carga constante e igual a 58.8 mm por minuto.



Figuras 10a y 10b. Configuración de carga en el ensayo de Tensión Indirecta.



Se registra la carga máxima aplicada (o tensión indirecta). El ensayo debe continuar hasta que se aprecie una grieta vertical (figura 10b). Se retira el espécimen de la prensa y se jalan las dos mitades para provocar su separación. Visualmente se determina si el agregado grueso se rompió o solo se separo el asfalto y se registra lo observado.

2.2.2. SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE (NIVEL II)

Para realizar la susceptibilidad de la mezcla a la deformación permanente se podrán emplear los ensayos siguientes:

2.2.2.1 Especificaciones con rueda cargada de Hamburgo.

El ensayo se debe realizar de acuerdo a la Recomendación AMACC RA-01/2011, Susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodadura de una mezcla asfáltica tendida y compactada, por medio del analizador de la rueda de carga de Hamburgo (HWT).

Las especificaciones se indican en la Tabla 10.

Tabla 10. Número mínimo de pasadas para la deformación máxima en la prueba de Hamburgo.

Nivel de transito	Mínimo de pasadas para la deformación máxima de 10 mm.
Bajo	10.000
Medio	15.000
alto/ muy alto	20.000



Figuras 11 y 12. Equipo de la Rueda Cargada de Hamburgo



2.2.2.2 Especificaciones con el APA

El ensaye debe realizarse de acuerdo a la Recomendación AMAAC RA-02/2011. Susceptibilidad a la deformación por rodadura de una mezcla asfáltica, por medio del Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).

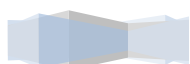
En la Tabla 11 se indican las especificaciones correspondientes en relación con el nivel de tránsito vehicular.

Tabla 11. Especificaciones de rodadura máxima con el Analizador de Pavimentos Asfálticos. APA para 8,000 ciclos.

Nivel de transito	Rodadura máxima
Bajo	7.0 mm
Medio	5.5 mm
Alto	4.0 mm
Muy alto	3.0 mm



Figuras 13 y 14. Equipo del Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)



2.2.2.3 Especificaciones con el ensaye de pista española

El ensaye se debe realizar de acuerdo a la recomendación AMAAC RA-03/2011, Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista española de ensayo. En la Tabla 12 se indican las especificaciones correspondientes.

Tabla 12. Velocidad máxima de deformación para el diseño de mezclas asfálticas mediante la máquina de pista en mm/min para el intervalo de 105 a 120 minutos.

	Nivel de transito			
	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Velocidad máxima de deformación en mm/min	0.2	0.2	0.15	0.12



Figuras 15 y 16. Equipo del ensayo de Pista Española



2.2.3 MÓDULO DINÁMICO (NIVEL III)

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica es un parámetro esencial para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos asfálticos. Se recomienda determinarlo con el procedimiento ASTM D3497, AASHTO TP62 o UNE-EN 12697-25, debiendo reportarlo sistemáticamente. No hay especificaciones de aceptación o rechazo en el parámetro de diseño.

Para el caso del protocolo se ha considerado un ensayo en probetas cilíndricas con un diámetro $\phi = 4"$. Y con una altura h igual a 15 cms. En modo de compresión axial no confinada, evaluada a 5 diferentes temperaturas (14, 40, 70, 100, 130 °F) y evaluada a 6 diferentes frecuencias (0.1, 0.5, 1, 5, 10, 25 Hz.).



Figuras 17 y 18. Equipo utilizado para el ensayo de Módulo Dinámico

2.2.4 DISEÑO POR FATIGA (NIVEL IV)

En el nivel 4 de diseño se recomienda que una vez determinada la fórmula de trabajo, se deba determinar la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica, empleando la viga de flexión de 4 puntos, conforme al procedimiento especificado en el método AASHTO T-321 bajo las siguientes condiciones:

- Ciclos de falla = 2000 micro deformaciones (me)
- Frecuencia = 10 Hz.
- Volumen de vacíos de las probetas = 4 ± 1.0 %
- Temperatura de prueba = 20°C
- Método de prueba = AASHTO T-321

Dependiendo del nivel de tránsito, las especificaciones correspondientes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 13. Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras para la prueba de fatiga a flexión de 4 puntos para la mezcla asfáltica densa.

Nivel de transito	Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras
Bajo	2000
Medio, Alto y Muy alto	5000

Las especificaciones presentadas en el protocolo no describen de forma adecuada los requerimientos para la determinación de la ley de fatiga en mezclas asfálticas. Uno de los objetivos de este trabajo es definir dichos requerimientos.



Figura 19. Equipo utilizado para el ensayo de Resistencia a la Fatiga

CAPITULO III "MÓDULO COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS"

3.1 TIPOS DE COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas tienen un comportamiento complejo. Considerando la amplitud de la deformación ($|\epsilon|$) y el número de ciclos de carga aplicados (N) se pueden identificar cuatro tipos de comportamientos principales:

- Para cargas que comprenden algunos cientos de ciclos y deformaciones «pequeñas» ($<10^{-4}$) el comportamiento es considerado como viscoelásticas lineal,
- Durante cargas de decenas de miles de ciclos y deformaciones «pequeñas» se desarrolla un tipo de daño, conocido como el fenómeno de «fatiga»,
- Para un número pequeño de cargas y deformaciones importantes, el comportamiento que se observa es fuertemente no lineal,
- Cuando ciclos de esfuerzos (compresión o tensión) son aplicados a partir de un esfuerzo nulo, deformaciones irreversibles no despreciables se producen para amplitudes de deformación cercanas de la ruptura. Su acumulación crea una «deformación permanente».

La figura 20 presenta un esquema de los comportamientos descritos en los puntos anteriores.

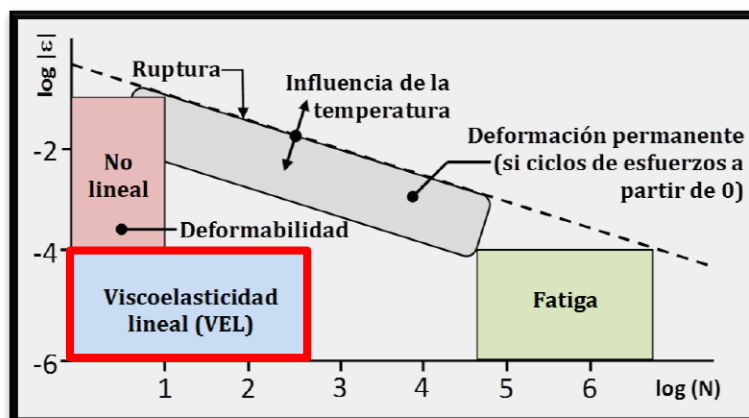
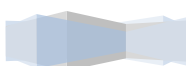


Figura 20 Comportamiento «tipo» de una mezcla asfáltica a temperatura controlada, (ϵ) deformación – (N) Número de repeticiones de carga.

Las fronteras presentadas en la figura 20, para los diferentes comportamientos, son de magnitudes que pueden variar sensiblemente según el material, la temperatura y el tipo de sollicitación.





3.2 MÓDULO COMPLEJO: VISCOELASTICIDAD LINEAL.

El ensayo de módulo complejo es realizado para determinar las propiedades viscoelásticas del material asfáltico (E^* y δ). Este ensayo es realizado bajo varias hipótesis. Este punto describe los requerimientos que se deben cumplir para su correcta ejecución en el laboratorio.

Hipótesis:

En la literatura, la mezcla asfáltica es un material generalmente considerado como un medio continuo, isótropo, viscoelásticas lineal y termosensible.

3.2.1 Medio continuo

A pesar que la estructura granular le da un carácter heterogéneo a la mezcla asfáltica, se puede adoptar la hipótesis de medio continuo. En el caso específico de las probetas fabricadas en laboratorio, se deberá cumplir con una relación de 5 entre el tamaño máximo del agregado y el diámetro de la probeta.

3.2.2 Isotropía

La compactación de las mezclas asfálticas en campo le confiere al material una cierta anisotropía debido a la orientación privilegiada del granular debida a la compactación. Además, un gradiente de densidad puede aparecer en el sentido del espesor de la carpeta asfáltica.

Para eliminar los efectos de esta anisotropía, generalmente los ensayos se realizan en probetas extraídas en el centro del pavimento. La extracción y las sollicitaciones en laboratorio corresponden a la dirección de mayor deformación.

3.2.3 Viscoelasticidad lineal y linealidad

La mezcla asfáltica adquiere las características viscoelásticas del asfalto. El cual es un material viscoelásticas termosensible (termosusceptible). A temperaturas muy altas (cargas elevadas), el asfalto se comporta como un fluido viscoso sin capacidad de recuperación o de regresar a su estado original. A muy bajas temperaturas (cargas pequeñas), los asfaltos se comportan como un sólido elástico, el cual regresa a su estado original después de deformarse completamente.

Es importante mencionar que existe también, una equivalencia entre las frecuencias altas y la bajas temperatura (módulo elevado) y entre las frecuencias bajas y las temperaturas altas (módulo bajo).

Las cargas reales aplicadas a los pavimentos se encuentran entre las dos cargas extremas expuestas, bajo estas condiciones la mezcla asfáltica presenta un comportamiento fuertemente viscoelásticas en donde la linealidad depende del nivel de deformación.

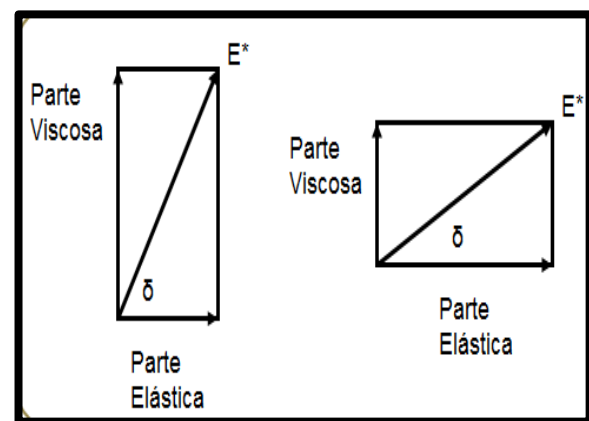
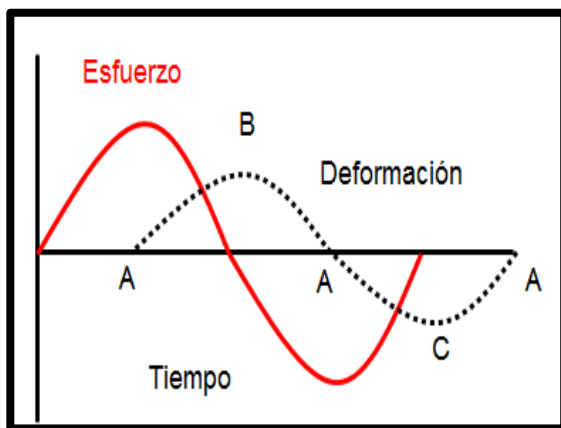
Se considera que las mezclas asfálticas presentan un rango de sollicitaciones para los cuales su comportamiento es lineal. Por lo cual, será en ese rango (pequeñas deformaciones) en donde se realizaran los ensayos de módulo complejo. Resultados



experimentales muestran que amplitudes de deformación de hasta 10^{-4} m/m aseguran una respuesta lineal de la mezcla.

El Hipótesis del comportamiento Viscoelástica lineal de asfalto supone la validez del principio de superposición de Boltzmann. La respuesta del material compuesto de una sollicitación de un número de tensión básica es la suma de las respuestas a cada una de estas tensiones básica. Esta suposición se utiliza para describir cómo bien la respuesta temporal de estos materiales.

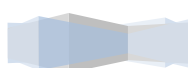
En algunos casos, simplemente la Hipótesis Elasticidad lineal para describir el comportamiento del material. Esta suposición se utiliza para el cálculo de tensiones y deformaciones en las capas de asfalto, en el contexto del método de diseño utilizado en Francia. Debe sin embargo, indicar que la naturaleza viscoelástica del material se tiene en cuenta a través de la elección de los valores de módulo para un par (frecuencia, temperatura) representativos de las condiciones medias.



Figuras 21 y 22. Graficas Esfuerzo- Deformación de material viscoelástico

3.3 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

La temperatura es un parámetro clave del comportamiento de los materiales arenosos. En efecto, como el aglutinante en su composición es un recubrimiento bituminoso termosusceptible, es decir es que sus propiedades dependen fuertemente de su temperatura. A bajas temperaturas, a registrado con carga normal (tráfico) alta rigidez y puede resultar sensible debido a la fragilidad del aglomerante a baja temperatura. A altas temperaturas, tiene un bajo módulo y deformabilidad.



3.4 TIPOS DE CARGAS EN MATERIALES VISCOELÁSTICOS

La Descripción Material de comportamiento viscoelástico lineal. Puede ser realiza utilizando varios tipos de señales como una función de la carga tiempo. Los tres tipos principales de carga aplicada durante el ensayo material bituminoso son:

- Cuasi-estática: carga analizadas mediante la introducción del tiempo (modo de tiempo);
- Carga sinusoidal: analizadas mediante la introducción de la frecuencia o el pulso (modo de frecuencia). El módulo complejo (E^*) se obtiene directamente con tales carga;
- No sinusoidal : cíclica de carga, por lo general en "pulsos" su aplicación específica es analizar

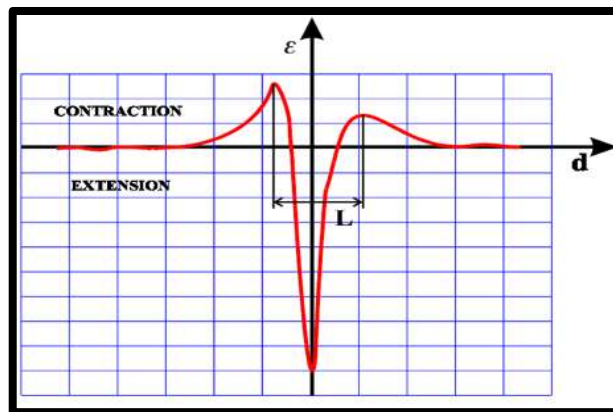
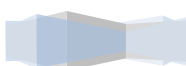


Figura 23. Carga sinusoidal aplicada para conocer el módulo dinámico y ángulo de fase



3.5 MODULO COMPLEJO EN LAS MEZCLAS ASFALTICAS

La aparición de la clasificación de asfaltos basada en desempeño, denotada PG por sus siglas en inglés Performance Grade (grado de desempeño), ha introducido nuevos conceptos y propiedades para el ingeniero civil que está involucrado en el proyecto, diseño, construcción y conservación de carreteras. En particular, aparecieron los términos **módulo complejo** y **ángulo de fase** de un asfalto, como características esenciales para asegurar una adecuada resistencia a las deformaciones permanentes y al agrietamiento por fatiga en la carpeta asfáltica de un pavimento sujeto al paso repetido del tránsito vehicular.

Es muy conveniente por ello profundizar en el concepto de módulo complejo, para lograr un mejor entendimiento de lo que ese parámetro significa y valorar todo su potencial para seleccionar y evaluar asfaltos convencionales y modificados, que puedan contribuir a una mayor durabilidad de nuestros pavimentos.

El módulo complejo E^* es el numero complejo definido como la relación entre la amplitud compleja del esfuerzo sinusoidal de pulsación ω aplicada al material $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$ y la amplitud compleja de la deformación sinusoidal resultante. Teniendo en consideración el carácter viscoelástico del material la deformación presenta un retardo del esfuerzo, el cual se traduce en un ángulo de desfase δ entre las dos señales: $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta)$. En el caso inverso, la sollicitación aplicada es una deformación sinusoidal $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$ y la respuesta será un esfuerzo sinusoidal $\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$.

En términos mas prácticos el **Módulo complejo** se define como el numero complejo que define la relación entre esfuerzo y deformación para un material visco-elástico lineal, E^* .

Tomando en cuenta la definición anterior, diremos entonces que el **Módulo dinámica** es el valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas en el rango lineal visco-elástico del material sometido a una carga sinusoidales $|E^*|$

El módulo complejo $E^*(t)$ es definido por

$$E^*(t) = \sigma^*(t) / \varepsilon^*(t) \quad (1)$$

En donde:

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)}} = |E^*| e^{i\delta} \quad (2)$$

$|E^*|$ es la norma del módulo complejo, muchas veces llamado modulo de rigidez (stiffness modulus).

δ es el ángulo de desfase (o ángulo de fase) del material.



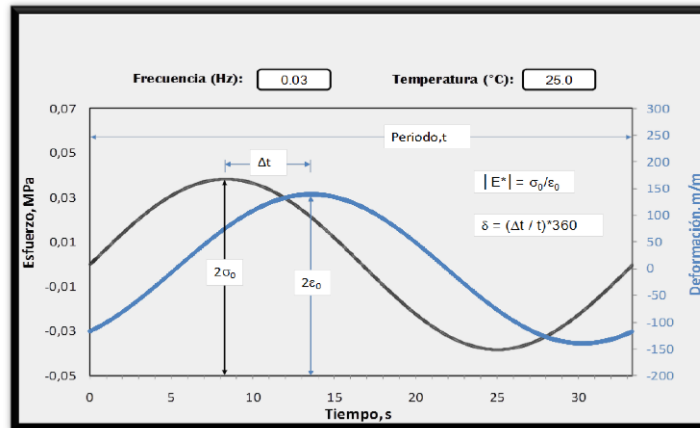


Figura 24. Esfuerzo-deformación durante un ensayo de módulo complejo.

E_1 y E_2 son dos valores que permiten describir la parte elástica y viscosa de la mezcla asfáltica. Para esto se utiliza la siguiente notación

$$E^* = E_1 + E_2 \quad (3)$$

E_1 es llamado módulo de elasticidad dinámica y es definido por $E_1 = |E^*| \cos \delta$,

E_2 es llamado módulo de pérdida (parte viscosa) y es definido por $E_2 = |E^*| \sin \delta$.

En el plano complejo, la parte real del módulo complejo E^* ($i\omega$) se llama el almacenamiento o módulo elástico E_1 , mientras que la parte imaginaria es la pérdida o el módulo viscoso E_2 ,

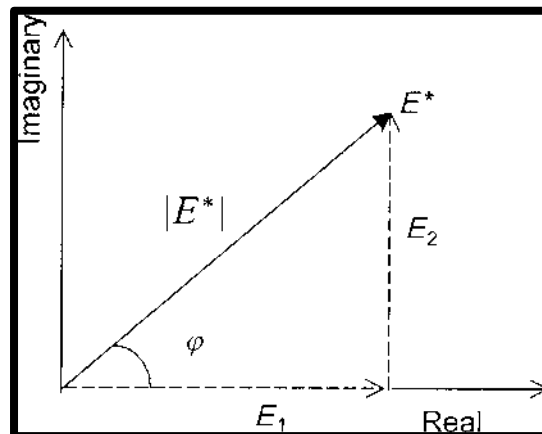


Figura 25. Representación de Módulo Complejo en el plano real e imaginario

El ensayo de módulo complejo en mezclas asfálticas es medido mediante un ensayo que somete el material a solicitaciones sinusoidales a diferentes frecuencias. Las mediciones son realizadas en el rango de pequeñas deformaciones para las cuales la mezcla asfáltica se comporta principalmente como un material viscoelástico lineal, la respuesta establecida para una solicitación sinusoidal, es también sinusoidal.



3.6 MODELOS REOLÓGICOS DE BASE.

Una forma de representar las propiedades físicas de los materiales es describiendo el comportamiento del material con base a su constitución interna, esto se puede realizar mediante ecuaciones constitutivas, bajo un punto de vista macroscópico. Una categoría de ecuaciones constitutivas son las que relacionan esfuerzos y deformaciones entre sí a una temperatura constante.

Entre los modelos más simples se encuentran el modelo de Maxwell y Kelvin, los cuales tienen como base dos materiales idealizados como son el cuerpo de Hooke y el cuerpo de Newton. Estas idealizaciones son utilizadas debido a la complejidad del comportamiento de los materiales, lo que lleva a remplazar el material real por un modelo más o menos idealizado.

Una gran ayuda para la visualización de los materiales idealizados son algunas analogías, que simulan el comportamiento mediante representaciones mecánicas simples. Entre las analogías más utilizadas están el resorte helicoidal que representa un cuerpo elástico idealizado (Figura 26) y el amortiguador como modelo idealizado de un cuerpo viscoso.

3.6.1 Cuerpo elástico.

La elasticidad es la, recuperando su forma original al quitar el esfuerzo aplicado, de igual forma se dice que un material se comporta elásticamente cuando sus deformaciones son proporcionales a los esfuerzos locales.

Después de leer estos conceptos cabe señalar que en la realidad no existe ningún material que se comporte en forma elástica pura, esto se puede ejemplificar de la siguiente forma, supongamos que tenemos el mejor resorte y lo estiramos en forma excesiva, primeramente perderá su respuesta proporcional antes mencionada, para después presentar deformaciones permanentes y finalmente romperse. Sin embargo podemos afirmar que los materiales empleados en la ingeniería reaccionan elásticamente siempre y cuando las fuerzas aplicadas sean bastante pequeñas.

La relación de proporcionalidad esfuerzo-deformación antes mencionado se denomina ley de Hooke, para representar esta relación elástica perfecta en forma ideal se utiliza el denominado modelo de Hooke (Figura 26), el cual es un modelo analógico de un resorte helicoidal.

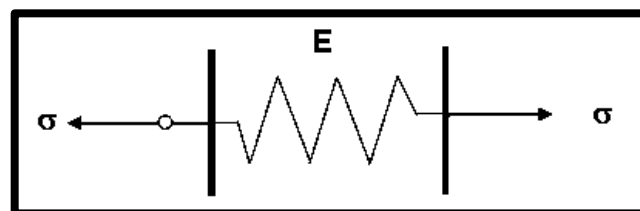
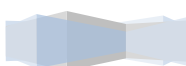


Figura 26. Resorte Helicoidal, Modelo de Hooke



En la Figura 27 se presenta una curva esfuerzo-deformación para un cuerpo elástico. En esta figura se puede observar la proporción entre el esfuerzo y la deformación antes mencionada, la pendiente de línea es el coeficiente de proporcionalidad (E), el cual es denominado módulo de Young o módulo de elasticidad del material.

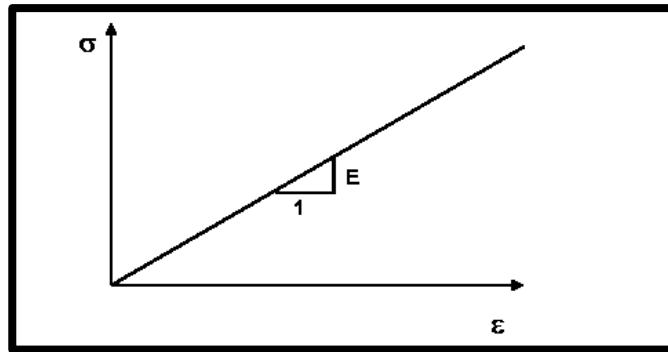


Figura 27. Grafica esfuerzo-deformación de un material elástico

La ley de Hooke es representada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma \quad (4)$$

En donde ε representa la deformación unitaria del material, σ el esfuerzo aplicado y E el módulo de Young.

Si σ permanece constante, también la deformación ε permanecerá constante. Es decir, cuando se aplica un esfuerzo σ_i en forma súbita y se mantiene constante después de un tiempo t, se generará una deformación de magnitud ε_i , que se conservará mientras el esfuerzo permanezca, de igual forma al retirar la fuerza aplicada la deformación volverá a ser cero.

3.6.2 Cuerpo Viscoso.

Para el estudio del efecto de un esfuerzo sobre un fluido, no se necesitan estudiar las deformaciones, sino las velocidades de deformación que este puede inducir. A diferencia con el cuerpo elástico donde solamente se necesita conocer la deformación para determinar el esfuerzo aplicado, para este tipo de modelo es necesario conocer el coeficiente de viscosidad del material para establecer el esfuerzo aplicado.

La representación de un medio viscoso se realiza utilizando un amortiguador como modelo analógico. Este modelo considera un amortiguador móvil dentro de un cilindro lleno de aceite, sin inercia y sin que haya compresión del fluido, para que esta última condición se satisfaga se considera que el pistón está perforado, en donde la λ es el coeficiente de viscosidad del líquido



La curva esfuerzo-deformación para este modelo se presenta en la Figura 28, en esta se puede observar que la respuesta del material es una semirrecta paralela al eje ϵ , por lo que respecta al σ , este puede inducir una deformación cualquiera mientras se mantenga por un tiempo suficientemente prolongado.

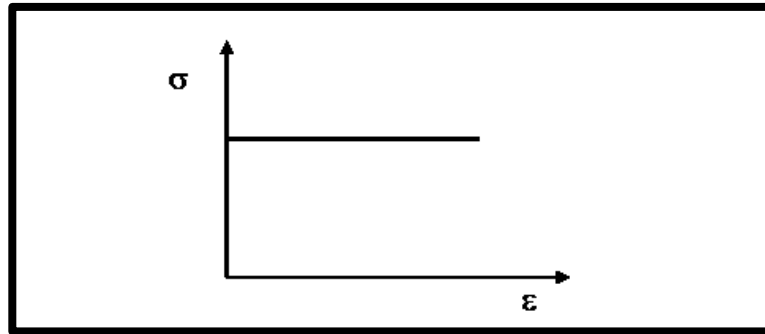


Figura 28. Grafica esfuerzo-deformación en un material viscoso

La ecuación que se utiliza en este modelo es la siguiente:

$$\sigma = \Lambda \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right) \quad (5)$$

Una forma más clara de comprender la relación esfuerzo deformación es incorporando la variable tiempo, esto se puede observar en la Figura 29, en donde se aplica una carga súbitamente y luego se mantiene, bajo esta condición la deformación aumentará linealmente y la velocidad de deformación permanecerá constante.

Se puede observar que el material sufre una deformación progresiva a un esfuerzo constante y esta crece en forma lineal con el tiempo.

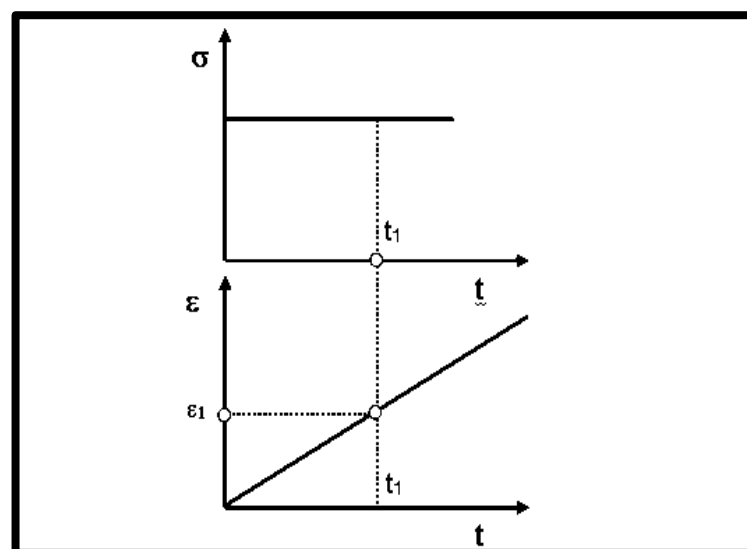


Figura 29. Esfuerzo-deformación de un material viscoso en el tiempo.



3.6.3 Modelos Viscoelásticos.

Los cuerpos anteriormente descritos sirven como base para tener un mejor entendimiento del comportamiento real de diferentes materiales, mediante la idealización de diferentes modelos viscoelásticos, que para el caso de mezclas asfálticas son combinaciones de los cuerpos elásticos y viscosos, entre los modelos viscoelásticos idealizados más utilizados se encuentran; el modelo de Maxwell, Kelvin, Burgers y el modelo generalizado.

3.6.3.1 Modelo de Maxwell.

Este modelo trata de simular materiales que primeramente responden de manera elástica, pero si la carga se mantiene tiende a comportarse de manera viscosa. Uno de los materiales que reacciona de esta forma es el asfalto.

Este modelo esta compuesto de un resorte helicoidal y un amortiguador colocados en serie (Figura 30). El modelo responde bajo una aplicación de la carga de la manera siguiente; primeramente presenta una deformación instantánea, la cual es proporcional al esfuerzo aplicado (producida por la respuesta del resorte), como se mencionó con anterioridad

El amortiguador no reacciona en forma instantánea, pero si el esfuerzo aplicado se mantiene se produce una deformación a velocidad constante la cual será función del tiempo y proporcional al esfuerzo, cuando el esfuerzo aplicado es retirado, la deformación producida por el resorte se recuperará en forma instantánea, mientras que la deformación alcanzada por el amortiguador se mantendrá.

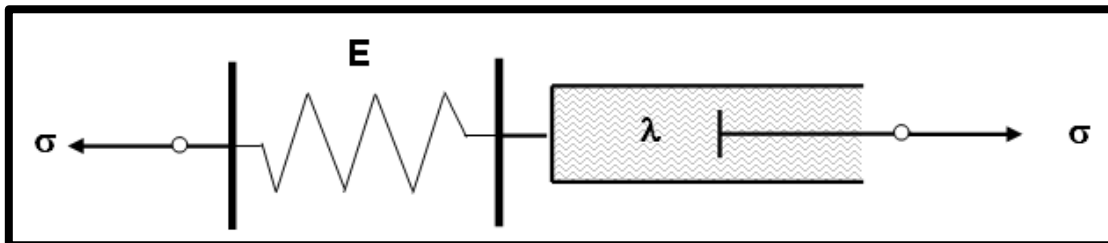
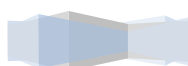


Figura 30. Modelo de Maxwell

En este modelo existen dos fenómenos característicos que son la fluencia (esfuerzo constante) y la relajación de esfuerzos (deformación constante).

Si se aplica al modelo un esfuerzo de tensión σ , ambas componentes soportarán el mismo esfuerzo sin embargo se deformarán de forma diferente, por lo tanto la deformación total (ϵ_T) será la suma de la deformación del resorte (ϵ_r) y la deformación del amortiguador (ϵ_a), esto se representa de la siguiente manera:



$$\sigma_T = \sigma_r = \sigma_a \quad (6)$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_r + \varepsilon_a \quad (7)$$

Despejando las ecuaciones 6 y 7 con respecto a la deformación tenemos

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (8)$$

$$\frac{d\varepsilon_a}{dt} = \frac{\sigma}{\lambda_0} \quad (9)$$

Derivando la primera (ε_r) y tomando en cuenta la ecuación 9, se tiene

$$\frac{d\varepsilon_r}{dt} + \frac{d\varepsilon_a}{dt} = \frac{d\varepsilon_T}{dt} \quad (10)$$

Dando como resultado

$$\frac{d\varepsilon_T}{dt} = \frac{1}{E_0} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\lambda_0} \quad (11)$$

Para el caso en estudio de este trabajo módulo complejo se adapto este principio y la ecuación se define como:

Función de Creep

$$F(t) = \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} \quad (12)$$

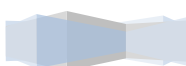
Mecánica de los materiales bituminosos de Carreteras

$$R(t) = E e^{\frac{t}{\tau}} \quad (13)$$

Con $\tau = \frac{\eta}{E}$ Donde τ es el tiempo de relajación

Módulo Complejo:

$$E^*(\omega) = E \frac{(i\omega\tau)}{1+i\omega\tau} = \frac{E\omega^2\eta^2 + iE^2\omega\eta}{E^2 + \omega^2\eta^2} \quad (14)$$



3.6.3.2 Modelo de Kelvin-Voigt

Este modelo se denomina Kelvin-Voigt, al igual que el modelo de Maxwell consta de un resorte y un amortiguador, solamente que estos trabajan en paralelo (Figura 10).

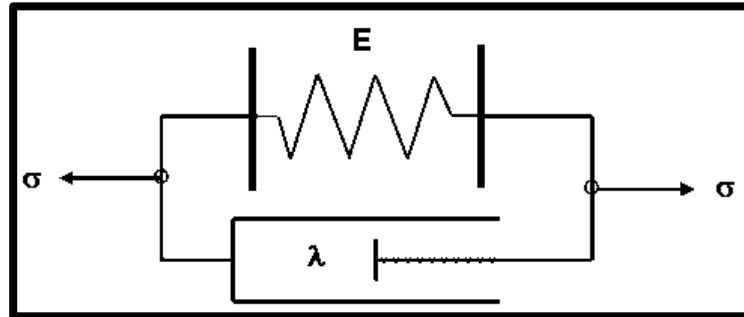


Figura 31 Modelo de Kelvin-Voigt

Si se aplica un esfuerzo de tensión σ_i a este sistema, este actúa al mismo tiempo sobre el resorte y el amortiguador, por lo que la deformación siempre será la misma y para el caso de los esfuerzos, una parte la tomará el resorte y otra el amortiguador.

$$\varepsilon_T = \varepsilon_r = \varepsilon_a \quad (15)$$

$$\sigma_T = \sigma_r + \sigma_a \quad (16)$$

Generalmente los esfuerzos soportados por el resorte σ_r y por el amortiguador σ_a serán diferentes y dependerán del módulo elástico y coeficiente de viscosidad.

Tomando en consideración las ecuaciones 6 y 7 tenemos

$$\sigma_r = E\varepsilon \quad (17) \quad \sigma_a = \lambda \dot{\varepsilon} \quad (18)$$

y de acuerdo con la ecuación 11

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \lambda_1 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (19)$$

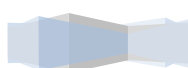
Integrando

$$\int_0^\varepsilon \frac{d\varepsilon}{\sigma - E_1 \varepsilon} = \int_0^t \frac{dt}{\lambda_1} \quad (20)$$

Resolviendo

$$F(t) = \frac{\sigma}{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (21)$$

Se resuelve para encontrar el modulo complejo



Función de Relajación:

$$R(t) = E + \eta \delta \quad (22)$$

Con δ función del pulso de dirección.

Módulo Complejo:

$$E^*(\omega) = E + i\omega\eta \quad (23)$$

3.6.3.3 Modelo de Burgers.

Este modelo está dividido en tres partes, la primera es un comportamiento elástico simple simulado mediante un resorte, la parte siguiente es un comportamiento inelástico sin deformaciones permanentes el cual es aproximado por el modelo de Kelvin y por último un comportamiento viscoso representado con un amortiguador, es decir un modelo de Kelvin y un modelo de Maxwell, este modelo analógico se presenta en la Figura 32.

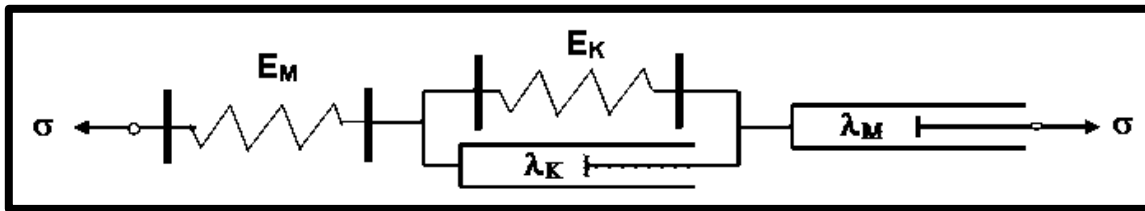
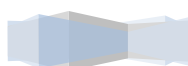


Figura 32. Modelo de Burgers

La deformación total del modelo es la suma de la deformación del modelo de Kelvin (ϵ_K) y la deformación del modelo de Maxwell (ϵ_M).

Con las notaciones de la Figura 32 y $T_K = \lambda_K / E_K$.

$$\epsilon = \sigma \left[\frac{1}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_K}} \right) + \frac{t}{\lambda_M} + \frac{1}{E_M} \right] \quad (24)$$



Se resolvió esta ecuación para encontrar el valor de modulo complejo

Función de Relajación:

$$R(t) = E_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + E_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (25)$$

$$\text{Con } \tau_1 = \frac{\eta_1}{E_1} \text{ y } \tau_2 = \frac{\eta_2}{E_2} \quad (26)$$

El Módulo Complejo asociado con este modelo esta dado por

$$E^*(\omega) = \frac{E_1}{1 + \left(i\omega \frac{\eta_1}{E_1}\right)^{-1}} + \frac{E_2}{1 + \left(i\omega \frac{\eta_2}{E_2}\right)^{-1}} \quad (27)$$

3.6.3.4 Modelo de Generalizado.

Cualitativamente un modelo de Burgers representa bien el comportamiento de un material viscoelástico, pero cuantitativamente, un solo modelo de Kelvin no es usualmente suficiente para cubrir el largo periodo de tiempo sobre el que la deformación retardada toma lugar, para esto se necesitarán un cierto número de modelos de Kelvin adicionales.

De acuerdo con lo anterior, se adecuó el modelo de Burgers, mediante la adición de n modelos de Kelvin conectados en serie (Figura 34).

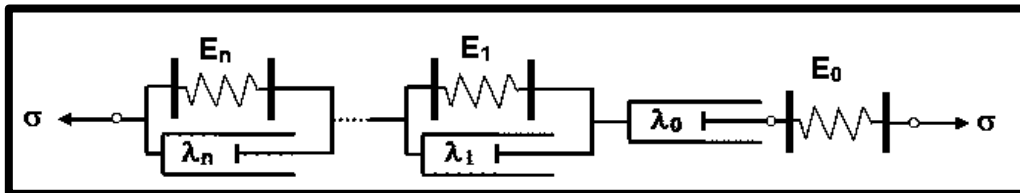
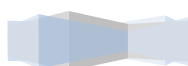


Figura 34. Modelo Generalizado

Este modelo explica el efecto de la duración de la carga sobre la respuesta del pavimento. Bajo una sola aplicación de carga, predomina la deformación instantánea y elástica retardada; y la deformación viscosa es insignificante. Sin embargo, bajo un largo número de repeticiones de carga, la acumulación de la deformación viscosa es causa de la deformación permanente. Bajo condiciones de esfuerzo constante la ecuación a utilizar es

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i} \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{T_i} \right)} \right] \quad (28)$$





3.6.3.5 Módulo de deformación.

Otro método de caracterizar materiales viscoelásticos es el módulo de deformación en función del tiempo $D(t)$, este módulo se define como:

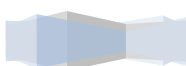
$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad (29)$$

Donde $\varepsilon(t)$ es la deformación, en función del tiempo, bajo esfuerzo constante.

Bajo esfuerzo constante, el módulo de deformación es el inverso del módulo de Young. Para el modelo generalizado se tiene:

$$D(t) = \frac{1}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{T_i} \right)} \right] \quad (30)$$

Conocidos E_0 , T_0 , E_i y T_i , los módulos de deformación se calculan con la ecuación anterior.





CAPITULO IV "ENSAYOS DEL MÓDULO COMPLEJO EN LABORATORIO"

4.1 ENSAYOS DE MÓDULO COMPLEJO

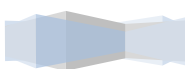
Existen diferentes métodos de ensayos de laboratorio para la determinación el módulo dinámico en mezclas asfálticas. Estos ensayos se pueden clasificar en dos grandes grupos: ensayos homogéneos y no homogéneos.

En el primer grupo se encuentran el ensayo triaxial, ensayo de tensión-compresión simple en probetas cilíndricas y ciertos ensayos de corte (cizallamiento). Los ensayos no homogéneos son los ensayos de flexión (en 2, 3 o 4 puntos) y el ensayo de compresión diametral.

En el caso de los ensayos homogéneos, el estado de esfuerzos y de deformaciones es el mismo en cada punto de la probeta ensayada. Esto permite que los ensayos homogéneos den acceso a la ley de comportamiento sin la necesidad de utilizar hipótesis complementarias. Los ensayos no homogéneos necesitan de la incorporación de hipótesis y la realización de cálculos más o menos complejos para obtener ese comportamiento.

Experimentalmente se ha observado que la dispersión en los ensayos homogéneos es menor y reduce notablemente el número de evaluaciones necesarias para determinar la curva maestra.

A continuación se muestra una breve descripción del equipo y método de algunos ensayos para especímenes de mezclas asfálticas para módulo dinámico.



4.1.1 ENSAYOS HOMOGÉNEOS

A continuación se mencionan los ensayos homogéneos más representativos para calcular el módulo dinámico y ángulo de fase de formas diferentes.

4.1.1.1 TENSIÓN DIRECTA

La prueba de tensión directa está normalizada por el estándar francés (NF T 98-260-1) y se realiza con el MAER (Máquina de prueba reológica). Esta prueba fue desarrollada por el LINDER (1977) y desarrollada por MOUTIER (1990). Se compone, para una temperatura dada, para presentar una resistencia a la tensión de un cilíndrico de carga hasta un valor dado deformación axial $\epsilon_{\max}$ siguiendo un tipo de deformación de carga controlada $\epsilon = a.t^n$ con $0.5 < n < 2$ (Esquema1.). La prueba se continúa durante varios tiempos de carga t_i (mismo valor de $\epsilon_{\max}$).



Esquema 1. Ensayo de Tensión Directa

A continuación se muestra la imagen del Ensayo de Tensión Directa.



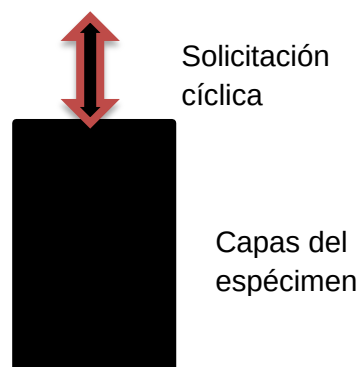
Figuras 35 y 36. Equipo utilizada para el Ensayo de Tensión Simple



4.1.1.2 MÉTODO DE ENSAYO DE TENSIÓN-COMPRESIÓN

El ensayo puede realizarse en muestras de forma cilíndrica o prismática. El espécimen se somete a esfuerzos axiales de tensión tipo compresión alterna (Esquema 2). Para mantener fuera la fisuración en bordes y mejorar la prueba, puede ser extraída la probeta del centro.

El ensayo es homogéneo en la parte central de la muestra. Puede ser realizado en control de la deformación o tensión, que es raramente el caso para otros ensayos de modulo dinámico. El módulo de rigidez, la relación de Poisson y otras características mecánicas pueden ser aprendidos en base a la experiencia.



Esquema 2. Ensayo de Tensión – Compresión

Después de mostrar en que consiste el ensayo de tensión – compresión se muestra una imagen representativa de dicho ensayo en laboratorio.

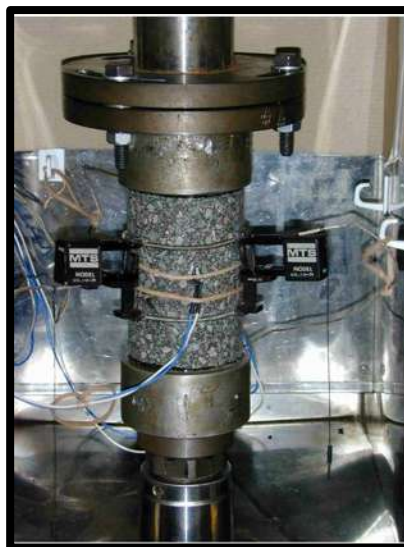
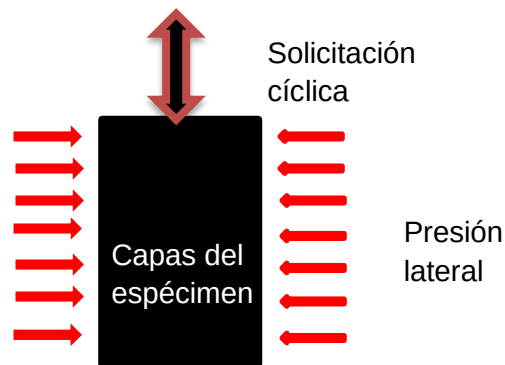


Figura 37. Ensayo de Tensión- Compresión



4.1.1.3 ENSAYO TRIAXIAL

El ensayo puede realizarse en muestras de forma cilíndrica o prismática. Se presenta similar al ensayo de tensión-compresión agregando también una presión de confinamiento aplicada sobre la muestra, (Esquema 3). Esta presión de confinamiento permite simular mejor el comportamiento de los pavimentos. En efecto, el ensayo triaxial permite aplicar esfuerzos laterales que existen en el caso de un pavimento real. En pruebas más complejas de esta área, la aplicación de la presión lateral puede también ser cíclica.



Esquema 3. Ensayo Triaxial

A continuación se muestra la imagen del equipo para el Ensayo Triaxial.



Figuras 38 y 39. Equipo utilizado para el Ensayo Triaxial



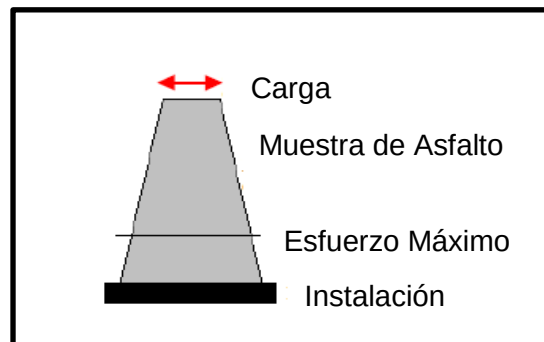
4.1.2 ENSAYOS NO HOMOGÉNEOS

A continuación se mencionan los ensayos no homogéneos más representativos para calcular el módulo dinámico y ángulo de fase de formas diferentes.

4.1.2.1 MÉTODO DE ENSAYO EN VIGA DE 2 PUNTOS

La prueba de modulo dinámico es desarrollada en LCPC desde 1965. El estudio de los parámetros de la prueba influyen como modo de temperatura y carga (fuerza o desplazamiento), dichos estudios fueron realizados por Doan (1970). La prueba se utiliza ampliamente en Europa y fue estandarizado en Francia. Sus resultados se utilizan en el método francés para pavimentos.

La muestra se fija de su base trapezoidal grande y se busca su punto máximo. Se busca que se impongan a esfuerzo o desplazamiento, (Esquema 4). El interés de una muestra de sección trapezoidal es eliminar los rebajes y el punto de aplicación de la carga. Así, se pueden evitar los efectos mínimos y la concentración de borde de deformación por debajo del punto de aplicación de carga en la aparición de grietas. La nueva máquina que se ha utilizado en los laboratorios LCPC y dispone de cuatro pruebas simultaneas.



Esquema 4. Ensayo de Viga de 2 Puntos



Figura 40. Equipo del Ensayo de Viga de 2 Puntos

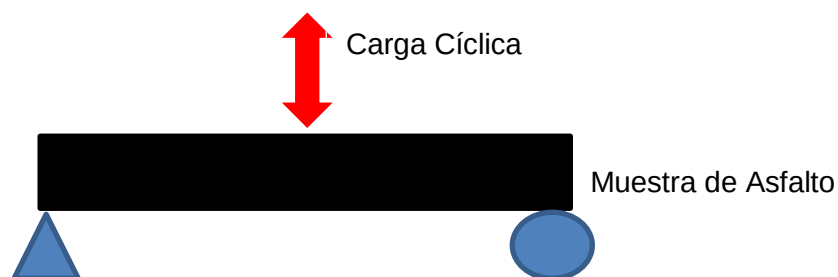


4.1.2.2 MÉTODO DE ENSAYO EN VIGA DE 3 PUNTOS

El espécimen es una viga que descansa sobre dos apoyos simples (Esquema 5). La sollicitación se aplica al centro de la viga impuesta en función de tensión o deformación.

El momento de flexión es cero en el apoyo derecho y varía linealmente hasta alcanzar su valor máximo en el centro de la probeta. El plano de rotura generalmente se encuentra en el mismo punto o muy cerca de ella.

Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas asfálticas sometidas a una carga cíclica, en un ensayo de fatiga por flexión en tres puntos, utilizando probetas prismáticas. El procedimiento consiste básicamente en someter una probeta prismática, apoyada en sus extremos y sujeta en su centro, a un desplazamiento de éste que varía con el tiempo según una función sinusoidal, de forma: $D = D_o \text{ Sen } (2\pi Ft)$, hasta el fallo de la probeta.



Esquema 5. Ensayo de la Viga en 3 Puntos

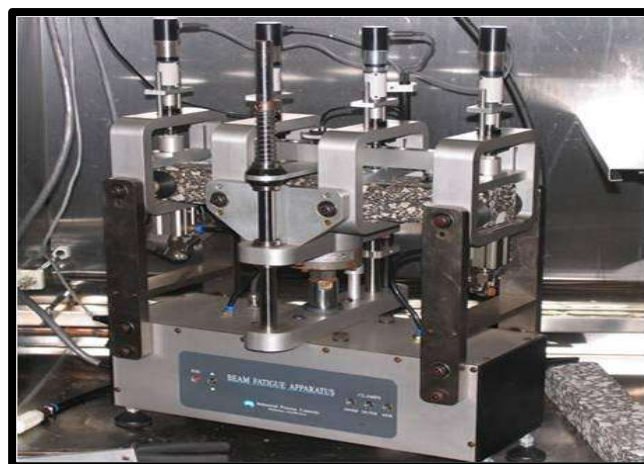


Figura 41. Equipo utilizado para el ensayo de Viga de 3 Puntos versión Norteamericana



4.1.2.3 MÉTODO DE ENSAYO EN VIGA DE 4 PUNTOS

Esta prueba se utiliza ampliamente en los Estados Unidos. Fue elegido siguiendo el programa SHRP para el estudio de la fatiga de asfalto. Esta prueba se diseñó para evitar la concentración de daños en el centro de la viga observada en el ensayo de flexión de tres puntos.

La tensión se ejerce en dos puntos simétricos, se parte la muestra en tres secciones como se muestra en la (Esquema 6). En ausencia de cizallamiento entre estos dos puntos, se puede aprovechar una zona de tiempo uniforme suficientemente larga.



Esquema 6. Ensayo de la Viga en 4 Puntos



Figura 42. Equipo utilizado en el Ensayo de Viga de 4 Puntos



4.1.2.4 FLEXIÓN CON APOYO

El ensayo apoyado de flexión lleva a una mejora muy importante con respecto a los ensayos de flexión 3 y 4 puntos. En esta prueba y para una mejor simulación de condiciones de la carretera, la probeta se coloca en una membrana de caucho o una capa de aire a presión (Figura 43). La geometría de la probeta es el de una viga o en una placa rectangular o circular.

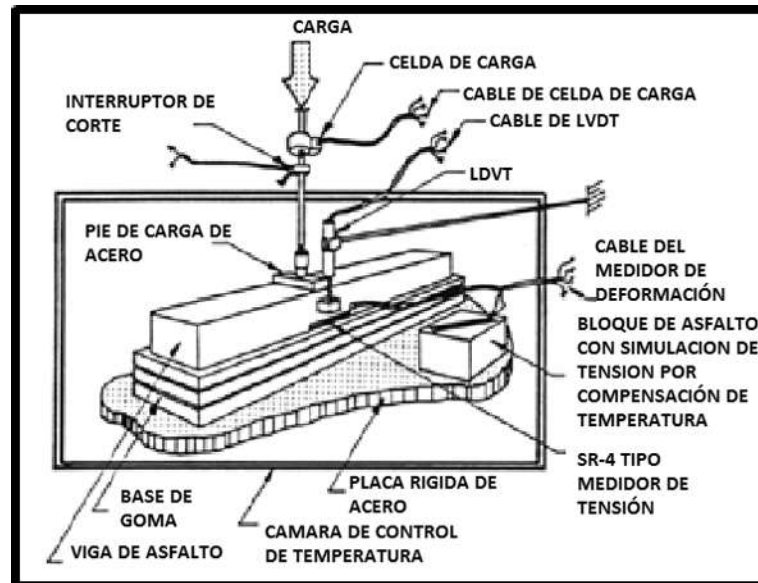


Figura 43. Esquema del Ensayo de Flexión con Apoyos.





CAPITULO V "ANÁLISIS DE MÓDULO COMPLEJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS"

5.1 PRESENTACIONES CLÁSICAS.

Existen diferentes representaciones del módulo y el ángulo de fase pero las más comunes son: **las Curvas Isotérmicas, Curvas Isócronas, Curva en el Plano Cole Cole (o Plano Complejo), Curva en el Espacio Black**

Para poder explicar y visualizar estas presentaciones clásicas se obtuvieron resultados de la evaluación de un ensayo de una mezcla asfáltica. El ensayo de módulo complejo fue realizado en modo de tensión-compresión a esfuerzo controlado (ensayo homogéneo). Se evaluaron 7 diferentes temperaturas (-25°C a 35°C) y 9 frecuencias (0,03Hz a 10Hz), como se indica en la tabla1.

Tabla 14. Puntos experimentales evaluados*

Temperaturas (°C)	Frecuencias (Hz)	Numero de ciclos
-25 -15 -5 +5 +15 +25 +35	0.03	5
	0.05	5
	0.1	10
	0.3	10
	0.5	10
	1	10
	3	30
	5	50
	10	100



5.1.1 Curvas Isotérmicas

Estas curvas son obtenidas trazando la curva del módulo complejo E^* en función de la frecuencia para cada una de las temperaturas de ensayo de Tensión-compresión, generalmente en escala bilogarítmica. La pendiente de las curvas isotérmicas permite estimar la susceptibilidad cinética del material asfáltico (variación del módulo con la velocidad de sollicitación).

A continuación se muestra en la figura 44, la presenta de las curvas isotérmicas de una mezcla asfáltica.

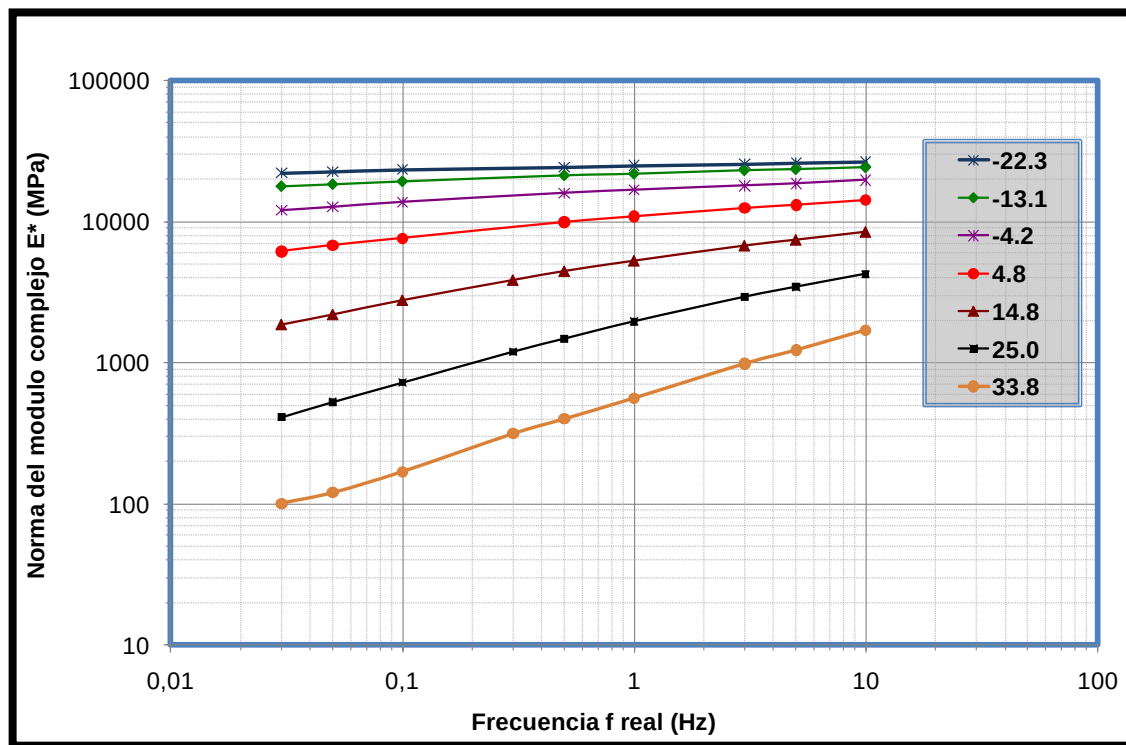


Figura 44. Curvas isotérmicas del módulo complejo



5.1.2 Curvas Isócronas

Esta es una representación similar a las curvas isotérmicas, la representación se realiza en escala semi-logarítmica y se invierten los parámetros frecuencia y temperatura. Esta representación permite estimar la susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica (variación del módulo con la temperatura). Un ejemplo de curvas isócronas en una mezcla asfáltica es presentado en la figura 45.

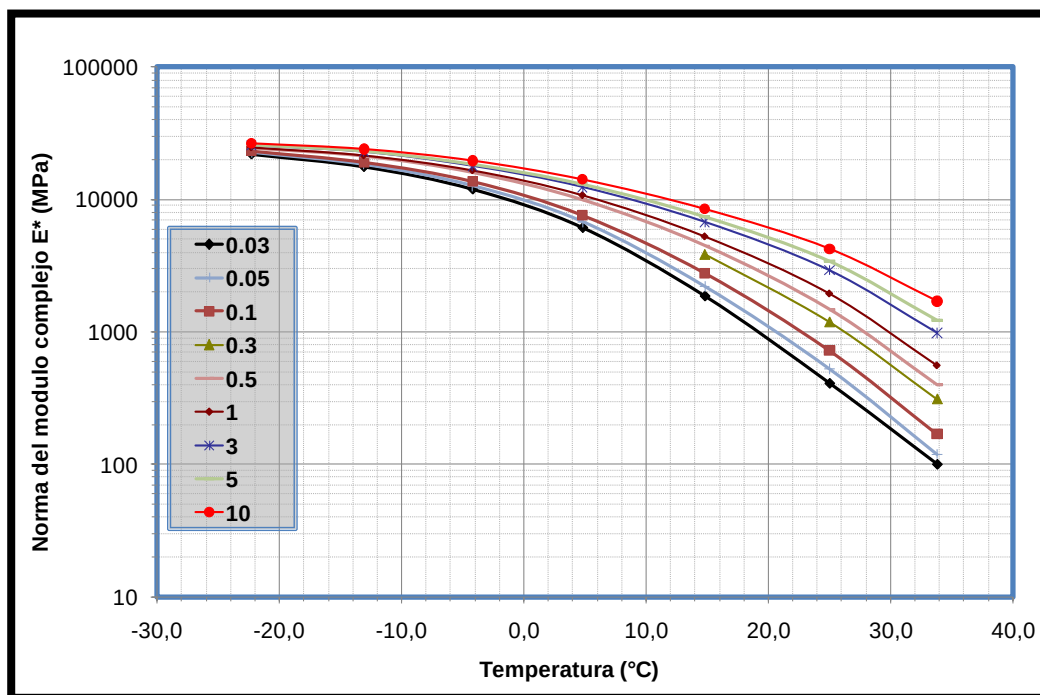


Figura 45. Curvas isócrona del modulo complejo,

5.1.3 Curva en el Plano Cole-Cole (o Plano Complejo)

Esta representación traza en las abscisas la parte real del módulo complejo E_1 y la parte imaginaria E_2 en la ordenada. Esta curva puede ser utilizada para calibrar un modelo de comportamiento reológico. Debido a que el material obedece el principio de equivalencia frecuencia-temperatura, los puntos experimentales permiten definir una curva única y característica del material evaluado.



La figura 46 presenta el plano de Cole-Cole de una mezcla asfáltica, probeta BBL3C2A.

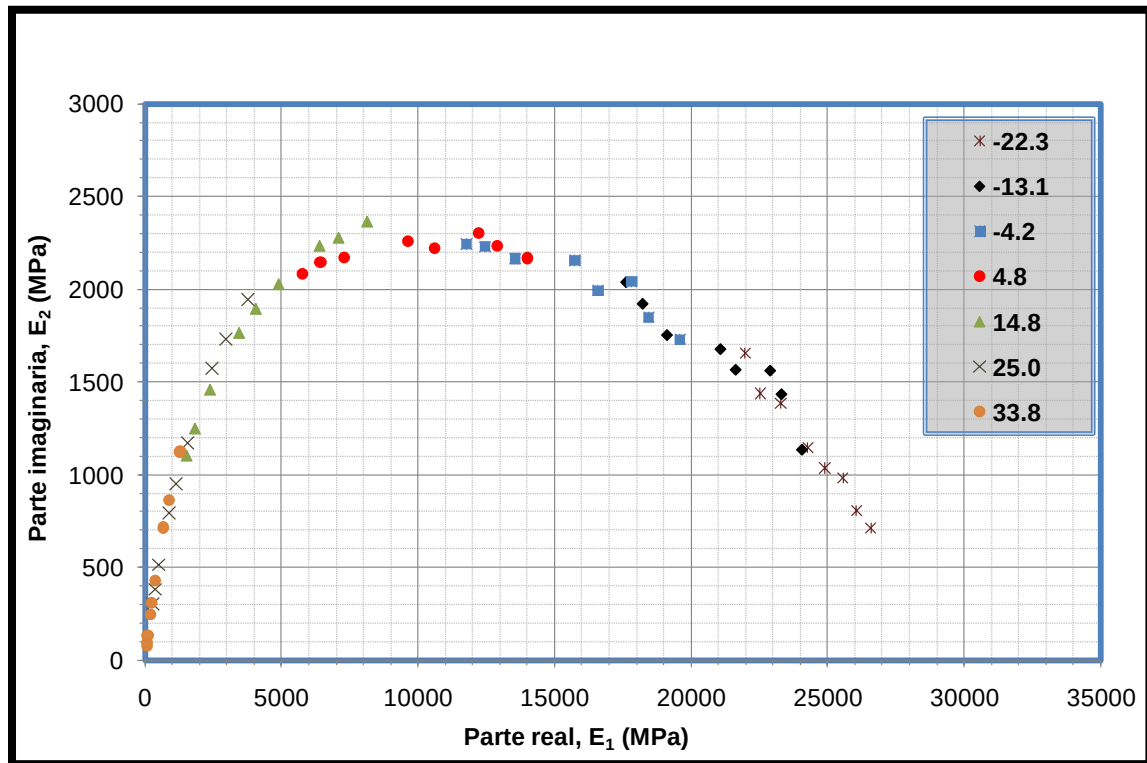


Figura 46 Plano de Cole-Cole,

5.1.4 Curva en el Espacio de Black.

Esta representación traza el logaritmo de la norma del módulo complejo $|E^*|$ (ordenada) en función del ángulo de fase (abscisa) correspondiente. Los valores del ángulo de fase son graficados en orden creciente de derecha a izquierda. Al igual que en la grafica de Cole-Cole, cuando en material cumple con el principio de equivalencia-temperatura se define una curva única que es característica del material.

La grafica de Black es utilizada para representar las zonas con valores de módulo bajo y en particular la disminución del ángulo de fase para las temperaturas altas.



La figura 47 presenta la gráfica de Black de una mezcla asfáltica, probeta BBL3C2A.

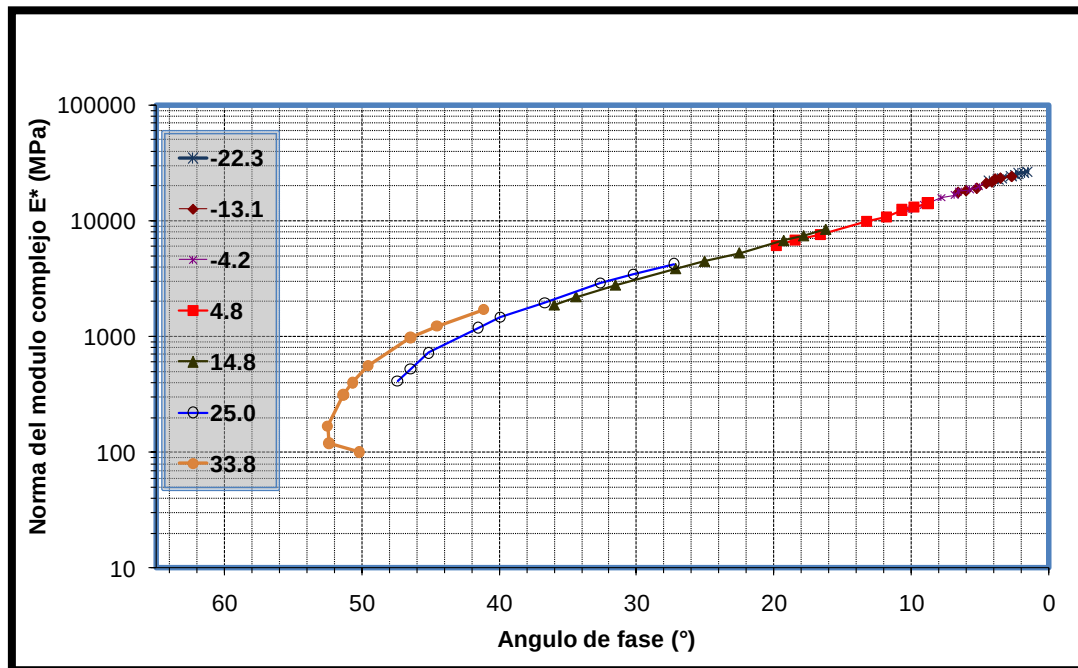


Figura 47 Grafica de Black

5.2 PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA TIEMPO-TEMPERATURA (CURVA MAESTRA)

El módulo es una función de dos variables: la frecuencia o pulsación (ω) y la temperatura (T). La propiedad de equivalencia tiempo-temperatura implica que se puede representar el módulo utilizando una variable reducida, $\omega^*f(T)$. Los materiales que cumplen este principio son llamados Termo-reológicamente simple.

Esta propiedad permite construir una curva única $\log(|E^*|)$ en función de $\log(f_r) = \log(2\pi/\omega)$ para una temperatura de referencia T_R fijada arbitrariamente. Para construir esta curva, es necesario trasladar, paralelamente al eje de las abscisas, cada isoterma T con relación a la isoterma de referencia T_R , hasta tener una superposición de los puntos de todas las isotermas. El valor del coeficiente de traslación de cada isoterma T es $\log(a_T)$, donde a_T es una función de la temperatura que verifica las propiedades siguientes:



$$E^*(\omega, T) = E^*(\omega \cdot a_T, T_R) \quad (31)$$

$$(T = T_R) = a_{T_R} = 1 \quad (32)$$

$$a_T = \frac{f(T)}{f(T_R)} \quad (33)$$

La curva que se obtiene se llama "Curva Maestra" (master curve). Esta curva es característica del material y permite determinar valores de módulo en frecuencias que no pueden ser obtenidas en un ensayo de laboratorio. Figura 48

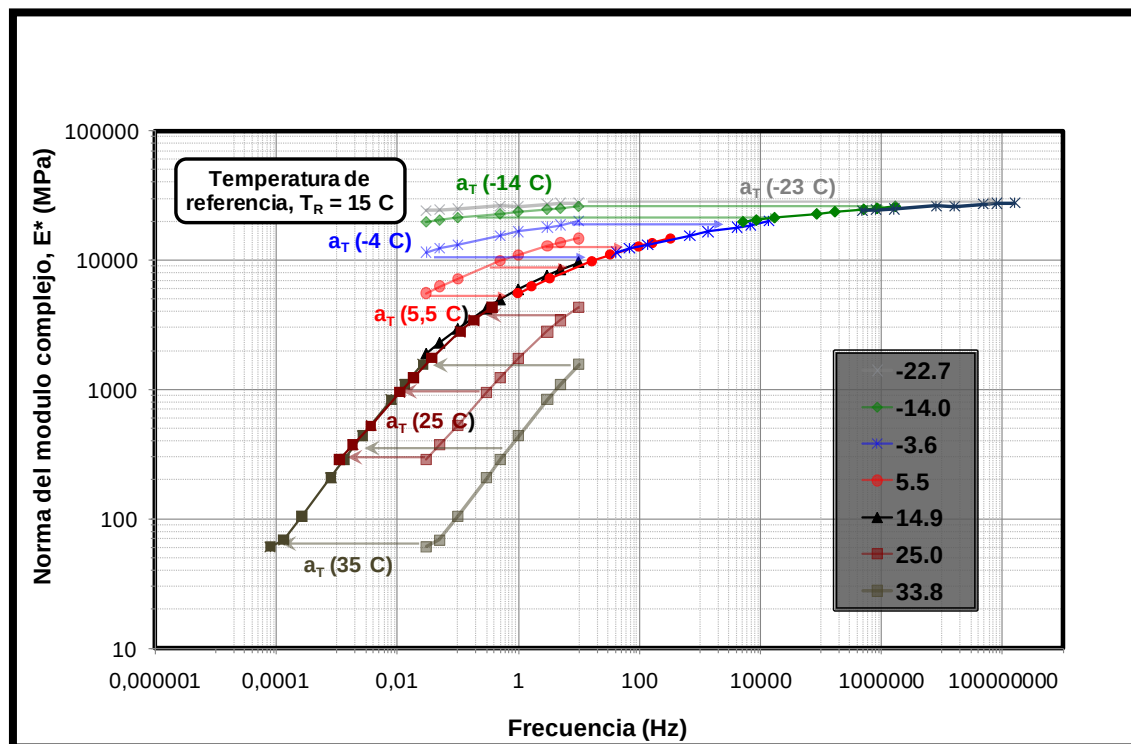
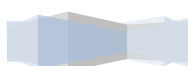


Figure 48 Curva maestra del módulo complejo, $T_{\text{ref}} = 15^\circ\text{C}$.



Así como se traza una curva maestra de modulo dinámico se debe trazar una curva única de ángulo de fase, figura 49.

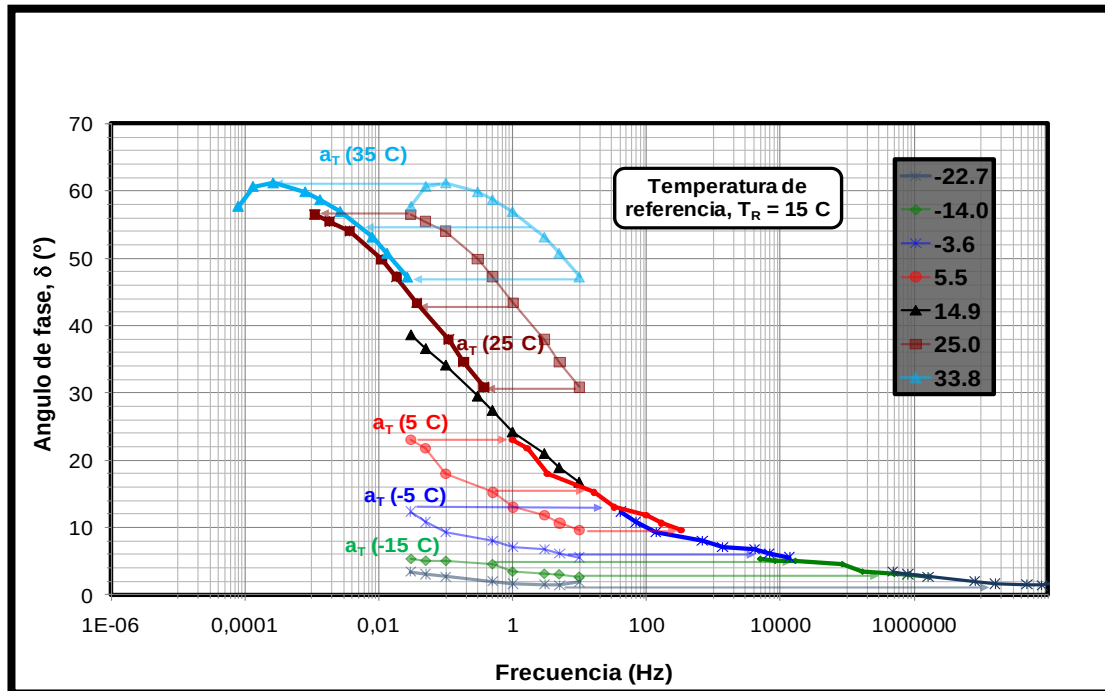


Figure 49. Curva maestra del ángulo de fase, $T_{ref} = 15^{\circ}\text{C}$.

Existen diversas expresiones de $\log a_T$. Las más utilizadas son las siguientes:

- La formula **WLF** (William/Landel/Ferry)
- Una fórmula de tipo Arrhénius
- Una fórmula del LCPC, Francia



5.2.1 Formula WLF (WILLIAM/LANDEL/FERRY)

La **ecuación de Williams-Landel-Ferry** (o **ecuación WLF**) es una ecuación empírica asociada a la superposición de tiempo-temperatura .

El empírico Williams-Landel-Ferry ecuación (ecuación WLF)

$$\log a_t = - \frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (34)$$

La ecuación se puede usar para encajar (retroceso) valores discretos del factor de desplazamiento a_T vs temperatura. Aquí, T es la temperatura de referencia elegida para construir la curva maestra compleja y C_1 , C_2 son constantes empíricas ajustadas para adaptarse a los valores de una T_r . Valores del factor de cambio de una T_r se obtienen por el registro de desplazamiento horizontal (una T_r) de fluencia datos de cumplimiento trazan en función del tiempo o de la frecuencia en escala logarítmica doble de modo que un conjunto de datos obtenidos experimentalmente a la temperatura T superpone con el conjunto de datos a la temperatura T_r . Un mínimo de tres valores de T_r son necesarios para obtener C_1 , C_2 , y típicamente más de tres se utilizan.

Una vez construida, la ecuación WLF permite la estimación del factor de cambio de temperatura para temperaturas diferentes de aquellos para los que se puso a prueba el material. De esta manera, la curva maestra se puede aplicar a otras temperaturas. Sin embargo, cuando las constantes se obtienen con datos a temperaturas superiores a la temperatura de transición vítrea (T_g), la ecuación WLF es aplicable a temperaturas en o por encima de T_g sólo T_g ; las constantes son positivas y representan el comportamiento Arrhenius. La extrapolación a temperaturas por debajo de T_g es errónea. Cuando las constantes se obtienen con datos a temperaturas inferiores a T_g , los valores negativos de C_1 , C_2 se obtienen, que no son aplicables por encima de la T_g y no representan el comportamiento de Arrhenius. Por lo tanto, las constantes obtenidas por encima de T_g no son útiles para predecir la respuesta del polímero para aplicaciones estructurales, que necesariamente debe funcionar a temperaturas por debajo de T_g .

La ecuación WLF es una consecuencia de la superposición de tiempo-temperatura (TTSP), que matemáticamente es una aplicación del principio de superposición de Boltzmann. Es TTSP no, WLF, que permite el montaje de una curva maestra de cumplimiento que se extiende por más tiempo o de la frecuencia, que ofrece el tiempo disponible para la experimentación o el rango de frecuencia de la instrumentación, tal como analizador mecánico dinámico (DMA) .

Mientras que el lapso de tiempo de una curva maestra TTSP es amplia, de acuerdo con Struik, es válido sólo si los conjuntos de datos no sufren de los efectos del envejecimiento durante el tiempo de prueba. Incluso entonces, la curva maestra





representa un material hipotético que no envejece. Teoría efectiva del tiempo. Tiene que ser utilizado para obtener la predicción útil para el tiempo a largo plazo.

5.2.2 Fórmula de Tipo **ARRHÉNIUS**

La ecuación de Arrhenius es una expresión matemática que se utiliza para comprobar la dependencia de la constante de velocidad (o cinética) de una reacción química con respecto a la temperatura a la que se lleva a cabo esa reacción. La ecuación fue propuesta primeramente por el químico holandés J. H. van 't Hoff en 1884; cinco años después en 1889 el químico sueco Svante Arrhenius dio una justificación física y una interpretación para la ecuación. Actualmente, es vista mejor como una relación empírica. Puede ser usada para modelar la variación de temperatura de coeficientes de difusión, población de vacancias cristalinas, velocidad de fluencia, y muchas otras reacciones o procesos inducidos térmicamente.

$$\log(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (35)$$

Con δH , la energía aparente de activación característica del material; R, la constante de gas perfecto ($8,314 \text{ J.mole}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T y T_R expresados en K

5.2.3 Fórmula del **LCPC, FRANCIA**

La fórmula del LCPC desarrollada en Francia se define a continuación

$$\text{Log}(a_T) = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 \quad (36)$$

Siendo

A_0 , A_1 et A_2 tres constantes.

La Figura 50 presenta los diferentes valores de a_T , para el caso particular de este trabajo se utilizó la fórmula de WLF, a una temperatura de referencia T_R de 15°C .



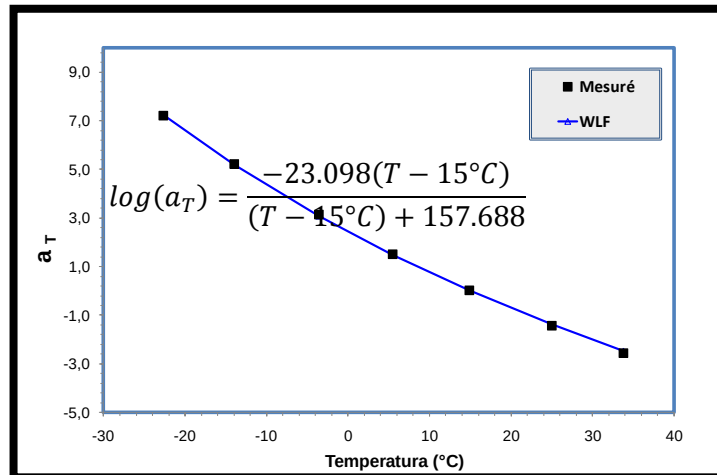


Figure 50. Evaluación de la formula WLF para los diferentes de a_T - Temperatura.

5.3 PREDICCIÓN Y MODELIZACIÓN DEL ENSAYO DEL MÓDULO COMPLEJO.

Los ensayos de módulo complejo (módulo dinámico) suelen ser muy tardados y costosos, por lo tanto para minimizar el tiempo y gasto en estos ensayos se desarrollaron algunas ecuaciones de predicción y modelos reológicos, para con estos encontrar valores de modulo complejo rápidamente para tener noción del comportamiento de las mezclas asfálticas con los distintos asfaltos simples y modificados.

A continuación se presentan las ecuaciones de predicción y modelos reológicos mas utilizados para el análisis y modelización de resultados del ensayo de módulo complejo.

5.3.1 ECUACIONES DE PREDICCIÓN DEL MÓDULO COMPLEJO.

La realización del ensayo del módulo complejo en mezclas asfálticas son largos y costosos, por lo que numerosos investigadores han desarrollado diversas ecuaciones para predecir el valor del módulo complejo. Estas ecuaciones generalmente están basadas en parámetros de composición de la mezcla o parámetros de frecuencia-temperatura.



5.3.1.1 Modelo de Hirsch

Este modelo permite la estimación del módulo complejo de la mezcla asfáltica a partir de los datos de rigidez del asfalto (G^*) y las propiedades volumétricas de la mezcla.

$$|E^*|_{mezcla} = P_c \left[4\,200\,000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_{asfalto} \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10\,000} \right) \right] + \frac{1-P_c}{\left[\frac{\left(1 - \frac{VMA}{100} \right)}{4\,200\,000} + \frac{VMA}{3\,VFA\,|G^*|_{asfalto}} \right]} \quad (37)$$

Donde

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA \cdot 3\,|G^*|_{asfalto}}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \cdot 3\,|G^*|_{asfalto}}{VMA} \right)^{0.58}} \quad (38)$$

$|E^*|$ = Módulo complejo de la muestra, psi

VMA = Vacíos en el agregado Mineral, %

VFA = Vacíos llenados con asfalto, %

$|G^*|_{asfalto}$ = Módulo dinámico de corte del asfalto, psi

5.3.1.2 Ecuación sigmoideal (Witzack).

La función sigmoideal está basada en cuatro parámetros, y toma como base la dependencia que tiene la curva maestra al valor de frecuencia reducida.

Los parámetros de calibración δ y α dependen de la granulometría, contenido de asfalto y vacíos de aire. Los otros dos parámetros β y γ dependen de las características del asfalto y de la magnitud de los parámetros δ y α .

La dependencia del módulo a la temperatura es incorporada mediante el parámetro de frecuencia reducida ω_r . La ecuación 39 define la frecuencia reducida como la frecuencia actual de carga multiplicada por el factor de a_T .

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log \omega_r)}} \quad (39)$$





$|E^*|$ = módulo complejo,

ω_r = frecuencia reducida, Hz,

δ = mínimo valor de $|E^*|$,

$\delta + \alpha$ = máximo valor de $|E^*|$,

β y γ = parámetros que describen la forma de la función sigmoideal

$$\omega_r = a_T * \omega \quad (40)$$

$$\log(\omega_r) = \log \omega + \log a_T \quad (41)$$

Dónde:

ω_r = frecuencia reducida, Hz,

ω = frecuencia de carga, Hz,

a_T = coeficiente de traslación,

T = temperatura.

Es importante señalar que esta ecuación de predicción esta calibrada a partir de la curva maestra del módulo complejo $|E^*|$.

5.3.2 Modelos Reológicos.

Como ya se mencionó anteriormente estos modelos reducen el tiempo y gasto para conocer el comportamiento de las mezclas asfálticas y/o encontrar el valor del módulo complejo. Diferentes modelos que combinan materiales ideales han sido utilizados para describir el comportamiento viscoelástico lineal de las mezclas asfálticas. Las combinaciones más simples son los modelos de Maxwell y de Kelvin-Voigt. La generalización de estos modelos permite una descripción satisfactoria del comportamiento de materiales asfáltico, siempre y cuando el número de elementos utilizados sea mínimo de 8 ($n = 8$).

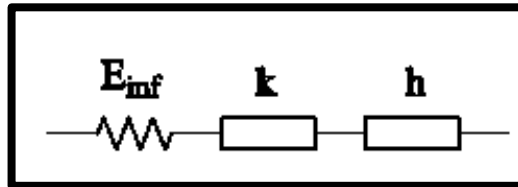
5.3.2.1 Espectros continuos

Los modelos reológicos de base mencionados en el capítulo III como son el modelo Maxwell o Kelvin-Voigt generalizados no son siempre apropiados para describir un comportamiento viscoelástico lineal complejo. La utilización de un modelo con un número infinito de elementos de Maxwell o Kelvin-Voigt da como resultado un espectro continuo estos se basan en los modelos reológicos bases. El cual modeliza de mejor forma el comportamiento de las mezclas asfálticas, algunos de estos modelos son el **Modelo Huet**, **Modelo Huet-Sayegh**, **Modelo 2S2P1D**.



5.3.2.2 Modelo Huet

El primer modelo propuesto para modelizar el comportamiento de asfaltos y mezclas asfálticas, fue el modelo de Huet (esquema 7). Este modelo asocia un resorte de rigidez E_{∞} (representa el modulo instantáneo) y dos elementos de fluencia parabólicos en serie. Se han realizado diversas mejoras a este modelo como es el modelo Huet-Sayegh.



Esquema 7. Modelo de Huet

La fórmula para calcular el módulo complejo con el modelo Huet es la siguiente:

$$E^*(\omega) = \frac{E_{inf}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (42)$$

Donde

ω = pulsación

τ = parámetro dimensión de un tiempo aparente a un tiempo de retardo cuyo valor varía con la temperatura,

H, K, δ = parámetros de elementos parabólicos del modelo, comprobar betún y asfalto $0 < k < h < 1$;

E_{inf} = módulo instantáneos de la modelo obtenido cuando tiende a ω_{τ} las frecuencias tienden a infinitas o de alta o de baja temperatura.

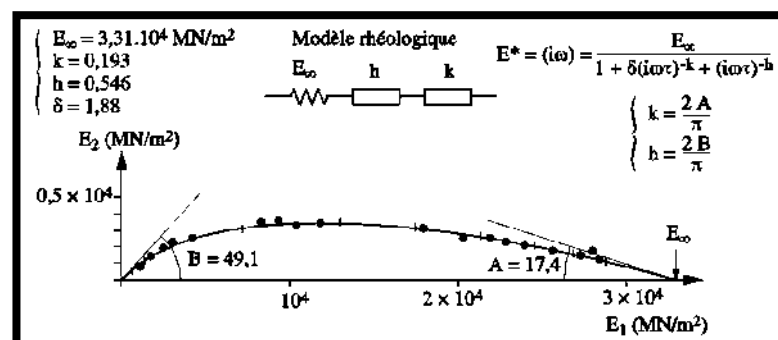
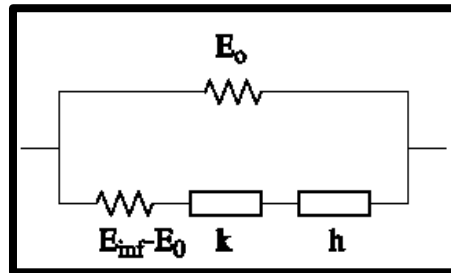


Figura 51. Determinación grafica de los parámetros de h y k del modelo de Huet en el plano de Cole-Cole.



5.3.2.3 Modelo Huet-Sayegh

Este modelo consta de dos ramas paralelas, donde el número tiene un resorte y dos amortiguadores parabólicos (esquema 8). Y como un conjunto de elementos en serie, tiene la deformación experimentada por esta rama cuando se aplica un voltaje a la misma, constituye la suma de deformaciones de los elementos que lo componen. Así, la función de la fluidez que resulta de esta rama es la suma de las funciones de la fluidez de estos elementos. El II rama comprende un muelle, comportamiento correspondiente a la estática y largo plazo un material bituminoso.



Esquema 8. Modelo Huet-Sayegh

Teniendo en cuenta la forma, el modelo consiste en Huet-Sayegh (1965), no es uno que se puede ajustar en una simple ecuación analítica para la función de la fluencia, debido a la interdependencia entre las dos ramas de la modelo. Así, en la ausencia de los mismos, se utiliza la ecuación que describe la función de la rama de fluencia I del modelo, de la siguiente forma:

$$E^*(\omega) = E_0 \frac{E_{inf} - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (43)$$

Donde

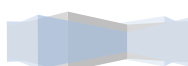
ω = pulsación

τ = parámetro dimensión de un tiempo aparente a un tiempo de retardo cuyo valor varía con la temperatura,

H, K, δ = parámetros de elementos parabólicos del modelo, comprobar betún y asfalto $0 < k < h < 1$;

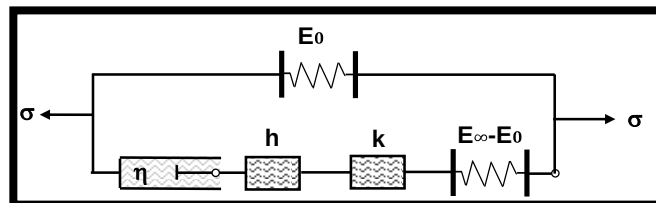
E_{inf} = módulo instantáneos de la modelo obtenido cuando tiende a ω_τ las frecuencias tienden a infinitas o de alta o de baja temperatura.

E_0 = Módulo Plástico



5.3.2.4 Modelo 2S2P1D

El modelo 2S2P1D consiste en una generalización del modelo de Huet-Sayegh (esquema 9). Se ha demostrado que este es un modelo preciso para la determinación del comportamiento viscoelástico lineal (rango de pequeñas deformación) de materiales asfálticos. La expresión del módulo complejo del modelo se presenta en la ecuación 44. Este modelo requiere de solo 7 constantes (E_{00} , E_0 , δ , h , η , τ) para una temperatura dada.



Esquema 9. Modelo reológico 2S2P1D.

$$E_{2S2P1D}^*(j\omega\tau) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (44)$$

Donde

j es el numero complejo definido por $j^2 = -1$

ω es la pulsación, $\omega = 2\pi f$, (f es la frecuencia)

k, h exponentes tal que $0 < k < h < 1$

δ = una constante

E_{00} = módulo estático, cuando $\omega \rightarrow 0$

E_0 = módulo vítreo, cuando $\omega \rightarrow \infty$

η = viscosidad newtoniana, $\eta = (E_0 - E_{00}) \beta \tau$

τ = tiempo característico, su valor depende solamente de la temperatura, τ evoluciona aproximadamente a la ley WLF.

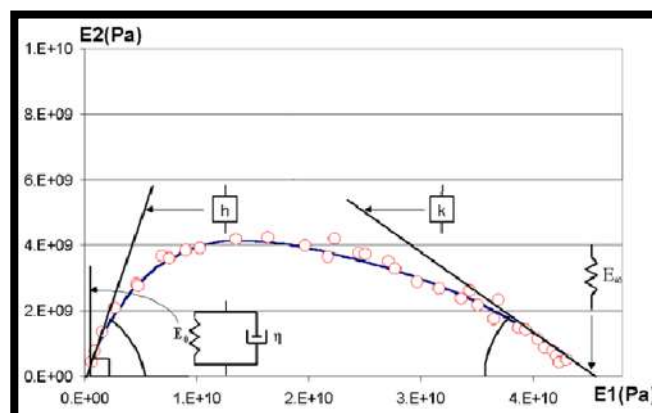
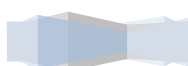


Figure 52. Calibración del modelo 2S2P1D, a partir del plan Cole-Cole.



CAPITULO VI "EJEMPLO PRÁCTICO"

6.1 EJEMPLO PRÁCTICO.

Se presenta un ensayo práctico para ilustrarlo lo mencionado en los capítulos anteriores de este trabajo y demostrar cual es la modelación más apropiada para las mezclas asfálticas.

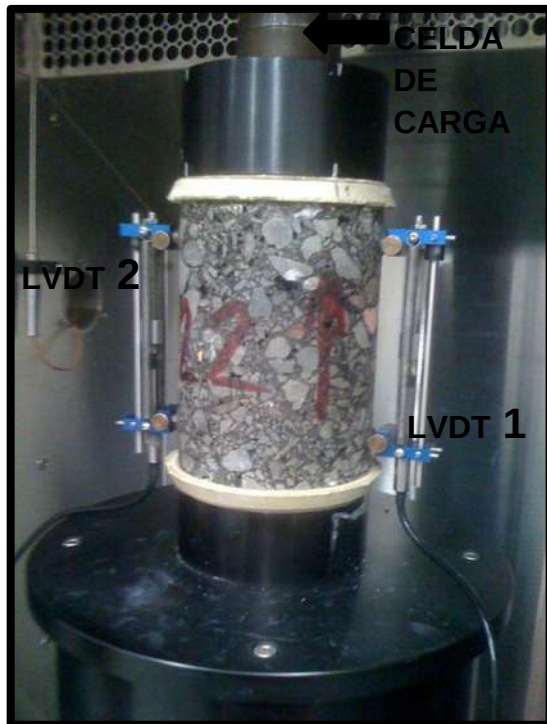
Para realizar el ejemplo práctico se realizó un ensayo de módulo complejo (módulo dinámico) en una mezcla asfáltica densa reforzada con fibras vegetal de 3 cm, en el equipo GCTS modelo ATM-025 a frecuencias de 0.03, 0.1, 0.3, 1.0, 3.0, 10.0 Hertz con temperaturas de -22.3, -13.1, -4.2, 4.8, 14.8, 25.0 y 33.8 °C. El ensayo comenzó como lo dice la norma AASHTO TP 62-07, cada uno de los especímenes de prueba, individualmente instrumentados con LVDTs, fueron ensayados para cada una de las combinaciones de temperatura y frecuencia de carga comenzando con la temperatura más baja y procediendo a la más alta. El ensayo a una temperatura dada comenzó con la frecuencia más alta de carga y procedió con la más baja.

Ahora se muestran una serie de imágenes del equipo, las muestras, dispositivos, montaje y del proceso del ensayo realizado de módulo complejo

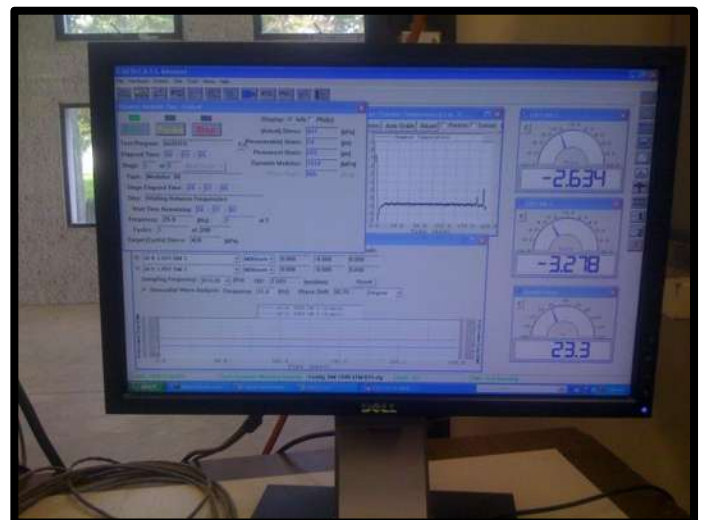


Figuras 53 y 54. Espécimen del ensayo de módulo complejo





Figuras 55 y 56. Montaje y dispositivos del ensayo de módulo complejo



Figuras 57 y 58. Equipo y software del ensayo de módulo complejo



Figura 59. Ensayo de módulo complejo (módulo dinámico)

En las imágenes mostradas anteriormente se muestra como se corta el núcleo del espécimen (figura 53) para realizar el ensayo, también se muestra los pines que se le adicionan al espécimen con ayuda de una resina epóxica (figura 54) para colocar los dispositivos de denominados LVDTs y medir las microdeformaciones generadas por la celda de carga implementada en el equipo GCTS modelo ATM-025 para realizar el ensayo (figura 55 y 56).

Después de ilustrar el equipo utilizado en el ensayo de módulo complejo (módulo dinámico), ahora se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de módulo complejo, los valores de E^* y δ .

Tabla 15. Resultados de módulos y ángulos de fase del ensayo de Módulo Complejo (Módulo Dinámico) y los cálculos de E_1 y E_2 respectivamente.

La parte real $E_1 = |E^*| \cos(\delta)$ y la parte imaginaria $E_2 = |E^*| \sin(\delta)$.

A manera de ejemplo se ilustra el primer cálculo, para observar el procedimiento

$$E_1 = |E^*| \cos \delta \quad \text{sustituyendo} \quad E_1 = (22047) \cos(4.3) = 21985.224$$

$$E_2 = |E^*| \sin \delta. \quad \text{Sustituyendo} \quad E_2 = (22047) \sin(4.3) = 1651.837$$

DATOS DEL ENSAYO DE MODULO COMPLEJO					
Temperaturas	Frecuencias	E^*	δ	E_1^*	E_2^*
-22,3	0,03	22047	4,3	21985,22409	1651,837698
-22,3	0,05	22582	3,6	22536,3019	1436,855922
-22,3	0,1	23325	3,4	23283,49598	1383,741418
-22,3	0,5	24301	2,7	24274,34004	1143,32538
-22,3	1	24921	2,4	24899,68648	1032,838388
-22,3	3	25580	2,2	25560,73854	981,9445264
-22,3	5	26069	1,8	26056,3537	804,3404266
-22,3	10	26590	1,5	26580,3265	709,4564354
-13,1	0,03	17721	6,6	17603,2769	2037,479327
-13,1	0,05	18311	6,0	18209,81047	1918,999284
-13,1	0,1	19182	5,2	19102,05313	1750,654519
-13,1	0,5	21127	4,5	21060,58776	1675,876277
-13,1	1	21676	4,1	21619,1428	1563,523997
-13,1	3	22937	3,9	22883,71473	1560,489596
-13,1	5	23342	3,5	23297,647	1432,209984
-13,1	10	24076	2,7	24049,50233	1133,157233
-4,2	0,03	11982	10,8	11770,10466	2243,909758
-4,2	0,05	12657	10,1	12459,60618	2227,630725
-4,2	0,1	13729	9,1	13557,05603	2163,642206
-4,2	0,5	15891	7,8	15744,63002	2154,181999
-4,2	1	16709	6,9	16589,46561	1992,932824
-4,2	3	17943	6,5	17826,7249	2039,037636
-4,2	5	18548	5,7	18455,23688	1847,754223
-4,2	10	19673	5,0	19597,38831	1726,911531
4,8	0,03	6143	19,8	5778,513732	2083,121874
4,8	0,05	6780	18,5	6430,731993	2146,708791
4,8	0,1	7613	16,6	7296,555711	2172,219141
4,8	0,5	9886	13,2	9623,992636	2260,619633
4,8	1	10844	11,8	10613,82974	2220,139077
4,8	3	12427	10,7	12211,8632	2303,878904
4,8	5	13103	9,8	12911,5751	2231,931069
4,8	10	14162	8,8	13995,74307	2165,751084





14,8	0,03	1871	36,0	1514,314932	1099,311683
14,8	0,05	2205	34,4	1819,775698	1245,374964
14,8	0,1	2784	31,5	2373,101824	1455,232696
14,8	0,5	4472	25,0	4052,343639	1891,660582
14,8	1	5292	22,5	4888,911233	2024,543247
14,8	3	6768	19,3	6389,958519	2231,753561
14,8	5	7442	17,8	7085,72664	2275,575721
14,8	10	8471	16,2	8135,071022	2362,352845
25,0	0,03	411	47,4	278,0702176	302,6870594
25,0	0,05	527	46,5	362,9794368	381,9201983
25,0	0,1	723	45,1	509,6906611	512,3290603
25,0	0,5	1478	39,9	1134,03681	948,4368834
25,0	1	1959	36,7	1570,796706	1170,955389
25,0	3	2919	32,7	2457,121631	1575,315492
25,0	5	3434	30,2	2967,153138	1728,314462
25,0	10	4242	27,3	3769,565261	1944,429906
33,8	0,03	101	50,2	64,49157484	77,34527032
33,8	0,05	120	52,4	73,08860274	94,92830874
33,8	0,1	169	52,5	102,8247912	133,9914295
33,8	0,5	399	50,7	252,7245194	308,7468284
33,8	1	561	49,6	363,9220397	427,0004232
33,8	3	984	46,5	677,7848903	713,6870404
33,8	5	1229	44,5	876,1819574	862,1368617
33,8	10	1706	41,2	1284,030246	1122,660494

Después de mostrar los resultados en la tabla 15 ahora se procederá a representar los ángulos y módulos dinámicos en sus representaciones clásicas que son: **las Curvas Isotérmicas, Curvas Isócronas, Curva en el Plano Cole Cole (o plano complejo), Curva en el Espacio Black**



6.1.1 CURVAS ISOTÉRMICAS

La primer representación del módulo complejo (módulo dinámico) son las **Curvas Isotérmicas de módulo complejo y de ángulo de fase**; que no es mas que graficar en una escala bilogarítmica, los módulos complejos y ángulos de fase en el eje de las ordenadas contra sus frecuencias respectivamente en las abscisas para cada una de las temperaturas analizadas (valores obtenidos en el ensayo de módulo complejo y ángulo de fase de la tabla 15.). Esta representación nos permite conocer la variación del módulo con la velocidad de la sollicitación por medio de su pendiente.

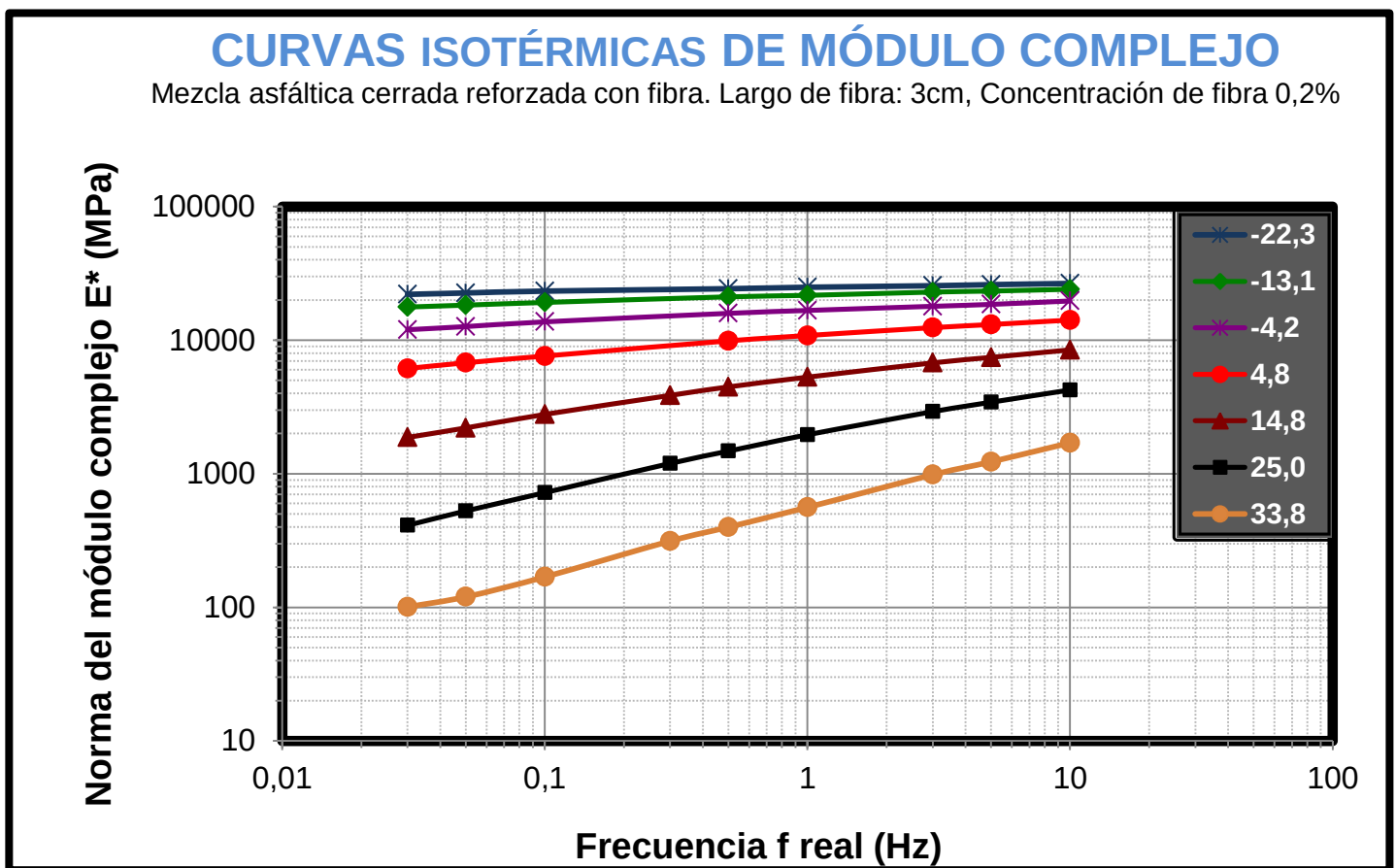


Figura 60. Curvas Isotérmicas del ejemplo practico

Se logra visualizar que a temperaturas bajas los valores de módulo son muy altos y a temperaturas altas este valor disminuye debido al comportamiento viscoelástico de la mezcla asfáltica. También se observa que las frecuencias bajas a las distintas temperaturas dan valores de módulos muy distintos, a diferencia que a frecuencias altas los valores de modulo no cambian tan drásticamente si no que su diferencia es mas pequeña.



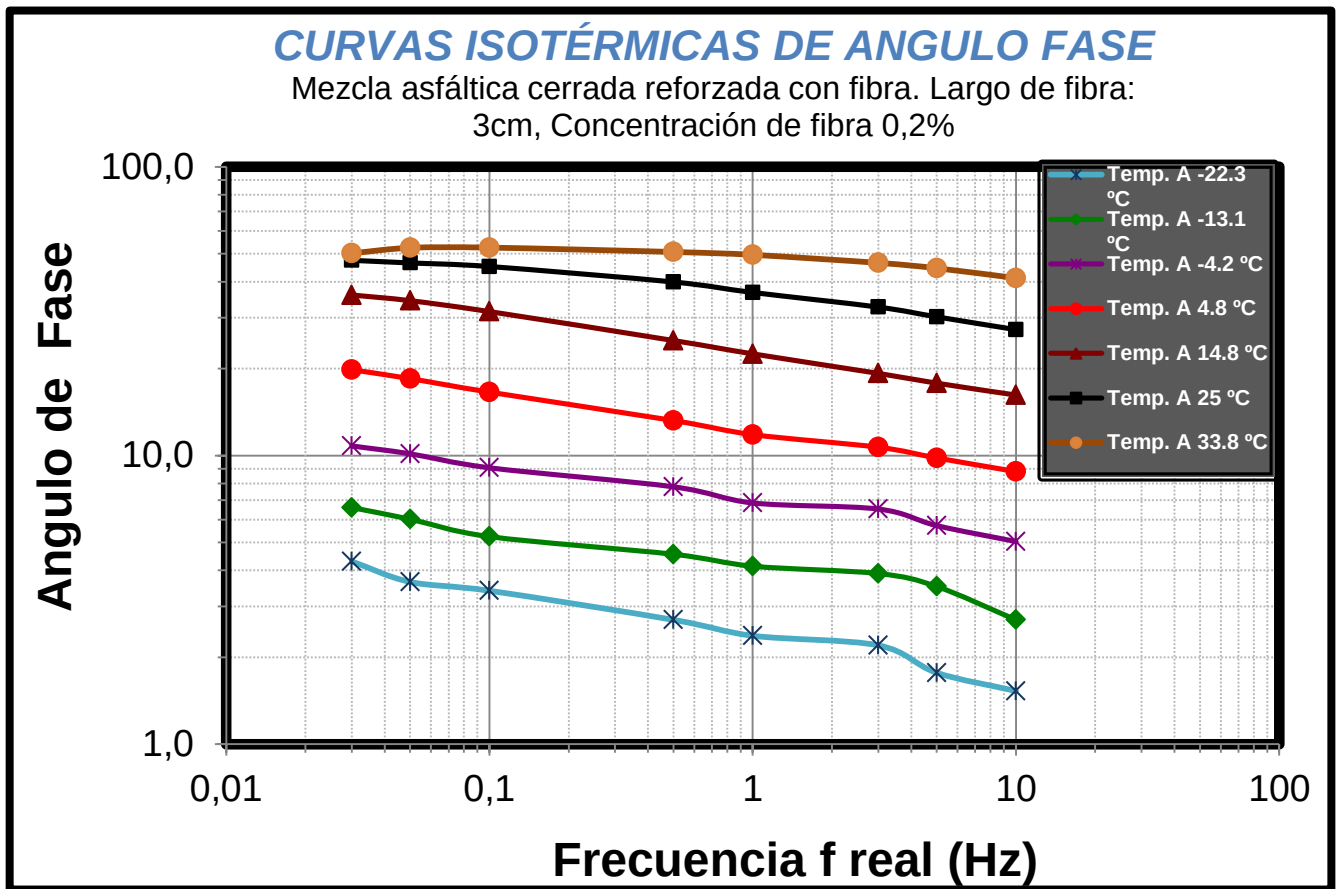


Figura 61. Curvas Isotérmicas de Angulo de Fase del ejemplo practico

Se observa en la grafica que a temperaturas altas el valor del ángulo de fase es mayor que a temperaturas bajas y se logra visualizar que a frecuencias bajas a las diferentes temperaturas los valores de ángulo disminuyen mas lentamente que a frecuencias altas, a diferencia del módulo complejo.



6.1.2 CURVAS ISÓCRONAS

La segunda representación clásica del módulo complejo es las **Curvas Isócronas**, que es graficar en una escala semilogaritmica en el eje de las ordenadas el módulo complejo y en las abscisas las temperaturas, para conocer la susceptibilidad térmica del módulo complejo a las diferentes temperaturas. Se grafico la tabla 15 de los datos obtenidos en dicho ensayo.

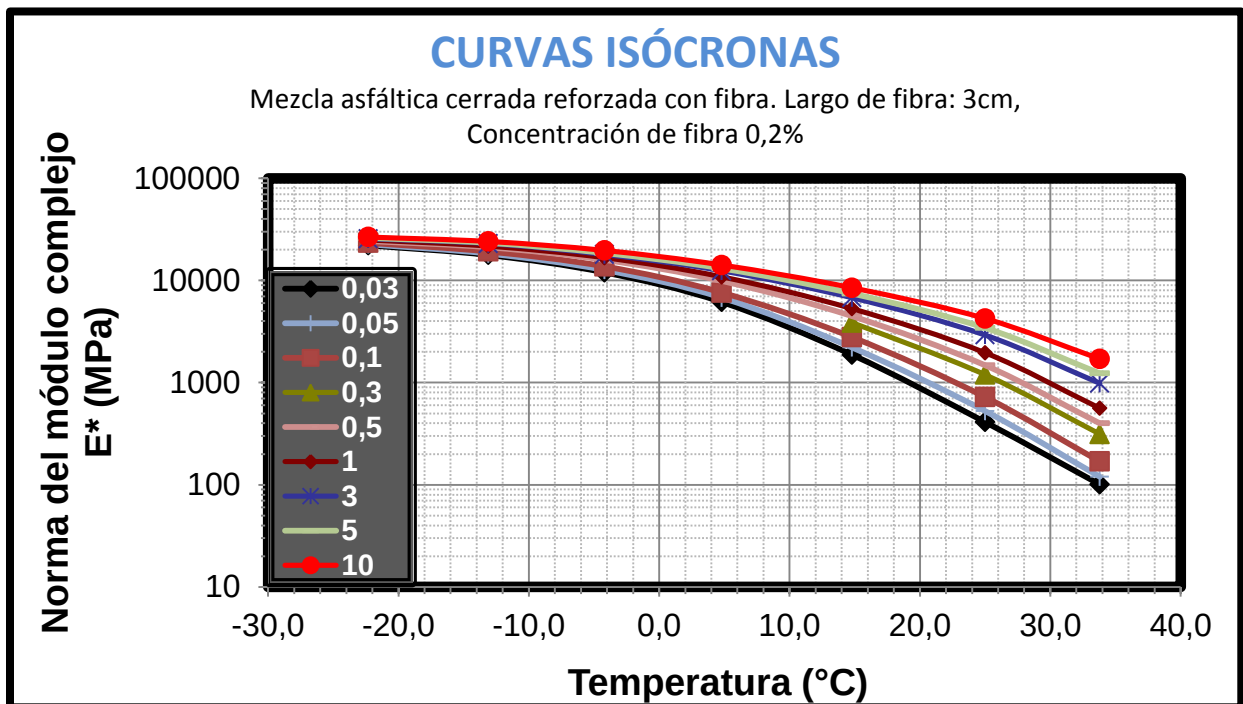


Figura 62. Curvas Isócronas del ejemplo practico

Después de realizar esta representación se ve claramente que las temperaturas bajas no influyen mucho en le valor de módulo complejo a diferencia que a temperaturas altas donde esta influye en gran parte en el valor del módulo complejo.



6.1.3 CURVA EN EL PLANO COLE-COLE (O PLANO COMPLEJO)

La tercera representación es la **Curva en el Plano Cole-Cole (o Plano Complejo)** en esta se grafica en las abscisas la parte real del módulo complejo E_1 y la parte imaginaria E_2 en la ordenada. Como ya se menciono antes esta curva puede ser utilizada para calibrar un modelo de comportamiento reológico. Debido a que el material obedece el principio de equivalencia frecuencia-temperatura, para graficar esta información se utilizo la tabla 15 con los valores de E_1 y E_2 .

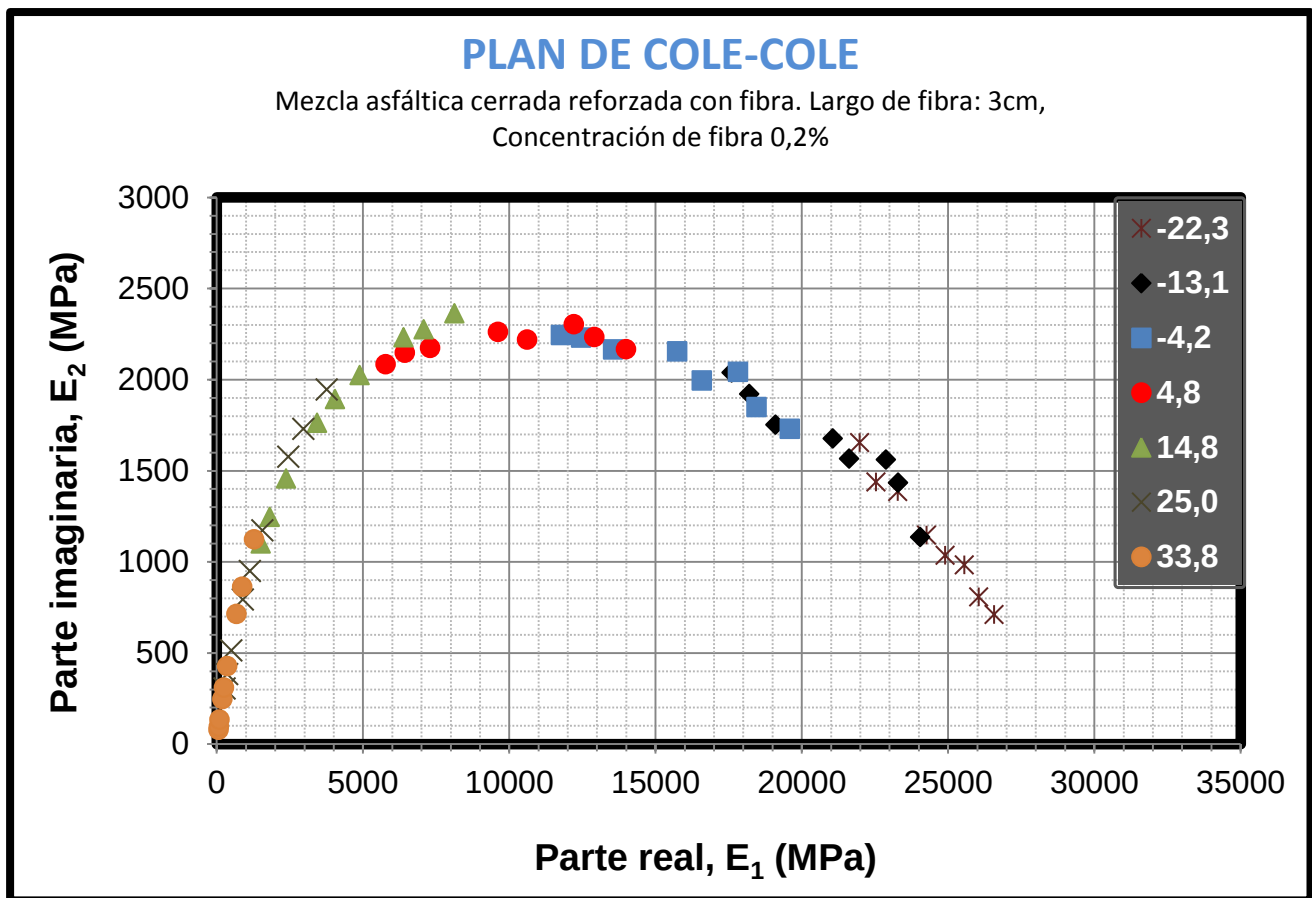


Figura 63. Curva en el plano Cole-Cole del ejemplo practico

Esta curva es única para cada mezcla asfáltica y nos indica el comportamiento de los módulos a diferentes temperaturas, se observa claramente que esta curva muestra mejor los módulos altos a temperaturas bajas ya que los módulos pequeños a temperaturas altas no los muestra muy claramente ya que estos valores están muy empalmados.



6.1.4 CURVA EN EL ESPACIO DE BLACK.

La cuarta representación clásica es la **Curva en el Espacio de Black**. Esta representación traza el logaritmo de la normal del módulo complejo $|E^*|$ en el eje de las ordenadas y en función del ángulo de fase en las abscisa. Los valores del ángulo de fase son graficados en orden creciente de derecha a izquierda. La grafica de Black es utilizada para representar las zonas con valores de módulo bajo y en particular la disminución del ángulo de fase para las temperaturas altas como ya se menciono en el capitulo anterior. Esta grafica se obtuvo a partir de los datos de la tabla 15 de los módulos y ángulos de fase.

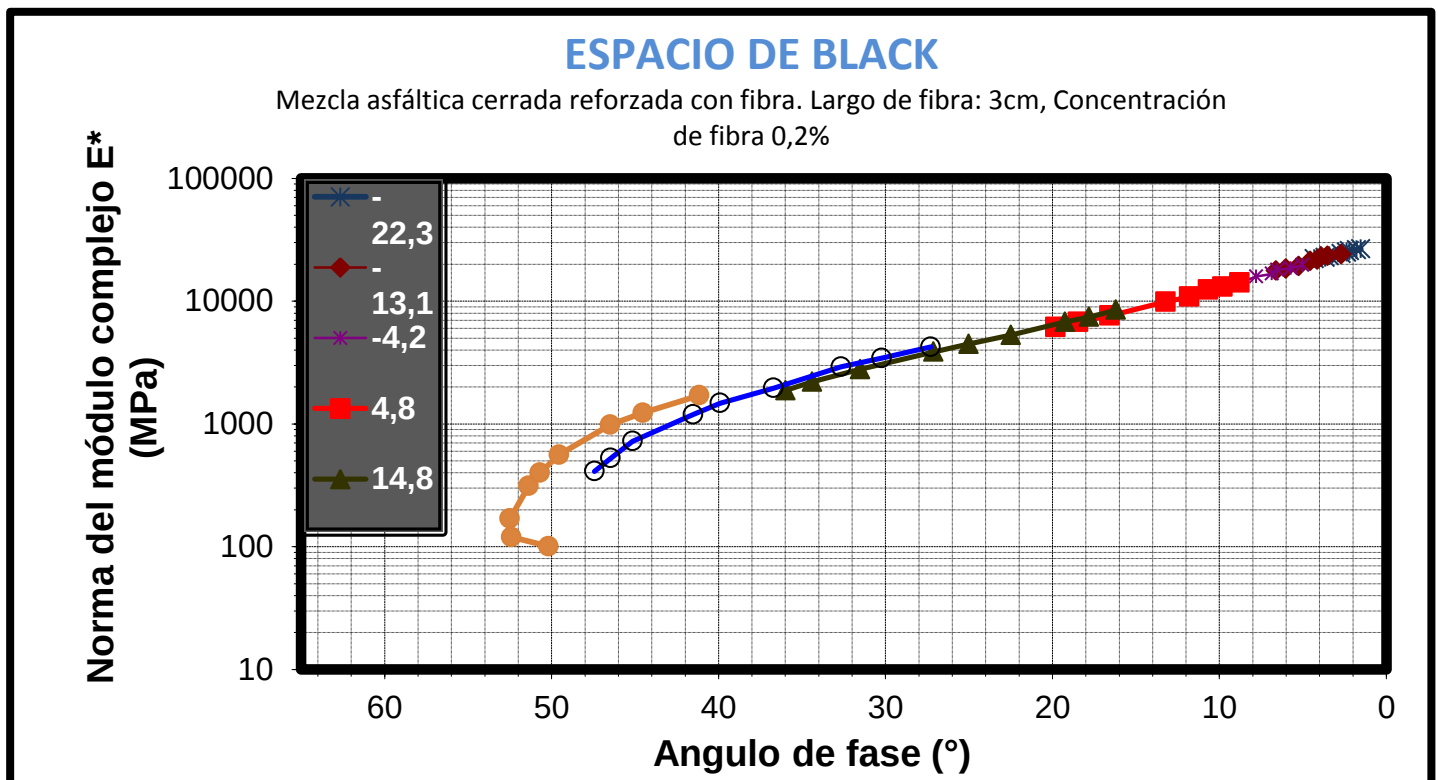


Figura 64. Curva en el Espacio de Black del ejemplo practico

A diferencia de la curva en el plano cole-cole esta curva muestra perfectamente el comportamiento de los módulos complejos pequeños a temperaturas altas y los módulos altos a temperaturas bajas ya no se observa tan claramente, por que los datos están muy encimados.

Por lo tanto se llego a la conclusión de que todas las representaciones clásicas son complementarias una con otra y su correcta elaboración nos dará una mayor información al respecto de la mezcla asfáltica en evaluación.



6.1.5 CURVA MAESTRA DEL MÓDULO COMPLEJO

Después de graficar las cuatro primeras representaciones se prosigue a graficar la curva única de la mezcla asfáltica llamada "Curva Maestra" que no es mas que desplazar los valores obtenidos en el ensayo teniendo como temperatura de referencia la temperatura ambiente con ayuda del principio de equivalencia tiempo-temperatura explicado en el capítulo V, en este caso como ejemplo practico se tomo una temperatura de referencia de 15°C tanto para Módulo Complejo, como para Angulo de Fase, esta curva maestra se grafica en la representación clásica de las isothermas debido a que se realiza en una escala bilogarítmica que es donde mejor se puede visualizar, para esto existen diversos métodos de graficación, el primero es el método manual donde se desplazan cada curva de las isothermas la mayor cantidad de puntos que logren tocar a la temperatura de referencia tanto temperaturas superiores o inferiores a ella y el valor de desplazamiento será el promedio de todos los desplazamientos hechos de cada punto de unión entre las 2 curvas. El segundo es por medio de la herramienta de Excel multiplicando los valores de las frecuencias por un factor de desplazamiento y de forma iterativa ir desplazando cada curva hasta que estas se unan para formar la "curva maestra" (figuras 65 y 66).

Como ejemplo practico se muestra como se desplazaron las curvas isotérmicas a la curva de referencia una de temperatura superior y otra inferior.

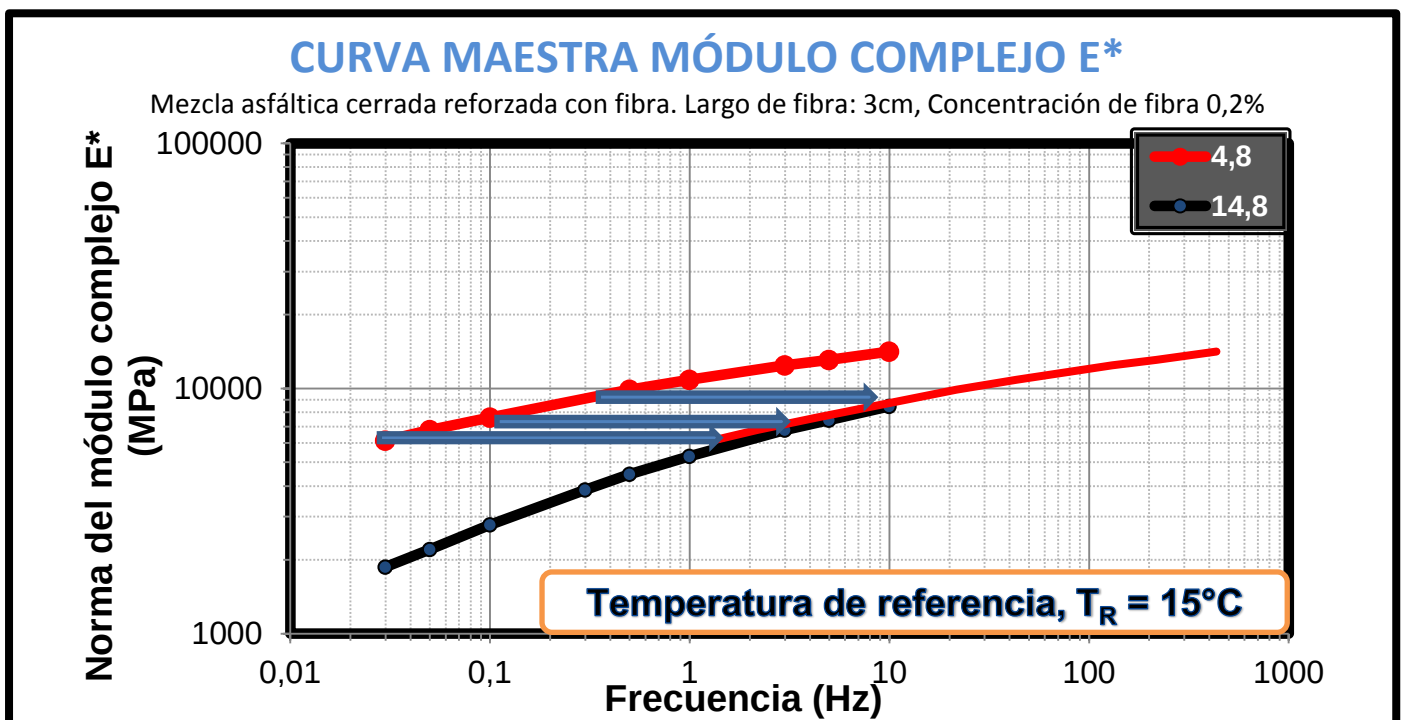


Figura 65. Traslación de la curva isotérmica de 4.8 °C a la curva de referencia.



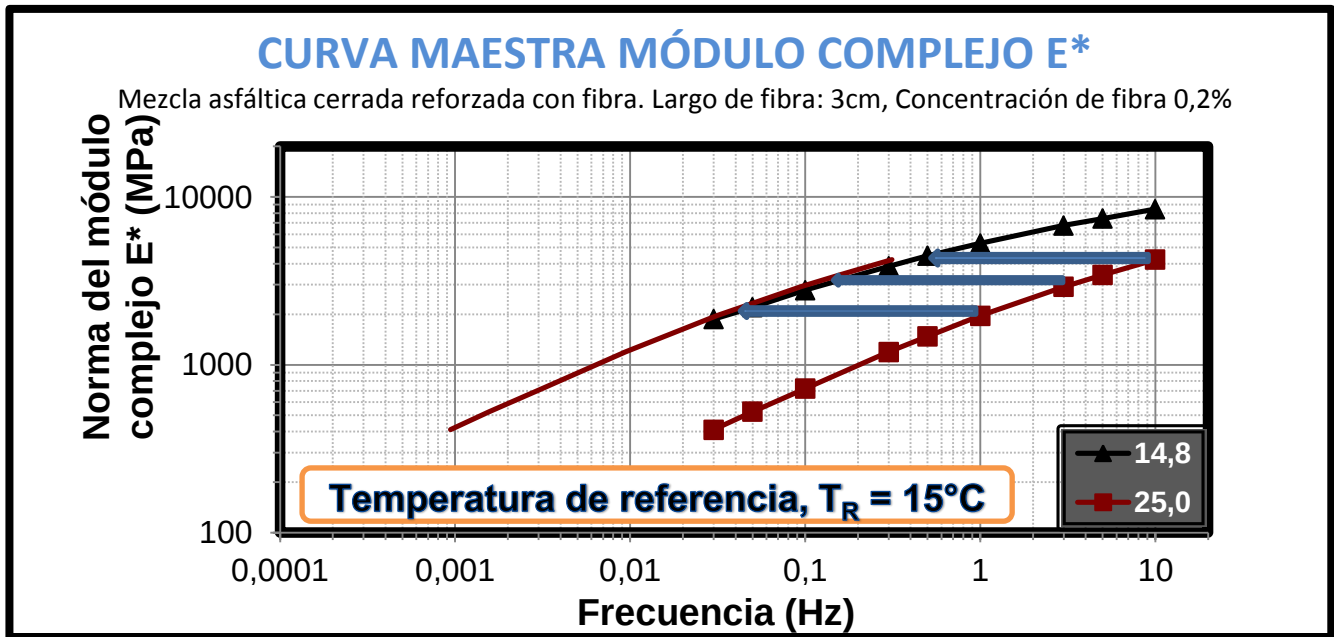


Figura 66. Traslación de la curva isotérmica de 25 °C a la curva de referencia

Después de explicar la elaboración de la curva maestra se presentan las curvas maestras de módulo complejo y ángulo de fase respectivamente.

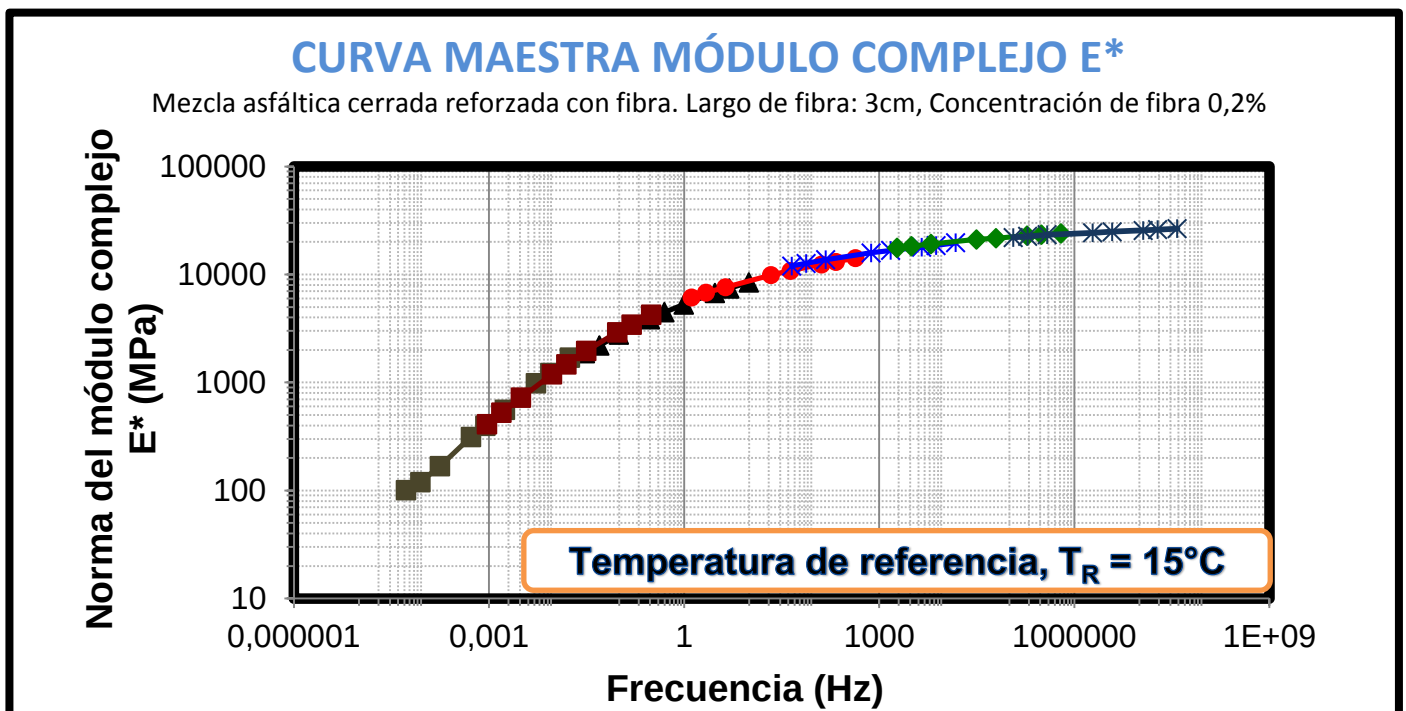


Figura 67. Curva Maestra del Módulo Complejo del ejemplo practico



Ahora se muestra la Curva Maestra del Angulo de Fase, cabe señalar que los valores de desplazamiento encontrados para la curva maestra de módulo complejo son los mismos para la curva maestra de ángulo de fase y se debe observar e iterar los valores de desplazamiento y decidir cuando las curvas están equilibradas con su mejor forma posible.

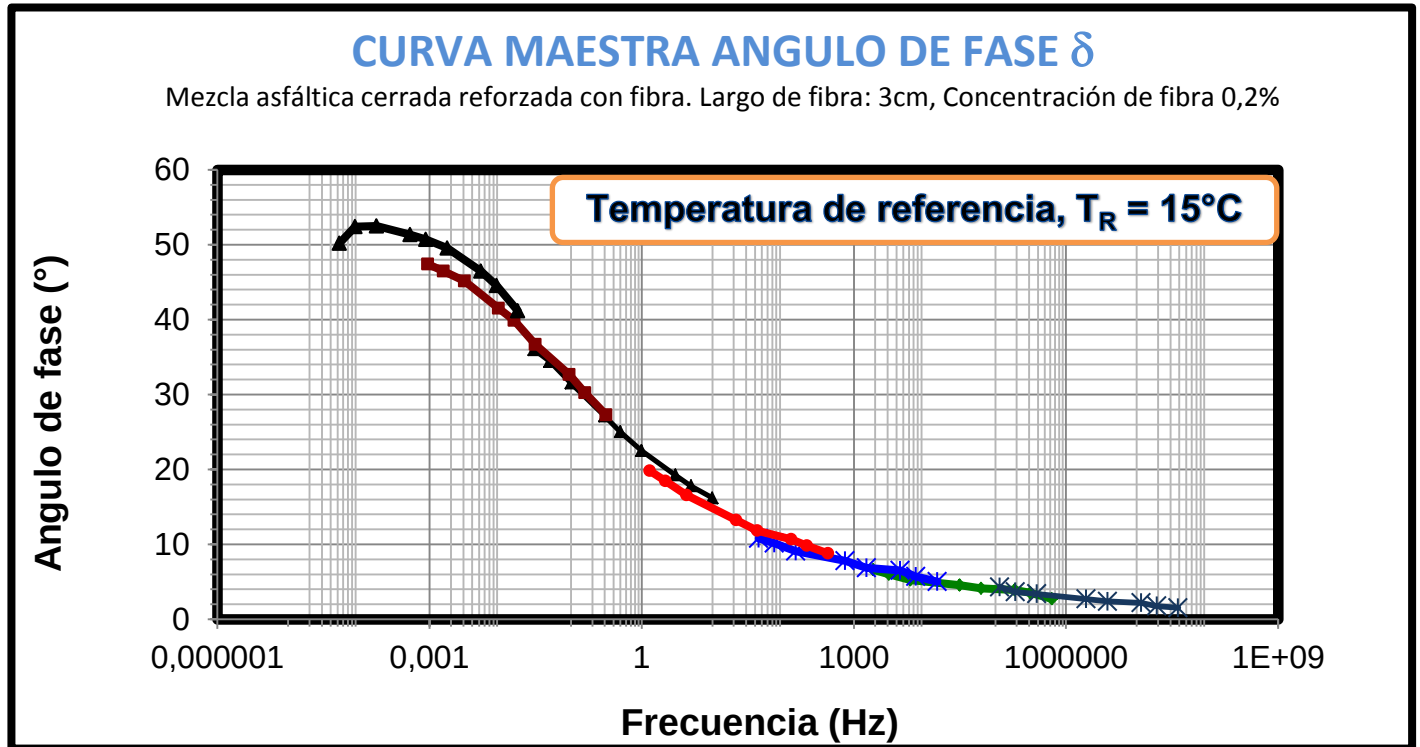
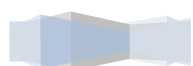


Figura 68. Curva Maestra del Angulo de Fase del ejemplo practico

Estas Curvas Maestras de Módulo y Angulo de Fase nos permiten determinar valores de módulo en frecuencias que no pueden ser obtenidas en un ensayo de laboratorio por restricciones del equipo y costos de realización.

Después de obtener las curvas maestras del módulo y ángulo de fase; junto con las representaciones clásicas es momento de hacer el análisis de calibración a nuestras curvas obtenidas del ensayo, pero primero se calculara el valor de desplazamiento ($\log aT$) de forma matemática con ayuda de la ecuación de William/Landel/Ferry.



6.1.6 WILLIAM/LANDEL/FERRY (WLF)

Después de realizar las curvas maestras de módulo complejo y ángulo de fase como se menciono anteriormente se debe calcular un factor de desplazamiento ($\log a_T$) de forma matemática, para esto existen diversos métodos, pero el más utilizado es el de William/Landel/Ferry (WLF) y este fue el que se utilizo en este trabajo. Estos valores de a_T se encontraron con la formula de WLF explicada en el capítulo V de forma iterativa con ayuda de las herramientas del software Excel. A continuación se muestran los valores de $\log a_T$ calculados (tabla 16).

DATOS DE LA CURVA MAESTRA DEL MÓDULO COMPLEJO		
Temperaturas	a_T	$\log a_T$
-22,3	3859758	6,59
-13,1	63031	4,80
-4,2	1509	3,18
4,8	43	1,63
14,8	1,1	0,04
25,0	0,03130	-1,50
33,8	0,00180	-2,74

Tabla 16. Tabla Resumen de los valores de $\log a_T$

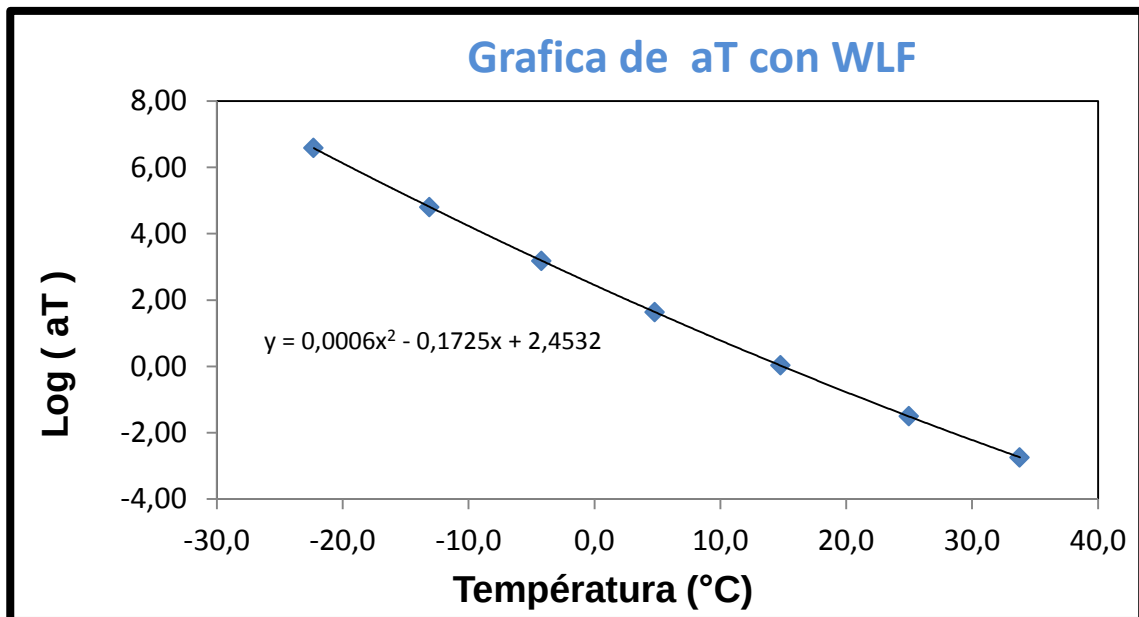


Figura 69. Curva de la grafica de a_T del ejemplo practico





Después de calcular el valor de desplazamiento ($\log a_T$) se llegó a la conclusión de que a temperaturas superiores a la de referencia los valores de $a_T < 1$ y para temperaturas inferiores a la de referencia $a_T > 1$.

Después de obtener las curvas maestras del módulo y ángulo de fase; junto con las representaciones clásicas es momento de hacer el análisis de calibración a nuestras curvas obtenidas del ensayo.

Por efectos prácticos se realizó la calibración para un modelo reológico (2S2P1D) y una ecuación de predicción (Ecuación Sigmoïdal de Witzack) que son los más utilizados.

6.1.7 ECUACIÓN SIGMOÏDAL WITZACK

La función sigmoïdal está basada en cuatro parámetros, y toma como base la dependencia que tiene la curva maestra al valor de frecuencia reducida.

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log \omega_r)}} \quad (39)$$

Donde:

$|E^*|$ = módulo complejo,

ω_r = frecuencia reducida, Hz,

δ = mínimo valor de $|E^*|$,

$\delta + \alpha$ = máximo valor de $|E^*|$,

β y γ = parámetros que describen la forma de la función sigmoïdal

$$\omega_r = a_T * \omega \quad (40)$$

$$\log(\omega_r) = \log \omega + \log a_T \quad (41)$$

Donde:

ω_r = frecuencia reducida, Hz,

ω = frecuencia de carga, Hz,

a_T = coeficiente de traslación,

T = temperatura.



1.- Primero debemos conocer los valores de los parámetros β , γ , δ y α que dependen de la granulometría y características del asfalto. Estos valores se calculan de forma iterativa y se detienen las iteraciones hasta que las curvas de módulo y ángulo de fase obtenidas con el ensayo estén posicionadas debajo de las curvas de la ecuación sigmoideal, en este caso se realizaron iteraciones con ayuda del método simplex para optimizar las iteraciones y minimizar el error. Donde simplemente se compara el valor del módulo obtenido en el ensayo con el calculado con cada iteración y se ve cual es su error dependiendo el número de datos, después el mayor error se distribuye en las otras iteraciones, hasta encontrar la iteración con el mínimo error.

Después de encontrar los valores de los parámetros β , γ , δ y α se procede a calcular los valores del módulo a distintas frecuencias propuestas como se muestra en la tabla 18.

Graficas de calibración de Witzack de la Curva Maestra del Módulo Complejo.

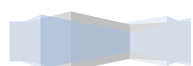
Tabla 17. Valores de los parámetros β , γ , δ y α en las iteraciones de la ecuación sigmoideal

Iteración 1	Iteración 2		Iteración 3		Iteración 4		Iteración 5	
α : 2,941	α :	2,941	α :	2,941	α :	2,941	α :	2,941
δ : 1,477	δ :	1,477	δ :	1,477	δ :	1,477	δ :	1,477
γ : -0,544	γ :	-0,533	γ :	-0,534	γ :	-0,534	γ :	-0,534
β : -1,199	β :	-1,165	β :	-1,164	β :	-1,165	β :	-1,166
Error 0,18254		0,187316		0,187440		0,187194		0,187045

Se observa en la tabla 17 que el error mínimo se encuentra en la columna 1 con un error de 0.18254, por lo tanto con estos parámetros se calcularán todos los módulos complejos

Tabla 18. Valores de los módulos complejos con la ecuación de Witzack

Frec. (Hz)	Log Frec. (Hz)	Log E*(est)	E*(est)
1,00E-100	-100,000	1,477	30,000
0,000000001	-9,000	1,548	35,322
0,00000001	-8,000	1,597	39,561
0,0000001	-7,000	1,678	47,671
0,0000003	-6,523	1,733	54,040
0,000001	-6,000	1,807	64,184
0,000003	-5,523	1,892	77,907
0,00001	-5,000	2,004	100,837
0,00003	-4,523	2,125	133,459





0,0001	-4,000	2,280	190,760
0,0003	-3,523	2,441	275,858
0,001	-3,000	2,633	429,777
0,003	-2,523	2,820	660,102
0,01	-2,000	3,028	1067,802
0,03	-1,523	3,216	1646,225
0,1	-1,000	3,412	2584,453
0,3	-0,523	3,577	3772,359
1	0,000	3,737	5454,999
3	0,477	3,863	7298,952
10	1,000	3,980	9555,904
30	1,477	4,069	11709,793
100	2,000	4,147	14034,580
1000	3,000	4,255	17975,103
10000	4,000	4,321	20945,450
100000	5,000	4,361	22966,963
1000000	6,000	4,385	24257,208
10000000	7,000	4,399	25049,185
100000000	8,000	4,407	25524,123
1000000000	9,000	4,412	25805,052
10000000000	10,000	4,414	25969,890

Con estos valores de módulo complejo obtenidos de las frecuencias propuestas (tabla 18) se grafico y se comparo con la curva maestra del módulo complejo calculada y graficada previamente.



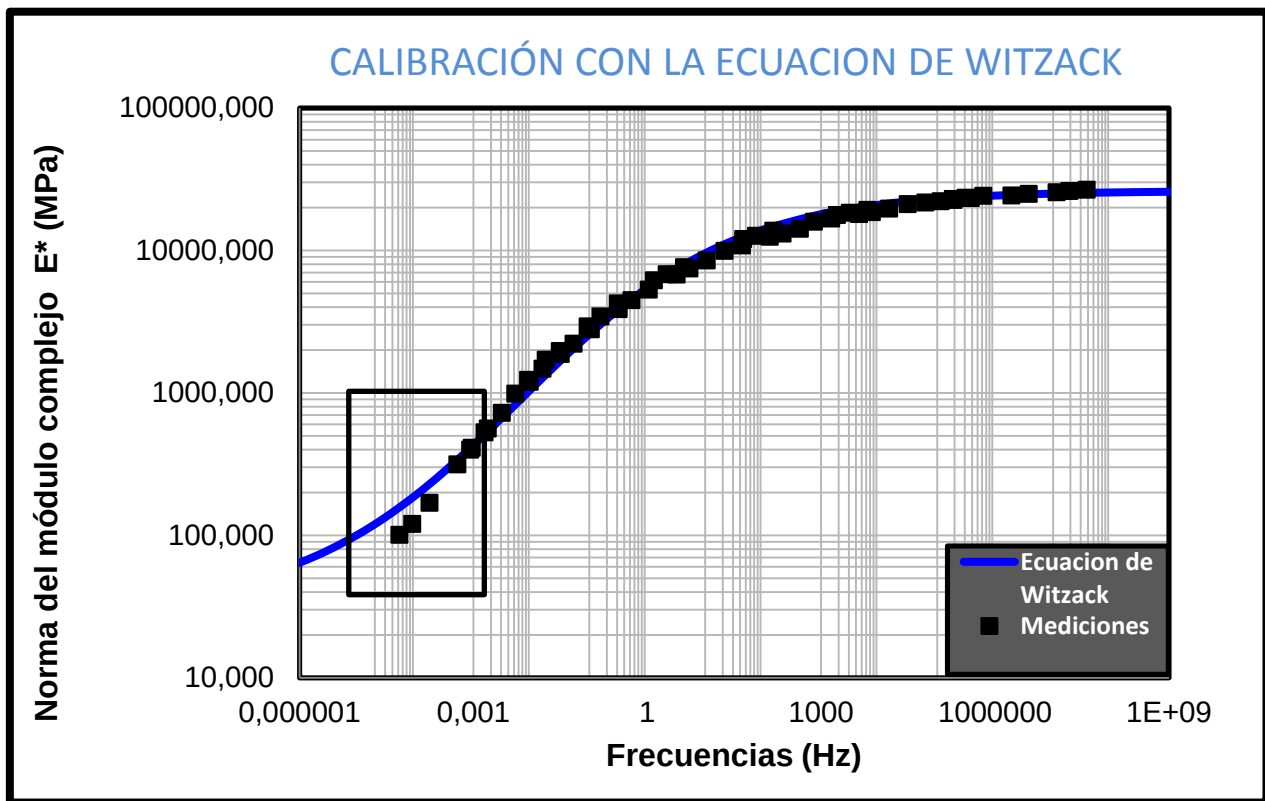


Figura 70. Calibración de la Curva Maestra del Módulo Complejo con la ecuación Sigmodal de Witzack

Se lograr observar que el modelo se asemeja muy bien para módulos altos y frecuencias altas, pero para módulos bajos y frecuencias muy bajas la ecuación de Witzack tiene un desfase considerable por el tipo de escala.

Graficas de calibración de Witzack de la Curva Maestra de Ángulo de Fase.

De la misma manera que se realizo la calibración para la curva maestra del módulo complejo se realizo la calibración de la "curva maestra del ángulo de fase", pero con la diferencia que en las iteraciones se calculan ángulos de fase y se comparan con los ángulos obtenidos en el ensayo, se obtuvo un error mínimo (tabla 19) y se calculo ángulos de fase a distintas frecuencias.

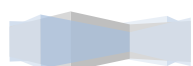


Tabla 19. Valores de los parámetros β , γ , δ y α en las iteraciones de la ecuación sigmoideal

Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3		Iteración 4		Iteración 5	
α :	49,93	α :	0,00	α :	49,93	α :	49,93	α :	49,93
δ :	2,039	δ :	2,039	δ :	0,000	δ :	2,039	δ :	2,039
γ :	0,780	γ :	0,780	γ :	0,780	γ :	0,000	γ :	0,780
β :	0,195	β :	0,195	β :	0,195	β :	0,195	β :	0,000
Error	0,001584		0,02252333		0,00262343		0,01544476		0,00217215

Se observa en la tabla 19 que el error mínimo se encuentra en la columna 1 con un error de 0.001584, por lo tanto con estos parámetros se calcularán todos los ángulos de fase.

Tabla 20. Valores de los ángulos de fase calculados con la ecuación de Witzack

Frec. (Hz)	Log Frec. (Hz)	Log $\delta(^{\circ})$
1,00E-100	-100,000	51,966
0,000000001	-9,000	51,911
0,00000001	-8,000	51,847
0,0000001	-7,000	51,708
0,0000003	-6,523	51,593
0,000001	-6,000	51,408
0,000003	-5,523	51,160
0,00001	-5,000	50,765
0,00003	-4,523	50,242
0,0001	-4,000	49,419
0,0003	-3,523	48,355
0,001	-3,000	46,729
0,003	-2,523	44,712
0,01	-2,000	41,805
0,03	-1,523	38,465
0,1	-1,000	34,102
0,3	-0,523	29,651
1	0,000	24,581
3	0,477	20,114



10	1,000	15,721
30	1,477	12,349
100	2,000	9,407
1000	3,000	5,712
10000	4,000	3,793
100000	5,000	2,859
1000000	6,000	2,418
10000000	7,000	2,214
100000000	8,000	2,119
1000000000	9,000	2,076
10000000000	10,000	2,056

Después de calcular los ángulos a distintas frecuencias, se procede a graficar los datos sobre la curva maestra de ángulo de fase graficada previamente con los datos obtenidos en el ensayo.

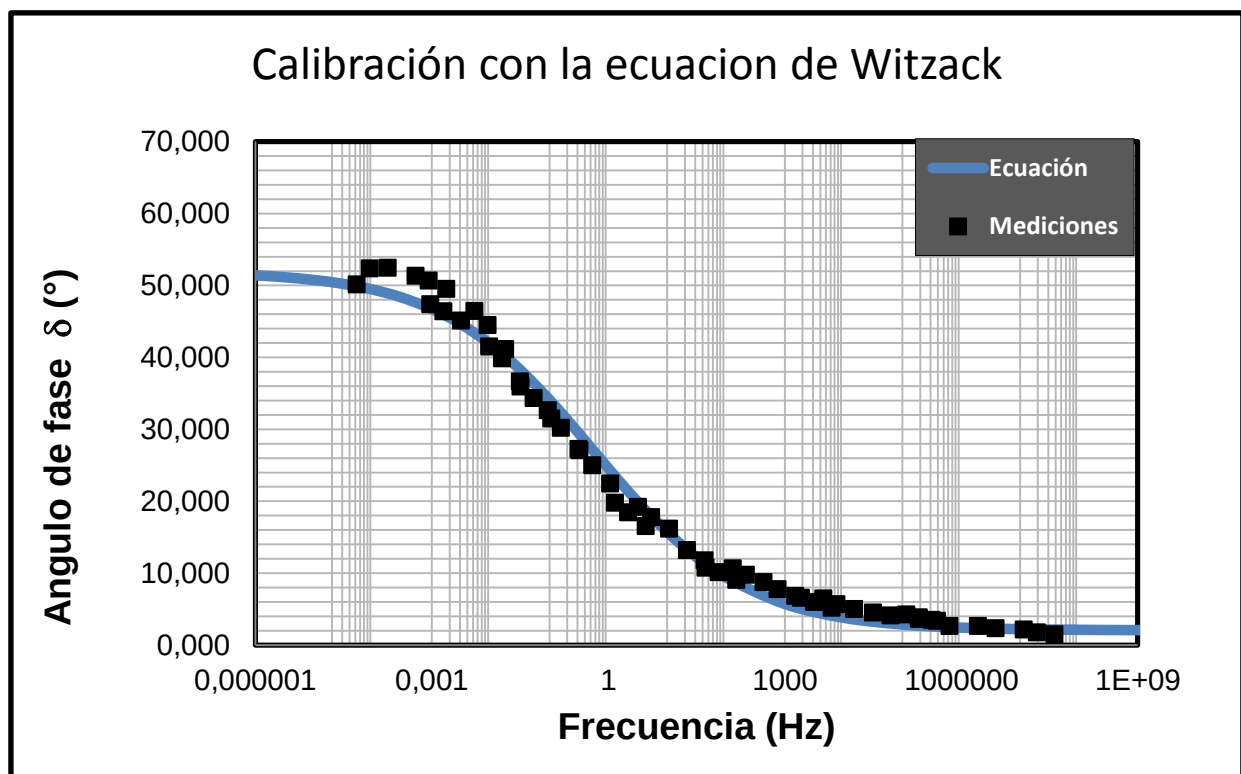


Figura 71. Calibración de la Curva Maestra del Ángulo de Fase con la ecuación de predicción sigmodal de Witzack

Se observa claramente que la ecuación de predicción se ajusta muy bien para ángulos de fase bajos y frecuencias altas, pero para ángulos de fase altos y frecuencias bajas esta ecuación de predicción no se ajusta correctamente. Por lo tanto se verificara con el modelo reológico para ver cual tiene un mejor ajuste.





6.1.8 ECUACIÓN DE OLARD 2S2P1D

Este modelo tal vez el mas completo de todos los modelos reológicos, es en la actualidad el mas utilizado para modelar las propiedades viscoelásticas lineales del material asfaltico. Su ecuación consta de:

$$E_{2S2P1D}^*(j\omega\tau) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (44)$$

Donde:

j es el numero complejo definido por $j^2 = -1$

ω es la pulsación, $\omega = 2\pi f$, (f es la frecuencia)

k, h exponentes tal que $0 < k < h < 1$

δ = una constante

E_{00} = módulo estático, cuando $\omega \rightarrow 0$

E_0 = módulo vítreo, cuando $\omega \rightarrow \infty$

η = viscosidad newtoniana, $\eta = (E_0 - E_{00}) \beta \tau$

τ = tiempo característico, su valor depende de solamente de la temperatura, τ evoluciona aproximadamente a la ley WLF.

Después de mostrar la ecuación del modelo reológico se presenta una explicación de esta modelación.

Para poder calibrar en este modelo se encontraron las variables constitutivas de la ecuación; esto se logró después de descomponer la ecuación (44) en su parte real y su parte imaginaria, con ayuda de la herramienta matemática "Descomposición de una Ecuación Real e Imaginaria" (mostrada posteriormente) para poder encontrar E_1 y E_2 , con estos 2 valores se calculo el valor del módulo y el ángulo, con estos datos se realizo la calibración con los modelos en el plano Cole-Cole y Espacio de Black que son los modelos típicos de calibración, dentro de esta calibración se depuraron los valores de aT con ayuda de la curva maestra de módulo complejo y la curva maestra de ángulo de fase. Esta modelación fue hasta cierto punto iterativa ya que se observo que los valores de módulo complejo y ángulo de fase calculados se compaginaron con los valores arrojados en ensayo en las cuatro representaciones mencionadas en este párrafo (plano Cole-Cole, Espacio de Black, curva maestra de módulo complejo y la curva maestra de ángulo de fase) después de encontrar los valores de las variables y depurar los valores de aT ya encontrados con la ecuación de William/Landel/Ferry anteriormente, se realizó la modelación de la ecuación reológica 2S2P1D.



Para este ejemplo práctico se realizara la "Descomposición de una Ecuación Real e Imaginaria" como dato didáctico.

$$E_{2S2P1D}^*(j\omega\tau) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (44)$$

Se llamara E'_1 y E'_2 a los siguientes valores

$$E'_1 = ((E_0 - E_{00}) * [1 + \{ \delta((\omega\tau)^{-k}) * \cos\left(\frac{k*\pi}{2}\right) \} + \{ (\omega\tau)^{-h} * \cos\left(\frac{k*\pi}{2}\right) \}]) \quad (45)$$

$$E'_2 = ((E_0 - E_{00}) * [\{ \delta((\omega\tau)^{-k}) * \sin\left(\frac{k*\pi}{2}\right) \} + \{ (\omega\tau)^{-h} * \sin\left(\frac{k*\pi}{2}\right) \} + (\beta\omega\tau)^{-1}]) \quad (46)$$

Se unen estos 2 valores

$$Union = \left(\frac{E'_1}{E_0 - E_{00}} \right)^2 + \left(\frac{E'_2}{E_0 - E_{00}} \right)^2 \quad (47)$$

Se calcula la parte real (E_1) y la parte Imaginaria (E_2)

$$E_1 = \frac{E'_1}{Union} \quad (48) \quad y \quad E_2 = \frac{E'_2}{Union} \quad (49)$$

Se calcula el modulo complejo $|E^*|$ como la resultante y su ángulo de fase δ

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (50)$$

$$\delta = \arctang \frac{E_2}{E_1} \quad (51)$$

Después de mostrar la descomposición de la ecuación 2S2P1D, se muestra valores de las variables de la ecuación y los valores de los ángulos y módulos complejos para ciertas frecuencias propuestas (tabla 21 y 22)

Es importante señalar que para encontrar los valores de E_{00} (Mpa) y E_0 (Mpa) se realizo por medio de la calibración en el plano Cole-Cole ya que E_{00} es el valor cuando la frecuencia (ω) tiende a 0 y E_0 cuando la frecuencia (ω) tiende a infinito por lo tanto con ayuda de la grafica este valor se encontró de manera visual, sin olvidar nunca la relación de la grafica y la tendencia de los puntos graficados para que el valor de E_{00} y E_0 sean lo mas aproximado posible, como se muestra en la imagen 72 y 73.



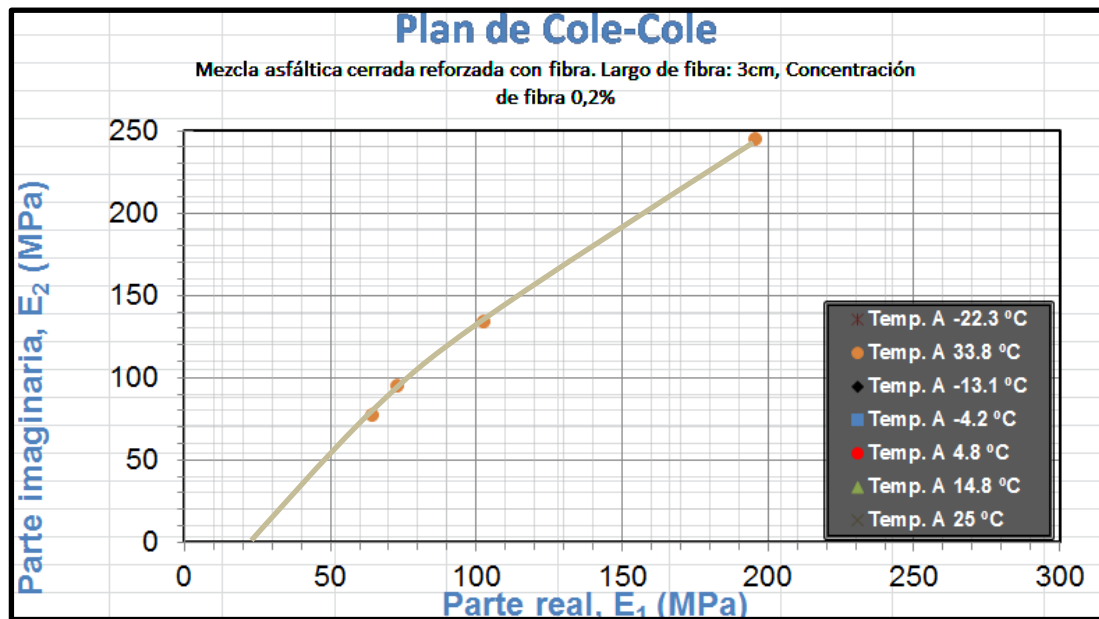


Figura 72. Grafica de los datos en el plano Cole-Cole para encontrar el valor de E_{00}

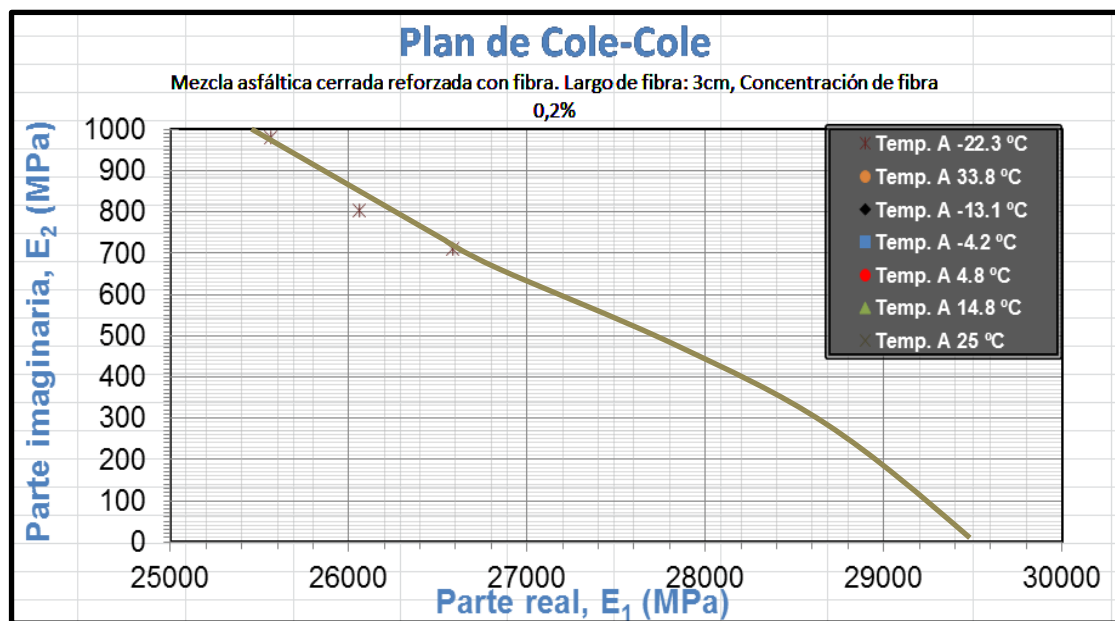


Figura 73. Grafica de los datos en el plano Cole-Cole para encontrar el valor de E_0



Para encontrar los valores de las constantes restantes como son k , h , δ , Υ y β se tomo en cuenta la imagen 74 mostrada posteriormente, para encontrar dichos valores con los datos del ensayo en la representación del plano Cole-Cole.

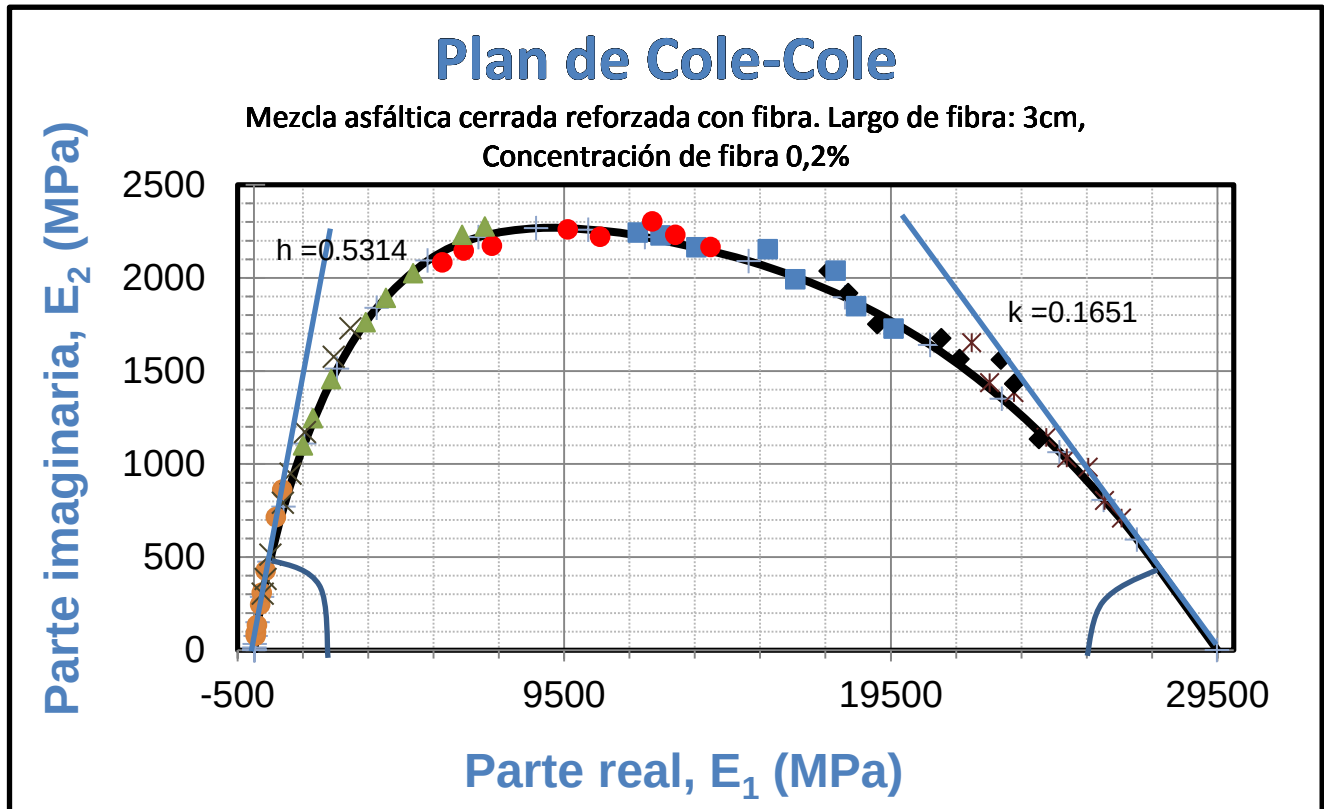


Figure 74. Calibración del modelo 2S2P1D, a partir del plan Cole-Cole.

Después de calcular todas las variables de la ecuación se presenta la tabla 21 y 22 del modelo reológico 2S2P1D.

Tabla 21. Resultados de las variables de la ecuación reológica de Olard 2S2P1D

E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	Υ	β
24,45	2,95E+04	0,1929	0,5314	2,5	0,07	150





Tabla 22. Resultados de los módulos y ángulos de fase obtenidos en el calculo de la modelación reológica 2S2P1D.

Módulo Complejo calculado por el Modelo 2S2P1S								
f(Hz)	ω^*Y	E'1	E'2	Unión	RealE1*	Imag.E2*	 E* 	Phi
1E-100	4,3982E-101	4,22664E+57	4,4678E+102	2,298E+196	24	0	24	0
1E-09	4,39823E-10	1858600370	4,48828E+11	2,3187E+14	24	0	24	0
1E-08	4,39823E-09	547740118,9	45281059942	2,3603E+12	24	0	24	0
1E-07	4,39823E-08	161815275,5	4645398729	2,4868E+10	24	0	24	0
3E-07	1,31947E-07	90591892,79	1588414346	2913493991	24	1	24	1
0,000001	4,39823E-07	48076987,17	499147023,8	289430040	25	2	25	4
0,000003	1,31947E-06	27049682,34	178194346,2	37390204,2	25	5	26	11
0,00001	4,39823E-06	14474639,83	60165565,16	4407659,94	28	14	31	26
0,00003	1,31947E-05	8237429,205	23571256,47	717603,126	36	33	49	42
0,0001	4,39823E-05	4491455,885	9080227,189	118120,11	62	77	99	51
0,0003	0,000131947	2621377,132	4089319,099	27156,9178	121	151	193	51
0,001	0,000439823	1487448,204	1842197,82	6452,74291	255	285	383	48
0,003	0,001319469	913207,9392	945962,1002	1989,84464	483	475	678	45
0,01	0,00439823	557777,9378	481544,3106	624,995535	917	770	1198	40
0,03	0,013194689	372362,8495	271356,9747	244,344766	1548	1111	1905	36
0,1	0,043982297	252858,1446	151014,9533	99,8411072	2557	1513	2971	31
0,3	0,131946891	187039,1415	91975,87979	50,0032234	3765	1839	4190	26
1	0,439822972	141663,9151	55887,33129	26,6941112	5331	2094	5728	21
3	1,319468915	114592,372	37052,65436	16,6944942	6889	2219	7237	18
10	4,398229715	94256,05316	24784,79392	10,9327827	8646	2267	8938	15
30	13,19468915	81020,9883	17903,43824	7,92457398	10248	2259	10495	12
100	43,98229715	70260,39356	13047,10023	5,87788032	11978	2220	12182	10
1000	439,8229715	56330,08276	7778,922093	3,72186913	15159	2090	15303	8
10000	4398,229715	47533,78384	4983,407896	2,62922859	18103	1895	18202	6
100000	43982,29715	41733,61344	3308,793244	2,01729554	20712	1640	20777	5
1000000	439822,9715	37830,77404	2233,391392	1,65301818	22910	1351	22950	3
10000000	4398229,715	35180,73916	1518,557367	1,42723174	24674	1064	24697	2
1E+08	43982297,15	33374,22296	1035,809746	1,28326581	26032	807	26044	2
1E+09	439822971,5	32140,61501	707,5008249	1,18958347	27043	595	27049	1
1E+100	4,3982E+99	29475,55	6,68782E-13	1	29500	0	29500	0

Posteriormente de tener todos los cálculos de la formula para las distintas frecuencias se procede a terminar la modelar en las distintas representaciones clásicas.



Graficas del Modelo 2S2P1D en el Espacio de Black.

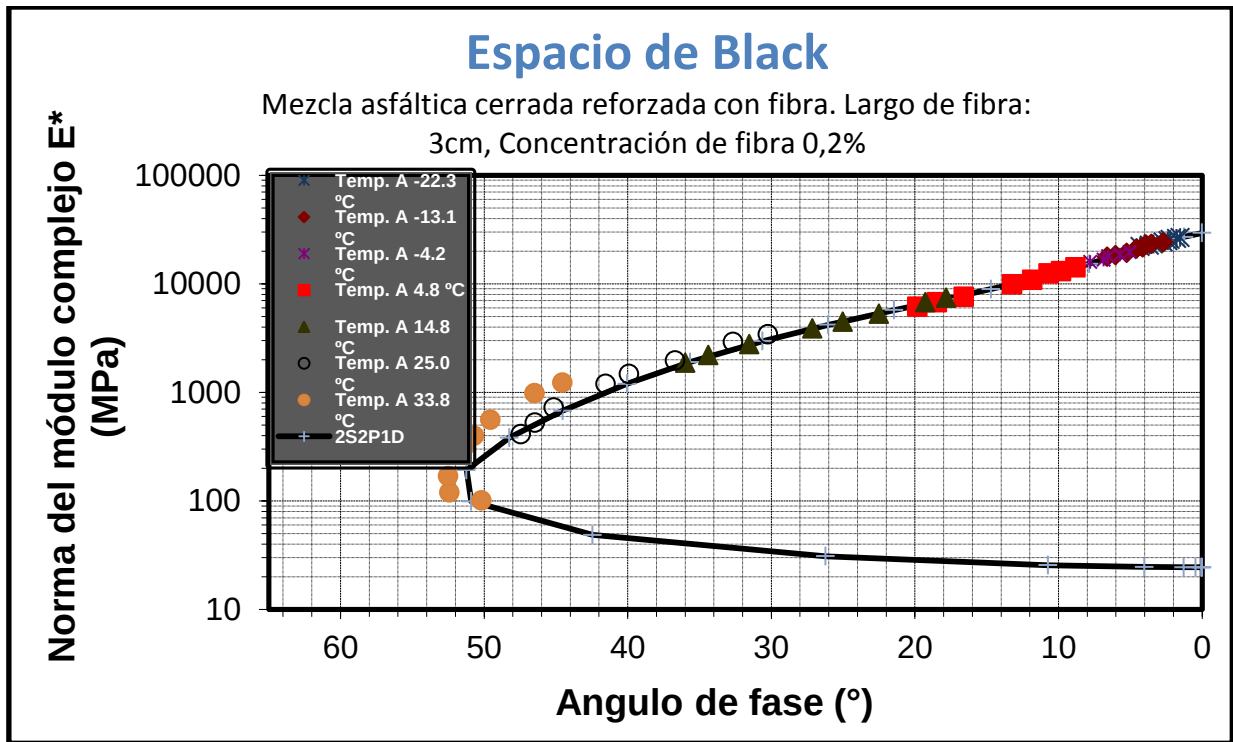


Figura 75. Modelación del Espacio de Black con el modelo 2S2P1D

Se observa claramente la similitud del modelo con los mediciones obtenidas con el equipo de ensayo, sin embargo se comparara ambos modelos, la ecuación de predicción y el modelo reológico 2S2P1D mas adelante para definir cual es mas adecuada para realizar la modelación.



Graficas del Modelo 2S2P1D en el Plano Cole-Cole

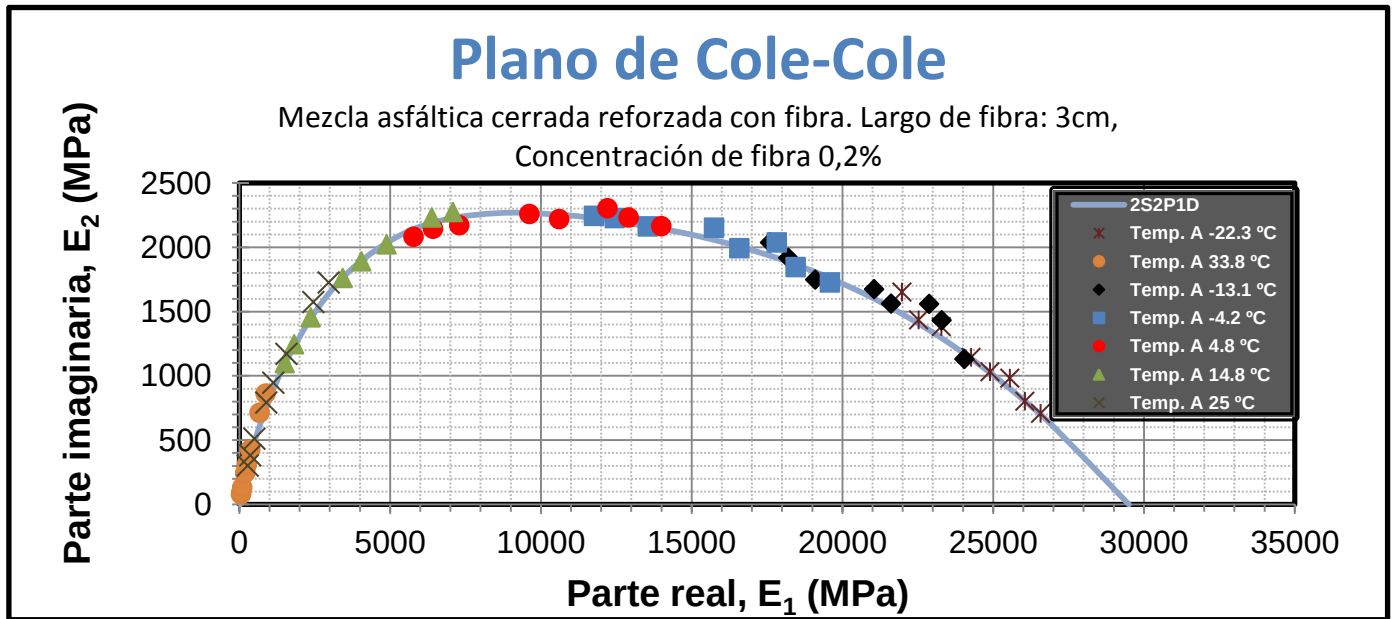


Figura 76. Modelación del Plano Cole-cole con el modelo reológico 2S2P1D

Graficas del Modelo 2S2P1D de la Curva Maestra del Módulo Complejo

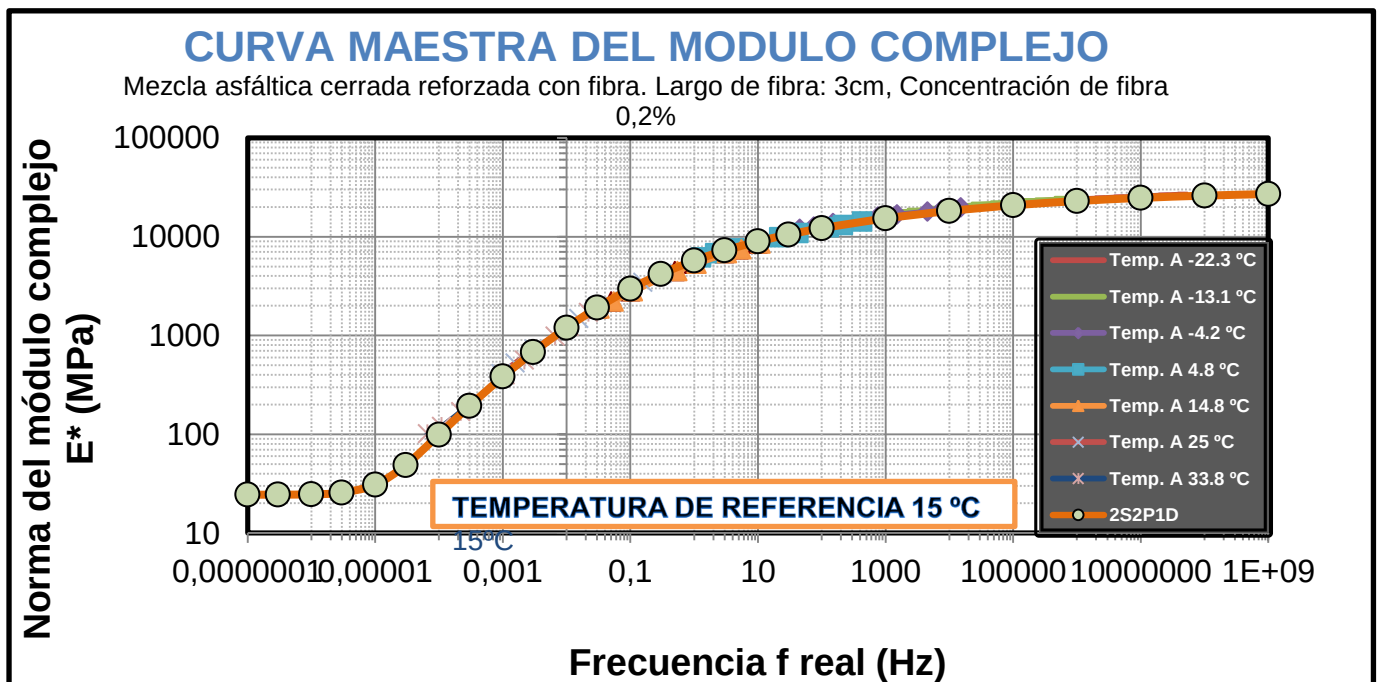


Figura 77. Modelación de la Curva Maestra del Módulo Complejo con el modelo reológico 2S2P1D



Graficas del Modelo 2S2P1D de la Curva Maestra del Angulo de Fase

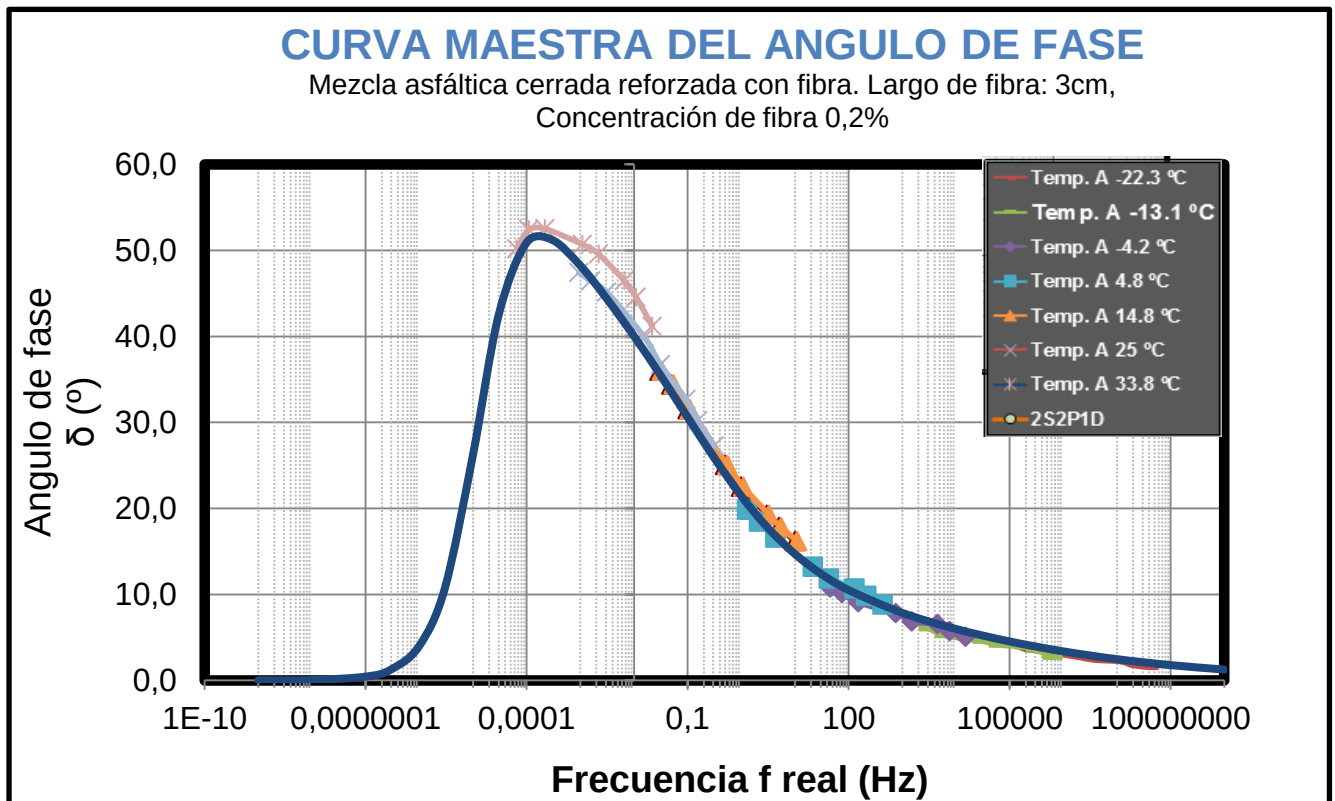
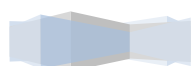


Figura 78. Modelación de la Curva Maestra del Angulo de Fase con el modelo reológico 2S2P1D

Concluimos la modelación observando que los datos obtenidos del ensayo y los calculados con el modelo tienen una similitud en a lo largo de todas las graficas tanto para frecuencias bajas y para frecuencias altas, a diferencia de la ecuación de Witzack.



6.1.9 COMPROBACION DE MODELACIÓN DE DATOS

Para concluir el ejercicio y verificar cual de las dos calibraciones es la mas adecuada de utilizar, se graficaron ambos modelos, la ecuación de predicción sigmoideal y el modelo reológico de Olard y así gráficamente definir cual es el mas exacto. Para realizar este análisis de cual es el mas adecuado de utilizar, se grafico en todas las representaciones posibles de realizar la calibración.

Curva maestra del Módulo Complejo.

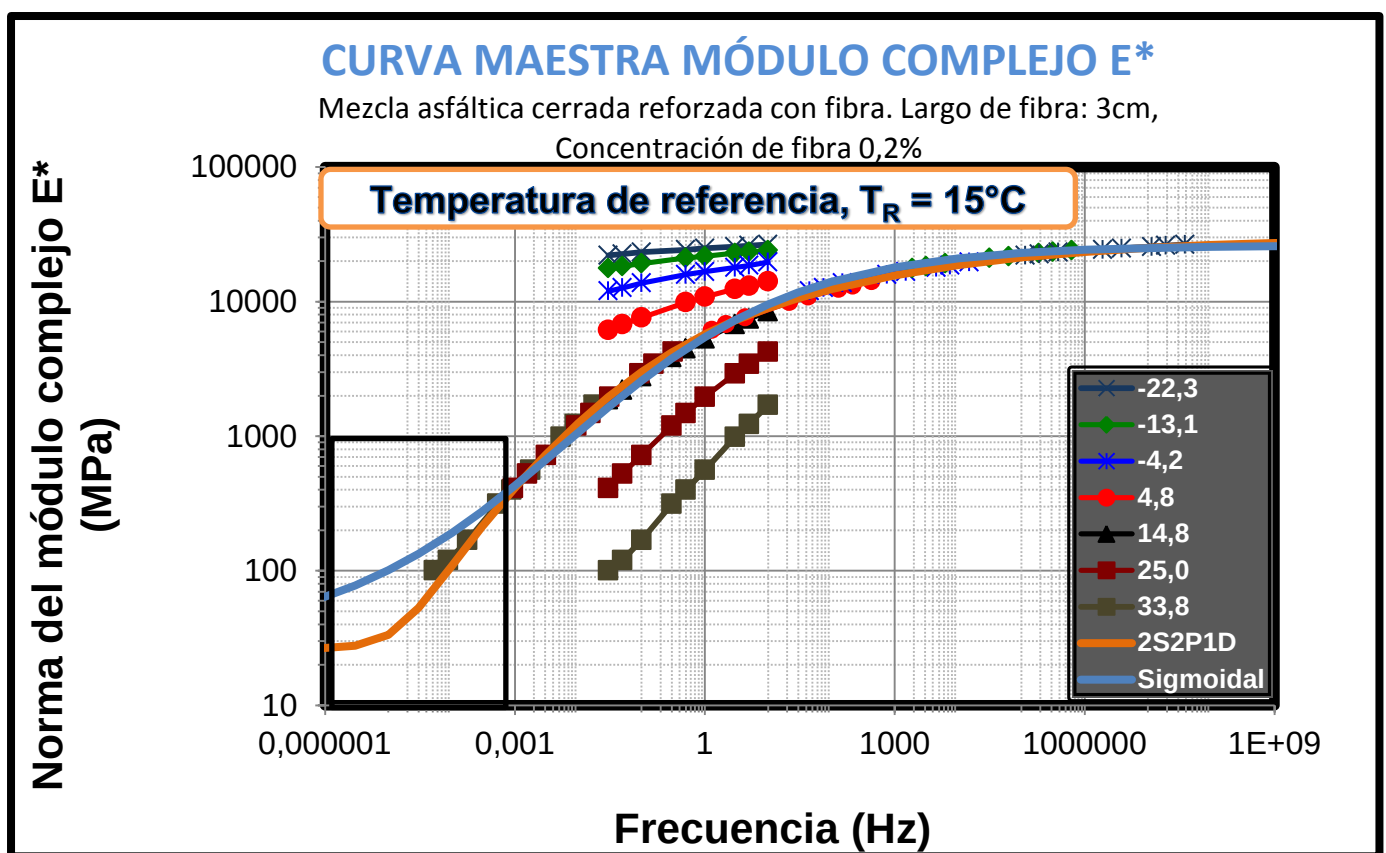


Figura 79. Comparación del modelo reológico de Olard y la ecuación de Witzack en la Curva Maestra del Módulo Complejo.

La primera comparación de los modelos en la curva maestra del módulo complejo se observa que la ecuación de Witzack no simula los módulos bajos y temperaturas bajas a diferencia del modelo 2S2P1D.



Curva Maestra del Ángulo de Fase

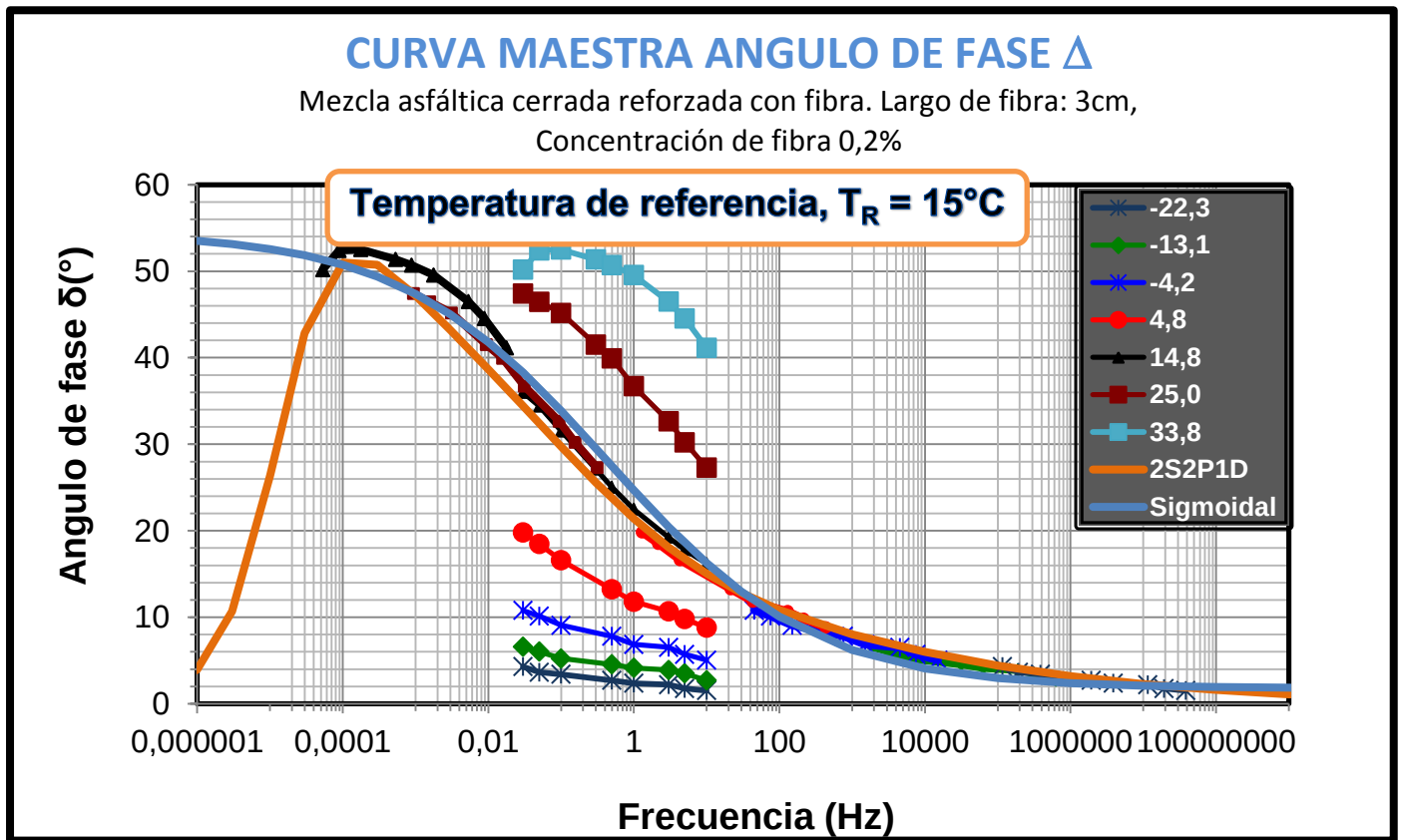


Figura 80. Comparación del modelo reológico de Olard y la ecuación de Witzack en la Curva Maestra del Ángulo de Fase

En la segunda representación se observa la correcta simulación del modelo reológico a diferencia de la ecuación sigmoideal que solo cumple a frecuencias altas y ángulos de fase bajos, corroborando lo que ya se había comentado anteriormente.



Plano en el Espacio de Black

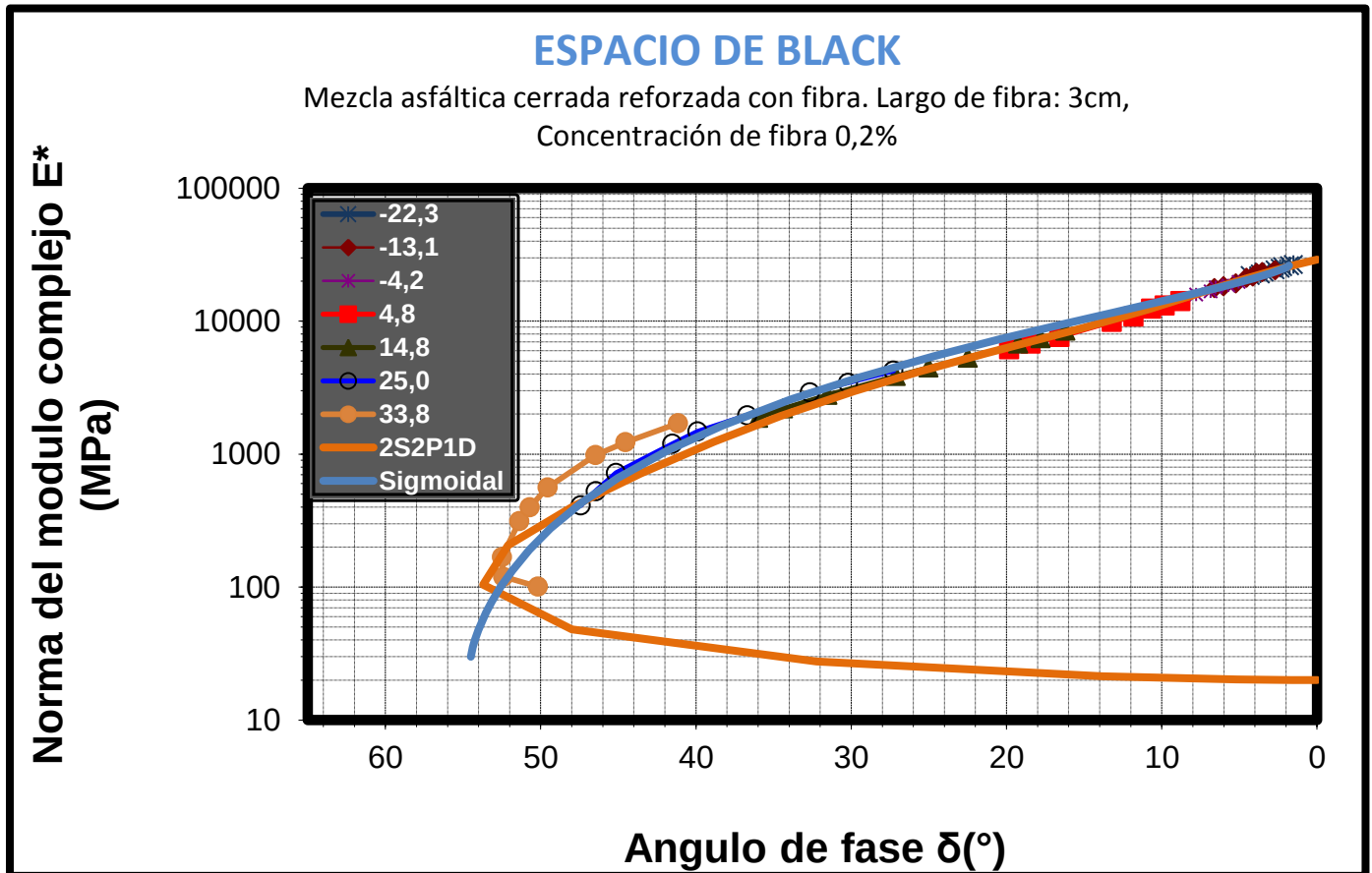


Figura 81. Comparación del modelo reológico de Olard y la ecuación de Witzack en la Curva en el Espacio de Black

En este plano no se ve tanta diferencia sin embargo el modelo 2S2P1D sigue la tendencia parabólica de los datos arrojados en el ensayo.



Plano Cole-Cole

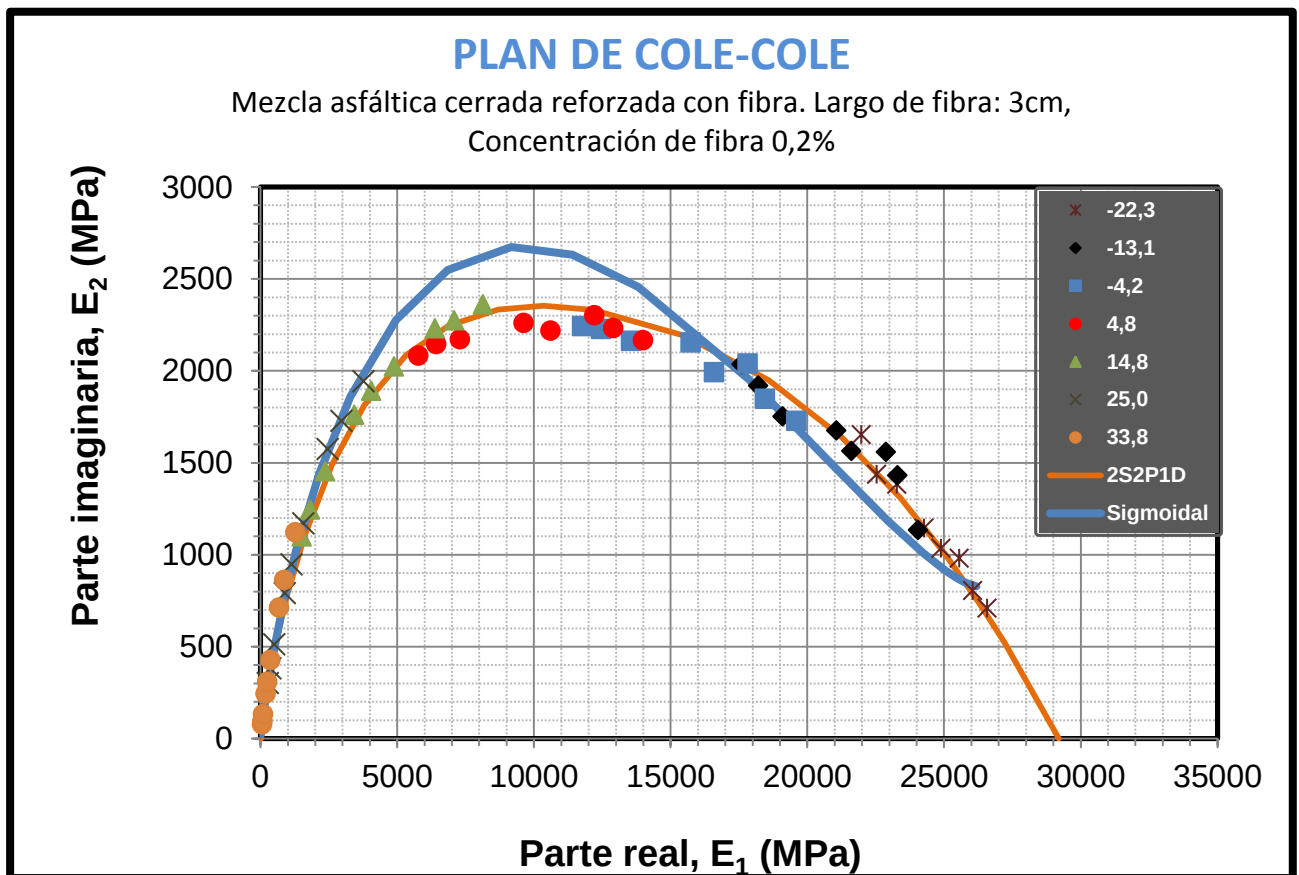


Figura 82. Comparación del modelo reológico de Olard y la ecuación de Witzack en la Curva en el plano Cole-Cole

Este es el plano más utilizado para observar la calibración y en esta representación se observa que la ecuación sigmoidal no simula la tendencia de los datos, permitiendo corroborar la hipótesis supuesta en el ejercicio al inicio de la calibración de los dos modelos tanto el reológico y el de la ecuación de predicción que se dijo que el modelo reológico 2S2P1D simula correctamente los datos y se ilustra en las 4 representaciones mostradas anteriormente (curva maestra de módulo complejo, curva maestra de ángulo de fase, espacio de black y plano cole-cole)





1.2 COMENTARIOS FINALES

La evaluación del módulo complejo (módulo dinámico) en las mezclas asfálticas es complicado de entender y analizar debido a su comportamiento viscoelástico lineal por lo tanto sus representaciones juegan un papel primordial para conocer su comportamiento y realizar una correcta evaluación, esta evaluación del módulo complejo tiene muchos usos, pero dos de los primordiales son:

- Realizar mezclas asfálticas de altos módulos, para mejorar las características físicas de los pavimentos en las carreteras tanto estatales, como federales y así brindar un mejor servicio a todos los usuarios que las utilizan.
- En segundo es un rubro más utilizado en laboratorio, evaluar los módulos complejos y ángulos de fase de los asfaltos simples y modificados con algún polímero, observar su comportamiento con asfalto simple y asfalto modificado y ver realmente que tanto puede mejorar a una mezcla, un asfalto modificado a temperaturas y frecuencias bajas, así como temperaturas y frecuencias altas, para de esta manera realizar una correcta elección del asfalto dependiendo las características del proyecto, del clima y ver la factibilidad del uso del asfalto modificado ya que en muchas ocasiones mejora muy poco sus características físicas, químicas, mecánicas y aumenta considerablemente los costos de la obra en construcción.

Continuando con una correcta evaluación y análisis es importante mencionar su modelación, después de analizar todas las modelaciones de predicción y reológicas se llegó a la conclusión de que las ecuaciones de predicción se ajustan bien al comportamiento del módulo complejo y al ángulo de fase de las mezclas asfálticas a frecuencias altas, pero a frecuencias muy bajas estas ecuaciones ya no reproducen el mismo comportamiento de laboratorio; sin embargo los modelos reológicos en específico el modelo 2S2P1D simula mejor el comportamiento viscoelástico lineal producido por las mezclas asfálticas y logra modelar de forma adecuada los ángulo de fase y módulo en frecuencias altas y bajas. Por lo tanto se concluye que el decir que el modelo 2S2P1D es el más adecuado para reproducir el fenómeno de viscoelasticidad lineal de una mezcla asfáltica obteniendo módulos complejos y ángulos de fase a cualquier frecuencia requerida sin tener limitaciones de equipo y/o económicas.





ANEXO A "NORMA AASHTO TP 62-07"

Prologo

El presente método de ensayo es una traducción de la norma extranjera AASHTO TP 62-07¹ Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA) emitida por la American Association of State Highway and Transportation Officials.

1. Alcance.

- 1.1 Este método de prueba cubre el procedimiento para preparación y ensayo de mezcla asfáltica en caliente (HMA) para determinar el módulo dinámico y el ángulo de fase para un rango de temperaturas y frecuencias de carga
- 1.2 Esta norma se aplica a especímenes de mezcla preparada en el laboratorio con tamaño nominal máximo menor o igual a 37.5 mm
- 1.3 Esta norma puede involucrar material riesgoso,

2. Documentos de referencia.

- 2.1 Normas AASHTO:
 - R 30, Acondicionamiento de mezcla Asfáltica en caliente (HMA)
 - T 67 Practicas para verificación de fuerza en máquinas de ensayo
 - T 166 Gravedad especifica bruta de mezclas asfálticas en caliente compactadas usando especímenes saturados y superficialmente secos.
 - T 209 Gravedad especifica teórica máxima y densidad de Mezclas asfálticas en caliente para pavimentos.
 - T 269 Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas densas y abiertas
 - T 312 Preparación y determinación de la densidad de especímenes de mezcla asfáltica en caliente por medio del compactador Giratorio Superpave.

3. Definiciones.

- 3.1 Módulo complejo (E^*), un número complejo que define la relación entre el esfuerzo y la deformación para un material viscoelástico lineal.
- 3.2 Módulo dinámico, ($|E^*|$), valor absoluto del módulo complejo calculado dividiendo el esfuerzo máximo entre la deformación máxima axial recuperable para un material sometido a carga senoidal.
- 3.3 Angulo de fase (ϕ), el ángulo en grados entre un esfuerzo senoidal pico aplicado y la deformación pico resultante en un ensayo bajo esfuerzo controlado.



4. Resumen del método.

- 4.1 Se aplica un esfuerzo de compresión axial senoidal (haversine) a un espécimen de concreto asfáltico a una temperatura y frecuencia de carga determinada. El esfuerzo aplicado y la deformación axial recuperable del espécimen se miden y se usan para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase.
- 4.2 La figura 1 presenta un esquema del equipo de módulo dinámico.

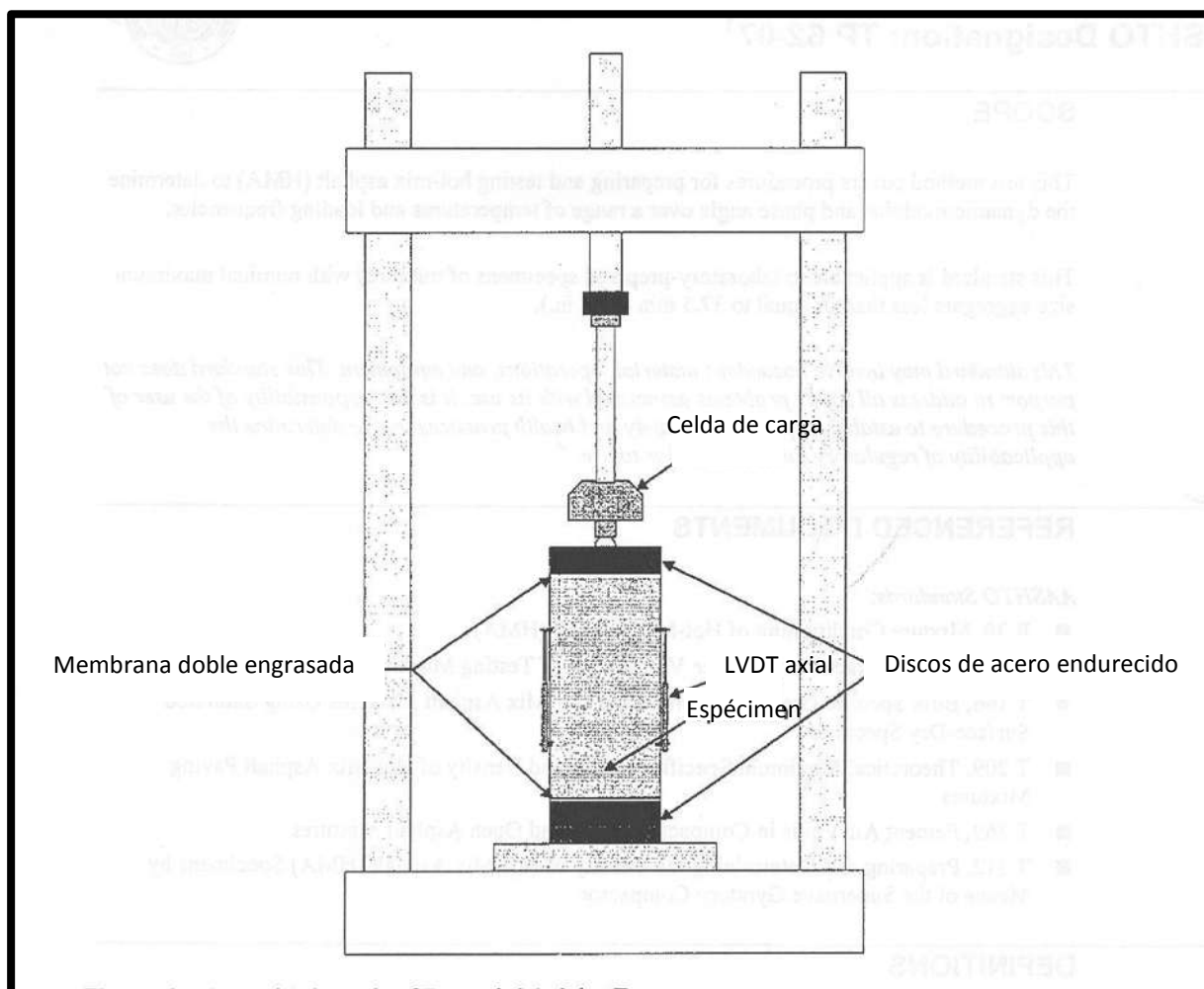


Figura 1. Esquema general del ensayo de módulo dinámico

5. Importancia y uso

- 5.1 Los valores de módulo dinámico medidos en un rango de temperaturas y frecuencias de carga pueden ser ajustados en una curva maestra para caracterizar el concreto asfáltico para el diseño de espesores de pavimentos y análisis de comportamiento.
- 5.2 Los valores de módulo dinámico y ángulo de fase también pueden ser usados como un criterio para el diseño de HMA.

6. Aparatos.

- 6.1 *Sistema de ensayo de módulo dinámico.* Un sistema de ensayo de módulo dinámico consiste de una máquina de ensayo, cámara ambiental y sistema de medición.
- 6.2 *Máquina de ensayo.* Una máquina de ensayo servo hidráulica capaz de producir una carga de compresión senoidal controlada. La máquina de prueba debe tener una capacidad de aplicar carga en un rango de frecuencias de 0.1 a 25 Hz y niveles de esfuerzo mayores a 2800 KPa (400 psi). Para cargas senoidales, el error estándar de la carga aplicada debe ser menor que el 5 por ciento. El error estándar de la carga aplicada es una medida de la diferencia entre los datos de carga medidos y el mejor ajuste senoidal. El error estándar de la carga es definido en la ecuación 1.

$$se(P) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n - 4}} \left(\frac{100\%}{\hat{x}_0} \right)$$

Donde

se(P)= error estándar de la carga aplicada

x_i = carga medida en el punto i

$\hat{x}_i$ = carga estimada para el punto i del ajuste senoidal

$\hat{x}_0$ = amplitud del ajuste senoidal

n = número total de datos recolectados durante el ensayo

- 6.2.1 *Cámara ambiental.* Una cámara para controlar la temperatura del espécimen de ensayo a la temperatura deseada. La cámara ambiental debe ser capaz de controlar la temperatura del espécimen en un rango de temperaturas de -10 a 60 °C (14 a 140 °F) con una exactitud de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($\pm 1^\circ\text{F}$). La cámara debe ser lo suficientemente grande para acomodar el espécimen de prueba y el espécimen de referencia con el termocople colocado en el centro para verificar la temperatura.

6.2.2 *Sistema de medición.* El sistema de medición debe estar controlado completamente por computadora, capaz de medir y registrar durante el ensayo la carga aplicada y la deformación axial. El sistema debe ser capaz de medir la carga senoidal aplicada y las deformaciones resultantes con una aproximación de 0.5 por ciento. La precisión y resolución de las mediciones son resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Exactitud y resolución del sistema de medición

Medición	Rango	Exactitud	Resolución
Carga	0.12 a 25 kN	Error ≤ 0.0 por ciento	≤ 0.0012 kN
Deformación	≥ 1 mm	Error ≤ 0.0025 mm	≤ 0.0002 mm
Log de fase entre la Carga y la deformación	No especificado	≤ 1 grado	No especificado

6.2.2.1 *Carga*, la carga debe ser medida con una celda de carga electrónica en contacto con uno de los extremos del espécimen. La celda de carga debe ser calibrada de acuerdo con T 67. El sistema de medición de carga debe tener un rango mínimo de 0 a 25 kN con una resolución de 1.2 N.

6.2.2.2 *Deformaciones axiales*, las deformaciones axiales deben ser medidas con un LVDT montado entre los pines pegados al espécimen, por ejemplo, como se muestra en la Figura 2. Las deformaciones deben ser medidas en dos puntos a 180° , tres puntos a 120° o cuatro puntos a 90° . El arreglo de mediciones en cuatro puntos a 90° tiene la ventaja sobre las otras dos opciones en que, en caso de que un LVDT no funcione apropiadamente, ese LVDT y el LVDT del lado opuesto pueden ser descartados y los dos LVDTs restantes pueden ser usados para determinar la deformación promedio. Los LVDTs deben tener un rango de ± 0.5 mm. El sistema de medición de la deformación debe poder regresar a cero y debe tener los rangos definidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos del sistema de medición de deformación

Rango, mm (in)	Resolución, mm (in)
± 0.5 (0.01969)	0.0100 (0.00039)
± 0.25 (0.00984)	0.0050 (0.00020)
± 0.125 (0.00492)	0.0025 (0.00010)
± 0.0625 (0.00246)	0.0010 (0.00004)

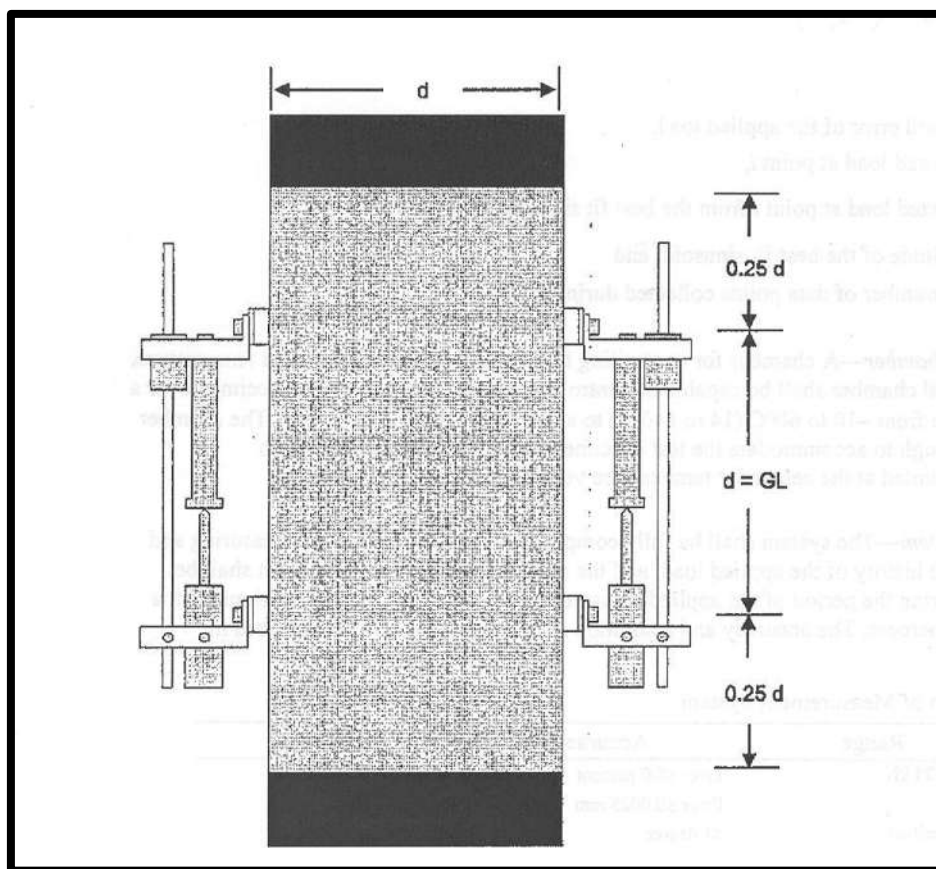


Figura 2. Esquema general de los puntos de medición (Sin escala)

- 6.2.3 *Placas de carga.* Se requieren placas de carga de $104.5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ para colocar arriba y abajo del espécimen para transferir la carga de la máquina de prueba al espécimen. Generalmente, estas placas deben ser hechas de acero endurecido o de chapa de acero, o aluminio anodizado de alta resistencia. Si son elaboradas de materiales más suaves se requerirá reemplazarlas más frecuentemente. No se deben utilizar materiales que tienen módulos elásticos lineales y dureza inferior que el aluminio 6061-T6.
- 6.2.4 *Tratamiento de los extremos.* Para reducir la fricción en los extremos debe aplicarse un tratamiento entre los extremos del espécimen y las placas de carga. El tratamiento de los extremos debe consistir de dos hojas de teflón o dos membranas de látex de 0.5 mm de espesor separadas con grasa de silicón.
- 6.3 *Compactador giratorio superpave.* Un compactador giratorio y el equipo asociado para preparar especímenes de laboratorio de acuerdo con T 312. El compactador debe ser capaz de compactar especímenes de 170 mm de altura.



- 6.4 *Sierra.* Una máquina para cortar los extremos de los especímenes de prueba a la longitud requerida. La sierra debe tener un lado de corte con diamante y debe ser capaz de cortar los especímenes a las dimensiones requeridas sin calentarse excesivamente o sin provocar corto.

Nota 1. Una sierra de albañilería facilita la preparación de los especímenes de prueba con extremos paralelos y lisos. Las sierras de hoja sencilla o doble de diamante deben tener mecanismos para mantener y controles de velocidad de precisión suficiente para asegurar el cumplimiento con las secciones 9.5 y 9.6 de este método. También es importante la rigidez de la hoja para evitar que se doble durante el corte.

- 6.5 *Extractor de núcleos.* Una maquina extractora con sistema de enfriamiento y punta de diamante para cortar especímenes de prueba de 101.6 mm de diámetro nominal.

Nota 2. Se recomienda una maquina extractora de núcleos con velocidad rotacional y alimentación vertical. La alimentación y velocidades pueden ser controladas por varios métodos. Se ha encontrado que una velocidad de alimentación vertical de aproximadamente 0.05 mm/rev y una velocidad rotacional de 450 RPM es satisfactorio para varias mezclas SUPERPAVE.

7 Riesgos.

- 7.1 Siga las precauciones de seguridad establecidas en el laboratorio cuando se preparan y ensayan especímenes de mezcla asfáltica en caliente (HMA).

8. Calibración del equipo de prueba.

- 8.1 La señal de acondicionamiento y el aparato de adquisición de datos del sistema de ensayo debe ser verificado para asegurar que no hay exceso en la fase de cambio entre los canales de carga y desplazamiento.
- 8.2 El sistema de ensayo debe ser calibrado antes de su uso inicial y al menos una vez al año, o de acuerdo a los requisitos de manufactura o cada 200 ensayos.
- 8.3 Verificar la capacidad de la cámara ambiental para mantener la temperatura requerida dentro de la exactitud especificada.
- 8.4 Verificar la calibración de todos los componentes de medición (tales como celda de carga y aparato de medición de la deformación del espécimen) del sistema de ensayo.
- 8.5 Si cualquiera de las verificaciones proporciona datos que no cumplen con la exactitud especificada, corrija el problema antes de proceder con la prueba.





9. Especímenes de prueba.

- 9.1 *Tamaño.* Los ensayos de módulo dinámico deben ser llevados a cabo en especímenes de prueba de 150 mm extraídos de mezclas compactadas en el compactador giratorio. El diámetro promedio de los especímenes debe estar entre 100 y 104 mm con una desviación estándar de 1.0 mm. La altura promedio del espécimen de prueba debe estar entre 147.5 y 152.5 mm.
- 9.2 *Envejecimiento.* Las mezclas preparadas en el laboratorio deben envejecerse a corto plazo en el horno durante 4 horas de acuerdo con el procedimiento R 30. Las mezclas de campo no requieren ser envejecidas antes del ensayo.
- 9.3 *Especímenes giratorios.* Prepare especímenes de 170 mm de altura de acuerdo con T 312 al contenido de vacíos de aire requeridos.

Nota 3. El ensayo debe ser llevado a cabo en especímenes de prueba (101.6 mm de diámetro) que cumplan con las tolerancias de vacíos de aire especificados. Los especímenes giratorios requerido para obtener un espécimen de prueba con el contenido de vacíos especificado deben ser determinado por ensayo y error, conseguido usando menos o más mezcla y compactándolo a la misma altura en el compactador giratorio. Generalmente, el contenido de vacíos de aire del espécimen de prueba es 1.5 a 2.5 por ciento inferior, que el contenido de vacíos de aire del espécimen giratorio cuando el espécimen de prueba es retirado del centro como es especificado en este método.

- 9.4 *Extracción.* Extraiga especímenes de prueba de 101.6 mm de diámetro del centro del espécimen giratorio. El extractor y el espécimen giratorio deben estar adecuadamente apoyados para asegurar que el espécimen de prueba resultante sea cilíndrico con los lados lisos, paralelos y libres de ranuras, bordes y escalonamientos.
- 9.5 *Diámetro.* Mida el diámetro del espécimen de prueba en la mitad y en tres puntos a lo largo del eje a 90° uno con respecto al otro. Registre cada una de las seis mediciones con una aproximación de 0.1 mm. Calcule el promedio y la desviación estándar de las seis mediciones. Si la desviación estándar es mayor que 2.5 mm, deseche el espécimen. Para los especímenes que sean aceptables, utilizar el diámetro promedio con una aproximación a 1 mm en todos los cálculos de las propiedades del material.
- 9.6 *Preparación de los extremos.* Los extremos de todos los especímenes de prueba deben ser lisos y perpendiculares al eje del espécimen. Prepare los extremos de los especímenes cortando con una sierra de una sola o doble hoja. Los extremos de los especímenes preparados deben cumplir las tolerancias descritas abajo. Rechace los especímenes de prueba que no cumplan dichas tolerancias.
- 9.6.1 La altura de la rugosidad de la superficie de corte de los extremos del espécimen debe estar dentro de una tolerancia de ± 0.05 mm en cualquier diámetro. Este requisito debe ser verificado al menos en tres posiciones ubicadas a 120° aproximadamente usando una regla y vernier de 8.1 a 12.5 mm de ancho aproximadamente o un comparador óptico.





9.6.2 El extremo del espécimen no debe alejarse de la perpendicular con respecto al eje del espécimen por más de un grado, equivalente a 2.7 mm en 152.4 mm. Este requisito debe ser verificado en cada uno de los especímenes usando un calibrador y una escuadra.

9.7 *Contenido de vacíos de aire.* Determine el contenido de vacíos de aire del espécimen de prueba de acuerdo con T 269. Rechace los especímenes con vacíos de aire que difieran más de 0.5 por ciento de los vacíos de aire especificados.

Nota 4. Se puede ahorrar tiempo si los núcleos de los especímenes de prueba fueron saturados y los pesos en agua y saturado y superficialmente seco fueron determinados inmediatamente o en un periodo de tiempo corto después de la extracción. Después se puede secar el espécimen de prueba en el horno toda la noche, se determina el peso seco al día siguiente y luego se preparan inmediatamente para el ensayo.

9.8 *Replicas.* El número de especímenes de prueba requeridos depende del número de mediciones de deformación axial hechas por espécimen y la exactitud deseada del módulo dinámico promedio. Se deben ensayar tres especímenes para obtener un límite en la exactitud deseada (por ejemplo menor que ± 15 por ciento del módulo dinámico verdadero). La Tabla 3 resume la exactitud estimada asociada con el número de especímenes.

Tabla 3. Exactitud estimada relacionada con el número de especímenes

LVDTs por espécimen	Numero de especímenes	Limite estimado de exactitud
2	2	$\pm 18.0 \%$
2	3	$\pm 15.0 \%$
2	4	$\pm 13.4 \%$
3	2	$\pm 13.1 \%$
3	3	$\pm 12.0 \%$
3	4	$\pm 11.5 \%$

9.9 *Almacenamiento de las muestras.* Si los especímenes no serán ensayados dentro de dos días, envuélvalos en polietileno y almacénelos en un cuarto de temperatura controlada a una temperatura entre 5 y 15°C. Los especímenes no deben ser apilados durante el almacenamiento.

Nota 5. Para eliminar los efectos de envejecimiento en los resultados del ensayo, se recomienda que los especímenes sean almacenados no más de dos semanas antes del ensayo.



10. Instrumentación del espécimen de prueba.

- 10.1 Pegue con adhesivo epóxico los pines de montaje, para los LVDTs axiales, a los lados del espécimen. La figura 3 muestra detalles del montaje de los pines y LVDTs.

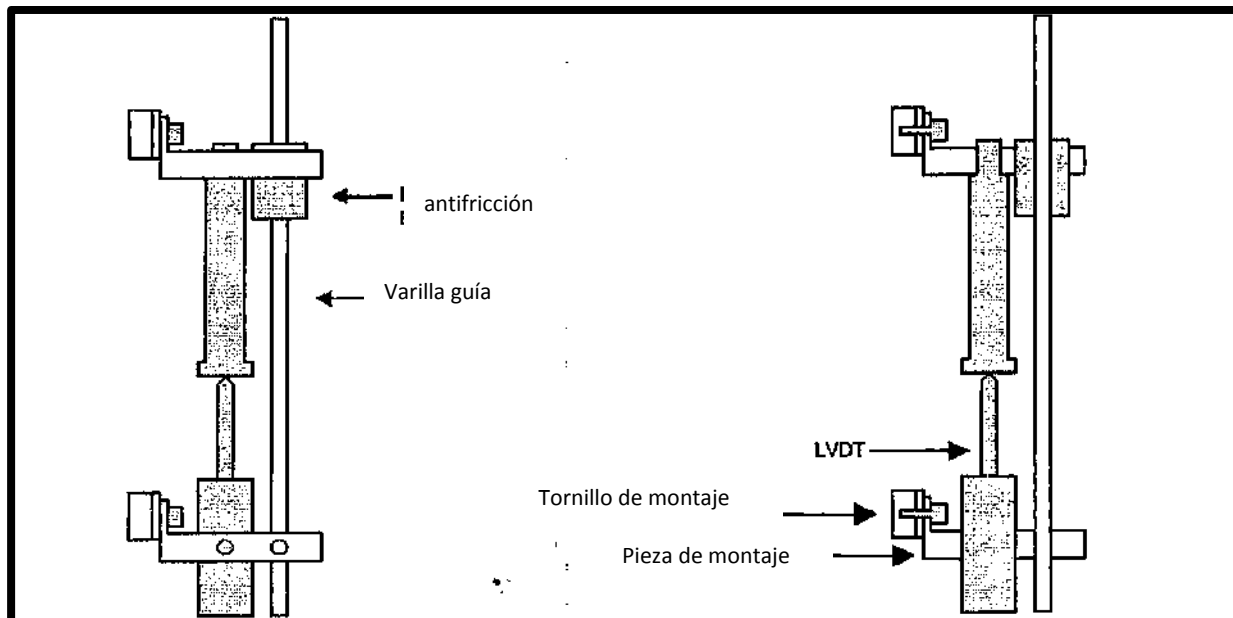


Figura 3. Detalle del montaje del Hardware

Nota 6. Un epóxico de secado rápido, como el QM-50 Duro Master Mend extra resistente de secado rápido, es adecuado para pegar los pines.

- 10.2 La longitud del medidor para medir la deformación axial debe ser de $101.6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Debe utilizarse un aparato para alineamiento y espaciado apropiado para facilitar el montaje del hardware de medición de la deformación axial.

11. Procedimiento.

- 11.1 La serie de ensayos para el desarrollo de curvas maestras para usar en respuesta de pavimentos y análisis de comportamiento debe ser llevada a cabo a -10 , 4.4 , 21.1 , 37.8 y 54°C a frecuencias de carga de 0.1 , 0.5 , 1.0 , 5 , 10 y 25 Hz para cada una de las temperaturas. Cada uno de los especímenes de prueba, individualmente instrumentado con LVDTs, debe ser ensayado para cada una de las 30 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga comenzando con la temperatura más baja y procediendo a la más alta. El ensayo a una temperatura dada debe comenzar con la frecuencia más alta de carga y proceder con la más baja.
- 11.2 Coloque el espécimen de prueba en la cámara de temperatura y permita que se equilibre a la temperatura de prueba especificada $\pm 0.3^\circ\text{C}$. Use un espécimen de monitoreo con un termocople montado en el centro para determinar el momento en

que el espécimen alcanza la temperatura especificada de ensayo. Los tiempos mínimos recomendados para que la temperatura se equilibre son proporcionados como una guía. Note que estas guías para tiempos de equilibrio son recomendadas cuando se ensayan de dos a cuatro replicas a la vez.

Tabla 4. Tiempos de equilibrio recomendados

Temperatura del espécimen °C (°F)	Tiempo en el cuarto de temperatura, h 25°C	Tiempo previo a la temperatura de ensayo, h
-10 (14)	Toda la noche	Toda la noche
4 (40)	Toda la noche	4 horas o toda la noche
21 (70)	1	3
37 (100)	2	2
54 (130)	3	1

- 11.3 Coloque uno de los tratamientos para reducir la fricción en los extremos encima del disco de acero endurecido de la parte inferior del marco de carga, monte los lvdt axiales en los pines previamente pegados al espécimen. Ajuste los LVDT al extremo de su rango lineal para permitir que el rango completo esté disponible para la deformación permanente a compresión acumulada.
- 11.4 Coloque el tratamiento para reducir la fricción en los extremos en la parte superior y el disco de acero endurecido encima del espécimen. Centre visualmente el espécimen con el actuador de carga con el propósito de evitar carga excéntrica.
- 11.5 Aplique una carga de contacto ($P_{\min}$) igual al cinco por ciento de la carga dinámica que será aplicada al espécimen. Es aceptable incrementar el esfuerzo de contacto aplicado hasta 20 KPa para mejorar la efectividad del control de la maquina aplicando una carga que mantendrá el contacto positivo con el espécimen pero sin dañarlo.
- 11.6 Ajuste y balancee el sistema de medición electrónico como sea necesario.
- 11.7 Aplique una carga ($P_{\text{dinámica}}$) sinusoidal (haversine) al espécimen en forma cíclica. La carga dinámica debe ser ajustada para obtener deformaciones axiales entre 50 y 150 microdeformaciones.

Nota 7. La carga dinámica depende sobre todo de la rigidez del espécimen y los rangos generalmente están entre 15 y 2800 KPa. Para temperaturas frías se requieren cargas más altas. La Tabla 5 presentan niveles de esfuerzo dinámico típicos basados en la temperatura.

Tabla 5. Niveles de esfuerzo dinámico típicos

Temperatura °C (°F)	Rango KPa	Rango, psi
-10 (14)	1400-2800	200-400
4 (40)	700-1400	100-200
21 (70)	350-700	50-100
37 (100)	140-250	20-50
54 (130)	35-70	5-10

- 11.8 Ensaye el espécimen de la temperatura más baja a la más alta, es decir, de -10°C a 54°C. Para cada una de las temperaturas, aplicar la carga de la frecuencia más alta a la más baja, es decir, de 25 Hz a 0.1 Hz. Al inicio del ensayo, precondicionar el espécimen con 200 ciclos a 25 Hz al nivel de esfuerzo que corresponda de acuerdo con la Tabla 5. Luego cargue el espécimen como es especificado en la Tabla 6. Un periodo típico de reposo entre cada una de las frecuencias es de dos minutos. El periodo de reposo no debe exceder 30 minutos para cualquier frecuencia consecutiva.

Tabla 6. Número de ciclos para la secuencia de ensayo

Frecuencia (Hz)	Número de ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0.5	15
0.1	15

- 11.9 El espécimen debe ser desechado al final de cada serie de ensayos para cada uno de los periodos de temperatura. Si la deformación permanente no recuperable acumulada es mayor que 1500 micro unidades de deformación, reducir el nivel de esfuerzo a la mitad. Mantenga los datos del ensayo hasta el siguiente periodo de reposo, deseche el espécimen, y use uno nuevo para el resto de las frecuencias de ensayos bajo condiciones de carga reducida.

12. CALCULOS.

- 12.1 Esta sección presenta los procedimientos para calcular el módulo dinámico, $|E^*(\omega)|$ y el ángulo de fase, $\theta(\omega)$, usando datos de una frecuencia de carga específica, ω . También define mediciones de calidad de los datos que deben ser usadas con los límites de la sección 13 para evaluar la confiabilidad de los datos de prueba.
- 12.2 La aproximación general usada aquí involucra el ajuste de mínimos cuadrados de una onda sinusoidal, como es descrito por Chapra y Canale en Métodos numéricos para ingenieros (McGraw Hill, 1985, pp 404-407). Se utiliza la regresión debido a que

es fácil para la mayoría de los ingenieros y técnicos en la industria de pavimentos entenderla y aplicarla efectivamente. Esta aproximación es fácilmente llevada a cabo en una hoja de cálculo.

12.3 Los datos obtenidos de cada uno de los ensayos de módulo dinámico a una frecuencia ω_0 son almacenados en forma de varios arreglos, uno para el tiempo (t_i), otro para el esfuerzo (σ_i) y otro para cada una de las deformaciones $j=1, 2, 3 \dots m$ de los transductores de deformación usados (ε_j). El número de $i=1, 2, 3 \dots n$ puntos en cada uno de los arreglos será igual y dependerá del número de datos recolectados por ciclo de carga y el número total de ciclos para cada uno de los cuales los datos han sido recolectados. Se recomienda que se utilicen 50 puntos por ciclo y 5 ciclos para un total de 250 datos.

12.4 *Análisis de datos de esfuerzo.* El primer paso en el análisis es analizar los datos en el arreglo de esfuerzos. El análisis de datos es llevado a cabo en datos de esfuerzo centrado el cual es calculado del arreglo de datos de esfuerzo restando el esfuerzo promedio.

12.4.1 Determinar el esfuerzo promedio como sigue:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}$$

Donde

$\bar{\sigma}$ = esfuerzo promedio

σ_i = esfuerzo en el punto i en el arreglo de datos

n = número de puntos en el arreglo de datos

12.4.2 Luego calcule el esfuerzo central restando el esfuerzo promedio de cada uno de las mediciones de esfuerzo:

$$\sigma'_i = \sigma_i - \bar{\sigma}$$

Donde

σ_i = esfuerzo en el punto i en el arreglo de datos

σ'_i = Esfuerzo central en el punto i en el arreglo de datos

$\bar{\sigma}$ = Esfuerzo promedio

12.4.3 De los datos de esfuerzo central, calcule los tres coeficientes de esfuerzo: desplazamiento, magnitud en la fase y magnitud fuera de fase.

$$A_{\sigma 0} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma'_i}{n} \quad (4)$$

$$A_{\sigma 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sigma'_i \cos(\omega_0 t_i) \quad (5)$$

$$B_{\sigma 1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \sigma'_i \sin(\omega_0 t_i) \quad (6)$$

Donde

$A_{\sigma 0}$ = coeficiente de esfuerzo de desplazamiento, Kpa (psi)

$A_{\sigma 1}$ = magnitud del coeficiente de esfuerzo en fase, Kpa (psi)

$B_{\sigma 1}$ = magnitud del coeficiente de esfuerzo fuera de fase, Kpa (psi)

σ'_i = Esfuerzo central en el punto i en el arreglo de datos

ω_0 = frecuencia del esfuerzo aplicado, rad/seg

t_i = tiempo en el punto i en el arreglo de datos, s

12.4.4 De los coeficientes de esfuerzo, calcular la magnitud del esfuerzo y el ángulo de fase.

$$|\sigma^*| = \sqrt{A_{\sigma 1}^2 + B_{\sigma 1}^2} \quad (7)$$

$$\theta_{\sigma} = \arctan\left(-\frac{B_{\sigma 1}}{A_{\sigma 1}}\right) \quad (8)$$

Donde

$|\sigma^*|$ =magnitud del esfuerzo, Kpa (psi)

θ_{σ} = ángulo de fase, grados

$A_{\sigma 1}$ = magnitud del coeficiente de esfuerzo en la de fase

$B_{\sigma 1}$ = magnitud del coeficiente de esfuerzo fuera de fase, Kpa (psi)

12.4.5 Calcule un arreglo de los esfuerzos centrales estimados y la desviación estándar del esfuerzo aplicado.

$$\hat{\sigma}'_i = A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1} \cos(\omega_0 t_i) \quad (9)$$

$$se(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\sigma}'_i - \sigma'_i)^2}{n-4} \left(\frac{100\%}{|\sigma^*|} \right)} \quad (10)$$

Donde

$\hat{\sigma}'_i$ = esfuerzo central estimado en el punto i, kPa (psi)

se(σ)= desviación estándar para el esfuerzo aplicado, por ciento

$A_{\sigma 0}$ = coeficiente de esfuerzo de desplazamiento, Kpa (psi)

$A_{\sigma 1}$ = magnitud del coeficiente de esfuerzo en fase, Kpa (psi)

$B_{\sigma 1}$ = magnitud del coeficiente de esfuerzo fuera de fase, Kpa (psi)

σ'_i = esfuerzo central en el punto i en el arreglo de datos

ω_0 = frecuencia del esfuerzo aplicado, rad/seg

t_i = tiempo en el punto i en el arreglo de datos, s

$|\sigma^*|$ =magnitud del esfuerzo, Kpa (psi)

n= número de puntos en el arreglo de datos

12.5 Análisis de datos de deformación. El segundo paso en el análisis es llevar a cabo un análisis similar en los datos de cada uno de los transductores de deformación. Sin embargo, en este caso los datos son corregidos para deriva causada por la deformación permanente durante el ensayo, y los datos centrados en la deformación promedio para el transductor.

12.5.1 Para estimar el ajuste en los datos de deformación, busque cada una de los arreglos de transductores de deformación y determine los valores máximo y mínimo y el tiempo en que ocurrió para cada uno de los ciclos de carga. Luego determine la pendiente del valor máximo y mínimo locales con respecto al tiempo usando regresión lineal. El promedio de estas dos pendientes es la velocidad de ajuste D_j para el transductor de deformación j.

12.5.2 Determine la deformación promedio de cada transductor como sigue:

$$\bar{\epsilon}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_{ji}}{n} \quad (11)$$

Donde

$\bar{\epsilon}_j$ = Deformación promedio para el transductor j

ϵ_{ji} = Deformación para el transductor j en el punto i del arreglo

n= número de puntos en el arreglo de datos

12.5.3 Corrija y centre los datos de deformación para cada uno de los transductores restando de las deformaciones medidas los tiempos de la velocidad de ajuste el tiempo de carga y también reste la deformación promedio para dicho transductor:

$$\epsilon'_{ji} = \epsilon_{ji} - D_j t_i - \bar{\epsilon}_j \quad (12)$$

Donde

ϵ'_{ji} = Deformación central y corregida para el transductor j en el punto i en el arreglo de datos

ϵ_{ji} = Deformación para el transductor j en el punto i en el arreglo de datos

t_i = tiempo para el punto i en el arreglo de datos

$\bar{\epsilon}_j$ = Deformación promedio para el transductor j

D_j = velocidad de ajuste del transductor j

12.5.4 De los datos de deformación centrados y corregidos para cada transductor, calcule los tres coeficientes de deformación: desplazamiento, magnitud en la fase y magnitud fuera de fase.

$$A_{\epsilon j0} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon'_{ji}}{n} \quad (13)$$

$$A_{\epsilon j1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon'_{ji} \cos(\omega_0 t_i) \quad (14)$$

$$B_{\epsilon j1} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon'_{ji} \sin(\omega_0 t_i) \quad (15)$$

Donde

$A_{\epsilon j0}$ = coeficiente de ajuste para el transductor de deformación j

$A_{\epsilon j1}$ = magnitud del coeficiente en fase para el transductor de deformación j

$B_{\epsilon j1}$ = magnitud del coeficiente fuera de fase para el transductor de deformación j

ϵ'_{ji} = Deformación central y corregida para el transductor j en el punto i en el arreglo de datos

t_i = tiempo para el punto i en el arreglo de datos

ω_0 = frecuencia del esfuerzo aplicado, rad/seg



12.5.5 De los coeficientes de deformación, calcule la magnitud de la deformación y el ángulo de fase para cada transductor.

$$|\epsilon_j^*| = \sqrt{A_{\epsilon j1}^2 + B_{\epsilon j1}^2} \quad (16)$$

$$\theta_{\epsilon j1} = \arctan\left(-\frac{B_{\epsilon j1}}{A_{\epsilon j1}}\right) \quad (17)$$

Donde

$|\epsilon_j^*|$ = Magnitud de la deformación para el transductor, j

$\theta_{\epsilon j}$ = Ángulo de fase para el transductor de deformación, grados

$A_{\epsilon j1}$ = Magnitud del coeficiente en fase para el transductor de deformación j

$B_{\epsilon j1}$ = Magnitud del coeficiente fuera de fase para el transductor de deformación j

12.5.6 Para cada uno de los transductores de deformación, calcular una matriz/fila de la deformación central y la corregida estimada y la desviación estándar de los datos de deformación.

$$\hat{\epsilon}'_{ji} = A_{\epsilon j0} + A_{\epsilon j1} \cos(\omega_0 t_i) + B_{\epsilon j1} \sin(\omega_0 t_i) \quad (18)$$

$$se(\epsilon_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\epsilon}'_{ji} - \epsilon'_{ji})^2}{n-4} \left(\frac{100\%}{|\epsilon_j^*|} \right)} \quad (19)$$

Donde

$\hat{\epsilon}'_{ji}$ = deformación central corregida y estimada para el transductor de deformación j en el punto i

$se(\epsilon_j)$ = desviación estándar para la respuesta del transductor j, por ciento

$A_{\epsilon j0}$ = coeficiente de ajuste para el transductor de deformación j

$A_{\epsilon j1}$ = magnitud del coeficiente en fase para el transductor de deformación j

$B_{\epsilon j1}$ = magnitud del coeficiente fuera de fase para el transductor de deformación j

ϵ'_{ji} = deformación central y corregida para el transductor j en el punto i en el arreglo de datos

t_i = tiempo para el punto i en el arreglo de datos

ω_0 = frecuencia del esfuerzo aplicado, rad/seg

$|\epsilon_j^*|$ = magnitud de la deformación para el transductor, j

n= número de puntos en el arreglo de datos

12.5.7 Calcule el ángulo de fase promedio, la magnitud de la deformación y la desviación estándar para todos los transductores de deformación m, con dos coeficientes de uniformidad que representan la variación entre la deformación de los transductores.

$$\bar{\theta}_{\epsilon} = \frac{\sum_{j=1}^m \theta_{\epsilon j}}{m} \quad (20)$$

$$|\bar{\epsilon}^*| = \frac{\sum_{j=1}^m |\epsilon_j^*|}{m} \quad (21)$$

$$se(\epsilon) = \frac{\sum_{j=1}^m se(\epsilon_j)}{m} \quad (22)$$

$$U_{\epsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (|\epsilon_j^*| - |\bar{\epsilon}^*|)^2}{m-1} \left(\frac{100\%}{|\bar{\epsilon}^*|} \right)} \quad (23)$$

Donde

$\bar{\theta}_{\epsilon}$ = Ángulo de fase promedio para todos los transductores de deformación, grados

$|\bar{\epsilon}^*|$ = Magnitud de la deformación promedio

$se(\epsilon)$ =desviación estándar promedio para todos los transductores de deformación, en por ciento

U_{ϵ} = Coeficiente de uniformidad para los transductores de deformación, porciento

U_{θ} = Coeficiente de uniformidad para la fase, porciento

m= número de puntos en el arreglo de datos

12.6 Calcule el ángulo de fase y el módulo dinámico. El paso final en el análisis de datos es calcular el ángulo de fase general, $\theta(\omega)$, en grados, y el módulo complejo, $|E^*(\omega)|$, kPa (psi) para la frecuencia seleccionada, ω :

$$\theta(\omega) = \bar{\theta}_{\epsilon} - \theta_{\sigma} \quad (25)$$

$$|E^*(\omega)| = \frac{|\sigma^*|}{|\epsilon^*|} \quad (26)$$

Donde

$\theta(\omega)$ = ángulo de fase entre el esfuerzo aplicado y la deformación para la frecuencia ω , grados

$|E^*(\omega)|$ = módulo dinámico para la frecuencia ω , Kpa (psi)

$\bar{\theta}_{\epsilon}$ = ángulo de fase promedio para todos los transductores de deformación, grados



θ_o = ángulo de fase del esfuerzo, grados

$|\sigma^*|$ = magnitud del esfuerzo, kPa (psi)

$|\epsilon^*|$ = magnitud de la deformación promedio

13. Calidad de los datos.

13.1 Además del módulo dinámico y el ángulo de fase, un producto del análisis de datos descrito en la Sección 12 son cuatro indicadores de calidad: (1) la desviación estándar del esfuerzo aplicado, (2) la desviación estándar de las mediciones de deformación, (3) el coeficiente de uniformidad de las mediciones de deformación y (4) el coeficiente de uniformidad de las mediciones del ángulo de fase.

13.2 Estos indicadores de la calidad de los datos deben ser usados para aprobar la confiabilidad de los datos. La Tabla 7 presenta los límites recomendados para los indicadores de calidad de los datos.

Tabla 7 Límites recomendados para los indicadores de calidad de los datos

Indicador	Símbolo	Ecuación n	Límite
Desviación estándar del esfuerzo aplicado	$se(\sigma)$	9	$\leq 10\%$
Desviación estándar promedio de la medición de deformaciones	$se(\epsilon)$	21	$\leq 10\%$
Coeficiente de uniformidad de las mediciones de deformación	U_ϵ	22	$\leq 20\%$
Coeficiente de uniformidad de las mediciones del ángulo de fase	U_θ	23	≤ 3 grados

Nota 8. Los límites recomendados están basados en la investigación concluida en el proyecto 9-29 NCHRP y quizá sea revisado en el futuro.

14. Reporte

14.1 Reporte la siguiente información para cada uno de los especímenes para cada combinación de temperatura y frecuencia ensayada:

14.1.1 Temperatura del espécimen

14.1.2 Frecuencia del ensayo

14.1.3 Módulo dinámico (de la ecuación 7)

14.1.4 Ángulo de fase promedio entre el esfuerzo aplicado y la deformación medida (ecuación 25)

14.1.5 Magnitud de la deformación promedio (Ecuación 21)

14.1.6 Magnitud del esfuerzo (Ecuación 7)



14.1.7 Desviación estándar del esfuerzo aplicado (Ecuación 10)

14.1.8 Desviación estándar promedio de la medición de deformaciones (Ecuación 22)

14.1.9 Coeficiente de uniformidad para las mediciones de deformación (Ecuación 23)

14.1.10 Coeficiente de uniformidad para las mediciones del ángulo de fase (ecuación 24)

15. REALIZÓ: M.C Mayra Flores Flores Jefe de laboratorio de asfaltos y mezclas asfálticas

16. REVISÓ: Ing. Alfonso Pérez Salazar Líder de grupo Geomateriales

Aprobó: Dr. Paul Garnica Anguas Jefe de la División de Laboratorios de Infraestructura	Autorizó: MC Rodolfo Téllez Gutiérrez Coordinador de Infraestructura.
--	---

APENDICE

Información no obligatoria.

X1. Propósito.

- X1.1 Este apéndice presenta un procedimiento para evaluar la uniformidad del contenido de vacíos de aire en especímenes de prueba producidos para ensayos de modulo dinámico.
- X1.2 Los ensayos indican la importancia de la diferencia en la gravedad específica bruta promedio entre el tercio superior e inferior del espécimen con respecto al tercio medio.
- X1.3 El procedimiento puede ser usado para determinar la altura para preparar especímenes giratorios con un compactador y disminuir las variaciones de contenido de vacíos de aire dentro de la muestra.





X2. Resumen.

- X2.1 Se preparan tres especímenes de prueba, como es descrito en la Sección 9, de los especímenes giratorios fabricados con la misma mezcla y compactados con la misma altura.
- X2.2 Los especímenes de prueba son cortados en tres rebanadas de igual espesor y se determina la gravedad específica bruta de cada una.
- X2.3 Una prueba de hipótesis estadística es llevada a cabo para determinar la importancia de las diferencias entre la gravedad específica bruta promedio de la rebanada superior e inferior con respecto a la de en medio.

X3. Procedimiento

- X3.1 Prepare tres especímenes de prueba siguiendo la sección 9 con un contenido de vacíos de aire de 5.5 por ciento. Los tres especímenes deben tener contenidos de vacíos de aire dentro de un rango de 5.0 a 6.0 por ciento.
- X3.2 Identifique el tercio superior, central e inferior de cada uno de los especímenes, luego vea los especímenes en tres puntos.
- X3.3 Determine la gravedad específica bruta de cada una de las nueve rebanadas de acuerdo con T 166 para mezclas densas y abiertas o T 269 para mezclas de granulometría abierta.
- X3.4 Elabore una tabla resumen de los datos de gravedad específica bruta en la cual cada columna contenga datos para una rebanada específica y cada una de las filas contenga datos de un núcleo específico.
- X3.5 Para cada columna calcule el promedio y varianza de las mediciones de gravedad específica bruta usando las ecuaciones X3.1 y X3.2.

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i}{3} \quad (X3.1)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 (y_i - \bar{y})^2}{2} \quad (X3.2)$$

donde:

$\bar{y}$ = promedio de la rebanada

s^2 = varianza de la rebanada

y^i = valores medidos

- X3.6 Comparación estadística de promedios. Compare la gravedad específica bruta promedio de las rebanadas superior, inferior con respecto a la central usando las pruebas de hipótesis descritas abajo. En la descripción de abajo, los subíndices s, m e i se refieren a las rebanadas superior, media e inferior, respectivamente.



X3.6.1 Verifique la rebanada superior con respecto a la de en medio.

X3.6.2 Hipótesis nula. La gravedad específica bruta promedio de la rebanada superior es igual al a gravedad específica bruta de l rebanada de en medio:

$$\mu_s^2 = \mu_c^2$$

X3.6.3 Hipótesis alternativa. La gravedad específica bruta promedio de la rebanada superior no es igual a la gravedad específica bruta promedio de la rebanada de en medio:

$$\mu_s^2 \neq \mu_c^2$$

X3.6.3.1 Prueba estadística:

$$t = \frac{(\bar{y}_s - \bar{y}_c)}{0.8165(s)} \quad (X3.3)$$

Donde

$$s = \sqrt{\frac{s_s^2 + s_c^2}{2}} \quad (X3.4)$$

Donde

$\bar{y}_s$ = promedio calculado para la rebanada superior

$\bar{y}_c$ = promedio calculado para la rebanada de en medio

s_s^2 =varianza calculada para la rebanada superior

s_c^2 = varianza calculada para la rebanada de en medio

X3.6.3.2 Región de rechazo. Para la muestra de tamaños especificados, el valor absoluto de la prueba de hipótesis debe ser menor que 2.78 para concluir que la gravedad especifica bruta de la rebanada superior y la de en medio son iguales.

X3.6.4 Verifique la rebanada inferior con respecto a la de en medio

X3.6.4.1 Hipótesis nula. La gravedad específica bruta promedio de la rebanada superior es igual al a gravedad específica bruta de l rebanada de en medio:

$$\mu_i^2 = \mu_c^2$$

X3.6.4.2 Hipótesis alternativa. La gravedad específica bruta promedio de la rebanada superior no es igual a la gravedad específica bruta promedio de la rebanada de en medio:

$$\mu_i^2 \neq \mu_c^2$$

X3.6.4.3 Prueba estadística:

$$t = \frac{(\bar{y}_i - \bar{y}_c)}{0.8165(s)} \quad (X3.5)$$

donde

$$s = \sqrt{\frac{s_i^2 + s_c^2}{2}} \quad (X3.6)$$

Donde

$\bar{y}_i$ = promedio calculado para la rebanada superior

$\bar{y}_c$ = promedio calculado para la rebanada de en medio

s_i^2 =varianza calculada para la rebanada superior

s_c^2 = varianza calculada para la rebanada central

X3.6.4.4 Región de rechazo. Para la muestra de tamaños especificados, el valor absoluto de la prueba de hipótesis debe ser menor que 2.78 para concluir que la gravedad especifica bruta de la rebanada inferior y la de en medio son iguales.

X.4 Análisis

X4.1 Diferencias significativas entre la gravedad especifica bruta de la rebanada superior e inferior con respecto a la de en medio indican una variación sistemática en la densidad dentro del espécimen.

X4.2 Especímenes con diferencias de gravedad especifica bruta para la rebanada superior y/o inferior con respecto al a de en medio en el orden de 0.025 se han comportado satisfactoriamente en los ensayos de modulo dinámico.

X4.3 Cambiando la altura de los especímenes giratorios se puede mejorar la uniformidad de la densidad en el espécimen de prueba.



BIBLIOGRAFÍA

Di Benedetto H., Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux : résultats expérimentaux et formulation rhéologique. **In:** RILEM. Ensayos Mecánicos en mezclas asfálticas, 1990, Budapest, pp 387-401.

Di Benedetto H., Corte J.-F., « Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges », Hermes, Lavoisier, 2004.

P Garnica, J.A Gómez, H. Delgado, Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 228, 2003

Mandel, J., Sur les corps visco-élastiques à comportement linéaire. Informes de la Academia de Ciencias. Paris, vol. 241, 1955, pp. 1910-1912

H. Delgado, Comportement à la Fatigue d'Enrobés Bitumineux Renforcés de Fibres Végétales, Memoria de Maestría en Investigación, Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon, 2008.

Saleçon J., Cours de calcul des structures anélastiques. Viscoélasticité, Prensa de la Escuela Nacional de Caminos y Puentes, Paris, 1983.

T. Pellinen, B. Crockford, Comparison of analysis Techniques to Obtain Modulus and Phase Angle from Sinusoidal Test Data. **In:** RILEM. Ensayos de desempeño y evaluación de mezclas asfálticas, 2003, Zurich, pp 301-307.

A Carter, D Perraton, La mesure du module complexe des enrobés bitumineux, 2^e Conferencia especializada en ingeniería de materiales, Montréal, Québec, Canada, 2002

J.D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, J. Wiley & Sons, New York, 1960

R. Bonaquist, Refining the Simple Performance Tester to Use in Routine Practice. NCHRP Report 614, 2008.

M. W. Witczak, J. Bari, Development of Master Curve (E*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures. Arizona State University Research Project, Tempe, AZ 85287-5306, 2004.

Guy Couarraze Jean-Louis Grossiord, Initiation à la rhéologique, Tech y Doc, 3^e edición

C. Huet, Etude par une méthode d'impédances du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias de la Universidad de Paris, 1963.





Olard F. Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé. Tesis: Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon, 2003, 221 p.

Houel A. Endommagement à la fatigue et fissuration mécanique des enrobés bitumineux sur dalle orthotrope. Tesis: Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon, 2007, 305 p.

Bonnot J., « Généralités sur essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôles des enrobés bitumineux », Ensayos Mecánicos de mezclas asfálticas. Simposio Internacional RILEM, p. 133-170, Belgrado, 12-16 septembre 1983.

Perraton, D., Baaj, H., Di Benedetto, H., Paradis, M., Evaluation de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux fondée sur l'évolution de l'endommagement du matériau en cours d'essai : aspects fondamentaux et application à l'enrobé à matrice de pierre. Canadian Journal of Civil Engineering, 2003, n°30, pp. 902-913.

M. Neifar, H. Di Benedetto, B. Dongmo, Permanent Deformation and Complex Modulus: Two Different Characteristics from a Unique Test. In: RILEM. Ensayos de desempeño y evaluación de mezclas asfálticas, 2003, Zurich, pp 316-323.

Asphalt Institute, Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave.

NORMA AASHTO TP 62-07, Método estándar del ensayo para determinar el Módulo Dinámico en Mezclas asfálticas en Caliente.

Rogelio Rodríguez Talavera, Víctor Manuel Castaño Meneses, Miguel Martínez Madrid. Emulsiones Asfálticas.

Revista de la Universidad de Eafit. Comportamiento dinámico de Mezclas asfálticas.

