

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Posgrado y Educación Continua



Tesis Doctoral

“CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL EMPLEO DE UNA VIGA SEMICIRCULAR EN FLEXIÓN”

Mg. Ing. Marina Lorena Cauhape Casaux

Director: Dr. Ing. Fernando Oscar Martínez

Miembros del Jurado: Dr. Ing. Hugo Bianchetto

Dr. Ing. Marcelo Bustos

Dr. Ing. Francisco Morea

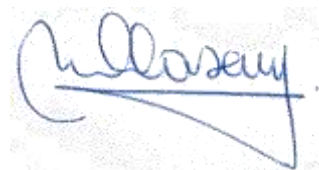
Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de

Doctora en Ingeniería

2023

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar por el título de Posgrado en ninguna otra Universidad o Institución.



Marina Lorena Cauhapé Casaux

RESUMEN

Actualmente, los métodos de diseño de pavimentos empírico-mecanísticos requieren para su implementación el conocimiento de las propiedades fundamentales de los materiales intervinientes. En el caso de las mezclas asfálticas, las propiedades viscoelásticas (módulo dinámico y ángulo de fase) son las de mayor interés. Históricamente, han sido determinadas experimentalmente en laboratorio mediante ensayos dinámicos de compresión uniaxial y triaxial, ensayos de tracción-compresión, vigas de dos y cuatro puntos y ensayos de tracción indirecta por compresión diametral, principalmente. En Argentina, ha ganado difusión esta última metodología por su relativa simplicidad de implementación utilizando probetas compactadas en laboratorio o caladas de pavimentos existentes. Su mayor inconveniente radica en la necesidad de adoptar una relación de Poisson para el cálculo del módulo dinámico debido al estado biaxial de tensiones generado durante el ensayo. Este trabajo presenta una nueva configuración para determinar las propiedades reológicas de mezclas asfálticas: la viga semicircular en flexión (SCB por su nombre en inglés). Ésta ha sido extensamente aplicada para caracterizar el comportamiento a fractura de rocas y mezclas asfálticas, sin embargo, no se han encontrado experiencias en la determinación de módulo dinámico. Sus ventajas incluyen la simpleza de la geometría de la probeta (ya sean elaboradas en laboratorio o testigos calados del pavimento) y la forma de aplicación de cargas y la posibilidad de empleo de equipos no específicos usualmente presentes en laboratorios. Se propone el desarrollo de un modelo de elementos finitos para establecer una ecuación para el cálculo del módulo dinámico a partir de la carga aplicada y los desplazamientos resultantes en la muestra y demostrar que la relación de Poisson no influencia su cálculo. Se presenta la instrumentación de probetas y la evaluación de diferentes mezclas asfálticas bajo diferentes condiciones de ensayo (temperatura y frecuencias de carga) para validar este innovador procedimiento propuesto.

PALABRAS CLAVE

Mezclas Asfálticas – Módulo Dinámico – Viscoelasticidad – Viga Semicircular

ABSTRACT

Nowadays, the empirical-mechanistic pavement design methods require for their implementation the knowledge of the fundamental properties of the intervening materials. In the case of asphalt mixtures, the viscoelastic properties (dynamic modulus and phase angle) are of greatest interest. Historically, they have been mainly determined by experimental tests in laboratory such as dynamic uniaxial and triaxial compression tests, tensile-compression tests, two and four point bending tests and indirect tensile tests. In Argentina, the indirect tensile test methodology has gained diffusion due to its relative simplicity of implementation using laboratory compacted specimens or samples taken of existing pavements. Its major drawback lies in the need to adopt a Poisson's ratio for the calculation of the dynamic modulus due to the biaxial state of stresses generated during the test. This work presents a new configuration to determine the rheological properties of asphalt mixtures: the semicircular bending (SCB). This methodology has been widely applied to characterize the fracture behavior of rocks and asphalt mixtures, however, no experiences have been found in the determination of dynamic modulus. Its advantages include the simplicity of the geometry of the specimen (whether made in the laboratory or cores cut from the pavement), the way of applying loads and the possibility of using non-specific equipment usually present in laboratories. The development of a finite element model is proposed to establish an equation for the calculation of the dynamic modulus from the applied load and the resulting displacements in the simple, and to show that the Poisson's ratio does not influence its calculation. The instrumentation of specimens and the evaluation of different asphalt mixtures under different test conditions (temperature and load frequencies) are presented to validate this innovative proposed procedure.

KEYWORDS

Asphalt Mixtures – Dynamic Modulus – Viscoelasticity – Semicircular bending

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todos aquellos que me han acompañado en el camino para poder llevar adelante esta Tesis:

A los miembros del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) y especialmente a los integrantes del Laboratorio Vial.

Al Dr. Fernando Martínez, por su apoyo, acompañamiento y asesoría.

A los miembros de mi familia y muy especialmente a mi esposo Gustavo y a mi hijo Mateo.

INDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
INDICE	6
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Mezclas asfálticas e infraestructura vial.....	13
1.2 Hipótesis de la investigación	16
1.3 Objetivos	16
1.4 Organización de la Tesis	18
1.5 Abreviaturas y símbolos	18
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y DESARROLLO TEÓRICO	24
2.1 Conceptos básicos de la mecánica del continuo	24
2.1.1 Análisis del estado de tensiones.....	24
2.1.2 Análisis del estado de deformaciones.....	27
2.1.3 Elasticidad.....	31
2.1.4 Estado plano de Tensiones	33
2.1.5 Viscoelasticidad.....	34
2.1.6 Conceptos tecnológicos de tensión y deformación	37
2.2 Caracterización Dinámica de Mezclas Asfálticas. Módulo Dinámico.....	39
2.2.1 Reseña Histórica	39
2.2.2 Definición	41
2.2.3 Curvas Maestras: Principio de equivalencia frecuencia-temperatura.....	43
2.2.4 Curvas Maestras: Modelos fenomenológicos	48
2.2.5 Curvas Maestras: Modelos funcionales	49
2.2.6 Determinación de $ E^* $ en Compresión Uniaxial.....	52
2.2.7 Determinación de $ E^* $ en Tracción por compresión diametral.....	53
2.3 El ensayo de Viga semicircular en flexión.....	57
2.3.1 Configuración SCB.....	58
2.3.2 Geometría de la SCB	58
2.3.3 Cálculo del Módulo Dinámico a partir de la SCB	59
CAPÍTULO 3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	61
3.1 Descripción general del método	61
3.2 Aplicación del MEF para el análisis de la viga semicircular en flexión. Análisis comparativo con el ensayo de tracción indirecta.....	64
3.2.1 Obtención de una ecuación para el cálculo del módulo dinámico	68

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

3.2.2	Análisis de tensiones en X e Y	72
3.3	Justificación del empleo de la SCB como método de obtención del Módulo dinámico	75
CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL		77
4.1	Materiales.....	77
4.2	Metodología para la obtención de probetas.....	77
4.3	Equipo de ensayo.....	79
4.4	Ensayo de Compresión Uniaxial.....	81
4.5	Ensayo en Tracción indirecta	83
4.6	Ensayo de Viga semicircular en flexión	85
4.7	Análisis comparativo para los modelos aplicados.....	87
4.7.1	Curvas Maestras de $ E^* $	87
4.7.2	Análisis gráfico-estadístico	89
4.7.3	Método gráfico.....	91
4.7.4	Método estadístico	94
4.7.5	Modelo Huet-Sayegh.....	97
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		106
5.1	Síntesis y objetivos de la Tesis.....	106
5.2	Conclusiones referidas al desarrollo y aplicación experimental del ensayo de viga semicircular en flexión	107
5.3	Conclusiones referidas a la aplicación de un modelo de estimación de módulo dinámico	108
5.4	Recomendaciones y acciones futuras posibles	109
CAPÍTULO 6. PUBLICACIONES.....		111
BIBLIOGRAFÍA.....		112
ANEXO A: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MÓDULO DINÁMICO EN COMPRESIÓN UNIAxIAL.....		121
ANEXO B: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MÓDULO DINÁMICO EN TRACCIÓN INDIRECTA.....		122
ANEXO C: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MÓDULO DINÁMICO EN VIGA SEMICIRCULAR EN FLEXIÓN.....		124
ANEXO D: RESULTADOS DE MÓDULO DINÁMICO PARA EL MODELO DE HUET-SAYEGH.....		126

FIGURAS

Figura 1-1: Configuración experimental de viga semicircular en flexión	15
Figura 2-1: Tensión aplicada y deformación resultante	24
Figura 2-2: Composición de fuerzas: componentes tangencial y normal.....	25
Figura 2-3: Componentes tangenciales y normales según planos coordenados	25
Figura 2-4: Tensor de tensiones para el caso tridimensional	25
Figura 2-5: Tensor de tensiones para el caso bidimensional.....	25
Figura 2-6: Transformación de esfuerzos por rotación de ejes.....	26
Figura 2-7: Tensiones principales en 1D, 2D y 3D	27
Figura 2-8: Invariantes de tensiones	27
Figura 2-9: Deformación lineal	28
Figura 2-10: Deformación en el plano	29
Figura 2-11: Deformaciones laterales por aplicación de fuerza axial P	30
Figura 2-12: Coeficiente de Poisson	31
Figura 2-13: Módulo de corte	33
Figura 2-14: Estado plano de Tensiones y Deformaciones	33
Figura 2-15: Viscosidad	34
Figura 2-16: Material viscoso	35
Figura 2-17: Material visco-elástico.....	35
Figura 2-18: Modelo de dos elementos de un sólido de Voigt-Kelvin	36
Figura 2-19: Curva de flujo plástico Modelo de Voigt-Kelvin	36
Figura 2-20: Modelo de dos elementos de un sólido de Maxwell	37
Figura 2-21: Tensiones y deformaciones	38
Figura 2-22: Fuerzas y deformaciones en los ensayos de determinación de módulo dinámico	38
Figura 2-23: Tensión aplicada y deformación resultante	42
Figura 2-24: Módulo de almacenamiento y módulo de pérdida	43
Figura 2-25: Variación del módulo dinámico $ E^* $ con la frecuencia para diferentes temperaturas	45
Figura 2-26: Curva Maestra de $ E^* $ para una temperatura de referencia de 20°C	46
Figura 2-27: Construcción de isócrona para representar la Curva Maestra de $ E^* $ para una frecuencia de referencia de 1Hz	47
Figura 2-28: Espacio de Black	48
Figura 2-29: Plano de Cole-Cole.....	48
Figura 2-30: Modelo sigmoidal generalizado.....	49
Figura 2-31: Modelo Huet	50

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

Figura 2-32: Modelo Huet-Sayegh (H-S).....	51
Figura 2-33: Esquema del ensayo de compresión uniaxial y probeta de ensayo	53
Figura 2-34: Esquema del ensayo de tracción indirecta y probeta de ensayo	54
Figura 2-35: Relación de Poisson en función de la temperatura [59]	56
Figura 2-36: Configuración experimental de viga semicircular en flexión	58
Figura 2-37: Configuración SCB adoptada.....	59
Figura 3-1. Mallado.....	65
Figura 3-2. Modelo terminado	66
Figura 3-3. Nodos considerados para el cálculo del desplazamiento horizontal.....	67
Figura 3-4. Distribución de cargas	67
Figura 3-5. Cálculo de la función K para SCB.....	70
Figura 3-6. Cálculo de la función K para TI	70
Figura 3-7. Cálculo de la función K para TI y SCB	71
Figura 3-8. Carga aplicada y deformación horizontal resultante.....	71
Figura 3-9. Tensiones X en el plano medio.....	73
Figura 3-10. Tensiones Y en el plano medio.....	73
Figura 3-11. Distribución de tensiones X e Y en el eje Y.....	74
Figura 3-12. Distribución de tensiones X e Y en el eje X.....	74
Figura 3-13. Distribución de esfuerzos teóricos sobre planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta.	75
Figura 4-1: Equipos de compactación.....	78
Figura 4-2: Probetas	78
Figura 4-3: Probetas empleadas para los ensayos	79
Figura 4-4. Equipo de ensayo para las tres modalidades presentadas (a) CU, (b) TI, (c) SCB.....	80
Figura 4-5. Esquema del equipo de ensayo para las tres modalidades presentadas. [3].	80
Figura 4-6. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla CA30	81
Figura 4-7. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla AM3	82
Figura 4-8. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla 2%SBP.....	82
Figura 4-9. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla H1 Base	82
Figura 4-10. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla H2 Carpeta...83	
Figura 4-11. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla CA30.....	84
Figura 4-12. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla AM3	84
Figura 4-13. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla 2%SBP.....	84
Figura 4-14. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla H1 Base	85
Figura 4-15. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla H2 Carpeta...85	

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

Figura 4-16. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla CA30.....	86
Figura 4-17. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla AM3	86
Figura 4-18. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla 2%SBP.....	86
Figura 4-19. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla H1 Base	87
Figura 4-20. Curva Maestra de $ E^* $ y Diagrama de Black para la mezcla H2 Carpeta...87	
Figura 4-21. Comparativa de curvas Maestras de $ E^* $ para cada una de las mezclas en estudio.....	88
Figura 4-22. Comparativa de metodologías SCB-CU a partir de la línea de igualdad para $ E^* $, EA (izq), y EL (der), para todas las mezclas ensayadas	92
Figura 4-23. Comparativa de metodologías SCB-TI a partir de la línea de igualdad para $ E^* $, EA (izq), y EL (der), para todas las mezclas ensayadas	92
Figura 4-24. Comparativa de metodologías SCB-CU a partir de la línea de igualdad para el ángulo de fase, ϕ , EA (izq), y EL (der), para todas las mezclas ensayadas.....	92
Figura 4-25. Comparativa de metodologías SCB-TI a partir de la línea de igualdad para el ángulo de fase, ϕ , EA (izq), y EL (der), para todas las mezclas ensayadas	93
Figura 4-26. Errores relativos máximos, mínimos y medios en función de la temperatura de ensayo	95
Figura 4-27. Curvas Maestras de $ E^* $ y diagramas de Black para todas las mezclas en estudio.....	97
Figura 4-28. Comparativa de Modelo H-S a partir de la línea de igualdad para $ E^* $ y ϕ , en el espacio aritmético (izq), para todas las mezclas ensayadas en CU.	100
Figura 4-29. Comparativa de Modelo H-S a partir de la línea de igualdad para $ E^* $ y ϕ , en el espacio aritmético (izq), para todas las mezclas ensayadas en SCB.	100
Figura 4-30. Errores relativos máximos, mínimos y medios en función de la temperatura de ensayo.....	103

TABLAS

Tabla 3-1: Condiciones de borde y propiedades	65
Tabla 3-2: Consideraciones especiales.....	67
Tabla 3-3: Variables consideradas en el estudio.....	69
Tabla 3-4: Ecuaciones para K encontradas	70
Tabla 3-5: Rango de valores para K	70
Tabla 4-1: Características principales de las mezclas asfálticas empleadas.....	77
Tabla 4-2: Parámetros de las ecuaciones constitutivas.....	89
Tabla 4-3: Criterio de bondad de ajuste, Witczak [92].....	91
Tabla 4-4: Coeficientes A y B de las rectas de correlación para los diferentes modelos analizados	93
Tabla 4-5: Criterio de bondad de ajuste para la SCB, Witczak [92].....	94
Tabla 4-6: Errores relativos por debajo del 25% para $ E^* $ y ϕ	94
Tabla 4-7: Errores relativos por debajo del 25% para $ E^* $ y ϕ en función de la temperatura de ensayo	95
Tabla 4-8: Resultado Análisis ANOVA para $ E^* $	96
Tabla 4-9: Resultado Análisis ANOVA para ϕ	97
Tabla 4-10: Parámetros del modelo H-S para las mezclas en estudio	99
Tabla 4-11: Coeficientes A y B de las rectas de correlación para los diferentes modelos analizados	101
Tabla 4-12: Criterio de bondad de ajuste para el modelo H-S, Witczak [92]	101
Tabla 4-13: Errores relativos por debajo del 25% para $ E^* $ y ϕ	102
Tabla 4-14: Errores relativos por debajo del 25% para $ E^* $ y ϕ en función de la temperatura de ensayo	102
Tabla 4-15: Resultado Análisis ANOVA para $ E^* $	104
Tabla 4-16: Resultado Análisis ANOVA para ϕ	105
Tabla A-1: Valores de ensayo de Módulo dinámico, $ E^* $, y ángulo de fase, ϕ , mediante la metodología de Compresión Uniaxial.....	121
Tabla B-1: Valores de ensayo de Módulo dinámico, $ E^* $, y ángulo de fase, ϕ , mediante la metodología de Tracción Indirecta.....	122
Tabla C-1: Valores de ensayo de Módulo dinámico, $ E^* $, y ángulo de fase, ϕ , mediante la metodología de Viga Semicircular en Flexión.....	124
Tabla D-1: Valores estimados de Módulo dinámico, $ E^* $, y ángulo de fase, ϕ , por el Modelo de HUET-SAYEGH a partir de la metodología de Compresión Uniaxial.....	126

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

Tabla D 2: Valores estimados de Módulo dinámico, $|E^*|$, y ángulo de fase, ϕ , por el Modelo de HUET-SAYEGH a partir de la metodología de Viga Semicircular en Flexión.....127

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Mezclas asfálticas e infraestructura vial

La infraestructura vial desempeña un rol de gran importancia dentro del sistema de transporte. El correcto funcionamiento del mismo colabora con el desarrollo económico y social de un país. En este sentido los caminos constituyen un elemento primordial dentro del sistema de transporte, pues representan una de las principales formas de traslado de personas y mercancías.

Para la construcción de caminos se emplean diferentes materiales, entre ellos, las mezclas asfálticas. Éstas se utilizan tanto en capas de rodadura como en capas inferiores. Su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios, facilitando la circulación de los vehículos y transmitir eficientemente hacia las capas inferiores de la estructura, las cargas debidas al tránsito.

Por lo tanto, el pavimento debe ser diseñado para tener una vida de servicio durante la cual provea una superficie que posibilite el desplazamiento de los diferentes medios de transporte en condiciones de comodidad y seguridad y una estructura capaz de soportar los esfuerzos inducidos por el tránsito pesado.

Resulta entonces necesario desarrollar los conocimientos científicos que permitan mejorar la durabilidad de las distintas capas componentes del pavimento y particularmente, las capas asfálticas por su mayor importancia relativa, durante los períodos usuales de diseño.

El pavimento es la parte de la estructura que requiere la mayor inversión de recursos económicos, tanto en su etapa de construcción como en su etapa de mantenimiento. El estado del pavimento influye directamente en la mayoría de los costos del usuario de la carretera, aumentándolos cuando su estado no es óptimo, debido principalmente a los aumentos en tiempos de viajes, consumo de combustible y deterioro de los vehículos, entre muchos otros costos involucrados.

Durante mucho tiempo y perdurando en la actualidad, el diseño de los pavimentos asfálticos se realizó típicamente mediante procedimientos empíricos, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si esa metodología de análisis tiene correlación con el comportamiento real del pavimento.

Sin embargo, en los últimos tiempos, con el avance de las investigaciones, se han empezado a implementar los métodos de diseño basados en principios mecanicistas, para los cuales resulta necesario el conocimiento y caracterización de las propiedades mecánicas de los distintos materiales componentes. Esta metodología resulta en un enfoque más eficiente para el diseño estructural de los pavimentos flexibles pues se basa en principios racionales en donde los materiales son caracterizados para obtener

propiedades mecánicas fundamentales susceptibles de ser incorporadas en modelos estructurales analíticos que posibiliten determinar magnitudes tales como tensiones, deformaciones y desplazamientos, mediante el uso de modelos estructurales y ecuaciones matemáticas. La finalidad de estos estudios apunta a ampliar los conocimientos científicos que permitan asegurar la durabilidad de los pavimentos durante los períodos de diseño.

Si bien estos modelos de cálculo se han visto favorecidos por el avance de la computación que ofrece cada vez mayores prestaciones a menor costo, no ha ocurrido lo mismo con las técnicas de caracterización de las propiedades mecánicas fundamentales de materiales en laboratorio, ya que se requieren equipamientos sofisticados de alto costo y personal altamente capacitado para operarlos.

Una de las principales propiedades mecánicas de interés es el módulo dinámico de las mezclas asfálticas $|E^*|$ que caracteriza el comportamiento viscoelástico de estos materiales dependiente de la temperatura y el tiempo (o frecuencia) de aplicación de las sollicitaciones.

Este módulo dinámico es un parámetro clave en el diseño del pavimento pues determina la distribución de tensiones y deformaciones en todas las capas componentes de la estructura vial y se vincula estrechamente con la valoración del deterioro por fatiga y acumulación de deformaciones permanentes. También se ha propuesto su utilización como un ensayo de valoración del comportamiento, aplicable en la dosificación, el control de calidad y el análisis de la influencia de distintos factores de formulación de este tipo de materiales.

El mismo es determinado en laboratorio mediante diferentes procedimientos experimentales siendo los más difundidos los propuestos por la norma AASHTO T342 "Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt" (2022) que utilizan la metodología de compresión uniaxial con cargas dinámicas o las propuestas por la norma EN 12697-26 (2018) "BS EN 12697-26:2018 Bituminous mixtures. Test methods Stiffness" en la que se proponen diferentes metodologías experimentales.

En particular, en el Laboratorio Vial del IMAE se ha desarrollado un protocolo de ensayos utilizando la metodología de tracción indirecta con cargas sinusoidales a diferentes frecuencias y temperaturas. Los resultados obtenidos son interpretados en la hipótesis de Viscoelasticidad Lineal con validez del principio de equivalencia frecuencia-temperatura de manera de desarrollar curvas maestras de variación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas. Esta metodología de ensayos produce un estado biaxial de tensiones en la parte central de la probeta y ha sido elegida principalmente porque permite ensayar

tanto probetas compactadas convencionalmente en el laboratorio como testigos calados de pavimentos en servicio. [1, 2, 3]

Sin embargo, la obtención del módulo dinámico - u otros parámetros mecánicos - a partir de ensayos y el análisis e interpretación de los mismos implican un costo experimental elevado, lo que hace que en muchos casos se tienda a la búsqueda de nuevos procedimientos y ensayos más eficientes para obtener los diferentes parámetros de caracterización.

Motivado en estas premisas ha surgido una nueva metodología para caracterizar mezclas asfálticas mediante una configuración de flexión de una viga semicircular como se muestra en la Figura 1-1.

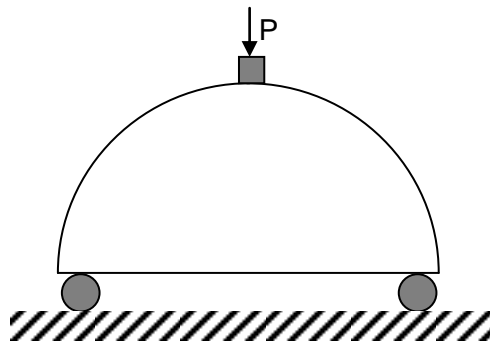


Figura 1-1: Configuración experimental de viga semicircular en flexión

En esta configuración experimental, la probeta se apoya sobre dos rodillos en la parte inferior en tanto que la carga se aplica en la parte superior de manera estática o dinámica, quedando solicitada como una viga de tres puntos, conservando la factibilidad de usar probetas compactadas convencionalmente en el laboratorio así como testigos calados de pavimentos en servicio adaptadas mediante un corte adicional en sentido diametral. Presenta la ventaja de desarrollar un estado uniaxial de tensiones en la parte media inferior de la muestra lo que a priori, significa una mayor simplicidad y eficiencia en la interpretación de las mediciones experimentales.

La simpleza que presenta la geometría de la probeta y la aplicación de cargas, la posibilidad de emplear equipos que no son específicos para este ensayo y pueden estar presentes en los laboratorios, y la posibilidad de adaptarse para determinar un número importante de propiedades en las mezclas, son algunas otras de las posibles ventajas de esta metodología experimental.

Se plantea entonces la hipótesis de que esta configuración experimental de una viga semicircular en flexión puede ser una metodología más eficiente para caracterizar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas por comparación con otras configuraciones experimentales.

Como consecuencia, esta investigación tiene como objetivo general la caracterización del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente mediante esta metodología de ensayo.

En particular y en primera instancia se dirige hacia la caracterización del módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente como cuestión original por cuanto, basado en la investigación bibliográfica realizada hasta el momento, esta configuración propuesta aún no ha sido utilizada con ese fin. Ello implica inicialmente, el desarrollo y puesta a punto del equipamiento necesario para llevarlo a la práctica, la definición de los protocolos de ensayo y análisis, la validación de esta metodología y la evaluación de la influencia de los distintos factores que afectan al módulo dinámico.

1.2 Hipótesis de la investigación

La presente Tesis plantea como hipótesis fundamental: verificar a partir de la premisa que indica que el módulo dinámico $|E^*|$ es una propiedad intrínseca del material, la metodología de determinación del mismo es independiente y por lo tanto el empleo del ensayo de Compresión Uniaxial, Tracción Indirecta y/o Viga Semicircular para su determinación resulta estadísticamente igual.

1.3 Objetivos

El objetivo general, considerando la hipótesis inicial planteada, resulta entonces:

Investigar sobre la posibilidad de utilizar un ensayo de Viga Semicircular en Flexión para caracterizar el comportamiento de mezclas asfálticas mediante resultados aptos para su aplicación en procedimientos de diseño de pavimentos flexibles basados en principios mecanísticos.

En particular se pretende:

- Recopilar experiencias y antecedentes sobre el empleo del ensayo de la viga semicircular en flexión en mezclas asfálticas para la determinación de distintos parámetros mecánicos.
- Desarrollar y poner a punto la metodología y el equipamiento necesario para poder llevar a cabo ese ensayo tanto en condiciones dinámicas como estáticas o hasta la rotura del espécimen.
- Caracterizar distintas mezclas asfálticas mediante la determinación del Módulo Dinámico aplicando esta metodología propuesta definiendo su campo de aplicación, la validez de la hipótesis de la viscoelasticidad lineal y del principio de equivalencia frecuencia-temperatura.

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

- Validar la metodología propuesta por comparación con los resultados obtenidos mediante el ensayo de Tracción Indirecta (TI) y Compresión Uniaxial (CU) para las mismas condiciones experimentales.

Se considera que estos objetivos planteados son un aporte importante para el diseño de pavimentos flexibles por cuanto posibilitarán comprender con mayor profundidad el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

La temática seleccionada constituye un aporte original del tema en nuestro país y se ubica dentro de las líneas de investigación que actualmente se encuentran en pleno desarrollo a nivel mundial.

1.4 Organización de la Tesis

La presente Tesis se encuentra organizada en 6 capítulos, cuyo contenido se resume en el siguiente detalle:

En el Capítulo 1 se plantea una introducción general del tema de Tesis, haciendo hincapié en la importancia del módulo dinámico en la caracterización de mezclas asfálticas para su empleo en el diseño de pavimentos flexibles. Se incluyen además los objetivos propuestos.

En el Capítulo 2 se describen antecedentes y el desarrollo teórico propiamente dicho, comenzando con temas de la mecánica del continuo, considerado como punto de partida y base conceptual. Luego se presentan diferentes teorías y conceptos referidos al análisis y descripción del comportamiento de las mezclas asfálticas a partir del módulo dinámico. Finalmente se incluyen antecedentes referidos al empleo de la viga semicircular en flexión como metodología de ensayo, así como también toda la investigación llevada adelante durante el desarrollo de esta Tesis.

En el Capítulo 3 se presenta el método de elementos finitos, el cual, debido a su gran versatilidad es considerado como una herramienta sumamente apropiada para el estudio de tensiones y deformaciones, considerando diferentes geometrías, condiciones y materiales, como es el caso puntual considerado en esta Tesis respecto a la metodología de viga semicircular en flexión y tracción indirecta.

En el Capítulo 4 se dan a conocer los materiales empleados en el estudio y los resultados obtenidos en el desarrollo experimental para las tres metodologías planteadas, se presentan análisis comparativos aplicando conceptos estadísticos para verificar la hipótesis inicial propuesta.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas, así como también posibles acciones futuras.

En el Capítulo 6 se detalla el resumen de los trabajos presentados en diferentes ámbitos, Congresos, Revistas, Conferencias, Reuniones, etc, basados en las investigaciones realizadas durante el desarrollo de la presente Tesis.

1.5 Abreviaturas y símbolos

SCB: Semi circular bending

TI: Tracción indirecta

CU: Compresión Uniaxial

$|E^*|$: módulo dinámico (MPa)

P1,P2,P3,P4: fuerza externas

ΔA : área elemental

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

ΔF : fuerza

p_{media} : fuerza media por unidad de área

p : tensión en un punto

σ : tensión normal

τ : tensión tangencial

$\sigma_{xy}, \tau_{xy}, \sigma_{yx}, \tau_{yx}, \sigma_{xz}, \tau_{xz}, \sigma_{yz}, \tau_{yz}, \sigma_{ij}, \sigma_{ji}$: tensiones tangenciales

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$: tensiones normales

α : ángulo de inclinación del plano

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Tensión normal máxima

$\sigma_{m\acute{i}n}$: Tensión normal mínima

I_1 : Primer invariante de tensiones

I_2 : Segundo invariante de tensiones

I_3 : Tercer invariante de tensiones

ϵ : deformación uniaxial

ΔL : variación de longitud

$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$: deformación normal

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$: deformación de corte

μ : coeficiente de Poisson

E : Módulo de Elasticidad

G : Módulo de corte

η : viscosidad

•

$\dot{\gamma}$: gradiente de velocidades o velocidad de deformación o cizalla

t_c : tiempo de carga

t_d : tiempo de descarga

$\frac{\partial \epsilon}{\partial t}$: velocidad de deformación

ϵ_r : deformación unitaria en el resorte

ϵ_a : deformación unitaria en el amortiguador

σ_r : tensión en el resorte

σ_a : tensión en el amortiguador

A_0 : sección transversal inicial

F : Fuerza externa

σ : tensión tecnológica

L_0 : longitud inicial

LVDT: Linear Variable Differential Transformer (transformadores diferenciales variables lineales)

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

$|E^*|$: módulo de deformación o Módulo dinámico
 $|G^*|$: módulo dinámico de corte
 $\sigma(t)$: tensión aplicada dependiente del tiempo t
 σ_0 : amplitud de la tensión aplicada
 $\varepsilon(t)$: deformación resultante dependiente del tiempo t
 ε_0 : amplitud de la deformación resultante
 ω : frecuencia angular (radianes/segundo)
 ϕ : ángulo de fase (en radianes)
 E^* : módulo complejo
 E_1 : módulo de almacenamiento (storage modulus)
 E_2 : módulo de pérdida (loss modulus)
 π : número pi, 3.1416...
 f : frecuencia (Hz)
 f_R : frecuencia reducida (Hz)
 a_T : factor de desplazamiento horizontal de la frecuencia original (shift factor)
 ΔH : energía aparente de activación (J/mol)
 R : constante universal de los gases perfectos ($R=8.314$ J/mol. $^{\circ}K$)
 C_A : constante de Arrhenius del material
 T_i : temperatura de ensayo de interés ($^{\circ}K$)
 T_R : temperatura de referencia ($^{\circ}K$)
 δ : logaritmo del valor mínimo de $|E^*|$, $|E^*|_{\min}$, módulo de equilibrio (MPa)
 α : logaritmo del valor máximo de $|E^*|$, $|E^*|_{\max}$, módulo vítreo (MPa)
 γ y β : parámetros de ajuste
 E_{∞} : módulo instantáneo para un tiempo de carga tendiendo a cero
 $J_1(t)$: elemento de flujo
 $J_2(t)$: elemento de flujo
 a , b , h y k : constantes de los elementos de respuesta parabólica
 τ : tiempo característico dependiente sólo de la temperatura
 E_0 : módulo estático
 δ : parámetro de ajuste
 i : unidad de los números imaginarios ($i=(-1)^{1/2}$)
 τ_0 : tiempo característico a la temperatura de referencia T_R
 T_i : temperatura de interés ($^{\circ}K$)
 σ : tensión sinusoidal aplicada
 L : base de medida

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

P_0 : amplitud de la carga aplicada

A: sección transversal de la probeta

D: diámetro de la probeta

h: altura de la probeta

σ_0 : amplitud de la tensión

ω : frecuencia angular

t: tiempo

ε : deformación sinusoidal resultante

ε_0 : amplitud de la deformación

Δh_0 : amplitud de la variación sinusoidal de la base de medida L

R: radio de la probeta

$$\alpha = \arcsen \frac{a/2}{R}$$

$\sigma_x(x)$, $\sigma_y(x)$: tensiones a lo largo del diámetro horizontal perpendicular al diámetro de carga

a: ancho de aplicación de la carga P

U(t): función de variación de longitud

K_1 , K_2 : coeficientes de integración

P_0 : amplitud de la variación de longitud de la base de medida

U_0 : amplitud de la carga aplicada

T: temperatura ($^{\circ}$ F)

T: Temperatura de ensayo ($^{\circ}$ C)

a, b: constantes de regresión

d: diámetro de los rodillos

L: separación entre los rodillos

B: longitud entre los puntos de medición A y B

E: distancia vertical para la ubicación de los LVDT

a: ancho de la placa de aplicación de carga

M_r : módulo resiliente

F: carga por unidad de ancho del espécimen en falla

V: deformación vertical

E: módulo de rigidez

d: deformación vertical en el punto medio de la superficie inferior de la probeta

CMOD, crack mouth opening displacement

σ_t : tensión de tracción

ε_t : deformación en tracción

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

T: espesor de la probeta

MEF: Método de Elementos Finitos

[N]: Matriz de Aproximación o Matriz de Funciones de Forma

[K]: matriz de rigidez

{F}: vector de fuerzas

{ δ }: vector de desplazamientos

h: espesor de la probeta,

b: base de medida para los desplazamientos horizontales,

Δ : desplazamiento, $f(b)$.

P: amplitud de la carga sinusoidal aplicada

Δ : amplitud de la deformación horizontal

t: intervalo de tiempo entre un ciclo de carga y deformación

τ : período para un ciclo de carga

K_1 , K_2 : constantes de integración función de la base de medida

CAC: Concreto asfáltico en caliente

AM3: Asfalto modificado tipo 3

SBP: Silo Bolsa Pellets

AAMP: asfalto altamente modificado con polímero

VAM: Vacíos del Agregado Mineral

RBV: Relación Betún-vacíos

Ymed: valores medidos

Yest: valores estimados o resultantes de los modelos

A: pendiente de la recta de regresión

B: ordenada al origen de la recta de regresión

Se: error de estimación estándar

Sy: error de desviación

N: tamaño de la muestra

k: número de variables independientes del modelo

Y: función dinámica del ensayo

\hat{Y} : función dinámica del modelo

\bar{Y} : valor promedio de la función dinámica del ensayo

R²: Coeficiente de determinación

(EA): espacio aritmético

(EL): espacio bi-logarítmico/logarítmico

H-S: Huet-Sayegh

TR: Temperatura de referencia

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y DESARROLLO TEÓRICO

2.1 Conceptos básicos de la mecánica del continuo

La mecánica de un medio continuo es una rama de la mecánica encargada del estudio de las tensiones y deformaciones de materiales sólidos, líquidos o gaseosos. El término continuo refiere a una simplificación en el análisis: se considera al material como una única unidad sin espacios vacíos, sin tener en cuenta su estructura molecular o atómica. Supone además que todas las funciones matemáticas empleadas en el desarrollo teórico son funciones continuas salvo algunas excepciones. En particular, para el desarrollo de esta tesis se va a hacer enfoque en la mecánica del sólido con estudio de materiales viscoelásticos. A continuación, se describen brevemente algunos conceptos principales que serán empleados a lo largo de la tesis. [4, 5, 6, 7]

2.1.1 Análisis del estado de tensiones

Consideremos un cuerpo libre como el presentado en la Figura 2-1, sometido a las fuerzas externas y en equilibrio P_1 , P_2 , P_3 y P_4 . Por él, se traza un plano arbitrario que lo separa en dos partes distintas donde las fuerzas P_1 y P_2 se mantienen en equilibrio con las fuerzas P_3 y P_4 que la parte II del cuerpo ejerce sobre la I. Estas se reparten sobre la superficie de corte. Cualquier área elemental ΔA está sometida a una fuerza ΔF .

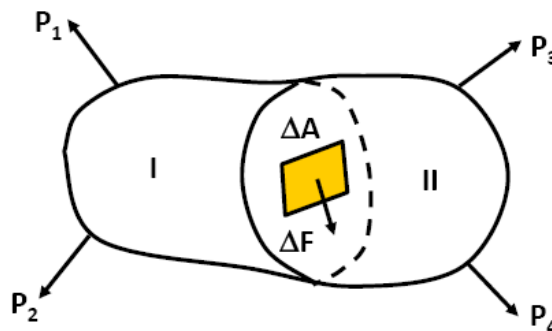


Figura 2-1: Tensión aplicada y deformación resultante

Se define a la fuerza media por unidad de área, p_{media} , a (Ec. 2-1):

$$p_{media} = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (\text{Ec. 2-1})$$

La tensión p en un punto se define como (Ec. 2-2) :

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (\text{Ec. 2-2})$$

En general la tensión p determinada posee una dirección inclinada con respecto al plano de la sección. Se considera conveniente descomponer la misma según dos direcciones, una paralela y otra perpendicular a dicha sección, obteniendo de esta manera las componentes tangencial y normal respectivamente Figura 2-2.

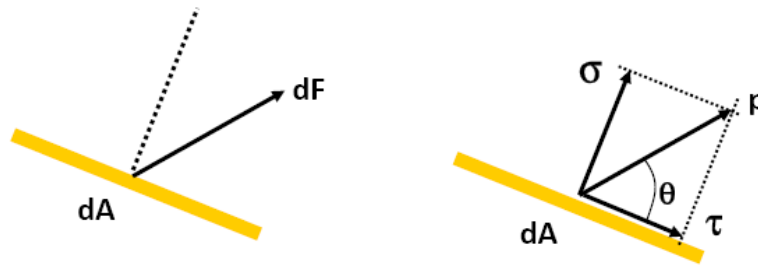


Figura 2-2: Composición de fuerzas: componentes tangencial y normal

Si este proceso se realiza sobre planos perpendiculares a un sistema coordenado (x,y,z) sobre un elemento infinitesimal se obtienen tres componentes sobre cada uno de los tres ejes ortogonales como se muestra en la Figura 2-3:

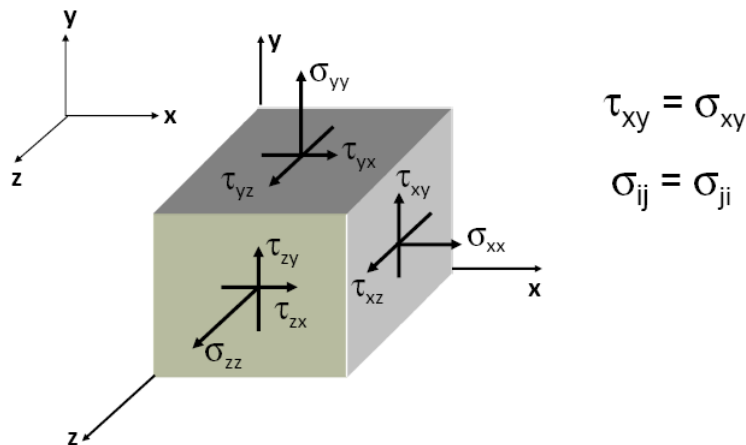


Figura 2-3: Componentes tangenciales y normales según planos coordenados

De esta manera el estado general de esfuerzos actuantes sobre un elemento infinitesimal puede ser definido a través de un tensor σ , Figura 2-4 .

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} = \tau_{xy} & \sigma_{xz} = \tau_{xz} \\ \sigma_{yx} = \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} = \tau_{yz} \\ \sigma_{yz} = \tau_{yz} & \sigma_{zy} = \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Figura 2-4: Tensor de tensiones para el caso tridimensional

Y en el caso particular dónde sólo actúen esfuerzos en 2 direcciones, Figura 2-5

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} = \sigma_x & \sigma_{xy} = \tau_{xy} & 0 \\ \sigma_{yx} = \tau_{yx} & \sigma_{yy} = \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 2-5: Tensor de tensiones para el caso bidimensional

Si se desearan conocer las tensiones actuantes según otras direcciones girando el sistema coordenado un determinado ángulo α (Figura 2-6), podrían plantearse condiciones de equilibrio para encontrarlas (Ec. 2-3), (Ec. 2-4) y (Ec. 2-5):

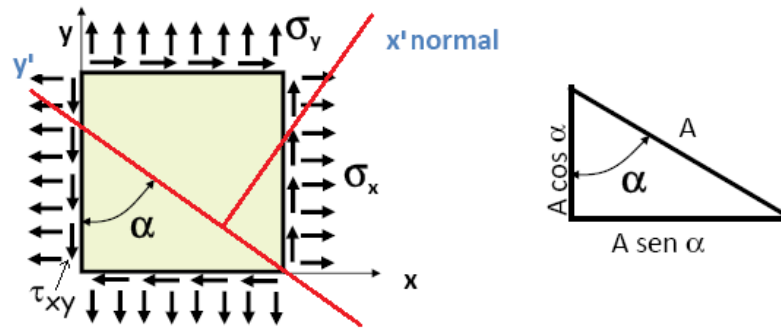


Figura 2-6: Transformación de esfuerzos por rotación de ejes

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_y \cdot \text{sen}^2 \alpha + 2\tau_{xy} \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{cos} \alpha \quad (\text{Ec. 2-3})$$

$$\sigma_{y'} = \sigma_x \cdot \text{sen}^2 \alpha + \sigma_y \cdot \cos^2 \alpha - 2\tau_{xy} \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{cos} \alpha \quad (\text{Ec. 2-4})$$

$$\tau_{x'y'} = (\sigma_y - \sigma_x) \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{cos} \alpha + \tau_{xy} \cdot (\cos^2 \alpha - \text{sen}^2 \alpha) \quad (\text{Ec. 2-5})$$

Debe notarse que el sistema de ejes seleccionado inicialmente puede no dar la información más importante sobre el esfuerzo en un punto, por lo tanto, usando transformación de esfuerzos puede obtenerse un conjunto particular de coordenadas que diagonaliza al tensor de tensiones donde se hacen nulos los esfuerzos cortantes, o bien dicho de otra manera, es posible encontrar el ángulo α para el que $\tau_{x'y'}$ es nulo. El correspondiente ángulo α define las direcciones de los planos principales para los que son máxima y mínima las tensiones nominales, (Ec. 2-6), (Ec. 2-7), (Ec. 2-8).

$$\tan 2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (\text{Ec. 2-6})$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{Ec. 2-7})$$

$$\sigma_{\text{mín}} = \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{Ec. 2-8})$$

Se verifica que los planos de máximas tensiones tangenciales se encuentran a 45° de los planos principales y la máxima tensión de corte resulta:

$$\tau_{x'y'} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{Ec. 2-9})$$

Según el tipo de elemento analizado y las fuerzas actuantes pueden presentarse tres casos diferentes de tensiones principales: en una dimensión (axiales), en dos dimensiones (en el plano) y en tres dimensiones (Figura 2-7).

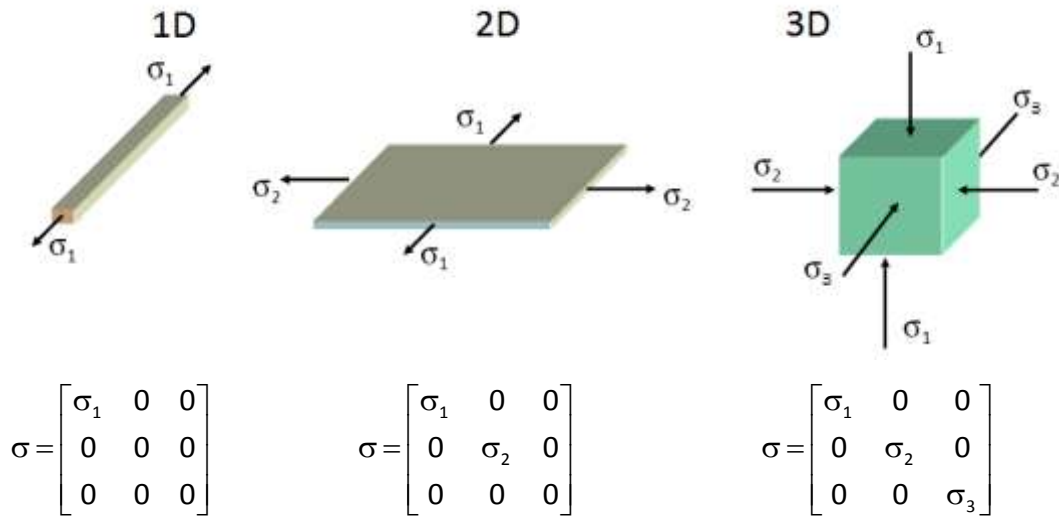


Figura 2-7: Tensiones principales en 1D, 2D y 3D

Otro concepto que resulta de interés en este estudio es el de los denominados Invariantes de tensiones, que se definen como cantidades escalares (números) que son independientes del sistema de coordenadas elegido. Los invariantes son 3 (Ec. 2-10), (Ec. 2-11) y (Ec. 2-12) y se presentan en la Figura 2-8

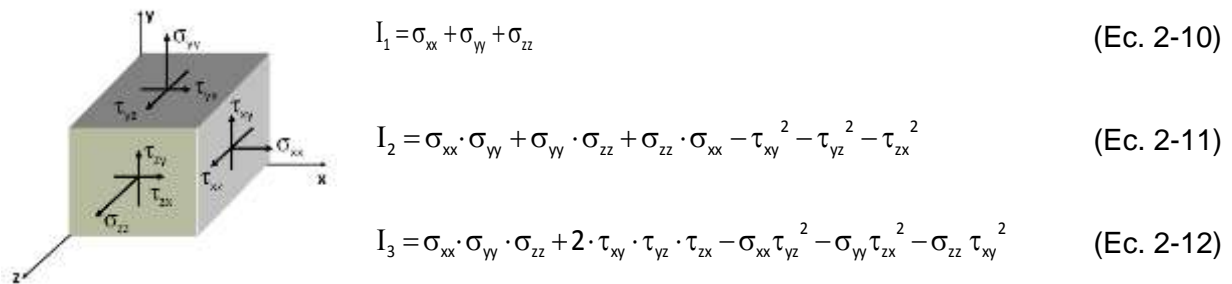


Figura 2-8: Invariantes de tensiones

Existen casos particulares donde los invariantes son iguales a cero:

Si el $I_3 = 0$ se tiene el caso del estado tensional biaxial o plano, tal como se verá es el que se desarrolla en el ensayo de tracción indirecta.

Si el $I_2 = 0$ y $I_3 = 0$ se tiene el caso del estado uniaxial o lineal, característicos de problemas relacionados con la tracción, compresión y flexión pura, como es el caso del ensayo de compresión simple o el de la viga semicircular. [4, 5, 6]

2.1.2 Análisis del estado de deformaciones

Todos los materiales, bajo la acción de fuerzas exteriores cambian su forma (se deforman). Se dice que un material se deforma cuando se producen cambios en su forma y volumen. Determinar la manera en que estos elementos lo hacen es de gran importancia puesto que influye notablemente sobre las leyes de distribución de las fuerzas interiores.

2.1.2.1 Deformación lineal

Para expresar cuantitativamente la intensidad de los cambios de forma y dimensiones se consideran 2 puntos A y B de un segmento de una varilla de longitud infinitesimal, separados uno del otro una distancia L_0 (dx). Como resultado de la variación de forma esta distancia aumenta ΔL , (el extremo A se mueve a A' , el extremo B se mueve a B'), Figura 2-9. La relación entre el incremento de longitud y la longitud original se denomina deformación uniaxial en el segmento AB y se expresa mediante la (Ec. 2-13).

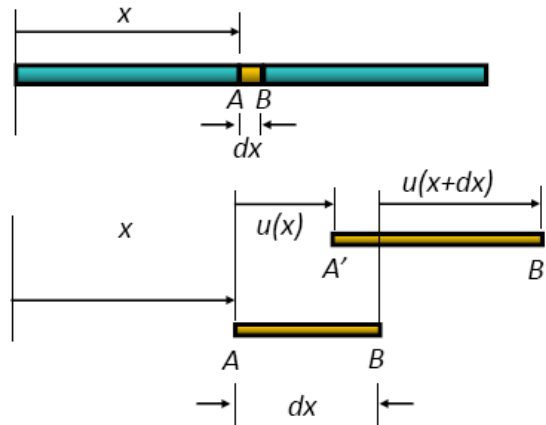


Figura 2-9: Deformación lineal

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{Ec. 2-13}$$

Dicho cambio producido en la longitud del segmento puede expresarse como (Ec. 2-14):

$$\Delta L = A'B' - AB = [x + dx + u(x + dx) - (x + u(x))] - dx = u(x + dx) - u(x) \tag{Ec. 2-14}$$

Donde:

$u(x)$ y $u(x+dx)$ son los desplazamientos de A y B respectivamente.

Usando la expansión de Taylor, el desplazamiento del extremo B se puede escribir como (Ec. 2-15):

$$u(x + dx) = u(x) + \frac{du}{dx} dx + \frac{1}{2} \frac{d^2u}{d^2x} (dx)^2 + \dots \tag{Ec. 2-15}$$

Despreciando el término de segundo orden en la expansión, el cambio en la longitud del segmento puede ser escrito como (Ec. 2-16):

$$\Delta L = u(x + dx) - u(x) = \frac{du}{dx} dx \tag{Ec. 2-16}$$

La deformación lineal en el punto x puede ser ahora definida entonces usando la definición básica de deformación uniaxial como (Ec. 2-17):

$$\epsilon_{AB} = \epsilon_{xx} = \frac{\Delta L}{L_0} = \left(\frac{du}{dx} dx \right) / dx = \frac{du}{dx} \quad (\text{Ec. 2-17})$$

La definición anterior muestra que la deformación en cada punto de la varilla puede ser conocida si el desplazamiento de todos los puntos es conocido como una función de x [u = f(x)]

La deformación lineal es definida en términos de los desplazamientos en una única dirección (en este caso la dirección de AB) la cual es dependiente de dos variables, y por lo tanto la deformación en un punto tiene 2 subíndices.

2.1.2.2 Deformación en el plano

De la misma manera que se definió la deformación lineal pueden plantearse las deformaciones en el plano, para ello se considera una figura plana que bajo la acción de fuerzas actuantes se deforma cambiando su forma de acuerdo a la Figura 2-10. En particular se consideran los puntos A y B, los cuales toman nuevas posiciones, se alargan y giran cambiando su dirección original según ángulos α y β , respectivamente.

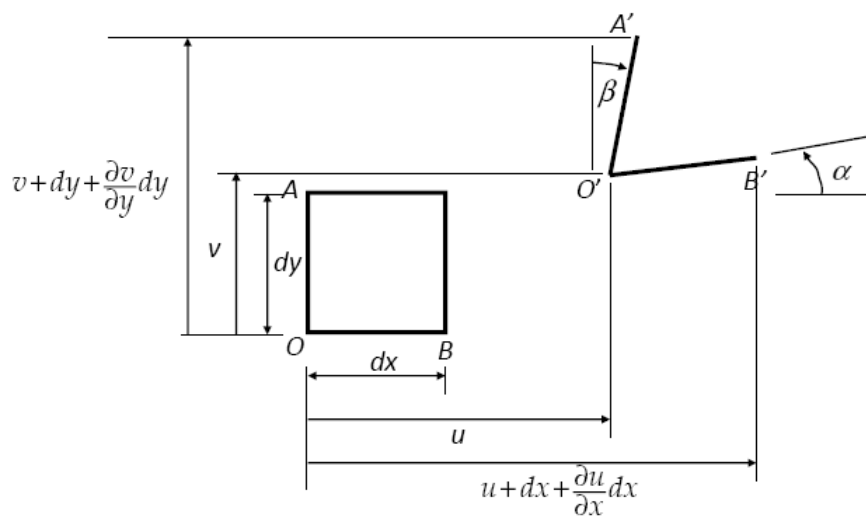


Figura 2-10: Deformación en el plano

Siguiendo un procedimiento análogo al realizado para la deformación lineal se obtiene la denominada deformación normal, la cual se define en términos de los cambios relativos de longitud de los lados (Ec. 2-18) y (Ec. 2-19):

$$\epsilon_{xx} = \frac{O'B' - OB}{OB} = \frac{\partial u}{\partial x} = \epsilon_x \quad (\text{Ec. 2-18})$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{O'A' - OA}{OA} = \frac{\partial v}{\partial y} = \epsilon_y \quad (\text{Ec. 2-19})$$

Se presenta además el estudio de las deformaciones originadas a partir de los cambios angulares y se define a la deformación de corte, (Ec. 2-20):

$$\varepsilon_{xy} = \alpha + \beta \approx \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{xy} = \gamma_{yx} \quad (\text{Ec. 2-20})$$

La relación sugiere que el estado de deformaciones en cualquier punto (x,y) del plano puede ser determinado si se conocen las funciones de desplazamientos.

2.1.2.3 Deformación en el espacio

Trabajando de la misma manera que en el plano puede obtenerse el estado deformacional en un punto, el que queda definido en función del conjunto de las deformaciones lineales y angulares en distintas direcciones y planos. Este estado deformacional, al igual que el estado tensional queda definido por seis magnitudes numéricas $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$.

2.1.2.4 Relación de Poisson

Cuando un cuerpo es sometido a la acción de una fuerza, el mismo se deforma en la dirección de esa fuerza actuante (deformaciones axiales, primarias o longitudinales) pero además se producen deformaciones en la dirección perpendicular de aplicación de la carga de sentido opuesto, es decir que se comprime en un sentido y se expande en el otro o viceversa (Figura 2-11). Dichas deformaciones reciben el nombre de deformaciones laterales y suelen expresarse en términos de deformaciones por unidad de longitud de dimensión transversal, o simplemente deformaciones unitarias laterales o secundarias o inducidas.

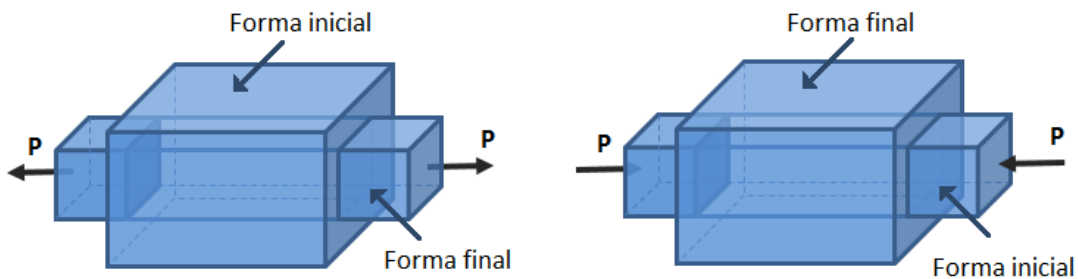


Figura 2-11: Deformaciones laterales por aplicación de fuerza axial P

Se define:

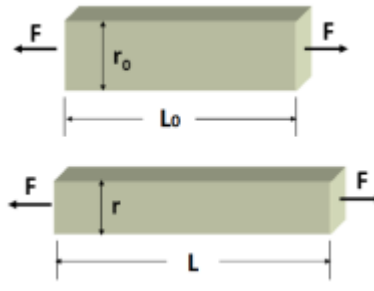
Material elástico: aquel material capaz de recuperar totalmente su forma original al desaparecer los esfuerzos que lo deformaron.

Material homogéneo: es aquel material en el que todos los puntos del mismo son iguales a efectos de comportamiento mecánico.

Material isótropo: es aquel material que presenta las mismas propiedades mecánicas y térmicas en todas las direcciones

Bajo la hipótesis de material elástico, homogéneo e isótropo la relación entre las deformaciones unitarias laterales y las deformaciones unitarias axiales, o longitudinales

causadas por una fuerza axial permanece constante. Esta constante es una propiedad bien definida de cada material y recibe el nombre de coeficiente de Poisson, Figura 2-12. (Ec. 2-22) .



$$\varepsilon_{\text{axial}} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{y} \quad \varepsilon_{\text{lat}} = \frac{r - r_0}{r_0} = \frac{\Delta r}{r_0} \quad (\text{Ec. 2-21})$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{\text{lat}}}{\varepsilon_{\text{axial}}} = -\frac{\Delta r / r_0}{\Delta L / L_0} \quad (\text{Ec. 2-22})$$

Figura 2-12: Coeficiente de Poisson

En particular, si el material es isótropo (Ec. 2-23):

$$\mu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (\text{Ec. 2-23})$$

Para el caso volumétrico se tiene (Ec. 2-24):

$$\varepsilon_{\text{vol}} = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\Delta L}{L_0} + \frac{\Delta r}{r_0} + \frac{\Delta r}{r_0} = \frac{\Delta L}{L_0} (1 - 2\nu) \quad (\text{Ec. 2-24})$$

El valor de μ fluctúa para los diferentes materiales en un rango estrecho, generalmente $0 < \mu < 0.5$; aunque para ciertos materiales específicos pueden presentarse valores negativos.

Existen también los denominados materiales anisótropos que son aquellos materiales linealmente elásticos pero que tienen módulos de elasticidad distintos y relaciones de Poisson en diferentes direcciones. Aparecen deformaciones angulares cuando actúan tensiones tangenciales y normales y las deformaciones lineales dependen de las tensiones normales y tangenciales. Además, los ejes principales del estado tensional no coinciden con los del estado deformacional. [4, 5, 6]

2.1.3 Elasticidad

La elasticidad se define como una propiedad mecánica de ciertos materiales capaces de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan. Dicho de otro modo, cuando un material elástico es deformado con una fuerza externa, experimenta una resistencia interna a la deformación y la restaura a su estado original si la fuerza externa ya no es aplicada.

Este comportamiento elástico está presente en la mayoría de los materiales sólidos hasta cierto punto, pero existe un límite de la magnitud de la fuerza y de la deformación acompañante dentro de esta recuperación elástica. Este límite elástico, es la mayor

fuerza o tensión por unidad de área que un material sólido puede soportar antes de producirse una deformación permanente. Para estos materiales, el límite de elasticidad marca el fin de su comportamiento elástico y el comienzo de su comportamiento de plástico.

Existe cierta dependencia referida a las propiedades del material entre las componentes del estado tensional y deformacional. Para el caso que las deformaciones sean de pequeña magnitud esa dependencia es lineal y se denomina Ley de Hooke, donde es el E módulo de elasticidad o módulo de Young (Ec. 2-25).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad (\text{Ec. 2-25})$$

La forma más simple de la Ley de Hooke es la que se observa en el cuerpo isótropo. En este caso las componentes del estado tensional y las del estado deformacional no dependen de la orientación de los ejes en el punto. Son materiales linealmente elásticos e isótropos que tienen un único módulo de elasticidad E y relación de Poisson μ en todas las direcciones (debido al ordenamiento de los cristales al azar).

A partir de esta definición pueden plantearse diferentes ecuaciones que permitan relacionar las tensiones y deformaciones para materiales linealmente elásticos e isótropos en el caso más amplio de tensiones axiales y de corte y se resumen a continuación (Ec. 2-26) a (Ec. 2-31):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (\text{Ec. 2-26}) \quad \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \quad (\text{Ec. 2-27})$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (\text{Ec. 2-28}) \quad \gamma_{xz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xz} \quad (\text{Ec. 2-29})$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (\text{Ec. 2-30}) \quad \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz} \quad (\text{Ec. 2-31})$$

Un análisis similar puede plantearse para el caso que en lugar de aplicarse una tensión normal, σ , se aplica una tensión de corte, τ (Figura 2-13). Se define entonces el Módulo de corte G como la relación entre el esfuerzo de corte y la deformación angular generada.

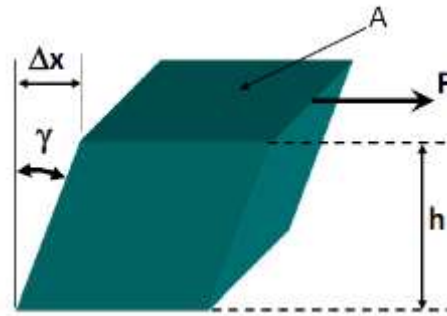


Figura 2-13: Módulo de corte

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{y} \quad \gamma = \frac{\Delta x}{h} \quad \rightarrow \quad G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F/A}{\Delta x/h} = \frac{F \cdot h}{\Delta x \cdot A} \quad (\text{Ec. 2-32})$$

A su vez el módulo de corte G se relaciona con el módulo de elasticidad E mediante la ecuación (Ec. 2-33)

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (\text{Ec. 2-33})$$

2.1.4 Estado plano de Tensiones

Resulta de interés para el desarrollo de la presente tesis el análisis de las relaciones encontradas en las (Ec. 2-26) a (Ec. 2-31) precedentemente aplicado a los casos particulares de estado plano de tensiones y deformaciones, el cual se presenta en (Figura 2-14):

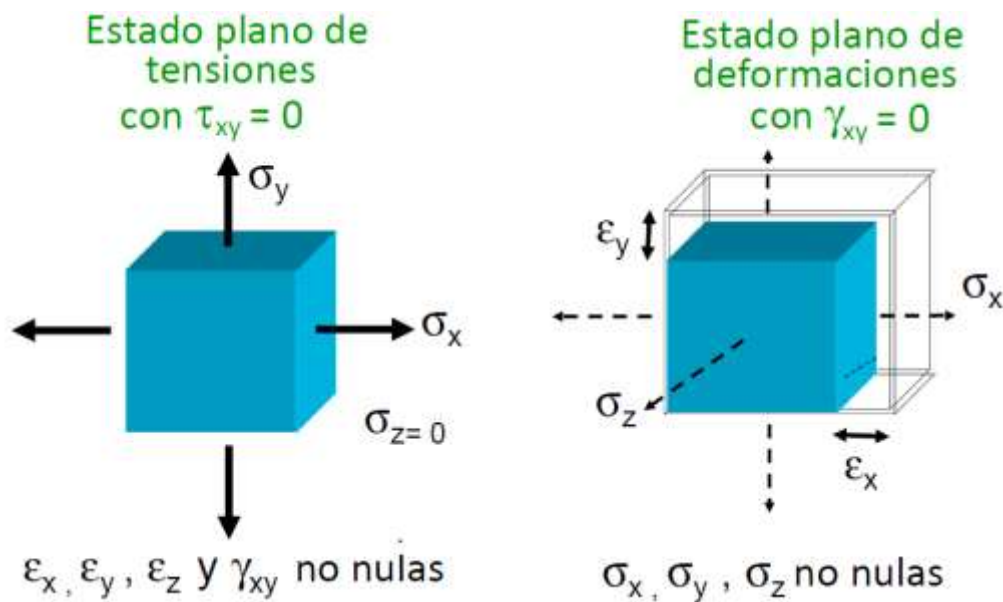


Figura 2-14: Estado plano de Tensiones y Deformaciones

2.1.5 Viscoelasticidad

Para comprender el concepto de viscoelasticidad se desarrollarán primero una serie de conceptos.

Reología: es el estudio del flujo y la deformación de la materia sometidas a fuerzas tangenciales o de cizalla y axiales. La medición de propiedades reológicas se aplica a todos los materiales: fluidos, semi-sólidos y sólidos. Las propiedades reológicas pueden determinarse a partir de la medición de la variación de la deformación en función del tiempo para el estado de tensiones que se mantiene constante.

Muchos materiales presentan propiedades reológicas complejas, que pueden variar dependiendo de las condiciones externas aplicadas, como la tensión, deformación, tiempo y temperatura.

Las propiedades reológicas tienen un impacto en todas las etapas del uso de los materiales en las diversas industrias, desde el desarrollo de productos y su estabilidad, hasta el procesado y el rendimiento de los insumos. El dispositivo empleado para medir estas propiedades depende, con frecuencia, de las velocidades de deformación y períodos de tiempo pertinentes, así como del tamaño de la muestra y de su resistencia a fluir.

Viscosidad: Para que se produzca movimiento en un fluido es necesario ejercer una fuerza para permitir que una capa del mismo se deslice sobre otra (Figura 2-15). Esa fuerza debe vencer el rozamiento interno que existe entre dichas capas. Se define entonces a la viscosidad η como la relación entre la fuerza por unidad de área aplicada y el gradiente de velocidad (Ec. 2-34).

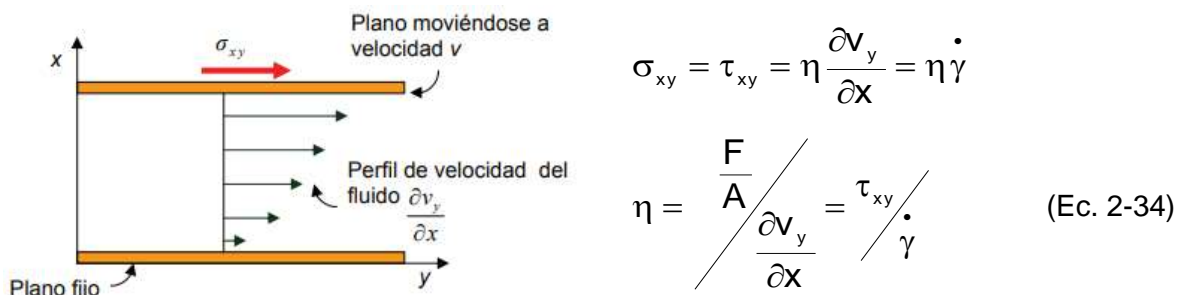


Figura 2-15: Viscosidad

Donde $\sigma_{xy}=\tau_{xy}$ es el esfuerzo por unidad de área o esfuerzo de cizalla o de corte; $\dot{\gamma}$ el gradiente de velocidades o velocidad de deformación o cizalla y η la viscosidad.

Por lo tanto, un material viscoso es aquel que, bajo la acción de una tensión constante, un tiempo t_c , fluye. Al retirar la carga que genera la tensión, el material, en el tiempo t_d permanece deformado. La deformación es una función del tiempo. (Figura 2-16)

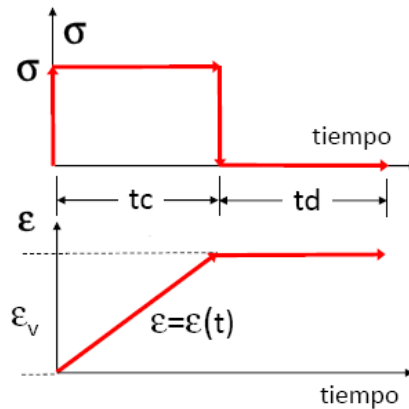
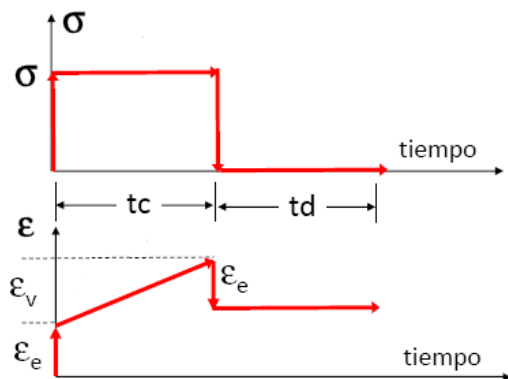


Figura 2-16: Material viscoso

Fluido Newtoniano: es aquel donde se cumple que el esfuerzo de cizalla o corte es linealmente proporcional a la velocidad de deformación y cuya constante de proporcionalidad es el coeficiente de viscosidad, o viscosidad dinámica. Dicho de otro modo, un fluido newtoniano es aquel para el cual la viscosidad, a una temperatura y presión dadas, es constante para cualquier velocidad de deformación, independientemente del tiempo que se esté aplicando la cizalla.

Fluido no Newtoniano: en este caso la velocidad de deformación aumenta más que la fuerza aplicada y la viscosidad varía.

Viscoelasticidad: es una propiedad que poseen determinados materiales. En este caso, la respuesta que generan frente a la acción de cargas actuantes responde a criterios elásticos y viscosos. Es un tipo de comportamiento reológico anelástico que exhibe tanto propiedades viscosas como propiedades elásticas cuando el material es deformado. Los esfuerzos dependen de la deformación y de la velocidad de deformación (Ec. 2-35) . (Figura 2-17)



$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2-35})$$

Figura 2-17: Material visco-elástico

Donde η es la viscosidad del material y $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ es la velocidad de deformación.

El comportamiento que presentan los materiales viales tales como suelos, materiales granulares y mezclas asfálticas en la estructura del pavimento cuando son sometidos a la

acción de cargas puede considerarse como si fueran este tipo de material y por lo tanto resulta de fundamental importancia su análisis.

Para aclarar este significado de viscoelasticidad, puede introducirse un modelo conceptual obtenido a partir de colocar un resorte y un amortiguador en paralelo como lo sugiere el Modelo de dos elementos de un sólido de Voigt-Kelvin, Figura 2-18, donde al aplicar la tensión, la deformación unitaria que se produce en el resorte, ϵ_r , y en el amortiguador, ϵ_a , es igual la deformación final del conjunto, ϵ , (Ec. 2-36). El esfuerzo total aplicado, σ , resulta la suma de los esfuerzos en el resorte, σ_r , y el amortiguador, σ_a (Ec. 2-37). Aplicando la Ley de Hooke y una relación lineal de velocidad esfuerzo-deformación para el líquido newtoniano, se obtiene la (Ec. 2-35) presentada anteriormente.

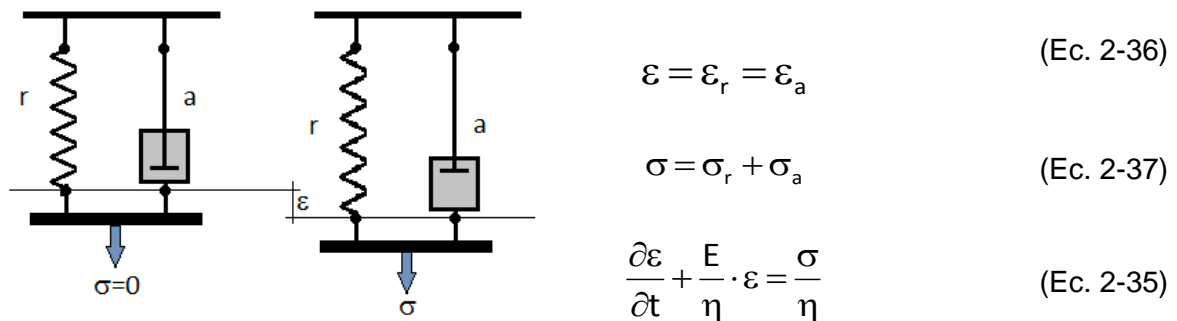


Figura 2-18: Modelo de dos elementos de un sólido de Voigt-Kelvin

Conforme pasa el tiempo, la deformación unitaria se acerca asintóticamente a la deformación unitaria máxima asociada con el resorte elástico hasta que finalmente todo el esfuerzo aplicado es tomado por el resorte y el amortiguador deja de estar activo. Si el esfuerzo se retira cierto tiempo antes, tiene lugar una recuperación asintótica de la deformación unitaria (Figura 2-19).

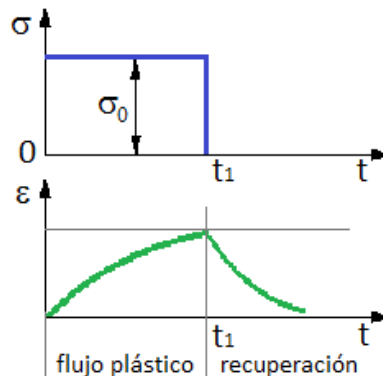
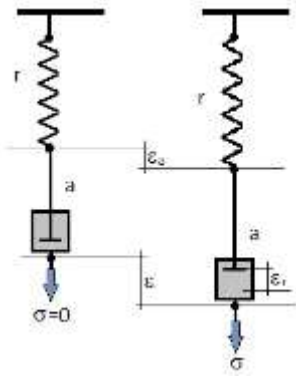


Figura 2-19: Curva de flujo plástico Modelo de Voigt-Kelvin

Esta solución muestra que el material Voigt-Kelvin exhibe una respuesta elástica demorada, por esta razón se denomina material anelástico. Basado en experiencias se sabe que tal comportamiento no es típico en algunos materiales. Puede formularse

entonces otra combinación lineal de esfuerzo, velocidad de esfuerzo y velocidad de deformación, asignándole al cuerpo una respuesta elástica instantánea, junto con un desplazamiento dependiente del tiempo. El modelo más simple con tales propiedades puede visualizarse como una combinación en serie de un resorte lineal y un amortiguador lineal, denominado Sólido de Maxwell (Figura 2-20).



$$\sigma = \sigma_r = \sigma_a \quad (\text{Ec. 2-38})$$

$$\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_a \quad (\text{Ec. 2-39})$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} \frac{1}{E} \quad (\text{Ec. 2-40})$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial \epsilon_r}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon_a}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} \frac{1}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{o} \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{E}{\eta} \sigma = E \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2-41})$$

Figura 2-20: Modelo de dos elementos de un sólido de Maxwell

En el modelo, si se aplica una tensión, σ , el esfuerzo a través del amortiguador es el mismo que a través del resorte (Ec. 2-38). Sin embargo, como cada elemento del modelo contribuye a la deformación unitaria total, (Ec. 2-39). La relación para la deformación unitaria debe diferenciarse respecto al tiempo, ya que para los materiales viscosos sólo se conoce la conexión entre la velocidad del esfuerzo y la velocidad de la deformación unitaria. Por otra parte, para materiales elásticos con E constante, al diferenciar la ley de Hooke con respecto al tiempo, se tiene (Ec. 2-40). Luego, al sumar las velocidades de la deformación unitaria para los dos elementos y simplificar, se obtiene la ecuación diferencial básica para la respuesta del sólido de Maxwell (Ec. 2-41).

Los procedimientos anteriores pueden generalizarse a muchos más materiales. Una combinación en serie de los modelos de Maxwell y Voigt-Kelvin establece el modelo básico (Sólido Estándar) para estudiar materiales viscoelásticos lineales. Otras combinaciones de resortes y amortiguadores con diferentes constantes se han usado efectivamente para representar polímeros, fibras, concreto, etc.

Desde un punto de vista fenomenológico, para materiales reales, las curvas de relajación y flujo plástico deben considerarse como propiedades fundamentales de un material dado y deben determinarse experimentalmente. [4, 5, 6, 8, 9, 10]

2.1.6 Conceptos tecnológicos de tensión y deformación

A continuación se describe el análisis de tensiones y deformaciones para su aplicación con fines tecnológicos. Para ellos se considera una barra de un material donde una dimensión prepondera sobre las otras dos y presenta una sección inicial A_0 , la cual es sometida a la acción de una carga externa F y ésta se deforma cambiando de tamaño o

forma. Se definen entonces la tensión con criterio tecnológico, σ , (Ec. 2-42) y la deformación, ε , (Ec. 2-43) como (Figura 2-21):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Ec. 2-42})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (\text{Ec. 2-43})$$

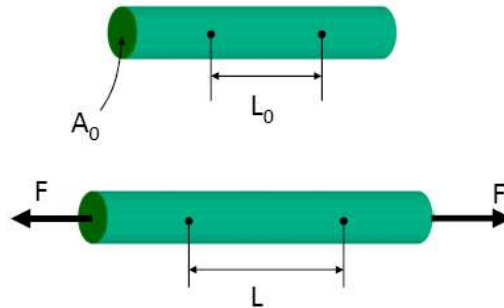


Figura 2-21: Tensiones y deformaciones

Es decir, la tensión se vincula con la carga externa aplicada y la deformación con la variación de la longitud de medida de una cierta base de longitud inicial L_0 .

Desde el punto de vista experimental ello supone disponer de un elemento capaz de medir esta fuerza, por ejemplo a través de una celda de carga y la variación de la longitud de la base de medida mediante un dispositivo tal como un transformador diferencial variable lineal, más conocido por sus siglas en inglés LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Esta situación es la que se genera en los diferentes ensayos empleados para la determinación del módulo dinámico y que se discutirán en esta tesis (Figura 2-22).

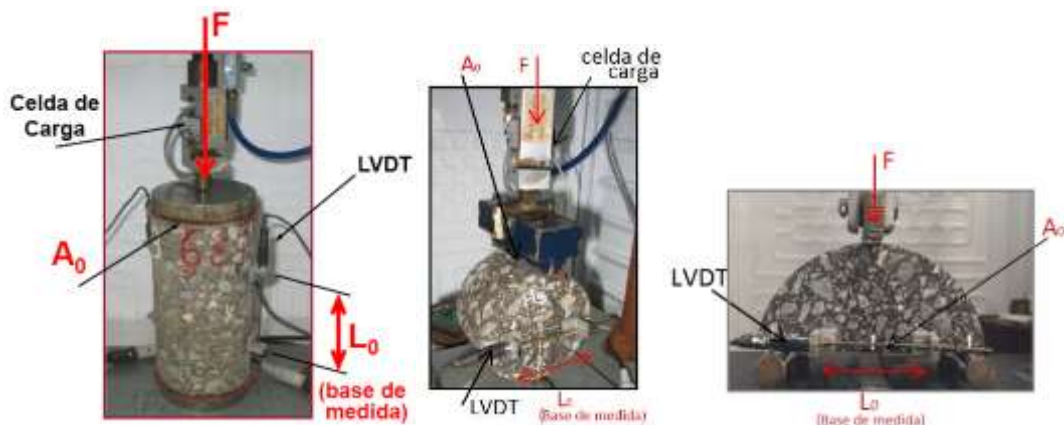


Figura 2-22: Fuerzas y deformaciones en los ensayos de determinación de módulo dinámico

2.2 Caracterización Dinámica de Mezclas Asfálticas. Módulo Dinámico

Las mezclas asfálticas son materiales viscoelásticos cuyas propiedades, dependientes de la temperatura y la frecuencia de aplicación de las cargas, condicionan su posterior comportamiento en servicio. Están constituidas por una combinación de agregados pétreos minerales y ligante. En general, los agregados (finos y gruesos) componen el 90% del total de la mezcla, un 5% es polvo mineral (denominado filler) y el 5% restante es ligante (la cantidad de ligante debe ser suficiente para garantizar el recubrimiento total de los agregados). Eventualmente algunas mezclas pueden contener aditivos.

Numerosas son las propiedades de interés usadas en pavimentación: módulo de deformación, comportamiento a fatiga, resistencia a la acumulación de deformaciones permanentes, resistencia a la tracción, estabilidad y durabilidad. En el caso que la mezcla sea empleada para capa de rodadura se debe tener en cuenta además la resistencia al deslizamiento, regularidad, permeabilidad adecuada, sonoridad y color, entre otras.

Básicamente para caracterizar una mezcla asfáltica se requiere conocer su módulo de deformación (relación entre tensiones impuestas y deformaciones resultantes) y leyes de falla (relación entre la magnitud de una sollicitación aplicada y el número de veces que es capaz de soportarla hasta alcanzar un nivel de deterioro determinado o la rotura). [11]

Como ya se ha mencionado entonces, el módulo de deformación o Módulo dinámico $|E^*|$ de las mezclas asfálticas es uno de los parámetros que mayor interés presenta por su significación en los procesos de diseño estructural de los pavimentos flexibles. Permite caracterizar el comportamiento viscoelástico de estos materiales dependiente de la temperatura y el tiempo (o frecuencia) de aplicación de las sollicitaciones. Es un parámetro clave en el diseño del pavimento pues determina la distribución de tensiones y deformaciones en todas las capas componentes de la estructura vial y se vincula estrechamente con la valoración del deterioro por fatiga y acumulación de deformaciones permanentes. También se ha propuesto su utilización como un ensayo de valoración del comportamiento aplicable en la dosificación, el control de calidad y el análisis de la influencia de distintos factores de formulación de este tipo de materiales.

2.2.1 Reseña Histórica

El empleo del módulo dinámico como parámetro de caracterización del comportamiento y su aplicación en el diseño de pavimentos ha sido tema de interés de muchos investigadores a lo largo de los años. A continuación, se mencionan algunas referencias de su evolución en el tiempo:

1954: Van der Poel [12] presenta el concepto de rigidez (stiffness) de los asfaltos y un nomograma de cálculo, actualmente vigente, para su estimación en cementos asfálticos convencionales para distintas condiciones de temperatura y frecuencia de

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

solicitación, a partir de resultados de ensayos empíricos tradicionales como la penetración a 25 °C y el punto de ablandamiento.

1962: Primera Conferencia Internacional sobre el Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos, Papazian [13] presenta el concepto de módulo dinámico concluyendo que la consideración de las mezclas asfálticas como materiales viscoelásticos podría ser aplicada al diseño y evaluación de pavimentos asfálticos. Ésta es una de las primeras referencias concretas a dicha propiedad.

1964: Heukelomp y Klomp [14] proponen una ecuación de estimación de $|E^*|$, posteriormente modificada por Van Draat y Sommer [15].

1967: Sayegh [16] continúa estudios realizados por Huet [17] y utiliza conceptos básicos de la viscoelasticidad para caracterizar el comportamiento de mezclas asfálticas. Introduce la validez del principio de equivalencia frecuencia-temperatura y la construcción de curvas maestras.

1969: el Instituto del Asfalto de Estados Unidos adopta el ensayo de módulo dinámico como indispensable para caracterizar el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas [18]. Shook y Kallas [19] proponen un modelo de estimación de $|E^*|$. Coffman y Pagen desarrollan el primer protocolo de ensayo de módulo dinámico de materiales viscoelásticos bajo una tensión sinusoidal uniaxial, aceptado como norma ASTM en 1979. Su designación es D3496 para ASTM y TP62 para las especificaciones AASHTO. El protocolo describe la prueba de módulo dinámico de materiales viscoelásticos bajo una tensión sinusoidal uniaxial. [20]

1977: Verstraeten et al. [21], desarrollan un método de predicción del módulo dinámico basado en ensayos sobre 52 mezclas asfálticas aplicando la técnica de flexión con cargas alternativas.

1978: Aparece el Método Shell de Diseño de Pavimentos que incluye un nomograma de estimación del módulo dinámico desarrollado por Ugé et al. [22], a partir de la composición volumétrica de la mezcla asfáltica y la rigidez del ligante. En Argentina, Tosticarelli et al. [23], presentan la medición de módulos dinámicos de un concreto asfáltico y una mezcla del tipo tosca-arena-asfalto mediante compresión uniaxial con cargas sinusoidales complementada con los métodos de Pulso Ultrasónico y Resonancia Longitudinal. (Primera publicación sobre este tema desarrollada en Argentina en el Laboratorio Vial del IMAE). Posteriormente, presentan resultados de módulos dinámicos obtenidos en nuestro país con la metodología de tracción indirecta por compresión diametral y aplican el concepto de equivalencia frecuencia-temperatura para el trazado de curvas maestras [24].

1995: Se implementa el reómetro de corte dinámico DSR para la caracterización dinámica de asfaltos dentro del Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP en inglés). Este dispositivo permite determinar un módulo dinámico de corte $|G^*|$ a partir de las tensiones de corte aplicadas y deformaciones resultantes en una pastilla de ligante de pequeño espesor.

1996- 1999: Witczak y co-autores [25, 26] proponen ecuaciones de regresión para la estimación de $|E^*|$ basadas en la granulometría de los agregados, la viscosidad del ligante y los contenidos volumétricos de los componentes. Más tarde esta ecuación es revisada utilizando el módulo dinámico de corte $|G^*|$ para caracterizar el asfalto [27].

1996: Martínez y Angelone [28] presentan una retrospectiva de 10 años de determinaciones de módulo dinámico en el Laboratorio Vial del IMAE y analizan la influencia de distintos factores como el contenido de vacíos de las mezclas, la concentración volumétrica de los agregados y la viscosidad de los ligantes. Años después se desarrolla un protocolo de ensayos utilizando la metodología de tracción indirecta con cargas sinusoidales a diferentes frecuencias y temperaturas. Los resultados obtenidos se interpretan bajo la hipótesis de Viscoelasticidad Lineal con validez del principio de equivalencia frecuencia-temperatura para desarrollar curvas maestras de variación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas. Esta metodología de ensayos ha sido elegida principalmente porque permite ensayar tanto probetas compactadas convencionalmente en el laboratorio como testigos calados de pavimentos en servicio.

2002: La Guía Empírico-Mecanicista de Diseño de Pavimentos Nuevos y Rehabilitados, (Guía AASHTO 2002), adopta como propiedad fundamental de caracterización del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas al módulo dinámico de las mismas. Se propone al ensayo de determinación de $|E^*|$ como un ensayo simple de valoración de la performance de las mezclas asfálticas.

A partir de esa fecha se suceden numerosos trabajos sobre el tema impulsados por el interés de implementar metodologías basadas en una filosofía empírico-racional de diseño de pavimentos. [3]

Es así que se presentan diferentes procedimientos experimentales para su determinación en laboratorio, siendo los más difundidos los propuestos en el NCHRP 1-28A (2003) [29] y AASHTO T 342 (2011) [30], que utilizan la metodología de compresión uniaxial con cargas dinámicas o las propuestas por la norma EN 12697-26 (2018) [31] en la que se proponen diferentes metodologías experimentales.

2.2.2 Definición

La definición formal de módulo dinámico ha sido presentada en numerosos estudios, [32, 33, 34]. Su teoría se basa en la hipótesis básica que las mezclas asfálticas sometidas a

pequeñas deformaciones pueden ser consideradas como materiales viscoelásticos lineales. Basado en estos trabajos se presenta a continuación en forma resumida el desarrollo teórico en que se funda dicha definición.

Si una mezcla asfáltica es sometida a la acción uniaxial de una tensión de variación sinusoidal de la forma (Ec. 2-44)

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (\text{Ec. 2-44})$$

en condiciones estacionarias ésta responde con una deformación también sinusoidal pero desfasada en el tiempo (Ec. 2-45) como se muestra en la Figura 2-23

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (\text{Ec. 2-45})$$

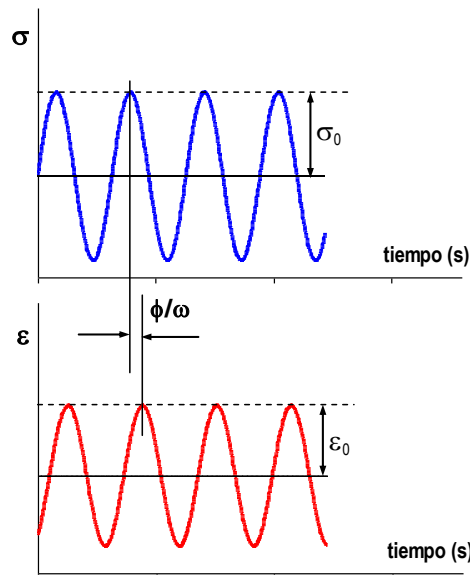


Figura 2-23: Tensión aplicada y deformación resultante

donde

- $\sigma(t)$: tensión aplicada dependiente del tiempo t
- σ_0 : amplitud de la tensión aplicada
- $\varepsilon(t)$: deformación resultante dependiente del tiempo t
- ε_0 : amplitud de la deformación resultante
- ω : frecuencia angular (radianes/segundo)
- ϕ : ángulo de fase (en radianes)

El módulo complejo E^* es definido como (Ec. 2-46):

$$E^* = \frac{\sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t)}{\varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \phi)} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \frac{\text{sen}(\omega t)}{\text{sen}(\omega t + \phi)} \quad (\text{Ec. 2-46})$$

y el módulo del “módulo complejo” o simplemente, el módulo dinámico como (Ec. 2-47):

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (\text{Ec. 2-47})$$

Se definen además dos cantidades E_1 (Ec. 2-48) y E_2 (Ec. 2-49) denominadas módulo de almacenamiento (storage modulus en inglés) y módulo de pérdida (loss modulus en inglés) respectivamente como:

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cdot \cos\phi \quad (\text{Ec. 2-48})$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cdot \text{sen}\phi \quad (\text{Ec. 2-49})$$

Resultando (Ec. 2-50) y (Ec. 2-51):

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0}\right)^2 \cdot (\cos^2\phi + \text{sen}^2\phi)} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (\text{Ec. 2-50})$$

$$\tan\phi = \frac{E_2}{E_1} \quad (\text{Ec. 2-51})$$

Estos módulos miden la energía almacenada en sólidos viscoelásticos. El módulo de almacenamiento representa la parte elástica y el módulo de pérdida representa la porción viscosa (Figura 2-24).

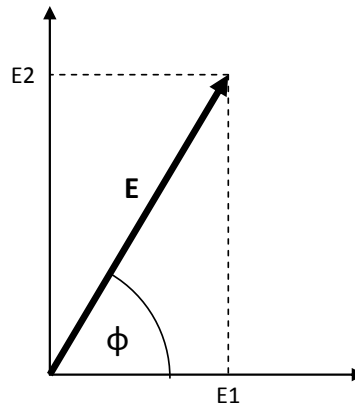


Figura 2-24: Módulo de almacenamiento y módulo de pérdida

El ángulo de fase ϕ caracteriza la mayor o menor respuesta elástica del material. Si ϕ es igual a cero, las tensiones y deformaciones están en fase tal como ocurre en los materiales perfectamente elásticos. Por el contrario, si ϕ es igual a $\pi/2$, las tensiones y deformaciones están absolutamente fuera de fase como ocurre en un material perfectamente viscoso ideal. [3]

2.2.3 Curvas Maestras: Principio de equivalencia frecuencia-temperatura.

Numerosas investigaciones han demostrado que el módulo dinámico es un parámetro que depende tanto de la temperatura considerada como de la frecuencia (o tiempo) de la carga aplicada.

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

El comportamiento de las mezclas asfálticas es posible representarlo a partir de las denominadas Curvas Maestras. Este comportamiento puede diagramarse perfectamente a partir de curvas isotermas que muestran la variación del módulo dinámico en un amplio rango de frecuencias para una temperatura de referencia elegida arbitrariamente. De la misma manera también pueden diagramarse a partir de curvas isócronas en función de la temperatura para una frecuencia de referencia arbitraria. Esto es posible de realizar gracias a la aplicación del principio de equivalencia frecuencia-temperatura que se detalla en párrafos siguientes.

En general, estas curvas presentan una forma de S apaisada y sus extremos asintóticos alcanzan para el nivel superior un valor dependiente de la rigidez límite del ligante asfáltico (módulo vítreo). Se da para condiciones de elevadas frecuencias o su equivalente de bajas temperaturas, donde la elevada rigidez que presenta el asfalto prepondera sobre el aporte de los agregados pétreos de la mezcla con predominio de su fase elástica. Para el extremo asintótico inferior, que se da para bajas frecuencias o altas temperaturas, se aproxima al denominado módulo de equilibrio. En este caso predomina la fase viscosa donde el mayor aporte depende de los agregados pétreos (granulometría, forma y trabazón de las partículas)

Como se ha mencionado, es posible considerar que resulta aplicable el principio de frecuencia-temperatura en base a la hipótesis de que las mezclas asfálticas son materiales termo-reológicamente simples, y que incluso puede ser aplicado aunque no se cumplan las condiciones visco-elásticas lineales.

Este principio resulta de fundamental importancia y utilidad, dado que la determinación experimental del módulo dinámico de las mezclas asfálticas requiere del empleo de equipamiento especializado con capacidad de aplicación de cargas de forma sinusoidal de manera controlada y de medición de las pequeñas deformaciones resultantes de esta excitación. Sin embargo, dichos equipos poseen una capacidad limitada en cuanto al rango de variación de las frecuencias de cargas y las temperaturas de ensayo aplicadas y por lo tanto la aplicación del principio de frecuencia-temperatura logra ampliar dicho entorno experimental al correspondiente con las condiciones que se producen en la mezcla asfáltica durante su vida en servicio.

Para explicitarlo se consideran datos de ensayo de módulo dinámico de una mezcla asfáltica obtenidos para cinco frecuencias de sollicitación, f , a 0.25; 0.50; 1, 2 y 4Hz y cinco temperaturas de ensayo: 0, 10, 20, 30 y 40°C (Figura 2-25)

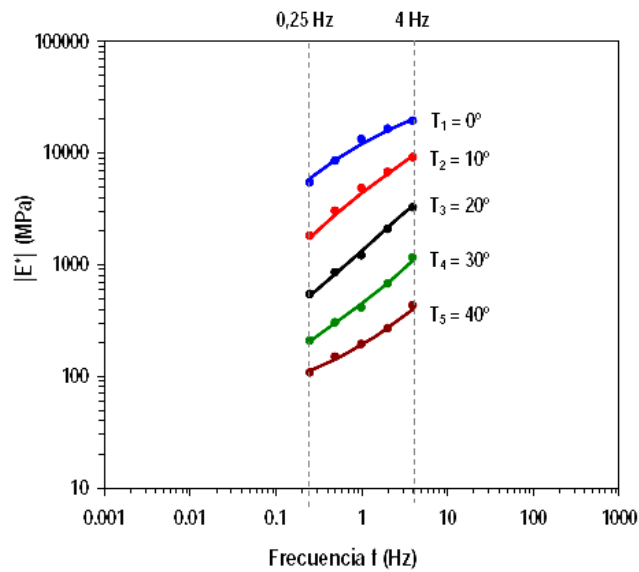


Figura 2-25: Variación del módulo dinámico $|E^*|$ con la frecuencia para diferentes temperaturas

Analizando los resultados de la Figura 2-25, se observa que el módulo aumenta conforme aumenta la frecuencia, para una temperatura constante. De la misma manera, considerando una misma frecuencia el módulo aumenta conforme disminuye la temperatura. Es decir que la frecuencia y la temperatura juegan un rol equivalente y recíproco, dado que el efecto provocado por el aumento de uno de ellos es equivalente al producido por una disminución del otro. De ello se desprende también que un mismo valor de módulo puede obtenerse de infinitas combinaciones de frecuencia de sollicitación y temperatura de ensayo.

De esta forma, al aplicar este principio es posible la construcción de las isotermas e isócronas anteriormente enunciadas que permiten describir el comportamiento de las mezclas asfálticas para el rango de valores característicos en su comportamiento in situ, el cual no sería posible de obtener si sólo se contara con los datos experimentales brindados por los diferentes equipos de ensayo cuyo rango de trabajo está acotado como se indicó previamente.

Para el caso de las isotermas, se logra a partir del desplazamiento horizontal de las curvas experimentales de manera que confluyan en una única curva a partir de la aplicación de una magnitud de traslación horizontal aT dependiente de la temperatura a la que se realizó el ensayo y la temperatura de referencia para las frecuencias reducidas, f_r , como se muestra en el ejemplo de la Figura 2-26, en este caso para una temperatura de referencia de 20°C.

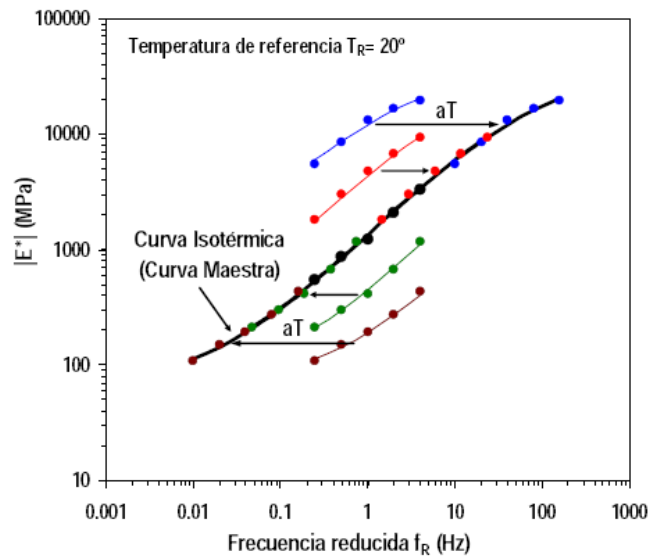


Figura 2-26: Curva Maestra de $|E^*|$ para una temperatura de referencia de 20°C

La expresión matemática para este factor puede indicarse a través de la (Ec. 2-52) y la (Ec. 2-53)

$$f_R = aT \cdot f \quad (\text{Ec. 2-52})$$

$$\text{Log}(f_R) = \text{Log}(aT) + \text{Log}(f) \quad (\text{Ec. 2-53})$$

Donde:

f_R : frecuencia reducida (Hz)

aT : factor de desplazamiento horizontal de la frecuencia original (shift factor)

f : frecuencia original (Hz)

Dado que su automatización no es posible, diversos autores han propuesto y evaluado distintos procedimientos para determinar este factor de desplazamiento, aT , para cada temperatura, basándose principalmente en aquellos empleados en el tratamiento de polímeros y otros materiales termo-reológicos. Entre los más utilizados en la tecnología de los asfaltos y mezclas asfálticas pueden nombrarse la ecuación de tipo Arrhenius, la ecuación del tipo Williams-Landel-Ferry y la ecuación polinómica de segundo orden [35, 36, 37].

Para el desarrollo de esta tesis se aplica el modelo de ecuación del tipo Arrhenius indicado en la (Ec. 2-54) basado en los estudios anteriores del Dr. Ing. Martínez [3]:

$$aT = e^{\left[\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_R} \right) \right]} = e^{\left[C_A \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_R} \right) \right]} \quad (\text{Ec. 2-54})$$

Donde:

ΔH : energía aparente de activación (J/mol)

R : constante universal de los gases perfectos ($R=8.314 \text{ J/mol} \cdot ^\circ\text{K}$)

C_A : constante de Arrhenius del material

T_i : temperatura de ensayo de interés ($^{\circ}K$)

T_R : temperatura de referencia ($^{\circ}K$)

Respecto al valor de la energía de activación existen diferentes teorías. Francken ha propuesto que la misma es constante e independiente del material y cercano a $208000J/mol$ por lo que C_A resulta aproximadamente igual a $2.51 \times 10^4 \text{ }^{\circ}K^{-1}$. Otros autores han propuesto otros criterios llegando a la conclusión que C_A es una constante propia de cada material dependiente del ligante asfáltico utilizado (este último criterio es el aplicado en esta tesis).

Siguiendo un procedimiento análogo al efectuado para la construcción de las curvas isotermas y aplicando el principio de frecuencia-temperatura pueden obtenerse las curvas isócronas (Figura 2-27).

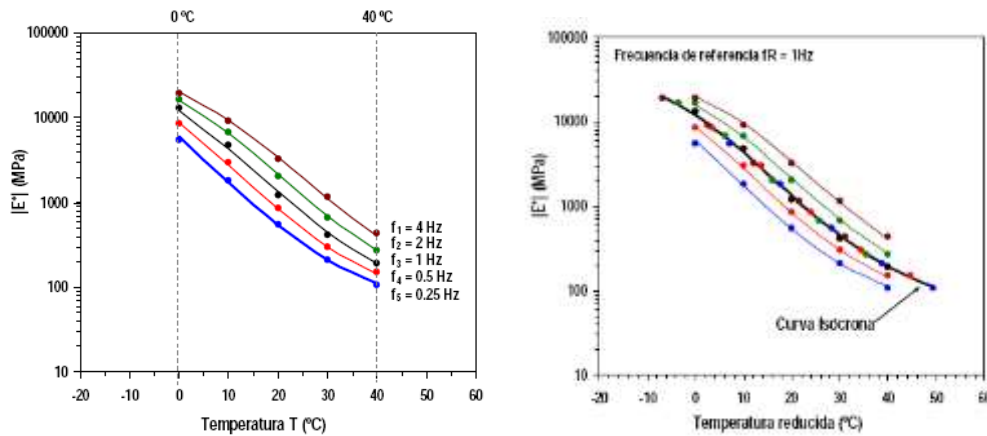


Figura 2-27: Construcción de isócrona para representar la Curva Maestra de $|E^*|$ para una frecuencia de referencia de 1Hz

Además del módulo dinámico, otro parámetro cuyo análisis resulta de interés en la caracterización de las mezclas asfálticas es el del ángulo de fase, ϕ . El mismo indica la mayor o menor respuesta elástica del material y el estudio de su comportamiento se encuentra relacionado con el comportamiento a fatiga y a deformación permanente de las mezclas asfálticas [38, 39]. Al graficarlo en función del módulo dinámico en el denominado espacio de Black puede observarse como su valor máximo aparece en la región de los valores intermedios de $|E^*|$ y decrece para condiciones extremas de temperaturas o frecuencias (Figura 2-28).

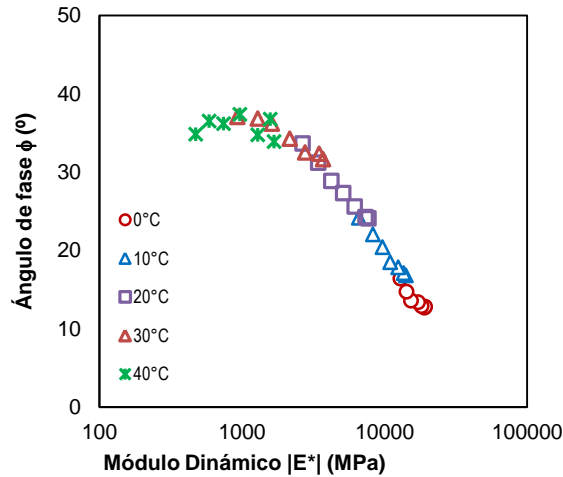


Figura 2-28: Espacio de Black

Finalmente, otro análisis que resulta útil a los fines de validar los datos experimentales para luego trazar la curva maestra es el llamado plano de Cole-Cole. En él se representa la variación del módulo de pérdida (componente viscosa del material, E_2) en función del módulo de almacenamiento (componente elástica del material, E_1). Si los datos experimentales de $|E^*|$ y ϕ son aceptables los valores calculados de E_1 y E_2 se alinean alrededor de una única curva independiente de las frecuencias y las temperaturas de ensayo (Figura 2-29). Todos los valores posibles del módulo dinámico quedan representados entonces por el módulo de un vector con origen en el origen de coordenadas y extremo sobre cualquier punto de la curva. [3, 40, 41, 42]

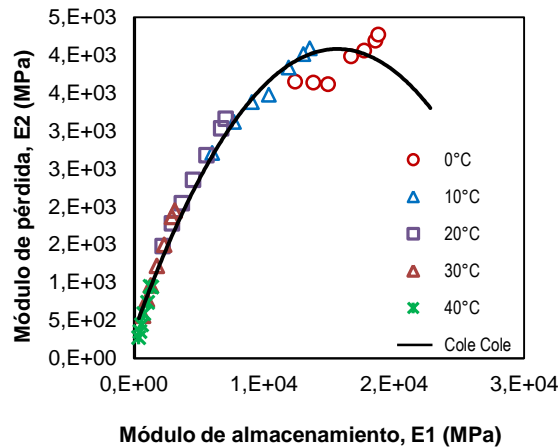


Figura 2-29: Plano de Cole-Cole

2.2.4 Curvas Maestras: Modelos fenomenológicos

La modelización de las curvas maestras de módulo dinámico de mezclas asfálticas mediante modelos genéricos constituye un paso fundamental para su aplicación al diseño de pavimentos. Para ello deben ajustarse las constantes de dichos modelos con los

valores experimentales de manera tal que la forma final de la curva obtenida se aproxime a la S apaisada mencionada anteriormente.

En esta tesis se propone la utilización de un modelo logístico sigmoidal simétrico para representarlas, respetando el comportamiento físico observado en este tipo de materiales. El mismo ha sido adoptado en la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista de Estructuras de Pavimentos Nuevos y Rehabilitados, Proyecto NCHRP19-9 y por varios autores.

El modelo sigmoidal generalizado (en forma de S apaisada), es de la forma (Ec. 2-55):

$$\text{Log} |E^*| = \delta + \frac{(\alpha - \delta)}{1 + e^{(\beta + \gamma \cdot \log f_r)}} \quad (\text{Ec. 2-55})$$

Donde:

$|E^*|$ = módulo dinámico de la mezcla (MPa)

δ : logaritmo del valor mínimo de $|E^*|$, $|E^*|_{\min}$, módulo de equilibrio (MPa)

α : logaritmo del valor máximo de $|E^*|$, $|E^*|_{\max}$, módulo vítreo (MPa)

γ y β son parámetros de ajuste del modelo relacionados a la curvatura, la pendiente y la localización del punto de inflexión de la función sigmoidal. El parámetro E_{\max} es un valor asintótico al que tiende la función para frecuencias muy elevadas. Por el contrario, E_{\min} es el valor asintótico al que tiende la función para frecuencias muy bajas (cuasi-estáticas) (Figura 2-30). [43] [44] [45] [46]

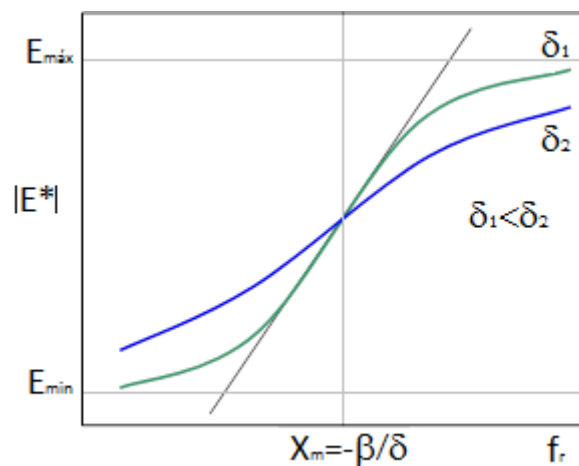


Figura 2-30: Modelo sigmoidal generalizado

2.2.5 Curvas Maestras: Modelos funcionales

A diferencia de los modelos fenomenológicos presentados previamente, los modelos funcionales se basan en asimilar el comportamiento real del material viscoelástico a un conjunto de elementos mecánicos ideales simples, como resortes y amortiguadores vinculados en serie o paralelo. Su mayor ventaja reside en la posibilidad de modelar el comportamiento global tanto del módulo dinámico $|E^*|$ como del ángulo de fase ϕ . En esta

tesis, basándose en el estudio de diferentes modelos planteados en trabajos previos se considera el empleo del modelo funcional de Huet-Sayegh, a continuación se presenta el desarrollo del mismo:

En 1965, Huet [17] propuso un modelo mecánico para caracterizar el comportamiento viscoelástico de ligantes y mezclas asfálticas. El mismo está compuesto por un resorte de rigidez E_{∞} (que representa el módulo instantáneo para un tiempo de carga tendiendo a cero) y dos elementos de flujo $J_1(t)$ y $J_2(t)$ de respuesta parabólica respecto al tiempo de la forma (Ec. 2-56) y (Ec. 2-57):

$$J_1(t) = a \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^h \quad (\text{Ec. 2-56})$$

$$J_2(t) = b \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^k \quad (\text{Ec. 2-57})$$

Donde a , b , h y k , son constantes de los elementos de respuesta parabólica y τ es un tiempo característico dependiente sólo de la temperatura.

Para estos elementos de respuesta parabólica, todas las deformaciones son recuperables una vez que se ha eliminado la tensión. El resorte y los elementos parabólicos se encuentran conectados en serie como se muestra en la Figura 2-31.

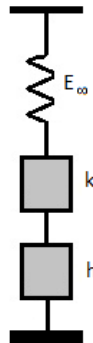


Figura 2-31: Modelo Huet

Posteriormente, Sayegh [16] realizó una modificación de este modelo disponiendo un resorte adicional de respuesta idealmente elástica en paralelo al modelo de Huet como se muestra en la Figura 2-32.

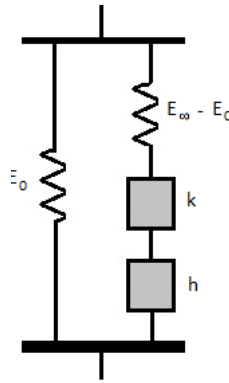


Figura 2-32: Modelo Huet-Sayegh (H-S)

Si ese conjunto de elementos mecánicos ideales es sometido a la acción de una tensión de variación sinusoidal de frecuencia angular ω , la expresión analítica del módulo complejo correspondiente resulta (Ec. 2-58):

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (\text{Ec. 2-58})$$

donde E_∞ , es el módulo instantáneo para tiempos de carga tendiendo a cero, E_0 es el módulo estático que caracteriza la rigidez del sistema mecánico bajo una tensión estática de duración infinita, ω es la frecuencia angular de excitación de la tensión sinusoidal, τ es el tiempo característico dependiente de la temperatura, h , k , δ son parámetros de ajuste del modelo e i es la unidad de los números imaginarios ($i = (-1)^{1/2}$).

A partir de la (Ec. 2-58) que utiliza álgebra compleja, es posible hallar por descomposición las componentes E_1 y E_2 del módulo complejo que resultan, (Ec. 2-59) y (Ec. 2-60):

$$E_1 = E_0 + \frac{E'_1}{\left[\frac{E'_1}{(E_\infty - E_0)} \right]^2 + \left[\frac{E'_2}{(E_\infty - E_0)} \right]^2} \quad (\text{Ec. 2-59})$$

$$E_2 = - \frac{E'_2}{\left[\frac{E'_1}{(E_\infty - E_0)} \right]^2 + \left[\frac{E'_2}{(E_\infty - E_0)} \right]^2} \quad (\text{Ec. 2-60})$$

con:

$$E'_1 = [E_\infty - E_0] \cdot \left\{ 1 + \left[\delta(\omega\tau)^{-k} \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{2}\right) \right] + \left[(\omega\tau)^{-h} \cdot \cos\left(\frac{h\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad (\text{Ec. 2-61})$$

$$E'_2 = [E_\infty - E_0] \cdot \left\{ \left[-\delta(\omega\tau)^{-k} \cdot \text{sen}\left(\frac{k\pi}{2}\right) \right] - \left[(\omega\tau)^{-h} \cdot \text{sen}\left(\frac{h\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad (\text{Ec. 2-62})$$

Con los datos experimentales de $|E^*|$ y ϕ obtenidos a distintas frecuencias y temperaturas y previa descomposición en las componentes E_1 y E_2 , es posible proceder al ajuste del modelo determinando los 6 parámetros E_∞ , E_0 , τ , h , k y δ . Luego el modelo puede ser utilizado de manera inversa para calcular E_1 y E_2 para cualquier otra combinación de frecuencia y temperatura no cubierta en la fase experimental y de ahí, el módulo dinámico y el ángulo de fase definidos anteriormente como (Ec. 2-50) y (Ec. 2-51):

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

$$\phi = \arctan \frac{E_2}{E_1} \quad (\text{Ec. 2-51})$$

Diversos autores han hecho uso del modelo H-S para describir el comportamiento viscoelástico de mezclas asfálticas [47, 48, 49, 50, 51].

Para tener en cuenta la evolución del tiempo característico τ respecto a la temperatura, se ha hecho uso del Principio de Equivalencia Frecuencia-Temperatura con:

$$\tau = \tau_0 \cdot a_T \quad (\text{Ec. 2-63})$$

con a_T , factor de desplazamiento horizontal de las frecuencias y τ_0 , el tiempo característico a la temperatura de referencia T_R .

Como se indica previamente, en esta Tesis se ha adoptado una función del tipo Arrhenius para el factor a_T definida como (Ec. 2-54):

$$a_T = e^{\left[C_A \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_R} \right) \right]} \quad (\text{Ec. 2-54})$$

con C_A , constante de Arrhenius propia del material, T_i , temperatura de interés ($^{\circ}\text{K}$) y T_R , temperatura de referencia ($^{\circ}\text{K}$). [52]

2.2.6 Determinación de $|E^*|$ en Compresión Uniaxial

Para describir la determinación del módulo dinámico a partir del ensayo de compresión uniaxial considérese una probeta cilíndrica esbelta de mezcla asfáltica solicitada a la acción de una fuerza de compresión axial de variación sinusoidal de la forma $P = P_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$ (Figura 2-33). En la misma se induce un estado uniaxial de tensiones de compresión de la forma (Ec. 2-64):

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P_0}{A} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (\text{Ec. 2-64})$$

donde:

σ : tensión sinusoidal aplicada

P_0 : amplitud de la carga aplicada

A : sección transversal de la probeta

- D: diámetro de la probeta
- h: altura de la probeta
- σ_0 : amplitud de la tensión
- ω : frecuencia angular
- t: tiempo

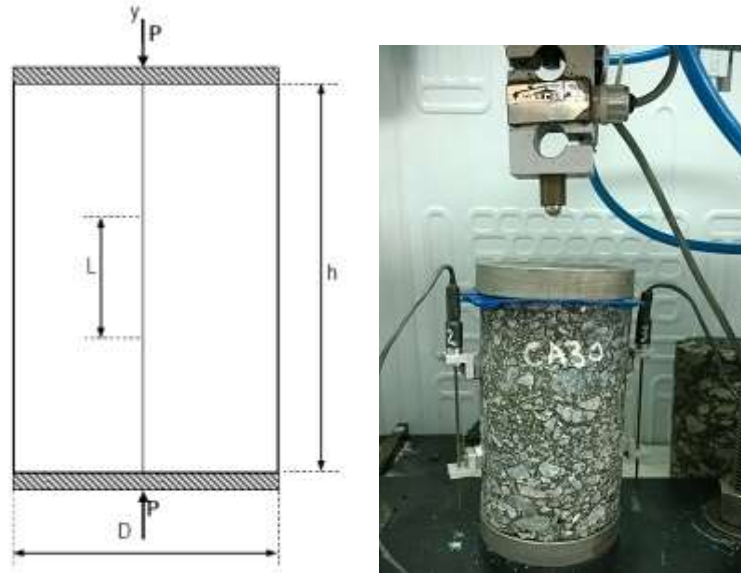


Figura 2-33: Esquema del ensayo de compresión uniaxial y probeta de ensayo

Este estado de tensiones desarrolla deformaciones también de variación sinusoidal pero desfasadas en el tiempo de la forma (Ec. 2-65):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \phi) = \frac{\Delta h_0}{L} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \phi) \quad (\text{Ec. 2-65})$$

donde:

ε : deformación sinusoidal resultante

ε_0 : amplitud de la deformación

Δh_0 : amplitud de la variación sinusoidal de la base de medida L

ϕ : ángulo de fase

En esas condiciones, el módulo dinámico $|E^*|$ es matemáticamente definido como (Ec. 2-66) [53]:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \frac{P_0/A}{\Delta h_0/L} \quad (\text{Ec. 2-66})$$

2.2.7 Determinación de $|E^*|$ en Tracción por compresión diametral

En un gran número de investigaciones presentes en la literatura se indica que los resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción indirecta han sido interpretados bajo

la hipótesis de que el material se comporta como un sólido homogéneo, isótropo y elástico.

Sin embargo, el ligante asfáltico presenta características viscoelásticas por lo que la utilización de métodos de interpretación basados en teorías elásticas resulta insuficiente y por lo tanto resulta necesario desarrollar una solución viscoelástica tomando como punto de partida a la solución análoga elástica y de esta manera obtener el módulo dinámico. Kim y otros [54] desarrollaron una solución a partir de las ecuaciones derivadas por Kim y Wen [55] para la tracción indirecta con tensiones constantes de creep.

El esquema básico del ensayo en tracción indirecta se presenta en la Figura 2-34. En el mismo una probeta cilíndrica es sometida a la acción de cargas de variación sinusoidal distribuidas a lo largo de dos generatrices diametralmente opuestas y situadas a lo largo del plano vertical, como resultado se desarrolla en su interior un estado biaxial de tensiones.

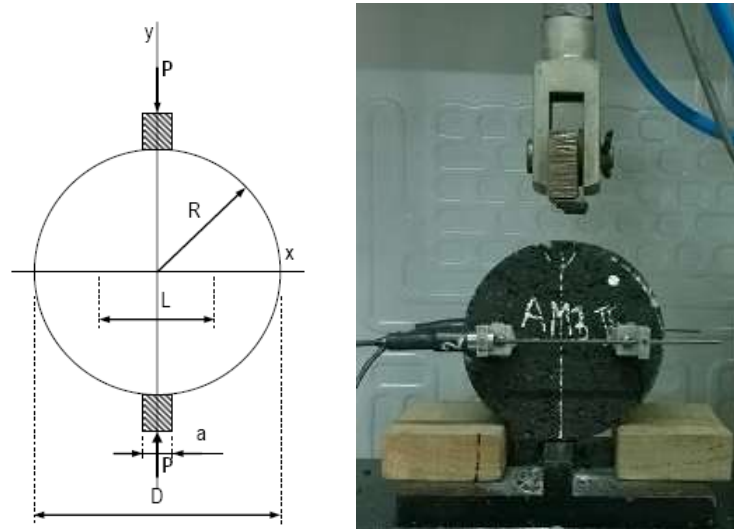


Figura 2-34: Esquema del ensayo de tracción indirecta y probeta de ensayo

Hondros [56] ha derivado las ecuaciones para el cálculo de las tensiones $\sigma_x(x)$ y $\sigma_y(x)$ a lo largo del diámetro horizontal perpendicular al diámetro de carga como:

$$\sigma_x(x) = \frac{2P}{\pi h a} \left[\frac{\left(1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2\right) \cdot \text{sen} 2\alpha}{1 + 2 \cdot \left(\frac{x}{R}\right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{x}{R}\right)^4} - \arctan \left(\frac{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}{1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2} \tan \alpha \right) \right] \quad (\text{Ec. 2-67})$$

$$\sigma_y(x) = -\frac{2P}{\pi h a} \left[\frac{\left(1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2\right) \cdot \text{sen} 2\alpha}{1 + 2 \cdot \left(\frac{x}{R}\right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{x}{R}\right)^4} + \arctan \left(\frac{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}{1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2} \tan \alpha \right) \right] \quad (\text{Ec. 2-68})$$

donde:

P: carga aplicada

R: radio de la probeta

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

D: diámetro de la probeta

h: altura de la probeta

$$\alpha = \arcsen \frac{a/2}{R}$$

Estas ecuaciones no contienen ni al Módulo Elástico ni la Relación de Poisson por lo que ellas permanecen válidas para cuerpos viscoelásticos. Entonces, si la probeta es solicitada por una carga de variación sinusoidal de forma $P = P_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$, las tensiones resultantes también lo serán como:

$$\sigma_x(x) = \frac{2P_0}{\pi h a} [f(x) - g(x)] \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (\text{Ec. 2-69})$$

$$\sigma_y(x) = \frac{2P_0}{\pi h a} [f(x) + g(x)] \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (\text{Ec. 2-70})$$

Con

$$f(x) = \left[\frac{\left(1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2\right) \cdot \text{sen} 2\alpha}{1 + 2 \cdot \left(\frac{x}{R}\right)^2 \cos 2\alpha + \left(\frac{x}{R}\right)^4} \right] \quad (\text{Ec. 2-71})$$

$$g(x) = a \text{rctan} \left(\frac{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}{1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2} \tan \alpha \right) \quad (\text{Ec. 2-72})$$

Este estado biaxial de tensiones produce deformaciones a lo largo del diámetro horizontal como:

$$\varepsilon_x(t) = \frac{1}{|E^*|} [\sigma_x(x) - \mu \sigma_y(x)] \quad (\text{Ec. 2-73})$$

Con

μ : relación de Poisson.

Esta deformación puede ser integrada a lo largo de una base de medida de longitud L de manera de obtener su variación de longitud U(t) como:

$$U(t) = \int_{-L/2}^{+L/2} \varepsilon_x(t) dx \quad (\text{Ec. 2-74})$$

Como la carga aplicada es de tipo sinusoidal, U(t) es también una función sinusoidal desfasada en el tiempo $U(t) = U_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi)$.

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

De acuerdo a la (Ec. 2-67), (Ec. 2-68), (Ec. 2-73) y (Ec. 2-74) y operando numéricamente, el módulo dinámico $|E^*|$ resulta finalmente:

$$|E^*| = \frac{P_0}{hU_0} (K_1 + \mu K_2) \quad (\text{Ec. 2-75})$$

Donde K_1 y K_2 son coeficientes de integración dependientes de las dimensiones de la probeta. En particular, para los ensayos realizados en esta tesis se considera una base de medida de longitud $L = 60 \text{ mm}$ y $a = 12.7 \text{ mm}$, de lo que resultan $K_1 = 0.258$ y $K_2 = 0.881$. P_0 y U_0 son las amplitudes de los registros sinusoidales de la carga aplicada y las variaciones de longitud de la base de medida [3, 57, 58].

Con respecto a la relación de Poisson, Mirza y Witczak [59] realizan una investigación a partir de valores medidos en diferentes estudios y presentan una ecuación para modelizar el comportamiento de la misma en función de la temperatura, que se muestra en la Figura 2-35 y tiene la forma de la (Ec. 2-76):

$$\mu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(3.1849 - 0.04233T)}} \quad (\text{Ec. 2-76})$$

Con T , temperatura en $^{\circ}\text{F}$

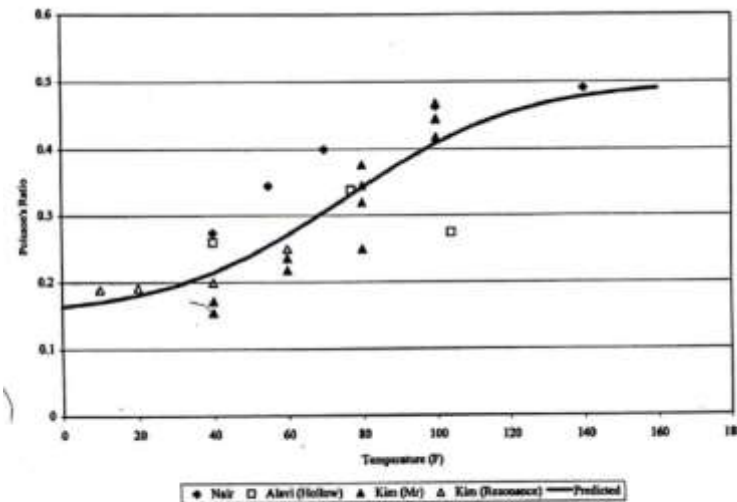


Figura 2-35: Relación de Poisson en función de la temperatura [59]

La Norma UNE-EN-12697, parte 26 [60] establece que si no se determina el valor de la relación de Poisson es posible adoptar un valor constante igual a 0.35 para todas las temperaturas.

En el Laboratorio Vial del Imae, Gschösser [61] realiza un estudio de la variación de la relación de Poisson en función de la temperatura a partir de mediciones de deformaciones en las direcciones x e y . En base al mismo se ha podido desarrollar una

ecuación de variación de μ en función de la temperatura para el rango de 0 a 40°C de la forma (Ec. 2-77):

$$\mu = aT + b = 0.005 \cdot T + 0.25 \quad (\text{Ec. 2-77})$$

donde:

μ : Relación de Poisson

T: Temperatura de ensayo, ° C

a, b : constantes de regresión, a = 0.005 y b =0.25

Esta última expresión es la empleada en el desarrollo de la Tesis:

2.3 El ensayo de Viga semicircular en flexión

El ensayo de la viga semicircular en flexión o SCB por sus siglas en idioma inglés (Semi Circular Bending) es un ensayo que fue originalmente empleado en Australia para el análisis de fractura en mecánica de rocas por Chong et al [62] y más adelante Lim et al [63], presentan sus estudios referidos a esta metodología.

Más tarde su empleo se extendió a mezclas asfálticas para determinar propiedades de resistencia a la fatiga como lo indica Krans et al [64] y de resistencia a la tracción Van de Ven y Smith [65].

Mull et al [66] han empleado el ensayo SCB con carga monotónica para evaluar la resistencia a fractura de mezclas asfálticas modificadas con polvo de neumático. En Estados Unidos, Molenaar et al [67] investigaron con este ensayo la resistencia al agrietamiento y la fractura de mezclas asfálticas. Saha y Biligiri emplearon el ensayo SCB con cargas sinusoidales para analizar la relación entre la fatiga y las propiedades de propagación de grietas de las mezclas asfálticas [68]. En la actualidad, basados en los resultados obtenidos y gracias a la simplicidad de la metodología del ensayo, se ha generado y proporcionado una plataforma adecuada para que múltiples investigadores caractericen las propiedades de fractura y fatiga de mezclas asfálticas en diferentes condiciones [69; 70; 71; 72; 73; 74; 75; 76; 77; 78; 79].

En cuanto a normativa empleada, en Europa la EN 12697-44 [80], y en Estados Unidos la ASTM D8044 [81] y la AASHTO TP 105-13 [82] describen el procedimiento para evaluar las propiedades de propagación de fracturas y grietas de mezclas asfálticas utilizando el ensayo SCB.

Entre las mayores ventajas de este tipo de ensayo de viga semicircular pueden mencionarse: la simplicidad de la geometría de la probeta, simple operatoria del equipo, la aplicación de cargas de compresión en lugar de cargas de tracción, fácil configuración de ensayo, datos de entrada simples para dar inicio al ensayo, posibilidad de obtener los

especímenes de ensayo a partir de equipos de compactación y calado disponibles en muchos laboratorios (principalmente calados)

2.3.1 Configuración SCB

La configuración experimental propuesta consiste en una probeta apoyada sobre dos rodillos en su parte inferior, los cuales tienen la posibilidad de desplazarse en sentido horizontal (apoyo móvil). En la parte superior se aplica una carga dinámica, quedando solicitada como una viga de tres puntos. Pueden emplearse probetas compactadas convencionalmente en laboratorio, y testigos calados de pavimentos en servicio, adaptadas mediante un corte adicional en sentido diametral. Como ventaja principal se destaca el desarrollo de un estado uniaxial de tensiones en la parte media inferior de la muestra lo que a priori, significa una mayor simplicidad y eficiencia en la interpretación de las mediciones experimentales (Figura 2-36).

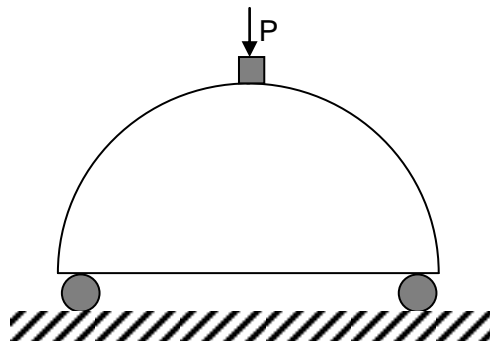


Figura 2-36: Configuración experimental de viga semicircular en flexión

2.3.2 Geometría de la SCB

La configuración adoptada se presenta en la (Figura 2-37 a). En ella, R es el radio de la muestra ($R = 75 \text{ mm}$), d es el diámetro de los rodillos ($d = 20 \text{ mm}$), L es la separación entre los rodillos ($L = 130 \text{ mm}$), b es la longitud entre los puntos de medición A y B ($b = 60 \text{ mm}$), e es la distancia vertical para la ubicación de los LVDT ($e = 8 \text{ mm}$) y a es el ancho de la placa de aplicación de carga ($a = 12.7 \text{ mm}$). La probeta no presenta muesca en su base. Para determinar las deformaciones que se produzcan al aplicar las cargas se coloca en ambas caras semicirculares de la probeta dos LVDT. La (Figura 2-37 b) muestra una probeta instrumentada según esta configuración experimental

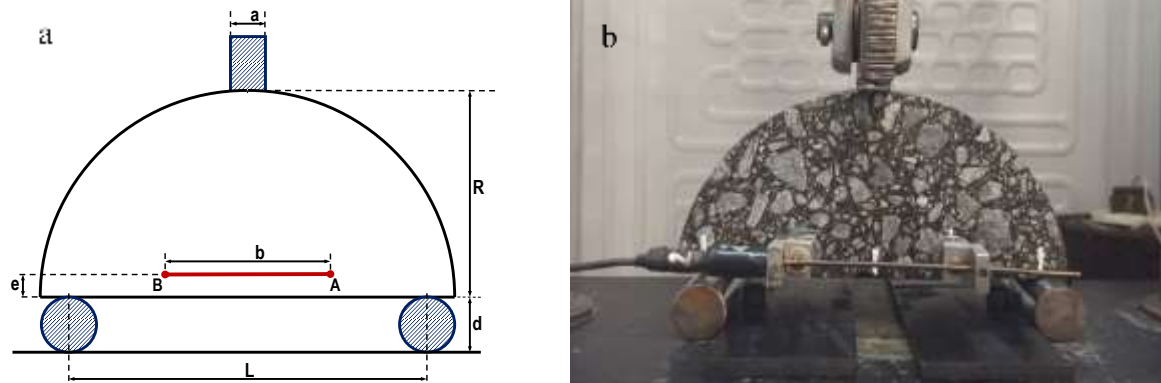


Figura 2-37: Configuración SCB adoptada

2.3.3 Cálculo del Módulo Dinámico a partir de la SCB

El módulo dinámico puede calcularse a partir del conocimiento de la distribución de tensiones que se producen en la probeta. En el caso de la configuración SCB propuesta, la mecánica analítica no contempla una solución que determine estas tensiones y por ende, tampoco el cálculo del módulo dinámico $|E^*|$. Para poder determinarlas, diversos autores han investigado y propuesto diferentes metodologías.

Molenaar et al. [67] aplicaron combinaciones de valores de frecuencia/temperatura usuales a una configuración SCB para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas, planteando como resultado la (Ec. 2-78)

$$M_r = 1.84 \frac{F}{V} \quad (\text{Ec. 2-78})$$

donde M_r es el módulo resiliente, F es la carga por unidad de ancho del espécimen en falla y V es la deformación vertical. Este resultado plantea una limitación: sólo puede ser aplicada para valores del espacio entre rodillos iguales a $1.6 R$.

Huang et al. [83], realizan estudios empleando teoría de elementos finitos, proponiendo la (Ec. 2-79) para el cálculo del módulo de rigidez E :

$$E = 1.997 \left[e^{1.175 \frac{P}{2R}} - 1 \right] \frac{P}{d} \quad (\text{Ec. 2-79})$$

donde d es la deformación vertical en el punto medio de la superficie inferior de la probeta y P es la carga aplicada.

Saha and Biligiri [68] utilizan la geometría SCB en ensayos de fatiga. Proponen que la caracterización viscoelástica de las mezclas puede ser obtenida a través del módulo dinámico y el ángulo de fase. El módulo dinámico $|E^*|_{\text{SCB}}$ puede obtenerse como la relación entre la tensión de tracción σ_t respecto a la deformación ϵ_t . La tensión de tracción es obtenida a partir de la carga aplicada como se indica en la (Ec. 2-80)

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

$$\sigma_t = \frac{P}{D.T} \quad (\text{Ec. 2-80})$$

donde P es la carga vertical, D es el diámetro de la probeta y T es el espesor de la probeta.

La deformación de tracción ε_t se calcula a partir de la (Ec. 2-81) utilizando el desplazamiento de la apertura de la punta de la grieta (en inglés CMOD, crack mouth opening displacement):

$$\varepsilon_t = \frac{\text{CMOD}}{D} \quad (\text{Ec. 2-81})$$

El ángulo de fase ϕ_{SCB} se obtiene a partir de la (Ec. 2-82):

$$\phi_{\text{SCB}} = \frac{t_i}{t_p} \cdot 360^\circ \quad (\text{Ec. 2-82})$$

donde t_i es el tiempo de retardo entre un ciclo de carga y deformación y t_p es el tiempo para un ciclo de carga.

En el próximo capítulo se empleará un Método de Elementos Finitos (MEF) para determinar una ecuación que permita calcular el Módulo Dinámico en la SCB.

CAPÍTULO 3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

3.1 Descripción general del método

A lo largo de la historia, la evolución de la ciencia ha permitido una constante mejora en los métodos de análisis de sistemas físicos que se ha traducido en una predicción cada vez más precisa del comportamiento de los elementos a través de expresiones numéricas.

El cálculo estructural ha experimentado en las últimas décadas un importante impulso gracias al desarrollo de nuevas herramientas matemáticas que, trasladadas al desarrollo informático también en auge, han permitido desarrollar métodos tan complejos como eficaces.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es resultado del desarrollo científico y la investigación matemática y computacional; es el método que se impone actualmente para el análisis tensional y de deformaciones de los sistemas estructurales.

El MEF es un método de aproximación numérica que parte del Método Matricial, elevándolo de modo “discreto” a “continuo”.

La gran ventaja que aporta es la capacidad de evaluar estructuras de más de una dimensión, dado que admite modelos de barras, de área y volúmenes.

Aunque el Método de los Elementos Finitos no deja de ser una aproximación, ya que la precisión del modelo depende del tamaño y forma de las partes en que se discretiza la pieza (Elementos Finitos), la posibilidad de introducir elementos en 2D o 3D ofrece mucha mayor precisión a la hora de obtener resultados que un modelo construido sólo con barras en 1D. La clave reside en el número de nodos y cómo interactúan entre ellos.

En el Método de los Elementos Finitos, se dispone de un código matemático mucho más potente en el que juega un importante papel la denominada Matriz de Aproximación o Matriz de Funciones de Forma [N] que rige el comportamiento del elemento en la zona intermedia a los Nodos.

En un Elemento Finito contamos con varios nodos en función de la geometría del mismo pudiendo ser barras (2 nodos), superficies triangulares (3 nodos) o superficies cuadrangulares (4 nodos). Cada uno de estos nodos cuenta con un conjunto de grados de libertad y una serie de cargas asignadas.

A partir de esos nodos se establecen las mencionadas Matrices de Aproximación o Matrices de Funciones de Forma [N] que se desprenden de varias expresiones polinómicas que definen el comportamiento de la zona intermedia a los nodos. El grado de estas expresiones polinómicas redundará en la precisión del modelo.

Así, se pueden conocer valores de desplazamientos intermedios a partir de los desplazamientos de los nodos usando como función de interpolación la matriz de aproximación.

Una vez conocida [N] se ha de buscar la matriz de rigidez [K]. Para ello, el método extendido es el del Principio de los Trabajos Virtuales, consistente en generar una ecuación de igualdad entre los trabajos internos y externos (Ec. 3-1):

$$\text{Trabajo Virtual Externo} = \text{Trabajo Virtual Interno} \quad (\text{Ec. 3-1})$$

Dadas unas fuerzas y tensiones reales y unos desplazamientos y deformaciones virtuales, el Trabajo Virtual Externo es el que producen las Fuerzas Reales sobre los Desplazamientos Virtuales y Trabajo Virtual Interno es el que producen las Tensiones Reales sobre las Deformaciones Virtuales.

A partir de esta relación planteada e introduciendo condiciones de Compatibilidad (desplazamientos – deformaciones) y de Comportamiento (Ley de Hooke), se llega a la expresión (Ec. 3-2):

$$\{F\} = [K] * \{\delta\} \quad (\text{Ec. 3-2})$$

Donde

{F}: vector de fuerzas

[K]: Matriz de Rigidez

{δ}: vector de desplazamientos

A partir de la cual se trabaja igual que con el Método Matricial para obtener la incógnita δ. Como se puede comprobar en esta explicación, el Método de los Elementos Finitos es matemáticamente mucho más complejo que otros métodos lineales como el matricial, sin embargo aporta más precisión y sobre todo más capacidad para modelizar estructuras fuera del rango de los elementos de barra.

Si bien su manejo matemático se muestra complejo, hoy en día se encuentran disponibles numerosos programas informáticos, muchos de ellos libres, con la capacidad de generar por sí solos estas ecuaciones a partir de un modelo gráfico y resolverlas numéricamente en poco tiempo para permitir conocer un comportamiento veraz de la estructura/sistema planteado, reduciendo su actividad al importante trabajo de la introducción de los “inputs” y el tratamiento de los “outputs” de manera que sean lo más representativos posibles del problema real planteado. [84]

En particular para el desarrollo de esta tesis se emplea el software LISA Finite Element Analysis, Software Version 8.0.0 (2013). [85]

Según lo describe su desarrollador, LISA es un paquete de análisis de elementos finitos para Windows fácil de usar, con un modelador integrado, un solucionador de

subprocesos múltiples y un postprocesador gráfico. La versión libre está limitada al empleo de 1300 nodos.

Básicamente el método tiene tres pasos principales

1) Construcción el modelo:

Para ello se puede optar entre diferentes opciones:

- ✓ crear nodos en diferentes posiciones para representar la forma del objeto
- ✓ crear a partir de formas predeterminadas disponibles en LISA
- ✓ importar desde un modelo CAD existente

Una vez hecho esto se procede a adecuar el diseño y posición de los nodos según sea necesario (por ejemplo para puntos de apoyo, de aplicación de cargas, etc)

Luego se crean los elementos finitos (vigas, placas, ladrillos, etc.) entre los nodos.

Se asignan propiedades materiales a los elementos.

Se asignan restricciones a los nodos seleccionados.

Se asignan fuerzas aplicadas a los nodos apropiados.

2) Resolución el modelo: se define el tipo de análisis a emplear (estático lineal, modo vibración, respuesta dinámica en el tiempo, etc) o puede optarse por emplear el Solver automático de LISA

3) Presentación de los resultados

Se trabaja sobre el archivo de resultados y se seleccionan los parámetros que se desean mostrar, por ejemplo desplazamientos, tensiones principales, temperatura, voltaje, etc. El mismo puede exportarse a un archivo de tipo *.csv para su posterior procesamiento, por ejemplo en una hoja de cálculo.

También se pueden mostrar como gráficos de contorno 2D o 3D, y/o como tablas de valores numéricos.

NOTA IMPORTANTE: Para aseverar la validez de los resultados debe verificarse:

- ✓ Coherencia de unidades de magnitud empleadas: El programa no posee unidades definidas por lo tanto y para evitar errores de magnitud se sugiere emplear las del SI.
- ✓ La validación requiere confirmar que se ha producido la convergencia de la malla y que los valores están en línea con las expectativas de cálculos manuales, experimentos o experiencias pasadas.
- ✓ La convergencia de la malla requiere refinar la malla repetidamente y resolver hasta que los resultados ya no cambian apreciablemente. [85]

3.2 Aplicación del MEF para el análisis de la viga semicircular en flexión. Análisis comparativo con el ensayo de tracción indirecta.

De acuerdo a lo planteado en el ítem 3.1 se procede a aplicar el MEF para modelizar la viga semicircular en flexión. Análogamente a lo realizado para la SCB se plantea el análisis de probeta circular en tracción indirecta para probetas cilíndricas de 100mm de diámetro. Este último análisis se realiza con el objeto de verificar si los resultados obtenidos mediante este MEF se condicen con los obtenidos a partir de la teoría y que ya han sido validados. Si esto es válido puede extenderse su validez para la configuración SCB, la que, como se dijo anteriormente no cuenta con una solución para el cálculo analítico de tensiones y deformaciones y por ende para determinación del módulo dinámico.

Si bien en trabajos anteriores [3] se ha demostrado que este ensayo es apto para la obtención del módulo dinámico y presenta ventajas frente al ensayo de compresión simple, este estudio se realiza con el fin de demostrar porqué la elección del modelo SCB resulta una mejor opción.

Construcción del modelo

Se parte de uno de los diseños predefinidos del programa:

- SCB: platea circular de radio $r=0.075\text{m}$
- TI: platea circular de radio $r=0.050\text{m}$

Para hacer un mejor uso de los recursos disponibles (el programa está limitado a 1300 nodos) se procede a aplicar simetría y trabajar entonces con un cuarto de platea (0° a 90°), de esta manera las dimensiones en que queda discretizado el diseño serán más pequeñas y se tendrá mayor precisión. Para la discretización se emplea la opción de malla automática facilitado por el software. Se multiplican los nodos de modo que el número final ronde los 1300 tal como lo muestra la Figura 3-1. Para ambos casos el número de nodos es de 1261.

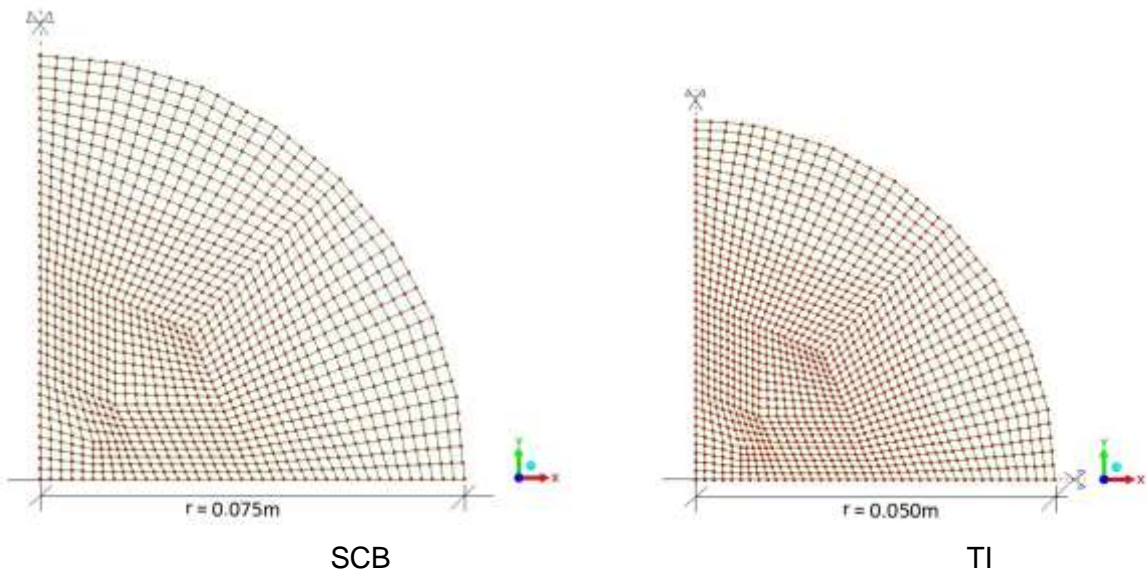


Figura 3-1. Mallado

Luego se procede a la determinación de las condiciones de borde y propiedades (Tabla 3-1):

Tabla 3-1: Condiciones de borde y propiedades

SCB	TI
Desplazamientos nulos en Y para el punto de apoyo de la viga: Nodo 8 (0.065625;0)	Desplazamientos nulos en Y para el eje de simetría
Desplazamientos nulos en X para el eje de simetría	
Correcciones de posición para los nodos donde se distribuirá la carga P y el nodo (o nodos) donde se medirá el desplazamiento horizontal (0.5 desplazamiento total)	
Material isótropo Módulo de Elasticidad (en Pa), variable(*) Coeficiente de Poisson, variable(*) espesor: 0.05m	

(*) A partir de su análisis comparativo se podrán obtener resultados que permitirán justificar el empleo de esta configuración frente a otras planteadas para la obtención del módulo dinámico de mezclas asfálticas.

El resultado se muestra en la Figura 3-2

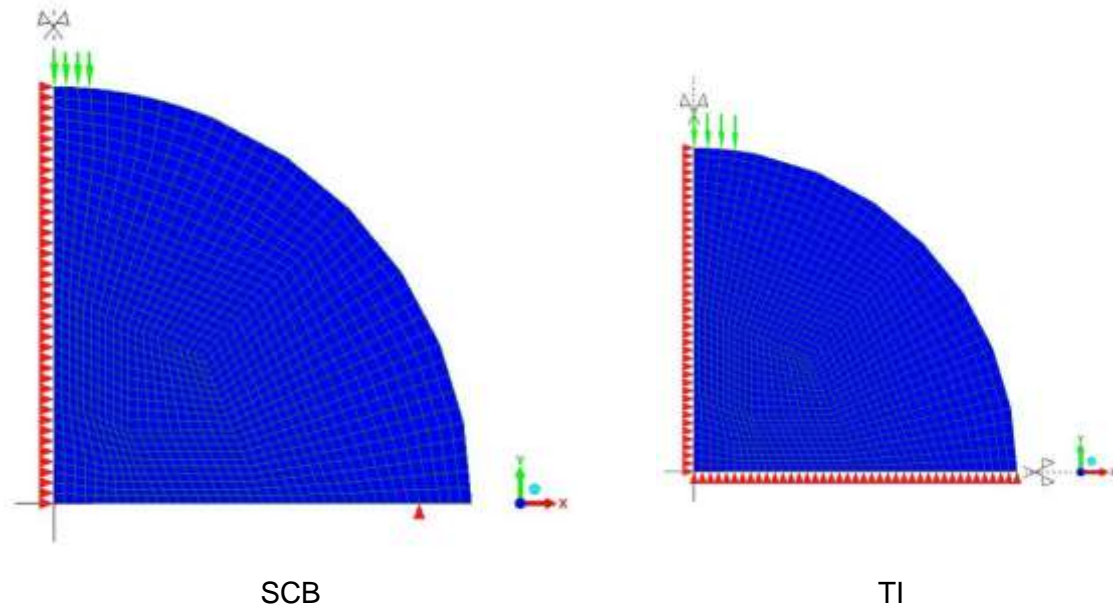


Figura 3-2. Modelo terminado

Resolución del modelo

Tal como se mencionó se aplicarán diferentes condiciones para la resolución de ambas configuraciones, lo que brindará un abanico de resultados a partir de los cuales obtener una serie de conclusiones relacionadas a la elección del modelo de SCB y de validación del empleo del MEF. Para ello se aplica el SOLVER automático del programa

Presentación de los resultados

El programa proporciona una gran cantidad de parámetros como resultado del análisis así como también diferentes maneras de representarlos: tablas, gráficos y animaciones. En particular, en esta investigación se trabaja con los valores de:

- ✓ desplazamientos en X
- ✓ tensiones XX
- ✓ tensiones YY

Se indican además, algunas consideraciones tomadas para la interpretación de los resultados (Tabla 3-2).

Tabla 3-2: Consideraciones especiales

SCB	TI
Desplazamiento horizontal: determinado como el valor promedio de 9 nodos centrados en correspondencia con el centro del dispositivo que sujeta al LVDT (Figura 3-3a)	Desplazamiento horizontal: Para su determinación se consideran los valores de 6 nodos en correspondencia con el centro del dispositivo que sujeta al LVDT (Figura 3-3b), los valores de los 3 nodos superiores se multiplican por 2 por condiciones de simetría, resultando el desplazamiento final el valor promedio de 9 mediciones.
Aplicación de carga P: se distribuye de manera equitativa entre 4 nodos. (Figura 3-4)	
Apoyo vertical de la viga: desplazamiento en Y nulo aplicado en un único nodo	-----

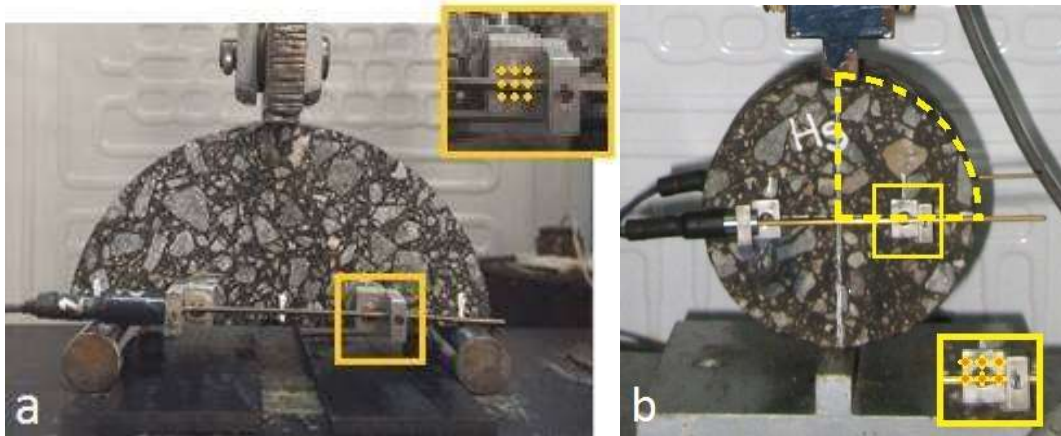


Figura 3-3. Nodos considerados para el cálculo del desplazamiento horizontal

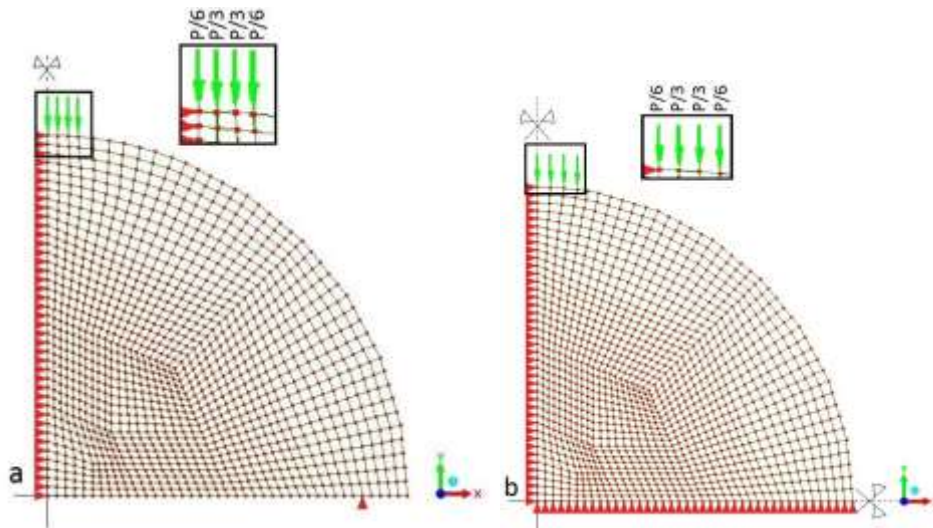


Figura 3-4. Distribución de cargas

A continuación se presenta el análisis de los procesamientos hechos en LISA.

3.2.1 Obtención de una ecuación para el cálculo del módulo dinámico

Se ha indicado precedentemente que para calcular el módulo dinámico es necesario conocer la distribución de tensiones que se producen en la probeta y para la configuración SCB propuesta, la mecánica analítica no contempla una solución que las determine y por ende, tampoco el cálculo del módulo dinámico $|E^*|$. Diversos autores han investigado y propuesto diferentes metodologías para ello, tal como se menciona en 2.3.3. Se propone entonces, a partir del empleo de un Modelo de Elementos Finitos (MEF), desarrollar una ecuación que permita el cálculo del módulo dinámico $|E^*|$.

Para ello partimos de la definición de Módulo Dinámico indicada como la relación entre tensiones y deformaciones (Ec. 3-3):

$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 3-3})$$

En particular, tomando como base lo investigado y desarrollado por Martínez et al [86] y Saha et al [68], y teniendo presente la hipótesis de que el módulo dinámico $|E^*|$ es una propiedad fundamental y característica de cada mezcla asfáltica, y que por lo tanto puede ser determinada mediante cualquier metodología experimental, puede plantearse que:

- La tensión resulta una función proporcional a la fuerza aplicada (P), el coeficiente de Poisson (μ) e inversamente proporcional al espesor de la probeta (h):
 $\sigma = f(P, \mu, 1/h)$.
- La deformación es una función proporcional al desplazamiento (Δl) e inversamente proporcional a la base de medida para los desplazamientos horizontales (b): $\varepsilon = f(\Delta l, 1/b)$.

Por lo tanto, a partir de las funciones de deformación y tensión propuestas podemos plantear que el módulo dinámico puede expresarse como (Ec. 3-4):

$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{f(P, \mu, 1/h)}{f(\Delta l, 1/b)} = K(\mu) \frac{P}{\Delta l(b) * h} \quad (\text{Ec. 3-4})$$

Es de destacar que la base de medida b forma parte de la configuración de viga semicircular adoptada y es determinante para el cálculo de los desplazamientos, si esta se modifica deberá volver a estimarse la ecuación del módulo dinámico.

De este modo, el módulo dinámico resulta una función que varía en base a la carga P aplicada, el desplazamiento (que incluye la influencia de la base de medida b mencionada previamente), el espesor de la probeta y una función K, dependiente del coeficiente de Poisson μ (Ec. 3-5).

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

$$|E^*| = K(\mu) \frac{P}{\Delta l^* h} \quad (\text{Ec. 3-5})$$

Por lo tanto, se requiere determinar la forma de esa función K, para una base de medida arbitraria b planteada al momento de la discretización. Para ello se propone realizar mediante un MEF, un análisis de diferentes situaciones que permitan obtener valores de K(μ) a partir de los cuales aproximar la función K. El valor de K(μ) puede despejarse a partir de la (Ec. 3-5) (determinación de los nodos donde se miden los desplazamientos) (Ec. 3-6):

$$K(\mu) = |E^*| \frac{\Delta l^* h}{P} \quad (\text{Ec. 3-6})$$

Es decir, se proponen de manera arbitraria valores de carga P, módulo de elasticidad $|E^*|$ y coeficientes de Poisson μ , planteando un espesor teórico h de 0.050m, y se corre el programa para simular diferentes combinaciones de estas variables para obtener los desplazamientos correspondientes y a partir de todos estos datos se calcula un valor K(μ) asociado (tener en cuenta que por simetría el valor obtenido del desplazamiento es la mitad del que se produce en la probeta). Estos valores de K(μ) se ubican en una gráfica en función de los valores de μ y se determina cuál es la función que mejor ajusta a dichos valores. En la Tabla 3-3 se presenta el detalle de los diferentes valores planteados en cada una de las variables consideradas (el procesamiento se realiza haciendo todas las combinaciones posibles entre ellos), teniendo presente que los valores elegidos sean consistentes con valores reales. Cabe destacar que, puesto que se trabaja dentro del rango de la proporcionalidad, es suficiente plantear un único valor de carga y variar los valores de E y μ .

Tabla 3-3: Variables consideradas en el estudio

Carga P (N)	Módulo de Elasticidad (Pa)	Coefficiente de Poisson, μ
1200		0.05
	50	0.10
	100	0.15
	500	0.20
	1000	0.25
	5000	0.30
	10000	0.35
	20000	0.40
		0.45

Los resultados encontrados para la SCB se muestran en la Figura 3-5:

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

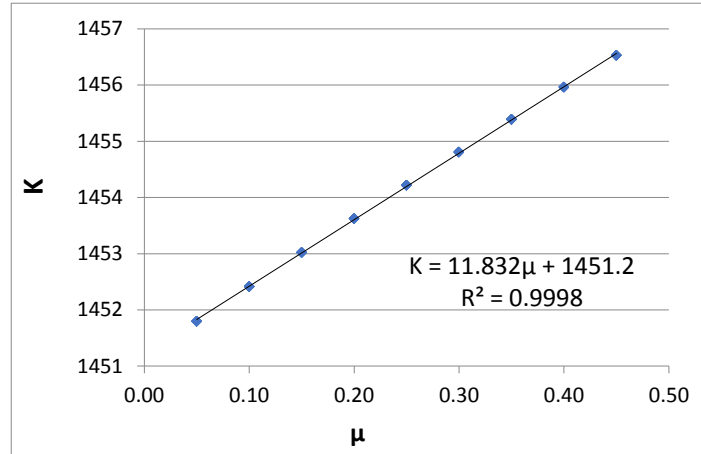


Figura 3-5. Cálculo de la función K para SCB

Análogamente, aplicando el mismo procedimiento se obtiene para el caso de TI (Figura 3-6):

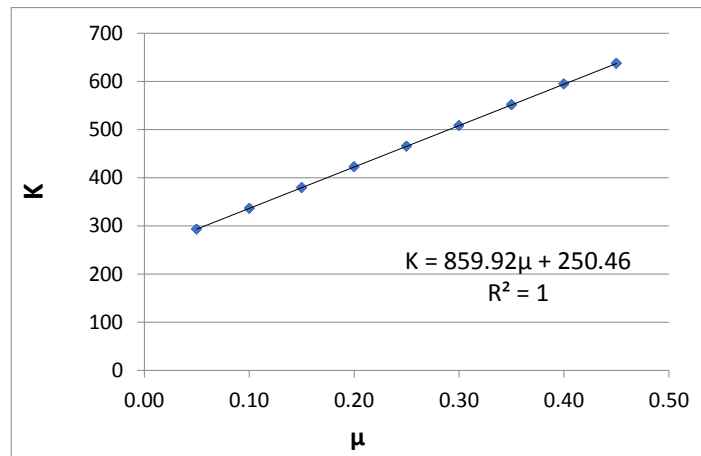


Figura 3-6. Cálculo de la función K para TI

Se observa que en ambos casos los valores se distribuyen siguiendo funciones de tipo lineal cuyas ecuaciones son (Tabla 3-4):

Tabla 3-4: Ecuaciones para K encontradas

SCB	TI
$K(\mu) = 11.83\mu + 1451.20$ (Ec. 3-7)	$K(\mu) = 859.92\mu + 250.46$ (Ec. 3-8)

Si se toma en cuenta que $0 < \mu < 0,5$ (Tabla 3-5)

Tabla 3-5: Rango de valores para K

SCB	TI
$1451.20 < K < 1457.12$	$250.46 < K < 680.42$

Se concluye para el caso SCB que el rango de variación de K es muy pequeño (0.41% entre el máximo y el mínimo) y por lo tanto la influencia del coeficiente de Poisson es

prácticamente despreciable, tal como puede verse gráficamente en la Figura 3-7. Podemos entonces adoptar para K un valor constante obtenido como el valor medio del rango, $K=1454$.

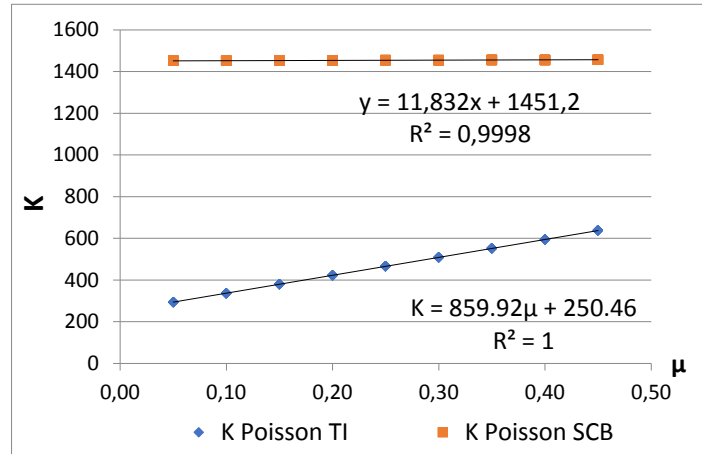


Figura 3-7. Cálculo de la función K para TI y SCB

Luego, en base a los resultados obtenidos con el MEF y de acuerdo con el principio de correspondencia elástico-viscoelástico aplicado a la geometría SCB con cargas sinusoidales en estado de equilibrio, el módulo dinámico $|E^*|$ se calcula de acuerdo a la (Ec. 3-9):

$$|E^*| = 1454 \frac{P}{\Delta l^* h} \quad (\text{Ec. 3-9})$$

donde $|E^*|$ es el módulo dinámico, P es la amplitud de la carga sinusoidal aplicada y Δl es la amplitud de la deformación horizontal resultante medida como se muestra en la Figura 3-8.

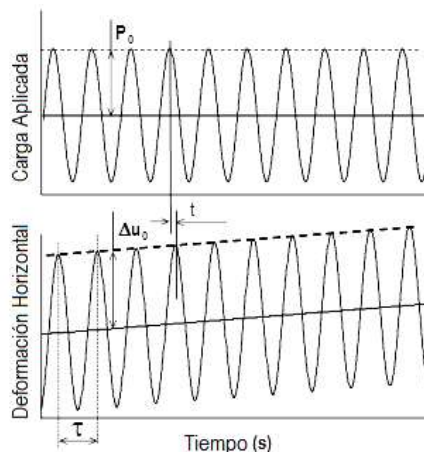


Figura 3-8. Carga aplicada y deformación horizontal resultante

El ángulo de fase ϕ entre carga y deformación se calcula de acuerdo a la (Ec. 3-10)

$$\phi = \frac{t}{\tau} \cdot 360^\circ \quad (\text{Ec. 3-10})$$

donde ϕ es el ángulo de fase, t es el intervalo de tiempo entre un ciclo de carga y deformación y τ es el período para un ciclo de carga.

Contrariamente, para el análisis en TI el rango de variación de K es muy amplio (272% entre el máximo y el mínimo) y por lo tanto la influencia del coeficiente de Poisson debe ser considerada indudablemente en el cálculo del módulo dinámico. Martínez [3] concluye en su tesis doctoral como ecuación de módulo dinámico determinado a partir del ensayo de Tracción Indirecta la ecuación que se muestra en la (Ec. 3-11):

$$|E^*| = \frac{P}{\Delta l * h} (K_1 + \mu K_2) \quad (\text{Ec. 3-11})$$

donde $|E^*|$ es el módulo dinámico, P es la amplitud de la carga sinusoidal aplicada y Δl es la amplitud de la deformación horizontal resultante medida como se muestra en la Figura 3-8 anteriormente presentada y K_1 y K_2 son constantes de integración función de la base de medida. Cabe destacar además que el coeficiente de Poisson varía con la temperatura, de modo que, para el caso de cálculo de $|E^*|$ mediante tracción indirecta, debe considerarse a su vez esta variación al momento de calcular la función $K(\mu, T)$. Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos con el MEF y para una relación $b/D=0.06\text{m}/0.10\text{m}=0.6$ los valores de K_1 y K_2 resultan 859.92 y 250.46 respectivamente, reemplazando obtenemos la (Ec. 3-12):

$$|E^*| = \frac{P}{\Delta l * h} (250.46 + 859.92 * \mu(t)) \quad (\text{Ec. 3-12})$$

El ángulo de fase ϕ se calcula de la misma manera que en la (Ec. 3-10)

3.2.2 *Análisis de tensiones en X e Y*

En este punto se analizan las tensiones en X e Y en el plano medio de la probeta proporcionados por el programa.

Se aplican las siguientes condiciones:

Módulo de Elasticidad: 2196 MPa (valor real observable en una mezcla asfáltica)

Carga P: 136N (en el modelo aplicamos P/2 por simetría)

Coficiente de Poisson: 0.35

El resultado se muestra en la Figura 3-9 y Figura 3-10 para ambas configuraciones.

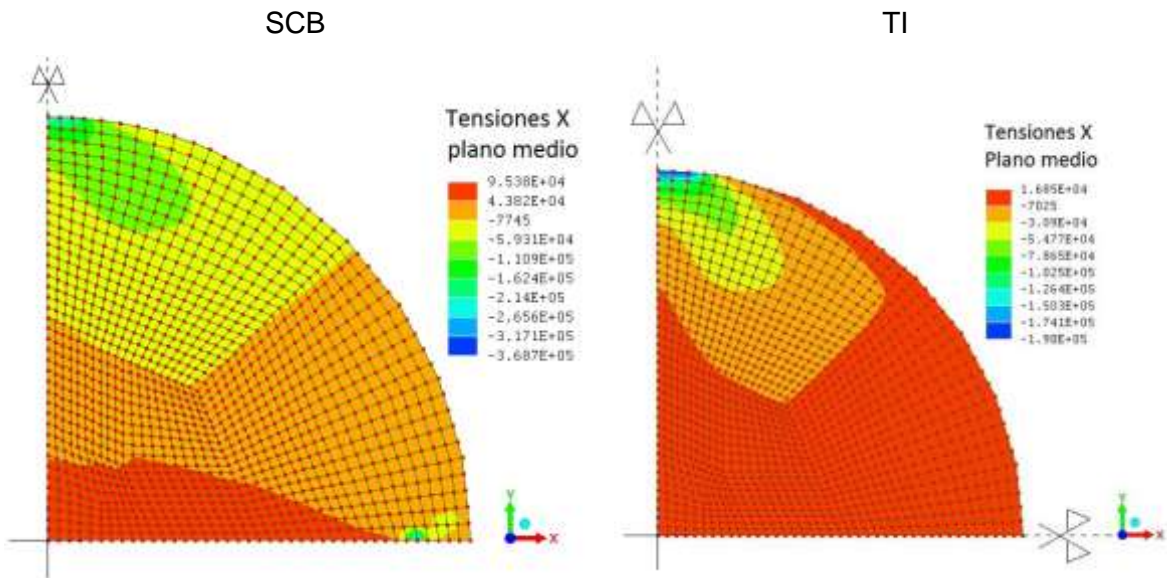


Figura 3-9. Tensiones X en el plano medio

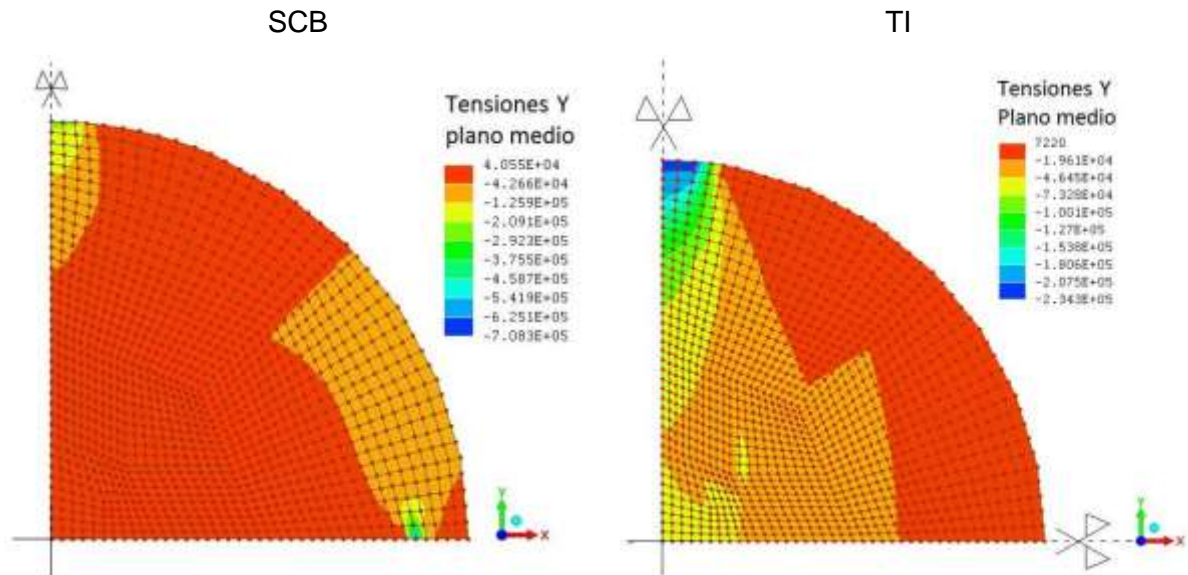


Figura 3-10. Tensiones Y en el plano medio

Se observa para ambos análisis que a igualdad de carga aplicada se producen mayores tensiones para la SCB, esto resulta ventajoso puesto que es posible emplear equipos con menos capacidad, menos potentes para poder realizar el ensayo y abarcar un rango de estudio más amplio.

Adicionalmente se analiza de manera puntual la distribución de tensiones X e Y sobre los nodos ubicados en el eje Y (eje de simetría de las probetas), Figura 3-11 y sobre el eje X (Figura 3-12).

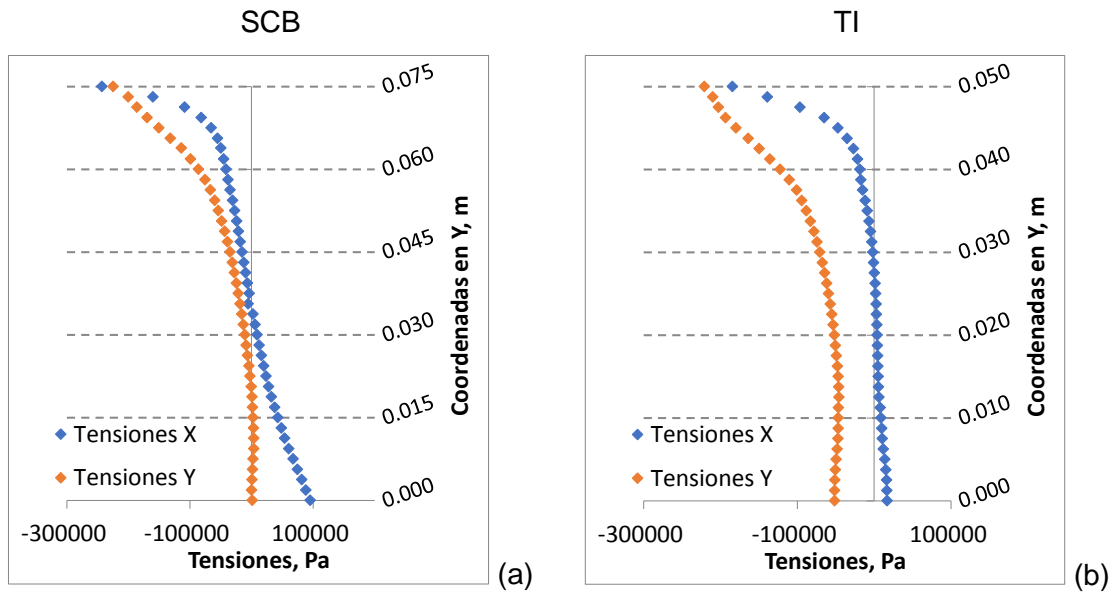


Figura 3-11. Distribución de tensiones X e Y en el eje Y

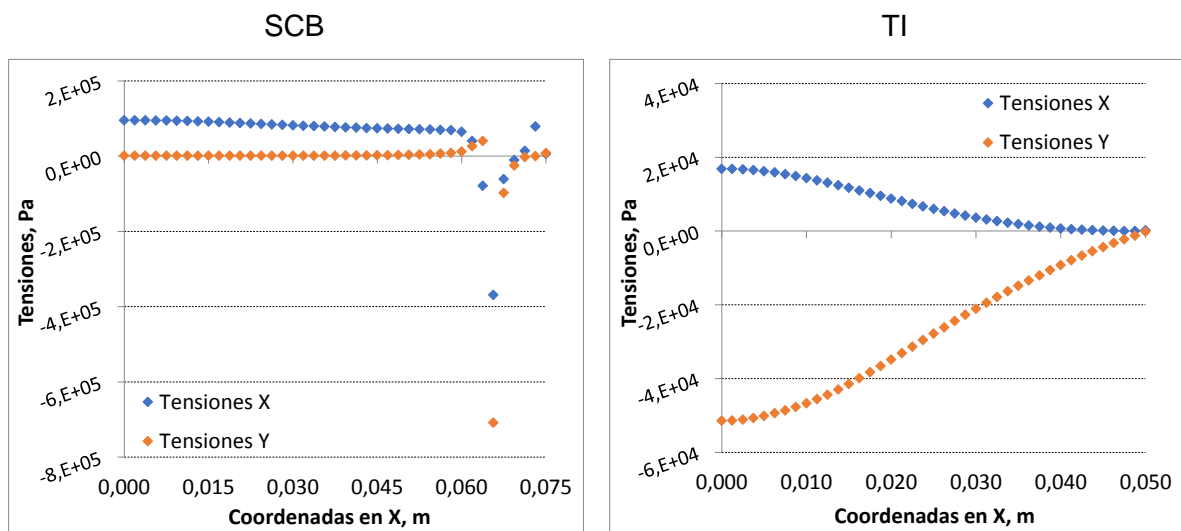


Figura 3-12. Distribución de tensiones X e Y en el eje X

Se observa que el comportamiento graficado en la Figura 3-11a para la SCB es el característico de una viga sometida a flexión con esquema de doble triángulo para las tensiones en X, donde el eje neutro atraviesa la sección normal en el área central. En la Figura 3-12a se observan tensiones de compresión en X prácticamente constantes y en Y

despreciables, a excepción de la zona de apoyo donde se produce un estado muy complejo con alta concentración de tensiones.

Para el análisis de las tensiones en TI, en la Figura 3-13 se presentan las tensiones teóricas a lo largo de los ejes horizontales y verticales en el ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta para una carga concentrada. Haciendo un análisis se observa que, para la distribución de tensiones en el diámetro horizontal en el centro de la probeta (Figura 3-13 a) el esfuerzo de compresión vertical es 3 veces superior al de tracción horizontal. Para el caso del diámetro vertical, en la zona central de la probeta, se produce un estado biaxial de tensiones, donde la tensión vertical de compresión es 3 veces superior a la de tracción horizontal generada (Figura 3-13b). Se concluye entonces que el comportamiento graficado a partir de los resultados obtenidos en LISA sigue las formas teóricas presentadas, verificando las relaciones entre las tensiones de compresión verticales y horizontales en centro de la probeta. En consecuencia, es de esperar que los resultados obtenidos a partir de este MEF para la SCB sean consistentes con el comportamiento real.

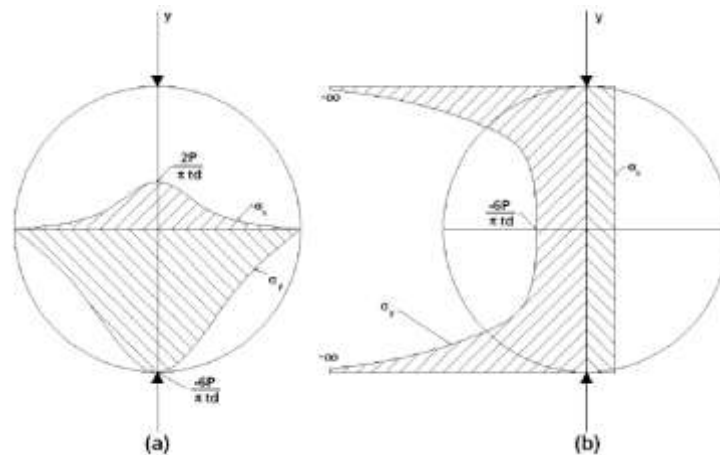


Figura 3-13. Distribución de esfuerzos teóricos sobre planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta.

3.3 Justificación del empleo de la SCB como método de obtención del Módulo dinámico

A partir de lo analizado en los puntos anteriores se llega a las siguientes conclusiones:

- Respecto al ensayo de compresión simple en probetas de 100mm de diámetro y 150mm de altura [87]

La obtención de este tipo de probetas cilíndricas esbeltas sólo puede conseguirse en laboratorio a partir del calado y corte de probetas elaboradas en el compactador giratorio, siendo esta tecnología muy poco aplicada en nuestro país puesto que este equipamiento no está disponible para la mayoría de los laboratorios.

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

Por otra parte, no es posible obtener especímenes calados in situ puesto que los espesores de pavimento en la mayoría de los casos son menores, generalmente inferiores a los 100mm.

- *Respecto al ensayo de tracción indirecta en probetas de 100mm de diámetro y 50mm de espesor*

A diferencia del ensayo a compresión simple las probetas para TI y SCB pueden ser caladas del pavimento puesto que ambas tienen un espesor teórico propuesto de 50mm. Para elaborarlas en laboratorio pueden hacerse empleando una prensa Marshall (TI) y caladas de probetas hechas con compactador giratorio o Roller compactor (TI-SCB) tal como se mostró en el ítem 4.2.

El equipamiento necesario para llevar a cabo el ensayo es relativamente simple, pudiendo ser empleados otros equipos de ensayo de módulo dinámico con algunas adaptaciones.

Una de las principales ventajas de la SCB está dada por el desarrollo de un estado uniaxial de tensiones en la parte media inferior de la muestra lo que a priori, significa una mayor simplicidad y eficiencia en la interpretación de las mediciones experimentales, ello significa que el cálculo del módulo dinámico no involucra a la relación de Poisson, se independiza de ella. Esto es destacable porque se ha demostrado que además, la relación de Poisson en las mezclas asfálticas presenta una variación en función de la temperatura [88]. Por el contrario, en TI el mayor inconveniente es que en el seno de la muestra que se ensaya se desarrolla un estado biaxial de tensiones que sí requiere de la adopción de una relación de Poisson para el cálculo del módulo dinámico.

Esto mismo hace posible que mediante simples adaptaciones, el ensayo pueda ser usado para analizar otros parámetros como por ejemplo el comportamiento a fractura.

A igualdad de fuerza P aplicada, las deformaciones producidas en la SCB son mayores que en TI, por lo tanto se requieren equipos menos potentes (más accesibles) con la posibilidad de barrer mayor cantidad de combinaciones de variables.

Por lo tanto, podemos inferir que el empleo de la SCB es una opción válida y superadora para la obtención del módulo dinámico.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Materiales

En este estudio se han considerado cinco mezclas asfálticas de tipo densas: una mezcla CAC-CA30, formulada con un asfalto convencional, denominada CA30; una mezcla CAC-AM3, elaborada con un asfalto modificado con polímero SBS, denominada AM3; ambas de uso común en Argentina, una mezcla elaborada con plásticos reciclados por vía seca (la misma mezcla CA30 a la que se le incorpora 2% de polietileno en pellets respecto al peso total de la mezcla) denominada 2%SBP y dos mezclas de alto módulo elaboradas con AAMP (asfalto altamente modificado con polímero) denominadas H1 y H2.

La selección de los materiales a estudiar se basa en experiencias de investigaciones previas similares llevadas a cabo en el laboratorio Vial IMAE-FCEIA-UNR, donde se intenta evaluar aquellas tipologías de mezclas que sean de uso común y mayoritario en nuestro país (CA30 y AM3) y además aquellas que posean características especiales, ya sea por el uso de agentes modificadores, materiales reciclados, etc (2%SBP, H1 y H2). Cabe destacar que la disponibilidad de estos materiales es siempre una variable que influye ampliamente en la decisión del número de mezclas a estudiar.

Sus propiedades principales se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Características principales de las mezclas asfálticas empleadas

Denominación	CA30	AM3	2%SBP	H1	H2
Contenido de asfalto en peso (%)	4.7	4.7	4.7	4.1	3.9
Contenido de asfalto en volumen (%)	11.6	11.5	11.3	10.4	9.4
Vacíos (%)	5.1	4.9	4.5	3.6	5.3
Densidad Teórica Máxima (kg/dm ³)	2.597	2.588	2.507	2.541	2.551
Densidad Marshall (kg/dm ³)	2.464	2.460	2.394	2.451	2.414
VAM (%)	16.7	16.4	15.7	13.6	14.7
RBV (%)	69.5	70.1	71.4	73.9	64.0
Estabilidad Marshall (KN)	15.0	13.6	14.3	10.3	9.4
Fluencia (mm)	4.1	4.8	4.1	5.8	6.8

4.2 Metodología para la obtención de probetas

Para la elaboración de las probetas requeridas para las tres metodologías de ensayo propuestas se toman como base probetas elaboradas en compactador giratorio (Figura 4-1 a) de 150mm de diámetro por 150mm de altura (Figura 4-2 a), probetas elaboradas en el compactador Marshall (Figura 4-1b) de 100mm de diámetro y 50mm de altura (Figura 4-2 b, y probetas prismáticas de 300mm por 300mm y 50 mm de altura (Figura 4-2 c) elaboradas en el compactador de probetas para WTT (roller compactor, Figura

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

4-1c). Para el ensayo de Compresión Uniaxial (CU) se calaron probetas de 100mm de diámetro, como se muestra en la (Figura 4-3 a). Para las SCB, se cortaron “rodajas” de 50mm de espesor que luego fueron divididas diametralmente como se muestra en la (Figura 4-3 b). También se obtuvieron muestras de 150mm semicirculares y circulares de 100mm de diámetro a partir de panes elaborados en el compactador roller (Figura 4-3 c).

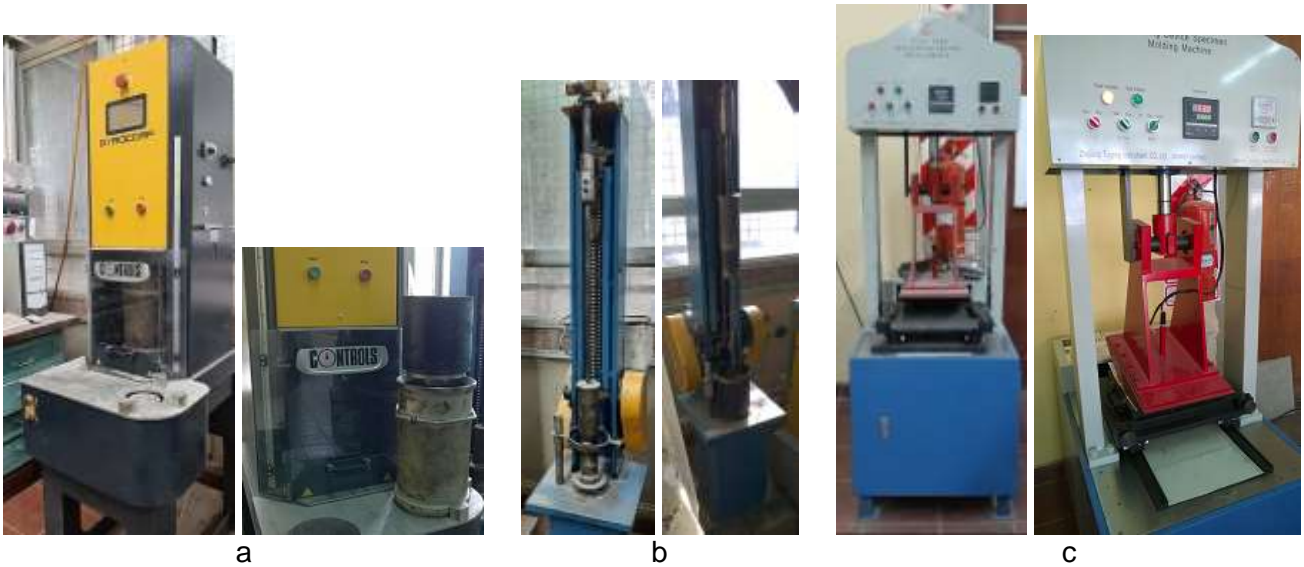


Figura 4-1: Equipos de compactación



Figura 4-2: Probetas

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión



Figura 4-3: Probetas empleadas para los ensayos

4.3 Equipo de ensayo

Todos los ensayos (compresión uniaxial, tracción indirecta y flexión) se realizaron utilizando una máquina servo-neumática, desarrollada, construida y puesta a punto por el Dr. Ing. Fernando Martínez en el Laboratorio Vial de la Universidad Nacional de Rosario. Para cada una de las metodologías propuestas se plantearon las modificaciones necesarias de manera de poder ejecutar los ensayos (Figura 4-4). En las tres consideraciones, las cargas aplicadas fueron de tipo sinusoidal (Haversine). En la Figura 4-5 se muestra un esquema simplificado de la misma.

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión



Figura 4-4. Equipo de ensayo para las tres modalidades presentadas (a) CU, (b) TI, (c) SCB.

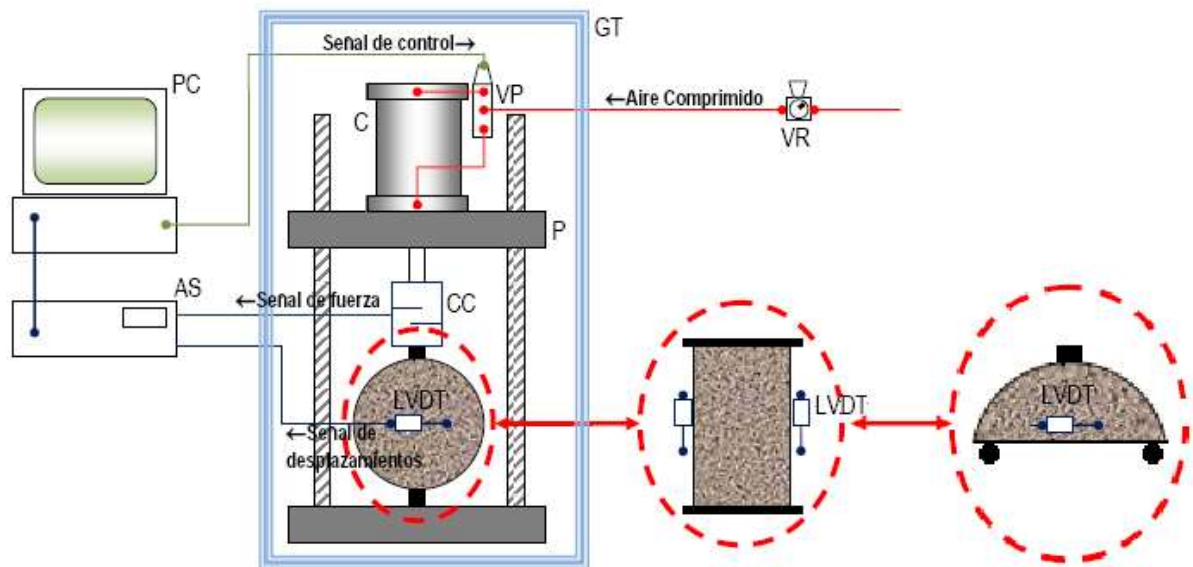


Figura 4-5. Esquema del equipo de ensayo para las tres modalidades presentadas.

[3]

Este equipo es capaz de aplicar cargas a través de una gama de frecuencias que van desde 0.01 Hz a 5 Hz. Una válvula proporcional controlada por la computadora se utiliza para generar las cargas sinusoidales en la frecuencia necesaria. El marco de ensayo está posicionado dentro de un recinto provisto de un sistema termostático que le permite alcanzar las temperaturas de ensayo en el rango de 0°C a 50°C. El sistema de adquisición de datos también fue desarrollado en el Laboratorio Vial de la Universidad de

Rosario y es capaz de medir y registrar datos en tres canales simultáneamente: dos para los desplazamientos y uno para la carga.

El mecanismo para medición de deformaciones se hizo mediante el empleo de dos LVDTs, donde la disposición de los mismos fue diferente según sea el ensayo llevado a cabo, como puede verse en la Figura 4-5. Las bases de medida en cada uno de ellos fueron de 35mm para CU (vertical) y 60mm para TI y SCB (Horizontal).

La carga aplicada y el promedio de las deformaciones fueron calculadas ajustando funciones sinusoidales a las mediciones experimentales.

En este estudio, se han utilizado cinco temperaturas (0, 10, 20, 30 y 40° C) y siete frecuencias (5, 4, 2, 1, 0,5, 0,25 y 0,10 Hz). Los valores experimentales de dos muestras gemelas se utilizaron para construir las curvas maestras del módulo dinámico utilizando técnicas de regresión no lineal para ajustar los datos experimentales a una función sigmoideal resolviendo los coeficientes de traslación de la ecuación de Arrhenius (“shift factors”, aT), y los coeficientes de esa función al mismo tiempo.[89]

En el anexo se incluyen las planillas con los datos de ensayo correspondientes.

4.4 Ensayo de Compresión Uniaxial

A continuación en la Figura 4-6 a Figura 4-10 se muestran las curvas maestras para las mezclas en estudio obtenidas a partir del ensayo de Compresión Uniaxial a la temperatura de referencia de 20 °C. Estas curvas maestras han sido utilizadas para promediar los valores experimentales del módulo dinámico de la mezcla a la misma temperatura y frecuencia considerada experimentalmente. Se muestran además los diagramas de Black correspondientes.

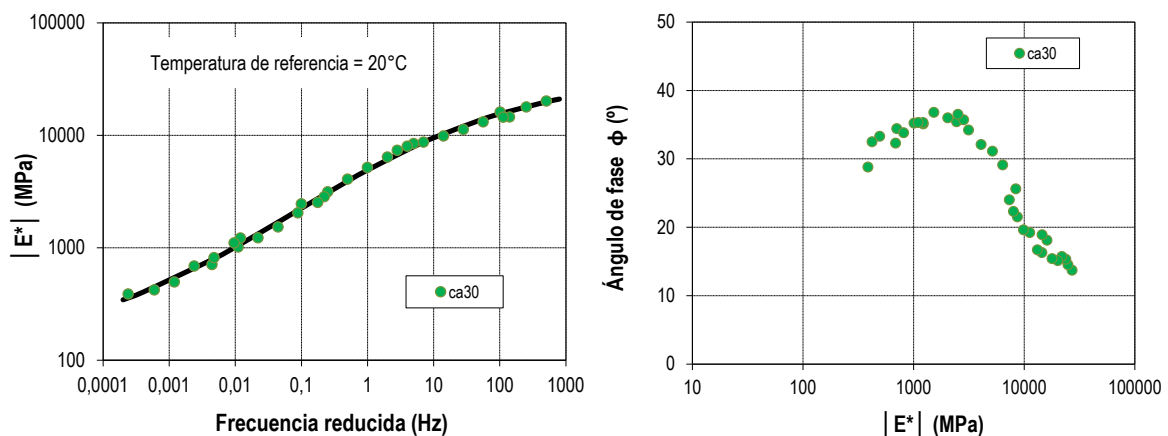


Figura 4-6. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla CA30

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

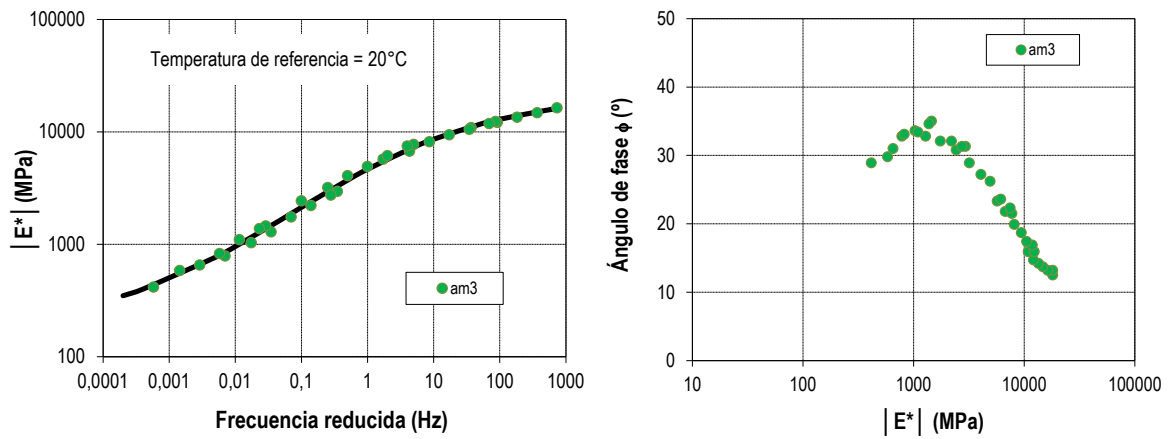


Figura 4-7. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla AM3

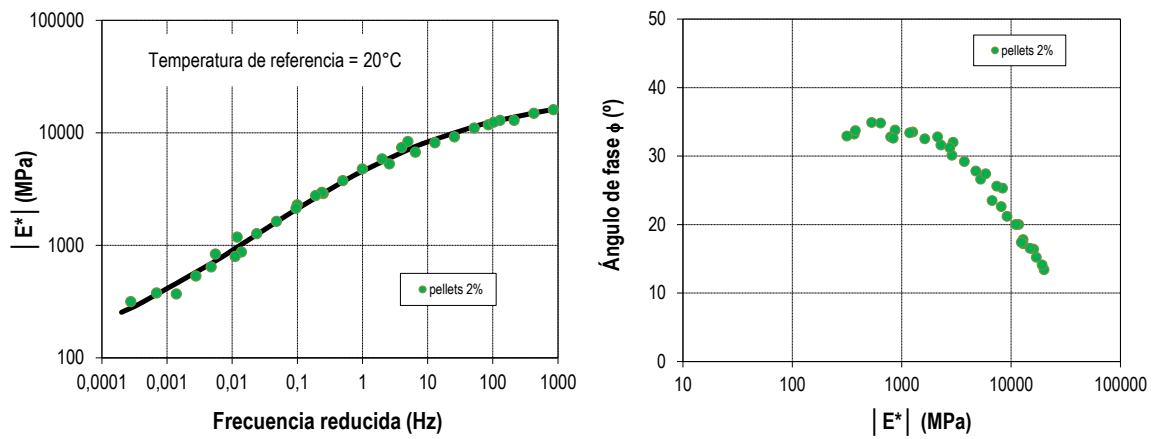


Figura 4-8. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla 2%SBP

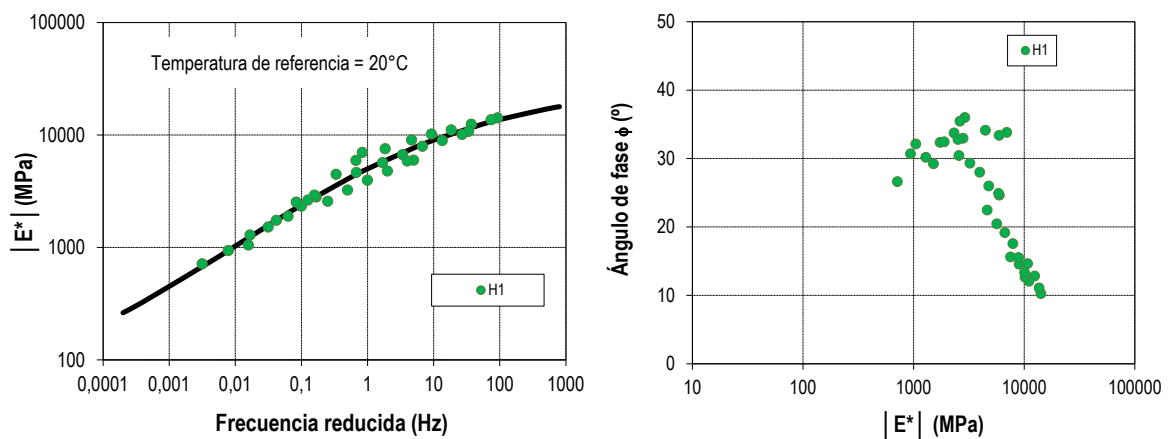


Figura 4-9. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla H1 Base

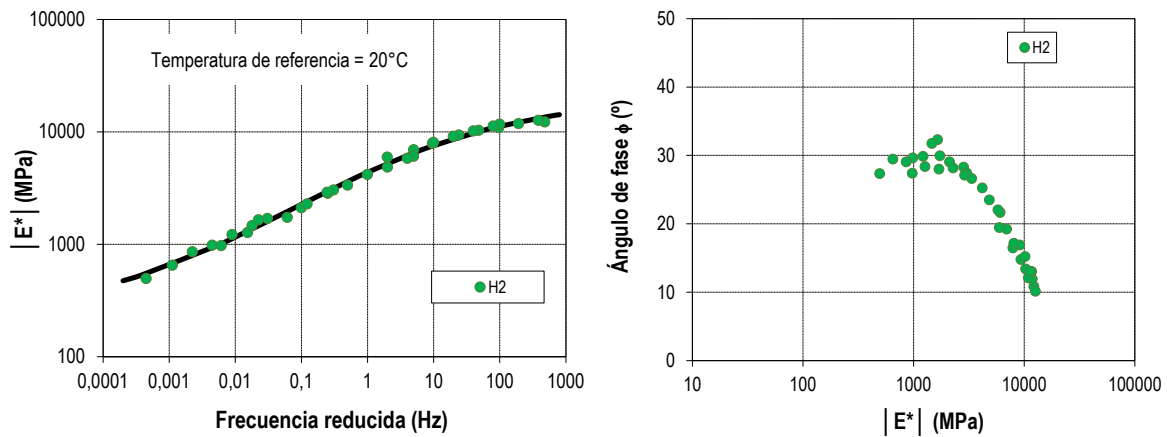


Figura 4-10. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla H2 Carpeta

En líneas generales esta metodología, que es la que se propone como válida, es representativa del comportamiento característico planteado al comienzo del estudio para todas las mezclas. Se observa cómo los valores de módulo dinámico se distribuyen a lo largo de las curvas Maestras en forma de S apaisada propuesta para su modelización, con dispersiones que rondan el 25-30% para probetas gemelas. Estas diferencias podrían considerarse muy aceptables, puesto que se ha observado que resultados de ensayo de muestras gemelas analizadas en laboratorio con el mismo procedimiento experimental pueden presentar una diferencia de ese orden entre ambas. Además se observa que dichos valores están en el mismo orden de magnitud que los obtenidos en otras predicciones de módulo dinámico utilizando ecuaciones y modelos predictivos aceptados por la comunidad científico-técnica [26, 90]

4.5 Ensayo en Tracción indirecta

Continuando con la presentación de resultados de ensayo, en la Figura 4-11 a Figura 4-15 se muestran las curvas maestras para las mezclas en estudio obtenidas a partir del ensayo de Tracción indirecta.

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

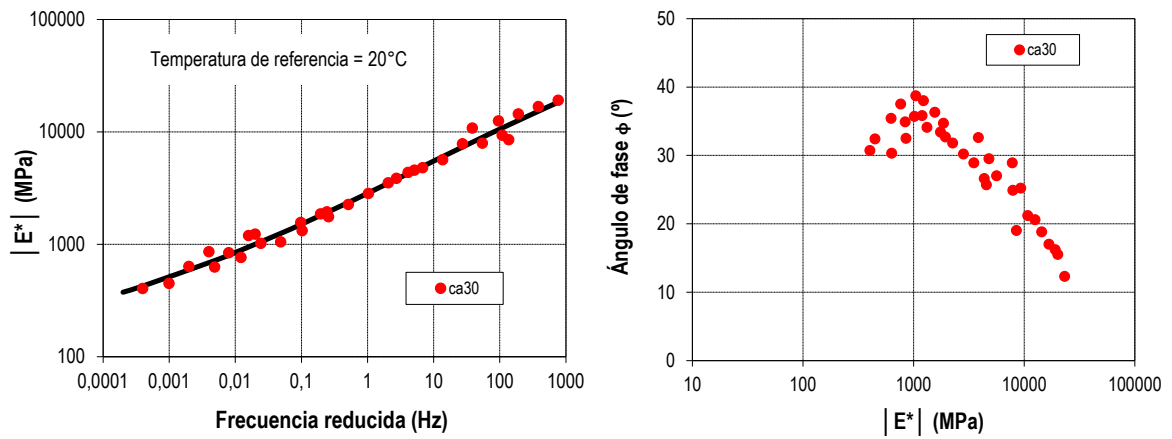


Figura 4-11. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla CA30

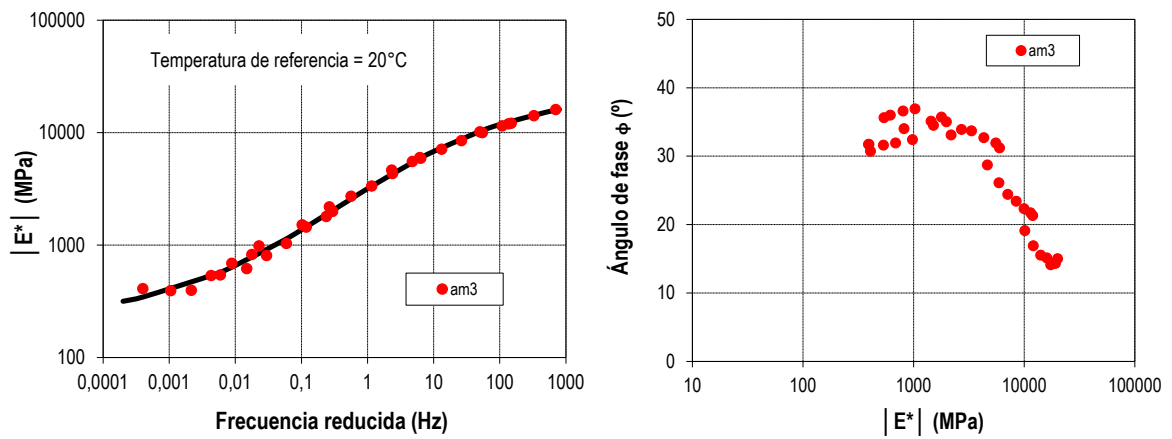


Figura 4-12. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla AM3

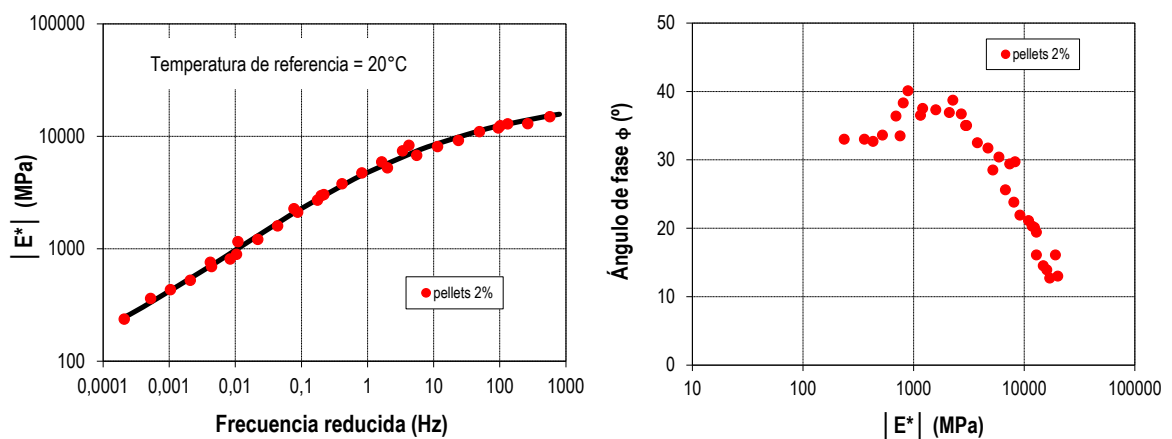


Figura 4-13. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla 2%SBP

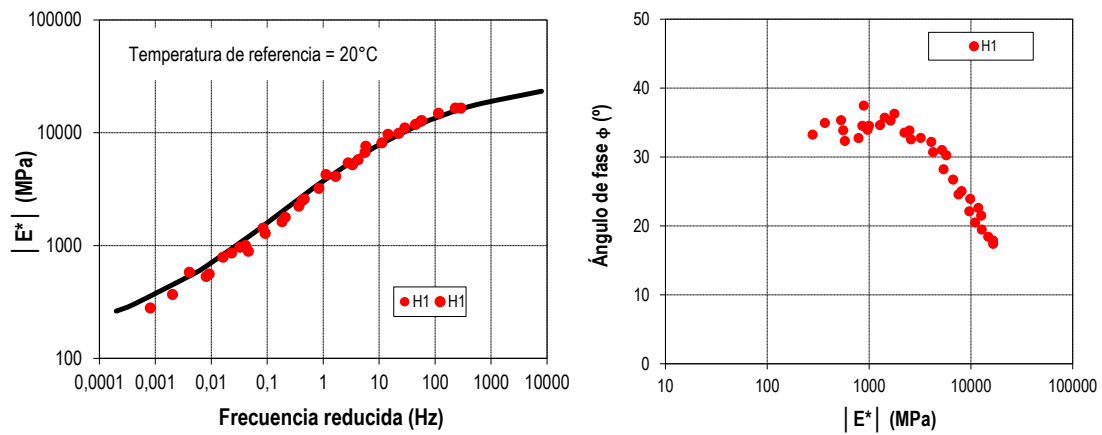


Figura 4-14. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla H1 Base

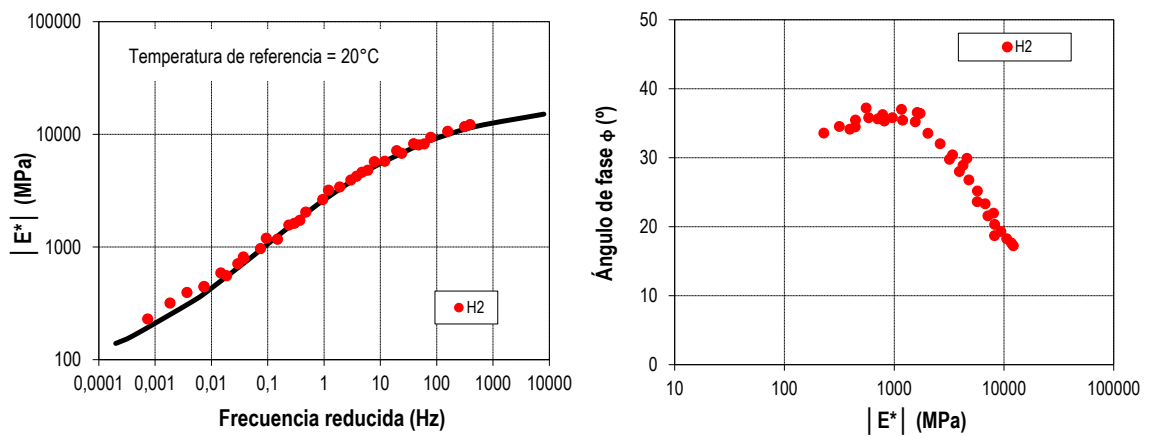


Figura 4-15. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla H2 Carpeta

Al analizar las curvas obtenidas a partir de los valores de ensayo resultados de esta metodología, se observa que las mismas se ajustan al comportamiento característico planteado al comienzo del estudio para todas las mezclas en estudio tanto en las curvas maestras como en los diagramas de Black, en concordancia con lo presentado en estudios anteriores por Martínez et al [1, 3, 11]

4.6 Ensayo de Viga semicircular en flexión

Finalmente, en la Figura 4-16 a Figura 4-20 se muestran las curvas maestras para las mezclas en estudio obtenidas a partir del ensayo SCB.

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

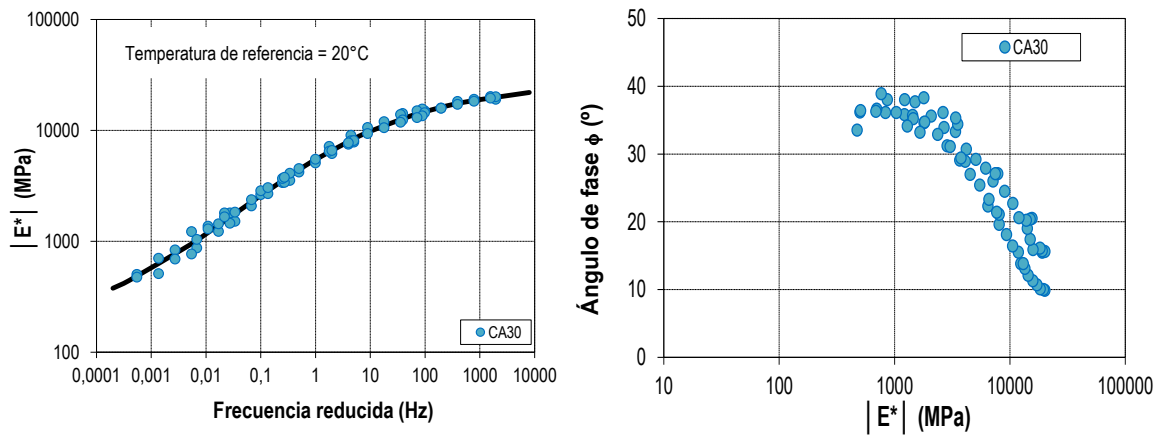


Figura 4-16. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla CA30

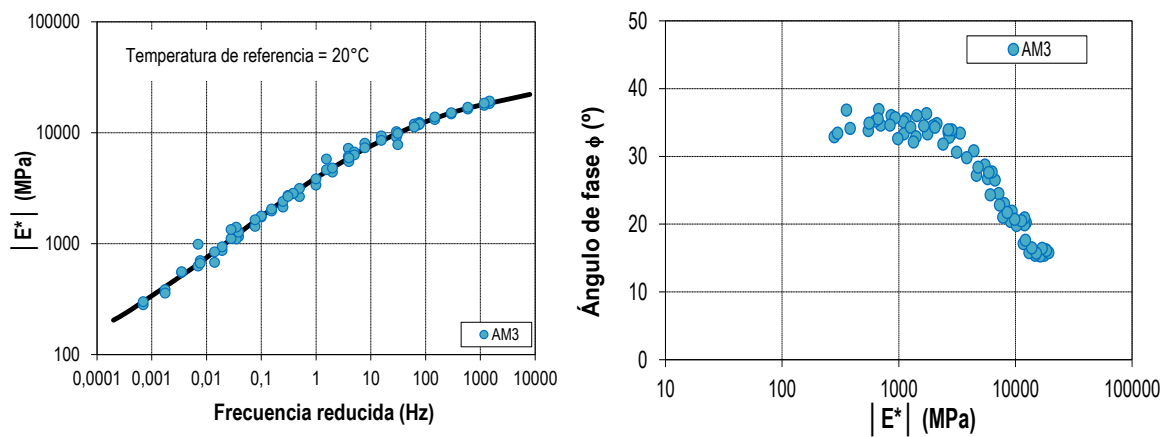


Figura 4-17. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla AM3

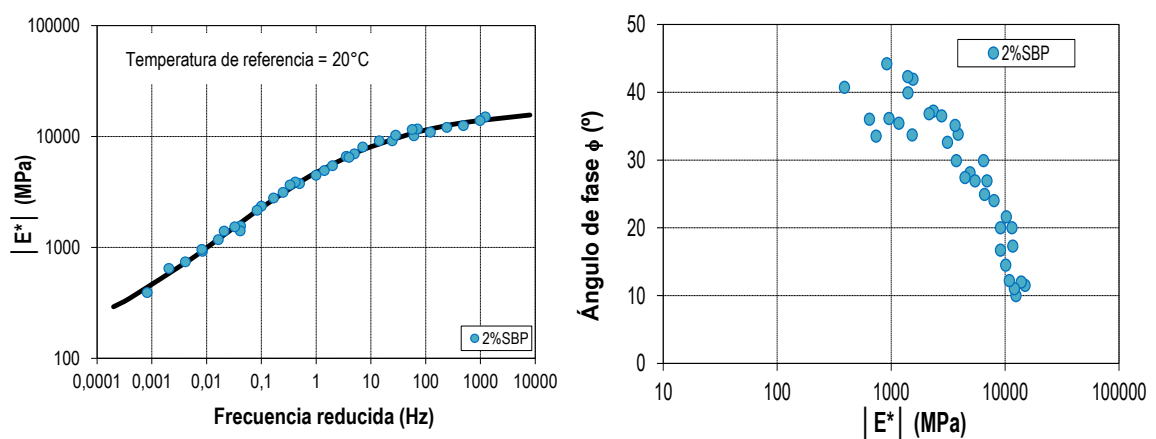


Figura 4-18. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla 2%SBP

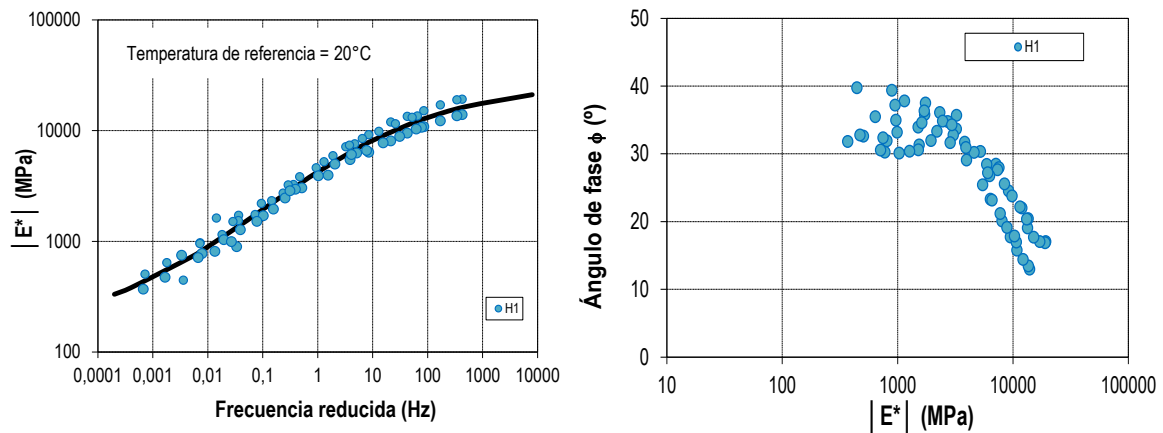


Figura 4-19. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla H1 Base

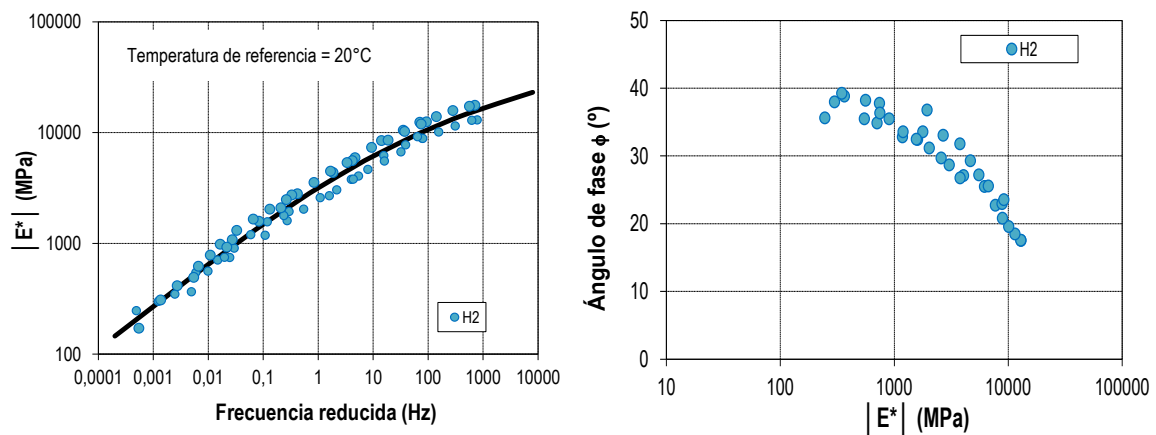


Figura 4-20. Curva Maestra de $|E^*|$ y Diagrama de Black para la mezcla H2 Carpeta
Nuevamente, para los resultados de ensayo obtenidos en SCB las curvas ajustan al modelo sigmoideal propuesto para $|E^*|$ y en el espacio de Black los puntos se distribuyen a lo largo de una única curva con máximos en los valores medios, disminuyendo hacia los extremos, como fuera detallado en la teoría, lo cual indicaría en primera instancia la viabilidad de aplicar el método de SCB para la determinación del módulo dinámico.

4.7 Análisis comparativo para los modelos aplicados

Se procede a continuación a realizar un análisis comparativo de los métodos aplicados para establecer la bondad de ajuste y la posibilidad de aplicación del ensayo SCB para la determinación del comportamiento de las mezclas asfálticas mediante el módulo dinámico.

4.7.1 Curvas Maestras de $|E^*|$

A continuación en la Figura 4-21 se muestran las curvas maestras de $|E^*|$ obtenidas mediante las tres metodologías para cada una de las mezclas planteadas.

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

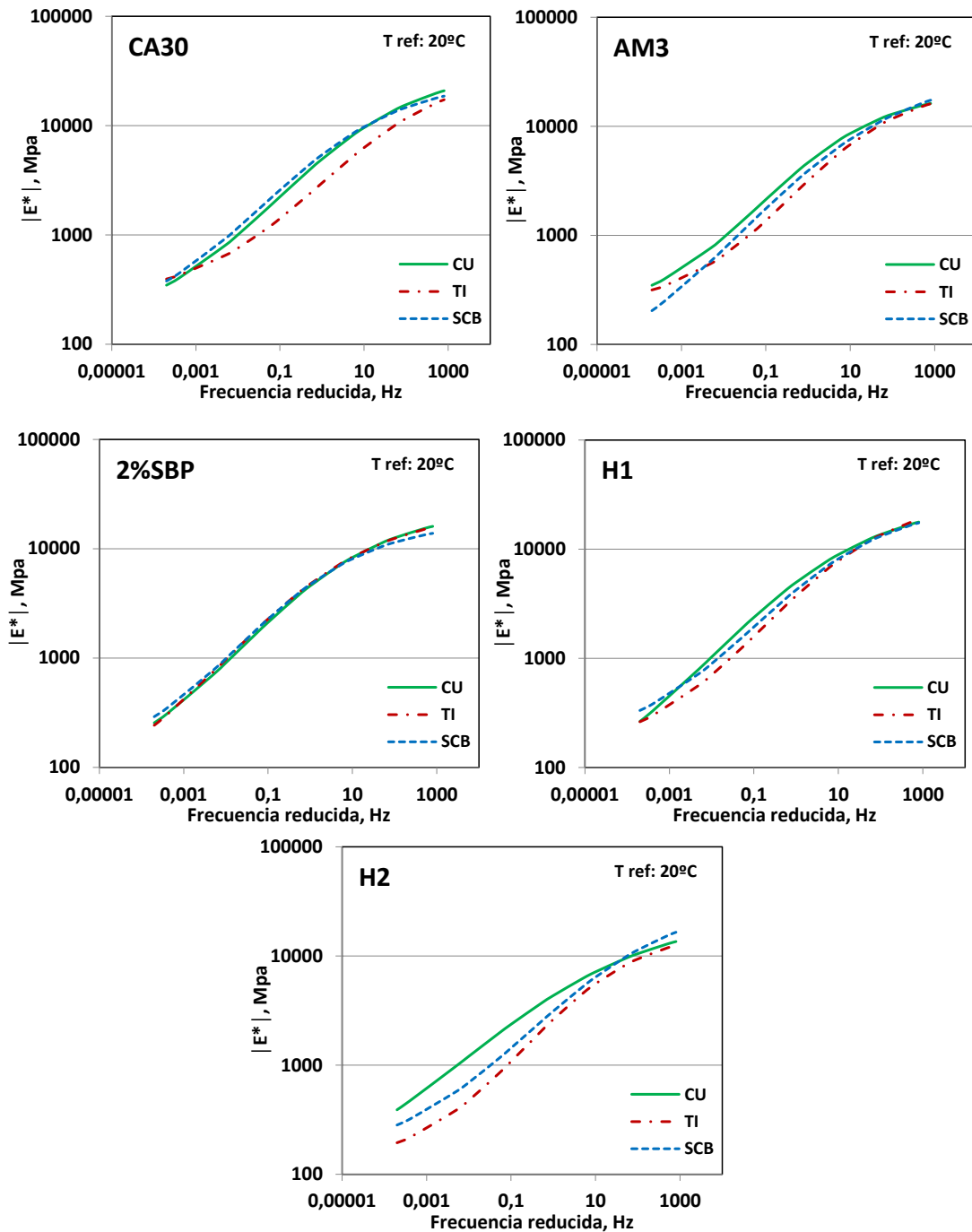


Figura 4-21. Comparativa de curvas Maestras de $|E^*|$ para cada una de las mezclas en estudio

Realizando un análisis visual, las curvas maestras parecieran representar un comportamiento similar para las tres metodologías; las principales diferencias se observan para valores de bajas frecuencias (o altas temperaturas) donde el módulo dinámico es menor. A modo comparativo, en la Tabla 4-2 se presentan los valores de los parámetros de las ecuaciones constitutivas de módulo dinámico para cada una de las mezclas en estudio para las tres metodologías propuestas.

Tabla 4-2: Parámetros de las ecuaciones constitutivas

Denominación	CA30	AM3	2%SBP	H1	H2
C_{ACU}	27679	23631	26996	15861	24803
C_{ATI}	23900	25556	28028	21155	21988
C_{ASCB}	22736	22011	23489	24346	22736
E_{minCU}	131	168	67	37	50
E_{minTI}	256	211	39	122	114
E_{minSCB}	129	36	94	146	126
E_{maxCU}	33834	21841	23639	29534	24623
E_{maxTI}	33113	23894	23723	30996	18011
E_{maxSCB}	27070	33457	18055	27102	33113
β_{CU}	-0.632	-0.763	-0.944	-1.010	-0.660
β_{TI}	-0.020	-0.293	-1.096	-0.479	-0.649
β_{SCB}	-0.840	-0.780	-1.070	-0.594	-0.807
δ_{CU}	-0.590	-0.676	-0.585	-0.510	-0.592
δ_{TI}	-0.635	-0.722	-0.545	-0.625	-0.647
δ_{SCB}	-0.600	-0.503	-0.640	-0.614	-0.462

Se concluye en función de los valores obtenidos la necesidad de analizar los parámetros determinados mediante el programa SOLVER y los datos de ensayo para que sus valores sean representativos del fenómeno, debiendo imponerse ciertas restricciones a la función.

4.7.2 Análisis gráfico-estadístico

Para probar la confiabilidad de los modelos propuestos a partir de los resultados de ensayo experimentales existen diferentes metodologías, entre las que pueden mencionarse los métodos gráficos y métodos estadísticos de bondad de ajuste. Nur Yusoff [91] plantea en su tesis doctoral algunos criterios que fueran propuestos por Witczak [92] y aplicados en otras investigaciones [3, 93, 94, 95, 96] y que se describen a continuación

Análisis gráfico: A partir del mismo se pretende visualizar el ajuste entre los valores medidos y estimados y la distribución de errores. Para aplicarlo se realiza un gráfico cartesiano donde el eje de abscisas representa los valores medidos en el ensayo y el eje de ordenadas los valores obtenidos a partir del modelo. Se observa la distribución que presentan a partir de la línea de igualdad. Se concluye que el modelo es tanto más representativo cuanto más se acerquen los puntos a dicha línea de igualdad. Por el contrario en la medida que los puntos se alejan indica que el método no es representativo de las mediciones.

Además se determina una recta de mejor ajuste por regresión lineal de mínimos cuadrados entre valores medidos, Y_{med} , y estimados o resultantes de los modelos, Y_{est} , de la forma:

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

$$Y_{est} = A * Y_{med} + B \quad (Ec. 4-1)$$

Donde:

A: pendiente de la recta de regresión

B: ordenada al origen de la recta de regresión

Cabe destacar que mediante el análisis de A y B también es posible evaluar la calidad de la estimación/modelo. Cuanto más se acerque A a la unidad y B a cero, más cerca de la línea de igualdad estarán los puntos de la línea de igualdad. En la medida que A y B se alejan de uno y cero respectivamente indican la presencia de un sesgo entre valores medidos y estimados, para lo cual sería conveniente recalibrar el modelo y encontrar una mejor condición.

Análisis Estadístico: Método Se/Sy: Mediante el mismo se establece el valor de la relación entre el error de estimación estándar, Se, y el error de desviación, Sy, definidos como:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{(n-k)}} \quad (Ec. 4-2)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{(n-1)}} \quad (Ec. 4-3)$$

Donde n es el tamaño de la muestra, k es el número de variables independientes del modelo, Y es la función dinámica del ensayo, \hat{Y} es la función dinámica del modelo e \bar{Y} es el valor promedio de la función dinámica del ensayo. Una vez estimados los valores se procede a determinar la relación Se/Sy; en la medida que el valor encontrado se aproxima más a cero mejor es el método aplicado para la modelización/estimación, dado que una mayor dispersión de los valores experimentales pueden ser comparados favorablemente con una menor dispersión de los valores estimados.

Análisis Estadístico: Coeficiente de determinación, R²: Evalúa la exactitud del modelo planteado. El mismo se obtiene a partir de:

$$R^2 = 1 - \frac{(n-k)}{(n-1)} \times \left(\frac{S_e}{S_y} \right)^2 \quad (Ec. 4-4)$$

Un ajuste perfecto estaría representado por el valor R²=1

A su vez Witczak [92] propone un criterio subjetivo de evaluación de la performance del modelo basado en los valores anteriores, el cual se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Criterio de bondad de ajuste, Witczak [92]

Criterio	R ²	Se/Sy
Excelente	≥ 0.90	≤ 0.35
Bueno	0.70 – 0.89	0.36 – 0.55
Aceptable	0.40 – 0.69	0.56 – 0.75
Malo	0.20 – 0.39	0.76 – 0.89
Muy malo	≤ 0.19	≥ 0.90

Análisis Estadístico: Análisis de varianza ANOVA

Para complementar el análisis estadístico se procede al estudio de la varianza mediante la función ANOVA.

De acuerdo a lo indicado en la bibliografía [97], el objetivo de una tabla ANOVA es testear si dos o más grupos son estadísticamente iguales o distintos entre sí. Para ello se parte del planteo de la hipótesis inicial, también conocida como “hipótesis nula”, es decir la propuesta inicial que se tiene sobre los grupos en estudio. En este análisis la hipótesis nula es que los promedios de todos los grupos serán estadísticamente iguales.

Luego, para saber si se cumple la hipótesis inicial se procede a aplicar un Test F (lo realiza internamente la función ANOVA), es decir, si los promedios de los grupos son iguales o no. Si el valor obtenido de “F” es mayor a un valor crítico, “F crítico”, la hipótesis inicial no se cumple, es decir, los promedios de los grupos son estadísticamente distintos. Por lo tanto es deseable que en este caso el valor de F sea menor que el F crítico para que los grupos analizados sean estadísticamente iguales.

4.7.3 Método gráfico

A continuación se muestran las gráficas comparativas para la metodología SCB comparadas con la CU y TI, tanto en el espacio aritmético (EA) como en el espacio bi-logarítmico (EL) para el módulo dinámico y el ángulo de fase. Las mismas incluyen la línea de igualdad y líneas que representan una banda de ±25% a ambos lados de la misma respectivamente para evaluar los errores y posibles dispersiones (Figura 4-22 a Figura 4-25), este porcentaje de error es considerado como normal en este tipo de ensayos y ha sido empleado en otros trabajos. [3]

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

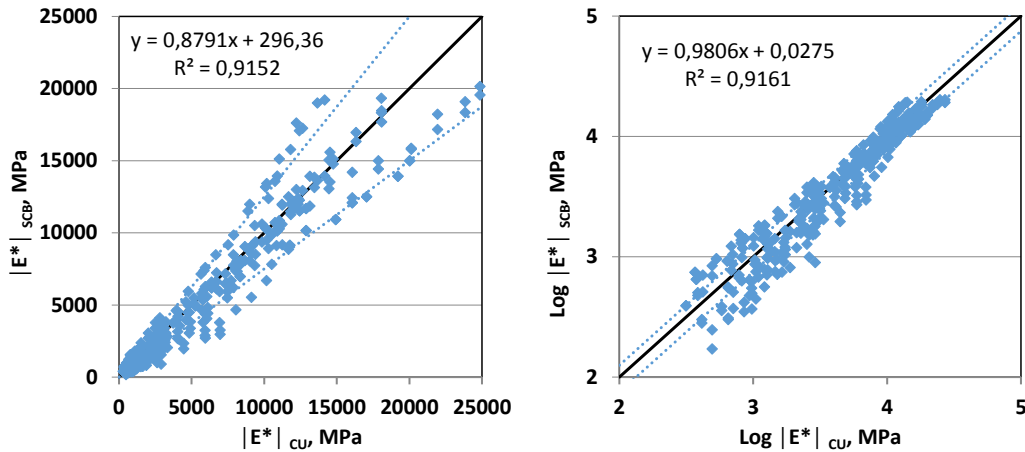


Figura 4-22. Comparativa de metodologías SCB-CU a partir de la línea de igualdad para $|E^*|$, EA (izq), y EL (der), para todas las mezclas ensayadas

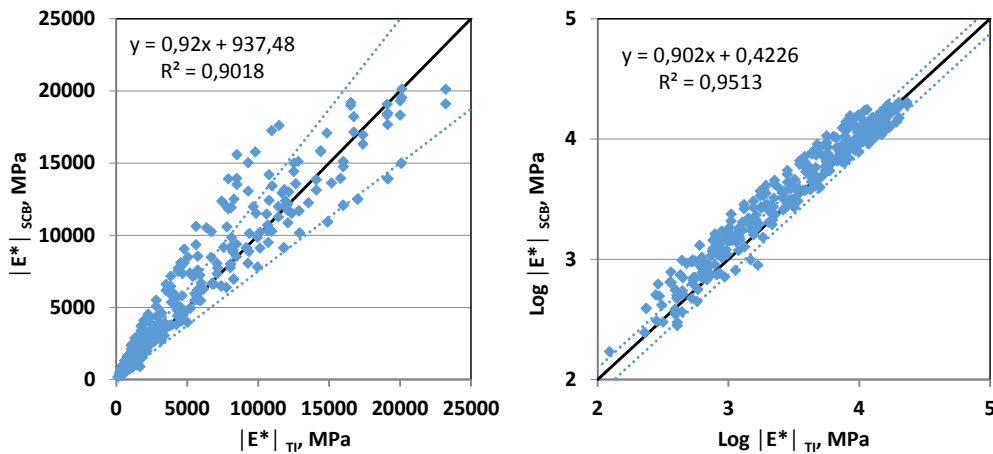


Figura 4-23. Comparativa de metodologías SCB-TI a partir de la línea de igualdad para $|E^*|$, EA (izq), y EL (der), para todas las mezclas ensayadas

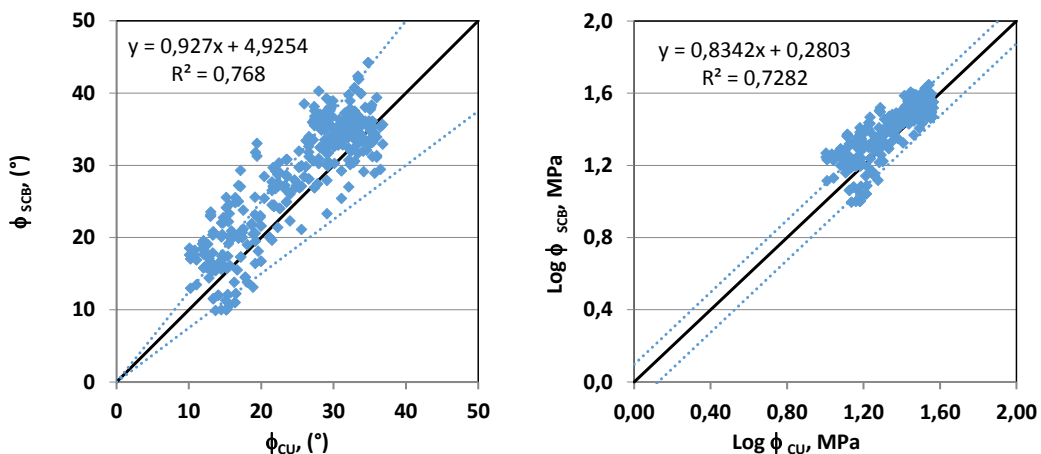


Figura 4-24. Comparativa de metodologías SCB-CU a partir de la línea de igualdad para el ángulo de fase, ϕ , EA (izq), y EL (der), para todas las mezclas ensayadas

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

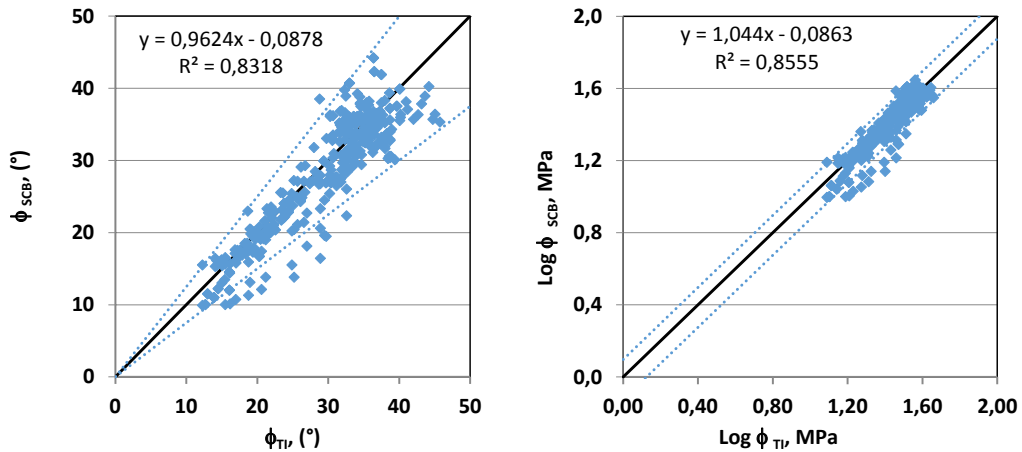


Figura 4-25. Comparativa de metodologías SCB-TI a partir de la línea de igualdad para el ángulo de fase, ϕ , EA (izq), y EL (der), para todas las mezclas ensayadas

Analizando las gráficas anteriores puede observarse que en líneas generales los valores obtenidos de los ensayos se distribuyen de manera homogénea alrededor de la línea de igualdad a excepción del ángulo de fase en SCB-CU donde aparece una leve tendencia a determinar valores mayores de ángulos de fase en flexión que en compresión uniaxial. Para ampliar el análisis se procede a aplicar los criterios de comparación detallados en 4.7.2. En la Tabla 4-4, se resumen los valores encontrados de los coeficientes A y B de las líneas de regresión para cada una de las gráficas presentadas.

Criterio	Espacio Aritmético				Espacio Logarítmico			
	A	B	Valores máximos	% B respecto al máx	A	B	Valores máximos	% B respecto al máx
$ E^* _{SCB-CU}$	0.879	296	$ E^* _{CU}^{máx}$ 27085	1.1	0.980	0.03	$ E^* _{CU}^{máx}$ 4.43	0.7
ϕ_{SCB-CU}	0.927	4.92	$\phi_{CU}^{máx}$ 37	13.4	0.834	0.28	$\phi_{CU}^{máx}$ 1.57	17.9
$ E^* _{SCB-TI}$	0.920	937	$ E^* _{TI}^{máx}$ 23221	4.0	0.900	0.42	$ E^* _{TI}^{máx}$ 3.37	9.6
ϕ_{SCB-TI}	0.962	0.08	$\phi_{TI}^{máx}$ 46	0.2	1.044	0.08	$\phi_{TI}^{máx}$ 1.66	4.8

Tabla 4-4: Coeficientes A y B de las rectas de correlación para los diferentes modelos analizados

Como puede observarse los valores de A son cercanos a la unidad tanto para $|E^*|$ como para ϕ y los de B menores al 10% respecto del valor máximo medido en CU o TI, excepto para ϕ en SCB-CU donde aparece una tendencia a medir ángulos de fase mayores en SCB, como se había indicado en el análisis gráfico previo. Por lo tanto, la metodología parecería ser potencialmente válida para la evaluación del módulo dinámico.

4.7.4 Método estadístico

A partir de los datos presentados en las gráficas anteriores (Figura 4-22 a Figura 4-25), se procede a determinar los parámetros R^2 , Se y Sy para determinar la bondad del ajuste del modelos de SCB respecto al de CU y TI respectivamente para el Espacio Aritmético y el Espacio Logarítmico. En la Tabla 4-5 , se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4-5: Criterio de bondad de ajuste para la SCB, Witczak [92]

		Espacio Aritmético			Espacio Logarítmico		
		R^2	Se/Sy	Valoración	R^2	Se/Sy	Valoración
$ E^* $	SCB-CU	0.92	0.27	Excelente	0.92	0.16	Excelente
ϕ	SCB-CU	0.77	0.51	Bueno	0.73	0.51	Bueno
$ E^* $	SCB-TI	0.90	0.30	Excelente	0.95	0.11	Excelente
ϕ	SCB-TI	0.83	0.43	Bueno	0.86	0.42	Bueno

Se observa que tanto para el EA como para el EL la bondad de ajuste para el modelo SCB respecto a CU y TI para el módulo dinámico resulta Excelente, mientras que para el ángulo de fase los valores arrojan resultados entre Aceptable y Bueno, en consonancia con lo encontrado en el análisis de los coeficientes A y B.

Se procede a profundizar el estudio analizando además las frecuencias acumuladas de los errores relativos para las metodologías propuestas tanto para $|E^*|$ como para ϕ . En la Tabla 4-6 se presenta el porcentaje de ensayos cuyo error relativo se encuentran por debajo del 25%.

Tabla 4-6: Errores relativos por debajo del 25% para $|E^*|$ y ϕ

		EA	EL
$ E^* $	SCB-CU	78%	100%
ϕ	SCB-CU	74%	100%
$ E^* $	SCB-TI	57%	100%
ϕ	SCB-TI	99 %	100%

Se observa que en el EL el 100% de los errores relativos se encuentra por debajo del 25% para todas las mezclas y para ambos parámetros.

Se evaluó además para el EA la influencia de la temperatura aplicando el mismo criterio de errores relativos menores o iguales a 25%. Los resultados se muestran en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Errores relativos por debajo del 25% para $|E^*|$ y ϕ en función de la temperatura de ensayo

		0°	10°	20°	30°	40°
$ E^* $	SCB-CU	86%	91%	97%	66%	49%
ϕ	SCB-CU	59%	64%	83%	77%	86%
$ E^* $	SCB-TI	89%	67%	60%	24%	43%
ϕ	SCB-TI	99%	100%	99%	100%	100%

Analizando los valores encontrados se observa que las mayores diferencias se tienen para las mayores temperaturas donde los módulos son menores y consecuentemente las diferencias en la medición representan mayor error relativo

Se grafican además valores máximos, mínimos y promedio para analizar la distribución de los errores en función de la temperatura. (Figura 4-26)

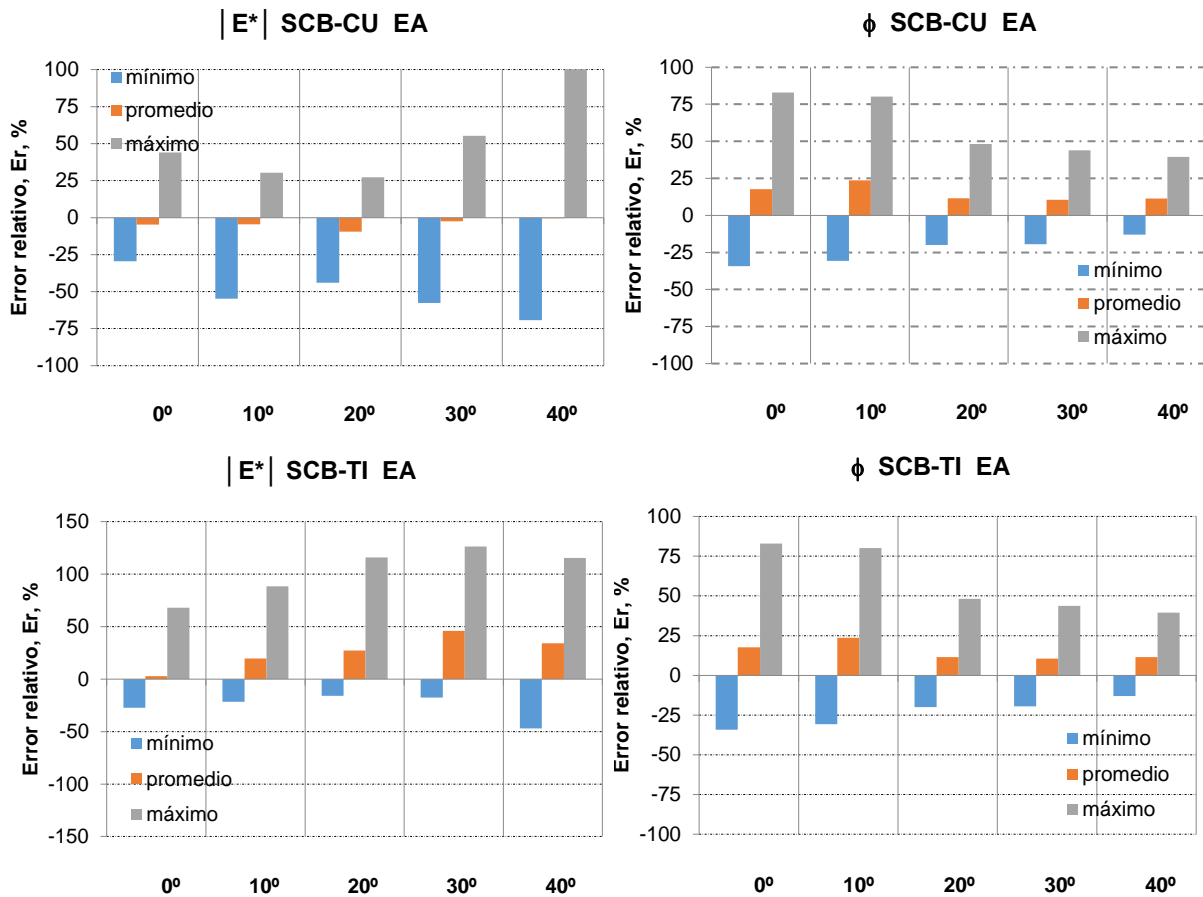


Figura 4-26. Errores relativos máximos, mínimos y medios en función de la temperatura de ensayo

Se observa una tendencia en general a presentar mayores valores de los parámetros para la medición a partir del ensayo SCB para todas las temperaturas.

Finalmente se procede a realizar un análisis de ANOVA. En la Tabla 4-8 se indican los resultados obtenidos

Para ello se plantea:

Hipótesis inicial/nula: “La determinación del módulo dinámico $|E^*|$ mediante la metodología de Compresión Uniaxial, Tracción Indirecta y Viga Semicircular es estadísticamente igual”.

Los grupos de estudio son:

- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla CA30
- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla AM3
- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla 2%SBP
- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla H1
- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla H2

Mezcla	Valor de F	F crítico	Valoración de hipótesis nula
CA30	0.8524	3.0485	V
AM3	0.0790	3.0485	V
2%SBP	0.3385	3.0485	V
H1	0.1533	3.0485	V
H2	2.1107	3.0485	V

Tabla 4-8: Resultado Análisis ANOVA para $|E^*|$

Se observa que para todas las mezclas se verifica la hipótesis nula, por lo tanto NO existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tres grupos analizados y la determinación de $|E^*|$ mediante la metodología de Compresión Uniaxial, Tracción Indirecta y Viga Semicircular es estadísticamente igual en concordancia con lo encontrado en el análisis de bondad de ajuste “Excelente” propuesto por Witczak [92]

Del mismo modo se procede a analizar los valores del ángulo de fase, ϕ .

Para ello se plantea:

Hipótesis inicial/nula: “La determinación del ángulo de fase, ϕ mediante la metodología de Compresión Uniaxial, Tracción Indirecta y Viga Semicircular es estadísticamente igual”.

Los grupos de estudio son:

- ϕ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla CA30
- ϕ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla AM3
- ϕ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla 2%SBP
- ϕ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla H1
- ϕ determinados experimentalmente mediante CU, SCB y TI para la mezcla H2

Mezcla	Valor de F	F crítico	Valoración de hipótesis nula
CA30	0.8768	3.0485	V
AM3	3.0131	3.0485	V
2%SBP	0.4032	3.0485	V
H1	4.6116	3.0485	F
H2	18.8260	3.0485	F

Tabla 4-9: Resultado Análisis ANOVA para ϕ

Se observa que para las mezclas CA30, AM3 y 2%SBP se verifica la hipótesis nula, no ocurriendo lo mismo para las mezclas H1 y H2, lo que significa que en los grupos de estudio aparecen diferencias estadísticamente significativas. Una vez más los resultados obtenidos se condicen con el análisis efectuado a partir de la bondad de ajuste y el análisis de frecuencias de errores relativos.

4.7.5 Modelo Huet-Sayegh

De manera análoga a lo realizado con los modelos fenomenológicos se procede al estudio de los modelos funcionales, en particular el modelo descrito en 2.2.5, Modelo de Huet Sayegh. En primer término se presentan las curvas comparativas a partir de los resultados de los ensayos de CU y SCB comparadas con el modelo. A continuación en la Figura 4-27 se muestran las curvas maestras para las mezclas en estudio obtenidas a partir del Modelo de Huet-Sayegh para las metodologías CU y SCB así como los diagramas de Black correspondientes. La Tabla 4-10 presenta los valores resultantes de la optimización para el modelo de Huet-Sayegh (H-S) de las mezclas asfálticas a la temperatura de referencia TR de 20 °C. Este proceso de optimización para el ajuste de los parámetros se ha realizado mediante la función Solver en la hoja de cálculo Excel debido a que es un método simple, robusto y de uso muy difundido para la optimización de valores.

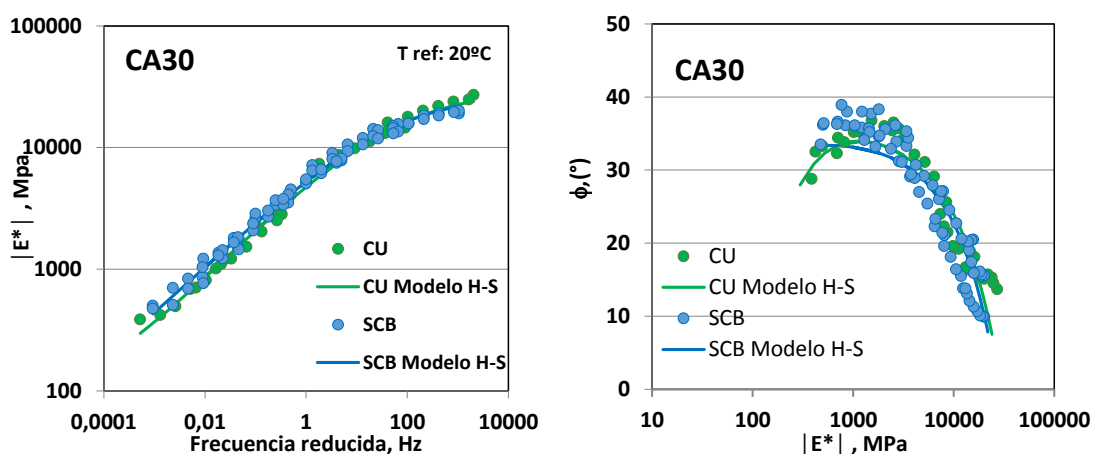


Figura 4-27. Curvas Maestras de $|E^*|$ y diagramas de Black para todas las mezclas en estudio

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

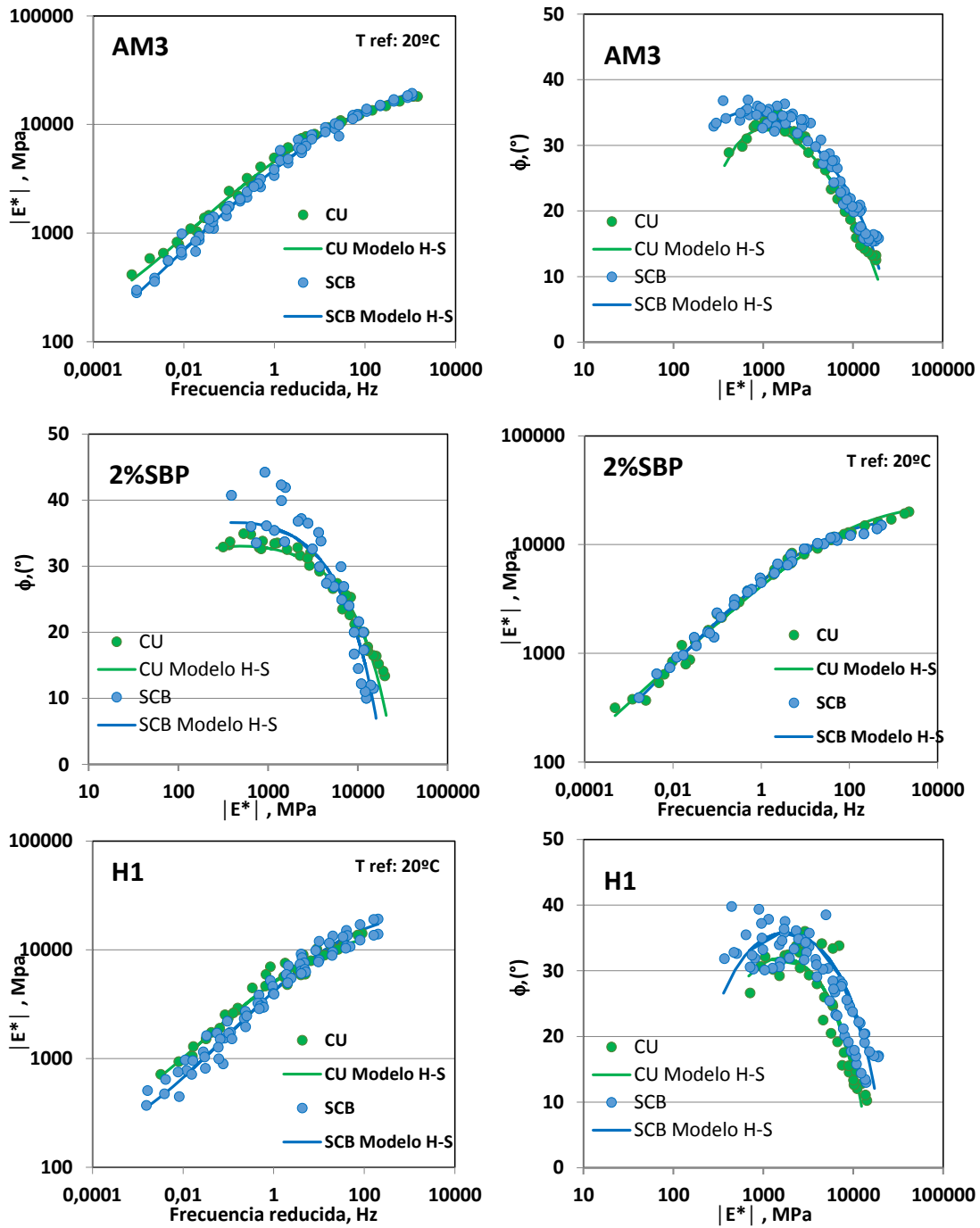


Figura 4-27. Curvas Maestras de $|E^*|$ y diagramas de Black para todas las mezclas en estudio (cont)

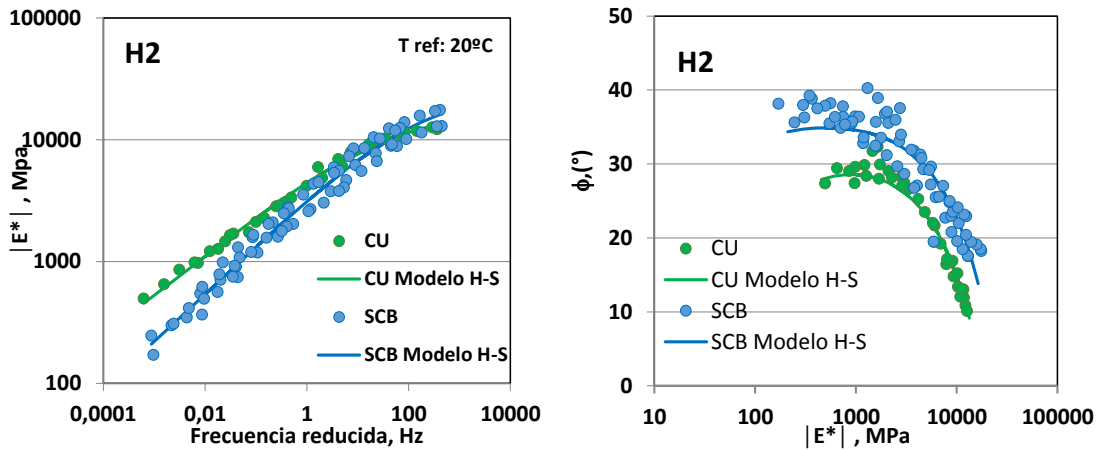


Figura 4-27. Curvas Maestras de $|E^*|$ y diagramas de Black para todas las mezclas en estudio (cont)

Tabla 4-10: Parámetros del modelo H-S para las mezclas en estudio

Mezcla	E_{∞} (MPa)	E_0 (MPa)	C_A ($^{\circ}K^{-1}$)	δ	k	h	τ_0 (s)
CA30 (CU)	30000	109	24065	7.65	0.38	0.62	4.582E-01
AM3 (CU)	30000	143	22683	2.67	0.26	0.53	3.799E-02
2%SBP (CU)	25816	10	24419	1.00	0.38	0.38	1.176E-02
H1 (CU)	15826	163	15729	4.45	0.43	0.43	1.132E+00
H2 (CU)	18355	44	23279	1.00	0.35	0.35	3.813E-02
CA30 (SCB)	27574	10	21423	4.84	0.38	0.38	3.269E-01
AM3(SCB)	30000	65	21540	4.06	0.33	0.56	6.355E-02
2%SBP(SCB)	19047	10	18655	1.00	0.42	0.42	4.718E-02
H1(SCB)	23369	136	19553	1.54	0.46	0.46	3.699E-02
H2(SCB)	25364	10	22120	1.15	0.40	0.40	7.511E-03

Se observa que el modelo ajusta muy bien para ambas metodologías de ensayo. Sin embargo, se ha observado también, como fuera mencionado en publicaciones anteriores [98], que los parámetros obtenidos son fuertemente dependientes de los valores de inicio o “semillas” utilizados en los procedimientos de ajuste que pueden conducir a soluciones que no convergen o que resultan con valores contrarios al sentido físico que representan. Por ello, en el momento de aplicar la función Solver para resolver el sistema se aplicaron ciertas restricciones para evitar justamente este inconveniente.

Para continuar con el análisis, en la Figura 4-28 y la Figura 4-29 se muestran las gráficas comparativas de valores medidos y estimados respecto a la línea de igualdad en el espacio aritmético para todas las mezclas ensayadas de Módulo dinámico y ángulo de fase. Se incluye además la banda de errores de $\pm 25\%$

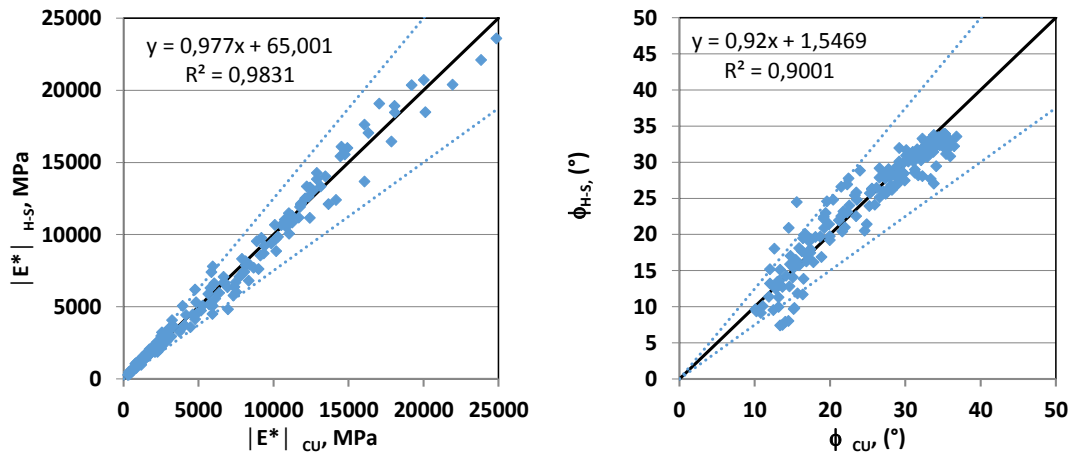


Figura 4-28. Comparativa de Modelo H-S a partir de la línea de igualdad para $|E^*|$ y ϕ , en el espacio aritmético (izq), para todas las mezclas ensayadas en CU.

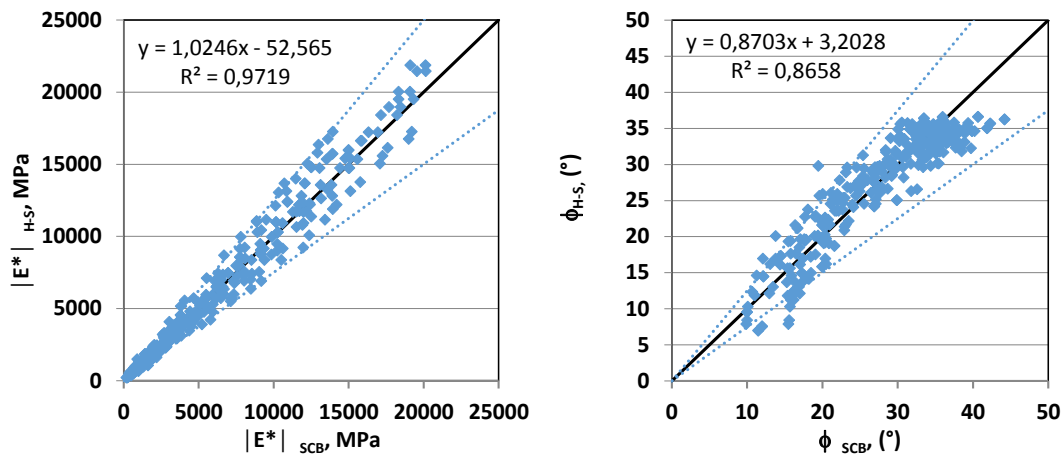


Figura 4-29. Comparativa de Modelo H-S a partir de la línea de igualdad para $|E^*|$ y ϕ , en el espacio aritmético (izq), para todas las mezclas ensayadas en SCB.

Se observa que los resultados encontrados muestran una vez más el buen ajuste del modelo H-S a las metodologías CU y SCB, donde los resultados se distribuyen de manera homogénea alrededor de la línea de igualdad y dentro del margen de error del 25%, con un mayor grado de dispersión al evaluar el ángulo de fase para valores bajos del mismo.

Se procede además al análisis de los criterios de comparación detallados en 4.7.2. En la Tabla 4-11, se resumen los valores encontrados de los coeficientes A y B de las líneas de regresión para cada una de las gráficas presentadas.

Tabla 4-11: Coeficientes A y B de las rectas de correlación para los diferentes modelos analizados

Criterio	Espacio Aritmético					
	A	B	Valores máximos		% B respecto al máx	
E* HS-CU	0.977	65	E* _{máx} CU	27085	0.2	
φ HS-CU	0.920	1.55	φ _{máx} CU	37	4.2	
E* HS-SCB	1.025	52	E* _{máx} SCB	20138	0.3	
φ HS-SCB	0.870	3.20	φ _{máx} SCB	44	7.2	

Como puede observarse los valores de A son cercanos a la unidad tanto para |E*| como para φ y los de B menores al 10% respecto del valor máximo medido en CU o SCB. Por lo tanto, el modelo parecería ser potencialmente válido para la evaluación del módulo dinámico.

Siguiendo con los mismos criterios de análisis se procede a determinar los parámetros R², Se y Sy para determinar la bondad del ajuste del modelo H-S respecto al de CU y SCB para el Espacio Aritmético (EA). En la Tabla 4-12, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4-12: Criterio de bondad de ajuste para el modelo H-S, Witczak [92]

Criterio	Espacio Aritmético		
	R ²	Se/Sy	Valoración
E* HS-CU	0.98	0.13	Excelente
φ HS-CU	0.90	0.31	Excelente
E* HS-SCB	0.97	0.17	Excelente
φ HS-SCB	0.87	0.34	Bueno

Se observa que la bondad de ajuste para el modelo HS respecto a CU y SCB para el módulo dinámico resulta Excelente, mientras que para el ángulo de fase los valores arrojan resultados entre Excelente y Bueno, en consonancia con lo encontrado en el análisis de los coeficientes A y B.

Tal como se verificó para la metodología SCB, se procede a profundizar el estudio analizando además las frecuencias acumuladas de los errores relativos para el modelo propuesto tanto para |E*| como para φ. En la Tabla 4-13 se presenta el porcentaje de ensayos cuyo error relativo se encuentran por debajo del 25%.

Tabla 4-13: Errores relativos por debajo del 25% para $|E^*|$ y ϕ

Mezcla		EA
$ E^* $	HS-CU	95%
ϕ	HS-CU	97%
$ E^* $	HS-SCB	94%
ϕ	HS-SCB	97%

Se observa que en el EA los errores relativos se encuentran por debajo del 25% para todas las mezclas y para ambos parámetros en porcentajes del 94% o mayor indicando muy buen ajuste.

Se evaluó además para el EA la influencia de la temperatura aplicando el mismo criterio de errores relativos menores o iguales a 25%. Los resultados se muestran en la Tabla 4-14

Tabla 4-14: Errores relativos por debajo del 25% para $|E^*|$ y ϕ en función de la temperatura de ensayo

Mezcla		0°	10°	20°	30°	40°
$ E^* $	HS-CU	100%	100%	83%	100%	91%
ϕ	HS-CU	89%	97%	100%	100%	100%
$ E^* $	HS-SCB	99%	93%	96%	100%	83%
ϕ	HS-SCB	89%	94%	100%	100%	100%

Analizando los valores encontrados se observa que las mayores diferencias se tienen para las mayores temperaturas donde los módulos son menores y consecuentemente las diferencias en la medición representan mayor error relativo.

Se grafican además valores máximos, mínimos y promedio para analizar la distribución de los errores en función de la temperatura. (Figura 4-30)

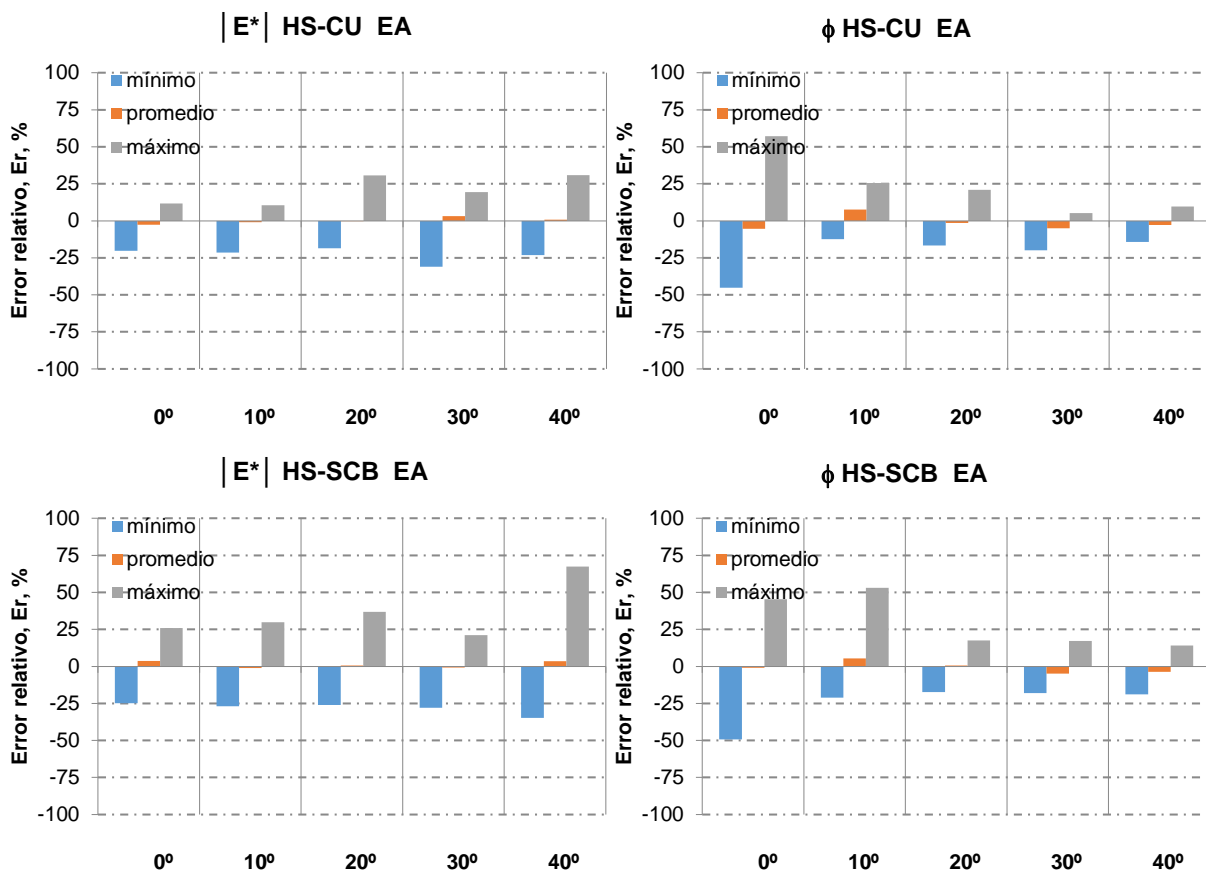


Figura 4-30. Errores relativos máximos, mínimos y medios en función de la temperatura de ensayo

Se observa para los valores de ambos parámetros una distribución homogénea de los errores relativos mínimos y máximos con valores promedio cercanos a cero. Las mayores dispersiones se dan para las temperaturas más altas para el caso de $|E^*|$ y para las temperaturas más bajas para el caso de ϕ .

Para este modelo también se procede a aplicar el análisis estadístico de Varianza ANOVA. En la Tabla 4-15 se indican los resultados obtenidos

Para ello se plantea:

Hipótesis inicial/nula: “La determinación del módulo dinámico $|E^*|$ mediante la metodología de Compresión Uniaxial, Viga Semicircular y sus estimaciones mediante el Modelo de Huet-Sayegh son estadísticamente iguales”.

Los grupos de estudio son:

- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla CA30
- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla AM3

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla 2%SBP
- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla H1
- $|E^*|$ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla H2

Mezcla	Valor de F	F crítico	Valoración de hipótesis nula
CA30	0.0916	2.6574	V
AM3	0.0775	2.6574	V
2%SBP	0.3337	2.6574	V
H1	0.0219	2.6574	V
H2	0.1795	2.6574	V

Tabla 4-15: Resultado Análisis ANOVA para $|E^*|$

Se observa que para todas las mezclas se verifica la hipótesis nula, por lo tanto NO existe una diferencia estadísticamente significativa entre los cuatro grupos analizados y la determinación de $|E^*|$ mediante la metodología de Compresión Uniaxial, Viga Semicircular y sus estimaciones mediante el modelo HUET-SAYEGH son estadísticamente iguales en concordancia con lo encontrado en el análisis de bondad de ajuste “Excelente” propuesto por Witczak [92]

Del mismo modo se procede a analizar los valores del ángulo de fase, ϕ .

Para ello se plantea:

Hipótesis inicial/nula: “La determinación del ángulo de fase, ϕ mediante la metodología de Compresión Uniaxial, Viga Semicircular y sus estimaciones mediante el Modelo de Huet-Sayegh son estadísticamente iguales”.

Los grupos de estudio son:

- ϕ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla CA30
- ϕ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla AM3
- ϕ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla 2%SBP
- ϕ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla H1
- ϕ determinados experimentalmente mediante CU y SCB y estimaciones HUET-SAYEGH correspondientes para la mezcla H2

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

Mezcla	Valor de F	F crítico	Valoración de hipótesis nula
CA30	0.1350	2.6574	V
AM3	2.431	2.6574	V
2%SBP	0.6440	2.6574	V
H1	4.0102	2.6574	F
H2	18.3361	2.6574	F

Tabla 4-16: Resultado Análisis ANOVA para ϕ

Se observa que para las mezclas CA30, AM3 y 2%SBP se verifica la hipótesis nula, no ocurriendo lo mismo para las mezclas H1 y H2, lo que significa que en los grupos de estudio aparecen diferencias estadísticamente significativas, al igual que lo obtenido para el estudio para las diferentes metodologías de ensayo propuestas. Una vez más los resultados obtenidos se condicen con el análisis efectuado a partir de la bondad de ajuste y el análisis de frecuencias de errores relativos.

Por lo tanto en base a todos los análisis realizados puede concluirse que el modelo de Huet-Sayegh constituye una muy buena aproximación al momento de describir el complejo comportamiento reológico de las mezclas asfálticas tanto para la metodología de compresión uniaxial como la de la viga semicircular.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Síntesis y objetivos de la Tesis

Los caminos constituyen una de las principales formas de traslado de personas y mercancías, siendo un elemento primordial dentro del sistema de transporte. Su correcto funcionamiento colabora con el desarrollo económico y social de un país.

El estudio, caracterización y diseño de pavimentos flexibles debe garantizar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios, facilitando la circulación de los vehículos y la transmisión eficiente de las cargas debidas al tránsito hacia las capas inferiores de la estructura. Resulta entonces necesario desarrollar los conocimientos científicos que permitan mejorar la durabilidad de las distintas capas componentes del pavimento

Durante mucho tiempo y perdurando en la actualidad, el diseño de los pavimentos asfálticos se realizó típicamente mediante procedimientos empíricos. Sin embargo, en los últimos tiempos, con el avance de las investigaciones, se han empezado a implementar los métodos de diseño basados en principios mecanicistas, para los cuales se requiere el conocimiento y caracterización de las propiedades mecánicas de los distintos materiales componentes.

Una de las principales propiedades mecánicas de interés es el módulo dinámico de las mezclas asfálticas $|E^*|$ que caracteriza su comportamiento viscoelástico dependiente de la temperatura y el tiempo (o frecuencia) de aplicación de las solicitaciones. Es un parámetro clave en el diseño del pavimento pues determina la distribución de tensiones y deformaciones en todas las capas componentes de la estructura vial y se vincula estrechamente con la valoración del deterioro por fatiga y acumulación de deformaciones permanentes. También se ha propuesto su utilización como un ensayo de valoración del comportamiento, aplicable en la dosificación, el control de calidad y el análisis de la influencia de distintos factores de formulación de este tipo de materiales

Basado en estas premisas, esta Tesis propone la investigación sobre una nueva forma de caracterización del comportamiento de mezclas asfálticas para su aplicación en procedimientos de diseño de pavimentos flexibles basados en principios mecanicistas a partir de la utilización de un ensayo de Viga Semicircular en Flexión. Para ello se han recopilado experiencias y antecedentes sobre el empleo de este ensayo; desarrollando y poniendo a punto la metodología y el equipamiento necesario para poder llevar a cabo el ensayo en condiciones dinámicas; caracterizando distintas mezclas asfálticas mediante la determinación del Módulo Dinámico, definiendo su campo de aplicación, considerando la validez de la hipótesis de la viscoelasticidad lineal y del principio de equivalencia frecuencia-temperatura para finalmente validar la metodología propuesta por

comparación con los resultados obtenidos mediante el ensayo de Tracción Indirecta y Compresión Uniaxial para las mismas condiciones experimentales.

Finalmente como resultado de estos estudios, se presentan en los apartados siguientes las conclusiones puntuales obtenidas para cada uno de los objetivos planteados.

5.2 Conclusiones referidas al desarrollo y aplicación experimental del ensayo de viga semicircular en flexión

En esta Tesis, se ha investigado el empleo de la configuración de SCB para la determinación del módulo dinámico $|E^*|$ y el ángulo de fase de cinco mezclas asfálticas diferentes.

Utilizando un modelo de elementos finitos pudo desarrollarse una ecuación para el cálculo de $|E^*|$, para la geometría específica adoptada: diámetro de rodillos, distancia entre rodillos, base de medida, ubicación vertical del LVDT y ancho de aplicación de carga.

El equipamiento necesario para llevar a cabo el ensayo es relativamente simple, pudiendo ser empleados otros equipos de ensayo de módulo dinámico con algunas adaptaciones.

Para los resultados de ensayo obtenidos en SCB las curvas ajustan al modelo sigmoideal propuesto para $|E^*|$ y en el espacio de Black los puntos se distribuyen a lo largo de una única curva con máximos en los valores medios, disminuyendo hacia los extremos, lo cual indicaría en primera instancia la viabilidad de aplicar el método de SCB para la determinación del módulo dinámico.

Respecto a la comparación de las tres metodologías de ensayo analizadas, para todas las mezclas, las curvas maestras de $|E^*|$ parecen representar un comportamiento similar, las principales diferencias se observan para valores de bajas frecuencias (o altas temperaturas) donde el módulo dinámico es menor. Se destaca la importancia del análisis al momento de evaluar los valores de ensayo obtenidos y los parámetros arrojados luego del análisis por los programas de cálculo de manera tal que los resultados medidos/calculados sean coherentes con el fenómeno físico que se está estudiando.

Para el análisis de los resultados de ensayo a partir de la línea de igualdad (SCB-CU Y SCB-TI), puede observarse que en líneas generales los valores obtenidos de los ensayos se distribuyen de manera homogénea alrededor de la misma a excepción del ángulo de fase en SCB-CU donde aparece una leve tendencia a determinar valores mayores de ángulos de fase en flexión que en compresión uniaxial. Ello se ve expresado a través de los valores obtenidos para los coeficientes de regresión lineal A y B, donde los valores de A son cercanos a la unidad tanto para $|E^*|$ como para ϕ y los de B menores al 10%

respecto del valor máximo medido en CU o TI, excepto para ϕ en SCB-CU donde aparece una tendencia a medir ángulos de fase mayores en SCB.

En cuanto a los criterios de bondad de ajuste propuestos por Witczak [92] se observa que tanto para el EA como para el EL, el modelo SCB respecto a CU y TI para el módulo dinámico resulta Excelente, mientras que para el ángulo de fase los valores arrojan resultados entre Aceptable y Bueno, en consonancia con lo encontrado en el análisis de los coeficientes A y B.

Para la evaluación de los errores relativos de la metodología SCB respecto a CU y TI, se observa que en el EL, el 100% de los errores relativos se encuentra por debajo del 25% para todas las mezclas y para ambos parámetros. Las mayores diferencias se tienen para las mayores temperaturas donde los módulos son menores y consecuentemente las diferencias en la medición representan mayor error relativo y la tendencia en general a presentar mayores valores de los parámetros para la medición se da para el ensayo SCB para todas las temperaturas.

Finalmente, los resultados encontrados a partir del análisis de la línea de igualdad del método gráfico y el criterio de bondad de ajuste son corroborados a partir del análisis de varianza ANOVA, donde la hipótesis nula se verifica para todas las mezclas en estudio en cuanto a la determinación de $|E^*|$ mediante las 3 metodologías de ensayo y se verifica sólo parcialmente para tres de las mezclas estudiadas para el ángulo de fase ϕ .

Por lo tanto, puede concluirse que la configuración de SCB ha sido verificada como una metodología simple y prometedora para la caracterización de la respuesta viscoelástica de las mezclas asfálticas.

5.3 Conclusiones referidas a la aplicación de un modelo de estimación de módulo dinámico

En una segunda etapa de esta Tesis se ha evaluado la aptitud del modelo mecánico de Huet-Sayegh para caracterizar el comportamiento viscoelástico lineal de las mezclas asfálticas en un amplio rango de frecuencias y temperaturas y para los dos parámetros que describen ese comportamiento: el módulo dinámico $|E^*|$ y el ángulo de fase ϕ .

Se han considerado los resultados experimentales de cinco mezclas asfálticas de variado comportamiento reológico y se han ajustado los parámetros de estos modelos de manera de minimizar las diferencias entre los valores medidos experimentalmente y los resultantes de los mismos.

Se observa que el modelo ajusta muy bien para ambas metodologías de ensayo. Sin embargo, se ha observado también, que los parámetros obtenidos son fuertemente dependientes de los valores de inicio o “semillas” utilizados en los procedimientos de ajuste que pueden conducir a soluciones que no convergen o que resultan con valores

contrarios al sentido físico que representan. Por ello, en el momento de aplicar la función Solver para resolver el sistema se aplicaron ciertas restricciones para evitarlo.

En el análisis de la línea de igualdad se observa una vez más que los resultados encontrados muestran el buen ajuste del modelo H-S a las metodologías CU y SCB, mostrando resultados que se distribuyen de manera homogénea alrededor de la línea de igualdad y dentro del margen de error del 25%, con un mayor grado de dispersión al evaluar el ángulo de fase para valores bajos del mismo.

En cuanto a los parámetros de regresión lineal, los valores de A son cercanos a la unidad tanto para $|E^*|$ como para ϕ y los de B menores al 10% respecto del valor máximo medido en CU o SCB. Por lo tanto, el modelo parecería ser potencialmente válido para la evaluación del módulo dinámico.

En cuanto a la bondad de ajuste para el modelo HS respecto a CU y SCB se concluye que para el módulo dinámico resulta Excelente, mientras que para el ángulo de fase los valores arrojan resultados entre Excelente y Bueno, en consonancia con lo encontrado en el análisis de los coeficientes A y B.

Finalmente analizando los errores relativos del modelo y los valores de ensayo en el Espacio aritmético, se observa que los errores relativos se encuentran por debajo del 25% para todas las mezclas y para ambos parámetros en porcentajes del 94% o mayor indicando muy buen ajuste. Los valores de ambos parámetros, módulo dinámico y ángulo de fase, muestran una distribución homogénea de los errores relativos mínimos y máximos con valores promedio cercanos a cero. Las mayores dispersiones se dan para las temperaturas más altas para el caso de $|E^*|$ y para las temperaturas más bajas para el caso de ϕ .

Por lo tanto en base a todos los análisis realizados puede concluirse que el modelo de Huet-Sayegh constituye una muy buena aproximación al momento de describir el complejo comportamiento reológico de las mezclas asfálticas tanto para la metodología de compresión uniaxial como la de la viga semicircular.

5.4 Recomendaciones y acciones futuras posibles

A lo largo del desarrollo de esta Tesis, se ha intentado incursionar en el estudio del módulo dinámico de las mezclas asfálticas, considerado como el parámetro de caracterización más importante de las mismas, para poder ser aplicado al diseño de pavimentos en los métodos mecanicistas. Por lo tanto, este trabajo constituye un aporte importante para el diseño de pavimentos flexibles por cuanto posibilitará comprender con mayor profundidad el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas. La temática seleccionada constituye un aporte original del tema en nuestro país y se ubica dentro de

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

las líneas de investigación que actualmente se encuentran en pleno desarrollo a nivel mundial.

Sin embargo, si bien se han evaluado mezclas asfálticas de propiedades variadas, para ahondar aún más en el aporte generado, resultaría interesante ampliar la evaluación a otro tipo de mezclas como por ejemplo mezclas discontinuas, del tipo SMA, mezclas con contenidos de RAP u otro tipo de material reciclado.

Finalmente se destaca que, dado que este estudio forma parte de un proyecto de investigación en curso en la Universidad Nacional de Rosario, para dar continuación a dicha línea de estudio, se plantea la posibilidad a futuro de la comparación del resultado obtenido en el equipo creado y puesto a punto en el Laboratorio Vial del IMAE, cuyo diseño ha ido evolucionando y perfeccionándose a lo largo del desarrollo del presente proyecto de investigación, con la implementación de nuevos soportes elaborados a partir de impresoras 3D, con el recientemente adquirido dentro del mismo laboratorio de manera de verificar o volver a calibrar el procedimiento propuesto, extendiendo la aplicación de esta metodología de Viga Semicircular en flexión al estudio de otros parámetros de caracterización diferentes al módulo dinámico tales como la resistencia a la rotura o la energía de fractura y la aplicabilidad del mismo principio de equivalencia frecuencia-temperatura en estos casos.

CAPÍTULO 6. PUBLICACIONES

A continuación se listan todas las publicaciones que han sido presentadas en diferentes ámbitos basadas en la presente Tesis

“The SCB Configuration for the Determination of the Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures”. M. Angelone, M. Cauhape Casaux, F. O. Martínez. 7th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements. Junio 2019, Grecia, book: Bituminous Mixtures and Pavements VII, pp.245-250. SN 9781351063265. DOI: 10.1201/9781351063265-37

“Ensayo de Viga Semicircular Dinámico: su Aplicación para la Caracterización Reológica de Mezclas Asfálticas”. Cauhape Casaux M., Angelone S., Martínez F. XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, CILA. Guatemala, Mexico. Nov 2019.

“A Dynamic Semi-Circular Bending Configuration for the Rheological Characterization of Asphalt Mixtures”. Cauhapé Casaux M., Angelone S., Martínez F. Journal of Civil Engineering and Construction, Vol 9 No 3 (2020). ISSN(Online): 2051-7777 DOI: <https://doi.org/10.32732/jcec.2020.9.3.150>

“Caracterización reológica de mezclas asfálticas. Determinación del módulo dinámico a partir del ensayo de viga semicircular en flexión”. Cauhapé Casaux M., Zorzutti L., Martínez F., Angelone S. XXXIX Reunión Anual del Asfalto. Encuentro Binacional Argentino-Paraguayo del Asfalto. Misiones, Nov 2020. Modalidad Virtual. <http://cpasfalto.com.ar/xxxixreunion-del-asfalto-presentaciones/>

“Ensayo de viga semicircular dinámico: Su aplicación para la caracterización reológica de mezclas asfálticas”. Cauhape Casaux M., Silvia Angelone S., Martínez F. Revista Asfalto y Pavimentación. ISSN: 2174-2189. Núm 41, Vol XI, segundo trimestre 2021, pág 13-23

“Aplicación del ensayo de flexión de una viga semicircular para la determinación del módulo dinámico de mezclas asfálticas”. Cauhape Casaux, M., Zorzutti L., Angelone S., Martínez F. XVIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Buenos Aires, Argentina. Sept 2022. http://www.congresodevialidad.org.ar/trabajos_tecnicos.php#

“Caracterización de las propiedades viscoelásticas de mezclas asfálticas mediante el empleo de una viga semicircular en flexión”. Cauhape Casaux, M., Zorzutti L. XXI Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, CILA. Punta del Este, Uruguay. Nov 2022.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Angelone S, Borghi M, Cauhapé Casaux M y Martínez F. Modelos para la Construcción de Curvas Maestras del Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas. XVII CILA. Antigua Guatemala, Guatemala, 2013.
- [2] Angelone S, Cauhapé Casaux M, Borghi M y Martínez F. Evaluation of Different Procedures and Models for the Construction of Dynamic Modulus Master Curves of Asphalt Mixtures. 9th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Trondheim, Noruega, 2013.
- [3] Martínez F. "Modelización del módulo dinámico de mezclas asfálticas para el diseño de pavimentos flexibles". Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, 2015
- [4] Popov Egor P, Balan Toader A. "Mecánica de Sólidos". Pearson Educación, ISBN 970-170398-7. Mexico 2000.
- [5] Curso de Posgrado FCEIA-UNR: Caracterización Avanzada De Materiales Viales
- [6] Feodosiev V.I. Resistencia de Materiales. Editorial MIR. ISBN 5-03-001183-8. Primera reimpresión. Moscú. 1980
- [7] Morales R. (4 de agosto de 2017). ¿Cuáles son las Ramas de la Mecánica?. Lifeder. Recuperado de <https://www.lifeder.com/ramas-de-la-mecanica/>.
- [8] https://iesmat.com/catalogos/WC_REOLOGIA/reologia/#:~:text=La%20reolog%C3%ADa%20es%20el%20estudio,se%20mide%20utilizando%20un%20re%C3%B3metro.
- [9] <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/viscosidad/viscosidad.htm>
- [10] <https://www.ucm.es>
- [11] Martínez F, Angelone S. "Modelación del Comportamiento de Mezclas Asfálticas". XIV Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto CILA. Cuba. 2007
- [12] Van der Poel C. "A general system describing the viscoelastic properties of bitumen and its relation to routine test data", Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, Part 5, p. 221. 1954
- [13] Papazian H S. "The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphalt concrete". Proc. First International Conferences on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA, p. 385. 1962.
- [14] Heukelomp W, Klomp A J G. "Road Design and Dynamic Loading", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 33, pp. 92-125. 1964.
- [15] Van Draat W, Sommer P. "Eingerätzurbestimmung derdynamischen elastizitätsoduln von asphalt", Strasse und Autobahn, Number 6, p. 206.(En Alemán).1965.

- [16] Sayegh G. "Viscoelastic properties of bituminous mixtures". Proc. Second International Conferences on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA, p. 743. 1967.
- [17] Huet C. "Etude par une methode d'impedancedu comportement viscoelastique des materiaux hydrocarbonés". These de Docteur-Ingenieur- Faculté des Sciences de Paris. Annales des Ponts et Chaussees, 1965.
- [18] Kallas BF, Riley J C. "Mechanical properties of asphalt pavement materials". Proc. Second International Conferences on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA, p. 743. 1967.
- [19] Shook JF, Kallas BF. "Factors Influencing Dynamic Modulus of Asphalt Concrete", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 38, pp. 140-178. 1969.
- [20] American Society for Testing and Materials. ASTM-D3496. "Standard Practice for Preparation of Bituminous Mixture Specimens for Dynamic Modulus Testing, 1979,1993,1999, 2005. (Retirada 2010).
- [21] Verstraeten J, Romain J E, Veverka V. "The Belgian Road Research Center's overall approach to asphalt pavement structural design". Proc. Fourth International Conferences on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA, p. 298. 1977
- [22] Ugé P, Gest G, Gravoisand A, Bonnaure F.. "Nouvelle methode de calcul du module complexe des melanges bitumineux", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussees, Special V, pp. 199-213. 1977.
- [23] Tosticarelli JR, Borgazzi R, Ferrero R. "Determinación en laboratorio del módulo de elasticidad dinámico de mezclas asfálticas". Memorias de la XXIª Reunión del Asfalto. Comisión Permanente del Asfalto, p. 379. 1978.
- [24] Tosticarelli J R, Martínez F, Angelone S. "Determinación del módulo dinámico (stiffness) de mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos de la Región Litoral". III Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Cartagena (Colombia).1985.
- [25] Witczak MW, Fonseca OA. "Revised predictive model for dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures", TRB Record 1540. 1996.
- [26] Andrei D, Witczak M W, Mirza MW. "Development of a revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures".NCHRP1-37A InterTeam Report, University of Maryland, 1999.
- [27] Bari J, Witczak MW. "Development of a new revised version of the Witczak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 381-423. 2006.

- [28] Martínez F, Angelone S. “Diez años de experiencia en la determinación experimental de módulos dinámicos en mezclas asfálticas: análisis y evaluación de los resultados obtenidos”. XXIXª Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto de la Argentina, Tomo II, p. 599. 1996.
- [29] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) NCHRP 01-28A. Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. Transportation Research Board. 2003
- [30] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 342, 2011 Edition, 2011 - Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Publication date January 2019
- [31] BS EN 12697-26:2018 Bituminous mixtures. Test methods Stiffness. ISBN: 978 0 580 91782 0.
- [32] Dougan CE, Stephens JE, Mahoney J, Hansen G. “E* - Dynamic modulus. Test protocol – Problems and solutions”. Report Number CT-SPR-0003084-F-03-3. University of Connecticut Storrs, Connecticut 06269-5202. 2003
- [33] Schwartz CW. Evaluation of Witczak Dynamic Modulus Prediction Model. Presented at 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005.
- [34] Yoder E J, Witczak M W. “ Principles of Pavement Design” , ISBN:9780471977803 Second Edition. Wiley, New York. 1975
- [35] Emri, I., ZUPANČIČ, B., Gergesova, M., Saprunov, I., Gonzalez-Gutierrez, J., & Bek, M. (2012). Importance of viscoelastic characteristics in determining functionality of time-dependent materials. *Dyna*, 79(175), 97-104.
- [36] Gergesova M.; Zupančič B.; Saprunov I.; Emri I.. The closed form t-T-P shifting (CFS) algorithm. *Journal of Rheology* 55, 1–16 (2011). <https://doi.org/10.1122/1.3503529>
- [37] Emri I., Gergesova M. Time-Dependent Behavior of Solid Polymers. *Rheology Chapter: Time-Dependent Behavior of Solid Polymers* 0. EOLSS Publishers Co. Ltd. United Kingdom. pp.247-33. ISBN- 978-1-84826-319-2 (e-Book Adobe Reader) ISBN- 978-1-84826-769-5 (Print (Color Edition) (Print)). 2010
- [38] Angelone S., Martínez F., Cauhapé Casaux M., Balige M., Berardo A. Alternativas sustentables en la producción de asfaltos: modificación con polvo de PE reciclado. XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, CILA. Bariloche, Argentina. Nov 2015. Publicado en e-book. ISBN 978-950-630-031-9. Pág 464-474. Felipe Nougués, Fernando Martinez editors

- [39] Juan Adrián Ramírez Escobar. Evaluación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas tibias mediante la viga de flexión a cuatro puntos. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México, 2021
- [40] Chehab G, Kim Y, Schapery R, Witczak MW. "Ramon Bonaquist Time-temperature superposition principle for asphalt concrete with growing damage in tension state". Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions 71:559-593. USA. 2002
- [41] Martínez F. Modelización micromecánica de mezclas bituminosas para el diseño de pavimentos flexibles. "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo". Revista Carreteras: VI Edición 2015-2016 N° 214, julio – agosto 2017.
- [42] Martínez F, Cauhape Casaux M., Zorzutti L, Angelone S. Determinación de las propiedades viscoelásticas de una mezcla templada con emulsión asfáltica. Revista Asfalto y Pavimentación. Número 42 Volumen XI Tercer trimestre año 2021
- [43] Martínez F, Angelone S. "The estimation of the dynamic modulus of asphalt mixtures from creep test results". 7th Int. RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials (ATCBM09), Rhodes, Greece. 2009
- [44] Martínez F, Angelone S. "The estimation of the dynamic modulus of asphalt mixtures using artificial neural networks". Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP. NAGOYA 2010
- [45] Martínez F, Angelone S. "Validación del módulo dinámico de mezclas asfálticas usando el ensayo de tracción indirecta". 16° Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (XVI CILA), Rio de Janeiro, Brasil. 2011
- [46] Bari J, Witczak MW. "Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists: From the Proceedings of the Technical Sessions. Volume: 75, pp 381-423, ISSN: 0270-2932. Savannah Georgia, United States, 2006.
- [47] Pronk A C. "Creation of master curves without adopting a rheological model". IPG project (IPG2.2.3B/PRAKT/LAB), The Netherlands. 2004.
- [48] Maina J W, Anochie-Boateng J, Matsui K. "Application of visco-elastic models to flexible pavement analysis". 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. 2011.

- [49] Yusoff N I, Shaw M T, Airey G. "Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders". *Construction and Building Materials* 25, pp. 2171–2189. 2011.
- [50] Moon K H. "Investigation of asphalt binder and asphalt mixture low temperature properties using analogical models". PhD Thesis. University of Minnesota. 2012.
- [51] Olard F. "Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé". These. Ecole Doctorale des Sciences pour l'ingénieur de Lyon, France. 2003.
- [52] Cauhapé Casaux M, Angelone S, Martínez F. Evaluación del comportamiento viscoelástico de mezclas asfálticas mediante modelos mecánicos (Evaluation of the viscoelastic behavior of asphalt mixtures by mechanical models). *Proceedings of the XIX^o Congreso Ibero Americano del Asfalto, Medellín, Colombia. 2017*
- [53] Angelone S, Martínez F. Validación del módulo dinámico de mezclas asfálticas usando el ensayo de tracción indirecta. XXXVI Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Ciudad de Buenos Aires. 2010
- [54] Kim YR, Youngguk S, King M, Momen M. "Dynamic Modulus testing of asphalt concrete in indirect tension mode". *TRB Annual Meeting USA. 2004*
- [55] Kim YR, Wen H. "Fracture energy from indirect tension testing," *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, pp. 779-793. 2002.*
- [56] Hondros G, "The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low resistance by the brazilian (indirect tensile) test with particular reference in concrete", *Australian Journal of Applied Science, Vol. 10, N 3, 1959.*
- [57] Giovanon O, Martínez F, Angelone S. Modelación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas 14 Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, La Habana, Cuba. 2007
- [58] Martínez F, Angelone S. Validación del módulo dinámico de mezclas asfálticas usando el ensayo de tracción indirecta. XXXVI Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Ciudad de Buenos Aires. 2010
- [59] Witczak and M. W. Mirza, "Development of Relationships to Predict Poisson's Ratio for Paving Materials," University of Maryland, College Park, MD, Interteam Technical Report for NCHRP 1-37A, 1999.
- [60] AENOR, UNE-EN 12697-26. "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez". 2012.

- [61] Gschösser F. "Modeling the Mechanical Behaviour of Asphalt Mixtures". Thesis for the degree of Civil Engineer, Leopold Franzens University, Innsbruck, 2008
- [62] Chong KP, Kuruppu MD. New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials. *International Journal of Fracture*, No. 26, 59-62. 1984
- [63] Lim IL, Johnston IW. Stress intensity factors for semi-circular specimens under Three-Point Bending. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.44, No.3,363- 382. 1993.
- [64] Krans R L, Tolman F, Van de Ven M F C. Semi-Circular Bending test: A practical crack growth test using asphalt concrete cores. *International RILEM conference on reflective cracking in pavements*, 3rd. Maastricht, The Netherlands: RILEM. 1996
- [65] Van de Ven M, Smit A, Krans R. Possibilities of a Semi-Circular Bending Test. *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, Seattle, Washington: International Society for Asphalt Pavements. 1997
- [66] Mull M A, Stuart K, Yehia A. Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement. *Journal on Material Science*, 37(3), 557–66. 2002
- [67] Molenaar AAA, Scarpas A, Liu X, Erkens SMJG. Semi-circular bending test; simple but useful? *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 71, 794–815. 2002.
- [68] Saha G, Biligiri K P Stato-dynamic response analyses through semicircular bending test: Fatigue life prediction of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. No. 150, 664-672. 2017.
- [69] Huang B, Shu X, Zuo G. Using notched semi circular bending fatigue test to characterize fracture resistance of asphalt mixtures. *Engineering Fracture Mechanics*, 109, 78–88. 2013.
- [70] Wu Z, Mohammad L, Wang L, Mull M. Fracture resistance characterization of Superpave mixtures using the semi-circular bending test. *Journal ASTM International (JAI)*; 2(3), 127–41. 2005.
- [71] Papagiannakis A T, Masad E A. *Pavement Design and Materials*. Editorial: Wiley. 2008
- [72] Arabandi M, Ferdowsi B. Evaluating the Semi-Circular Bending test for HMA Mixtures. *Journal IJE Transactions A. Basics*, 22(1), 47-58. 2009
- [73] Li X J, Marasteanu M O. The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature. *Engineering Fracture Mechanics*; 77(7), 1175–1190. 2010

- [74] Li X J, Marasteanu MO. Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental Mechanics*; 50, 867–876. 2010
- [75] Shu X, Huang B, Vukosavljevic D. Evaluation of cracking resistance of recycled asphalt mixture using semi-circular bending test. *Paving materials and pavement analysis (GSP 203)*, 58–65. 2010.
- [76] Huang B, Shu X, Vukosavljevic D. Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement. *Journal Materials in Civil Engineering*; 23(11),1535–1543. 2010
- [77] Li X, Marasteanu M O, Kvasnak A, Worel B. Factors Study in Low-Temperature Fracture Resistance of Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(2). DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:2(145) 2010
- [78] Biligiri K P, Said S, Hakim H. Asphalt Mixtures' Crack Propagation Assessment using Semi-Circular Bending Tests. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 5, Issue Number 4, 209-217 2012
- [79] Elseifi M A, Mohammad L N, Ying H, Cooper III S. Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures. *Road Materials and Pavement Design*; Volume 13, Issue sup1: Papers from the 87th Association of Asphalt Paving Technologists' Annual Meeting, 124-139. 2012.
- [80] European Committee for Standardization EN 12697-44: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test. 2010
- [81] American Society of Testing Materials. ASTM D8044 – 16: Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi- Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures. 2016
- [82] American Association of State and Highway Transportation Officials. AASHTO TP 105-13 Standard method of test for determining the fracture energy of asphalt mixtures using the semicircular bend geometry (SCB). 2013.
- [83] Huang L, Cao K, Zeng M. Evaluation of Semicircular Bending Test for Determining Tensile Strength and Stiffness Modulus of Asphalt Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 37, No. 2, 122-128. 2009.
- [84]<https://eadic.com/blog/entrada/calculo-estructural-el-metodo-de-los-elementos-finitos/>
- [85] <https://lisafea.com/>

- [86] Martínez F, Angelone S. Modelación del Comportamiento de Mezclas Asfálticas. XIV Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, La Habana, Cuba, 2007.
- [87] NCHRP 1-37A. "Mechanistic-Empirical design of new and rehabilitated pavement structures" Draft Report. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 2004.
- [88] Gschösser F. Modeling the mechanical behaviour of asphalt mixtures". Thesis for the degree of Civil Engineer, Leopold Franzens University, Innsbruck. 2008.
- [89] Martínez F, Angelone S. Evaluación de diferentes modelos de predicción del módulo dinámico de mezclas asfálticas. XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Mar del Plata. 2009.
- [90] Christensen, D. W., Pellinen, T. K., & Bonaquist, R. F. (2003). Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Volume 72, 97-121
- [91] Yusoff N I Md. Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. The University of Nottingham. 2012
- [92] Witczak, M., Pellinen T., El-Basyouny M. "Pursuit of the simple performance test for asphalt concrete fracture/cracking". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, USA*. 2002
- [93] Yusoff N I Md, Mounier D, Ginoux M.S, Mohd. R H, Airey G D, Di Benedetto H. "Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model". *Construction and Building Materials*, 38, 395-406, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.038>. 2013.
- [94] Bonaquist, R., & Christensen, D. W. (2005). Practical Procedure for Developing Dynamic Modulus Master Curves for Pavement Structural Design. *Transportation Research Record*, 1929(1), 208–217. <https://doi.org/10.1177/0361198105192900125>
- [95] Ceylan H., Gopalakrishnan K., Kim S.. "Advanced approaches to hot-mix asphalt dynamic modulus prediction". *Canadian Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1139/L08-016>. July 2008.
- [96] Tran, N.H. and Hall, K.D. Evaluating the Predictive Equation in Determining Dynamic Moduli of Typical Asphalt Mixtures Used in Arkansas. *Electronic Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 74E, 2005.
- [97] <https://www.ninjaexcel.com/formulas-y-funciones-de-excel/tabla-anova/>

Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión

[98] Cauhape Casaux M, Angelone S. Martínez F. Evaluación del comportamiento visco elástico de mezclas asfálticas mediante modelos mecánicos. XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Colombia, Noviembre 2017.

*Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas
Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión*

ANEXO A. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MÓDULO DINÁMICO EN COMPRESIÓN UNIAxIAL

Tabla A-1: Valores de ensayo de Módulo dinámico, $|E^*|$, y ángulo de fase, ϕ , mediante la metodología de Compresión Uniaxial

T (°C)	fe (Hz)	CA30		AM3		2%SBP		H1		H2	
		ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)
0	5	13.7	27085	12.5	18080	13.4	20027	10.2	14168	10.8	12223
0	4	14.5	24864	13.2	18100	14.1	19221	11.1	13671	10.1	12664
0	2	15.3	23851	13.2	16341	15.2	17054	12.8	12431	11.9	11823
0	1	15.7	21940	13.7	14768	16.4	16077	12.0	11054	12.1	10906
0	0.5	15.1	20137	14.2	13474	16.5	14932	12.6	10191	13.4	10301
0	0.25	15.4	17876	14.7	12114	17.8	12891	14.5	9013	14.8	9355
0	0.1	18.1	16076	15.9	10867	20.0	11768	15.6	7531	16.4	7898
10	5	18.9	14546	15.9	12352	17.2	12906	14.6	10755	13.0	11684
10	4	16.3	14478	16.9	11848	17.4	12444	13.3	10103	13.1	11264
10	2	16.7	13156	17.4	10538	20.0	11037	15.5	8899	15.2	10167
10	1	19.2	11232	18.7	9404	21.2	9208	17.5	7908	16.9	9128
10	0.5	19.6	9852	19.9	8151	22.6	8149	19.2	6679	17.1	8062
10	0.25	21.5	8677	21.8	6737	23.5	6720	20.4	5660	19.2	6937
10	0.1	24.0	7341	23.3	5706	26.6	5288	22.5	4631	19.4	5957
20	5	25.6	8416	21.5	7737	25.3	8354	24.6	5956	21.6	6060
20	4	22.3	7988	22.3	7472	25.6	7399	24.9	5864	22.0	5806
20	2	29.1	6395	23.6	6131	27.4	5872	26.0	4778	23.5	4849
20	1	31.1	5174	26.2	4919	27.8	4775	28.0	3960	25.2	4179
20	0.5	32.1	4076	27.2	4063	29.2	3750	29.3	3239	26.6	3353
20	0.25	34.2	3141	28.9	3194	30.1	2888	30.4	2570	28.3	2837
20	0.1	35.4	2449	30.8	2427	31.6	2284	33.7	2325	29.0	2111
30	5	35.7	2834	31.3	2946	32.0	2959	33.8	6978	27.4	3035
30	4	36.5	2522	31.3	2739	31.2	2761	33.4	5938	27.1	2895
30	2	36.0	2040	32.1	2204	32.8	2134	34.1	4467	28.1	2279
30	1	36.8	1527	32.1	1746	32.5	1629	33.0	2799	29.9	1735
30	0.5	35.1	1223	32.8	1288	33.5	1266	32.8	2524	28.0	1699
30	0.25	35.2	1012	33.6	1031	33.4	1184	32.3	1738	28.4	1271
30	0.1	34.4	706	32.8	785	34.8	641	30.2	1289	27.4	974
40	5	35.3	1218	35.0	1453	33.8	871	36.0	2913	32.3	1647
40	4	35.3	1100	34.6	1378	32.8	794	35.4	2631	31.7	1467
40	2	33.8	814	33.4	1098	32.6	836	32.4	1894	29.9	1217
40	1	32.3	688	33.1	824	34.9	533	29.2	1514	29.6	981
40	0.5	33.3	495	31.0	652	33.2	369	32.1	1049	29.0	858
40	0.25	32.5	421	29.8	583	33.7	377	30.7	937	29.4	651
40	0.1	28.8	387	28.9	415	32.9	315	26.6	713	27.3	496

ANEXO B. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MÓDULO DINÁMICO EN TRACCIÓN INDIRECTA

Tabla B-1: Valores de ensayo de Módulo dinámico, $|E^*|$, y ángulo de fase, ϕ , mediante la metodología de Tracción Indirecta

T (°C)	fe (Hz)	CA30		AM3		2%SBP		H1		H2	
		ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)
0	5	12.3	22109	15	20013	13	20105	17.4	16538	17.2	12178
0	4	13.5	22073	14.3	19138	16.1	19156	17.9	16531	17.6	11695
0	2	12.7	21914	14.1	17380	12.7	17031	18.4	14853	18.3	10594
0	1	15	21510	15.1	16009	13.9	16003	19.5	12821	19.3	9387
0	0.5	13.6	20933	15.5	14110	14.5	14895	20.5	10998	20.3	8254
0	0.25	15.4	19090	16.9	12111	16.1	12929	22.1	9674	21.6	7138
0	0.1	15.8	15872	19.1	10141	20.3	11818	24.6	7576	23.6	5720
10	5	15.9	21834	21.3	11939	19.4	12878	21.5	12654	18.7	8211
10	4	18.9	18715	21.7	11435	20.1	12380	22.6	11854	22.0	8056
10	2	15.1	15248	22.3	9969	21.1	10960	23.9	9862	23.3	6764
10	1	17.1	14051	23.4	8480	21.9	9164	25.0	8125	25.2	5747
10	0.5	18.4	12394	24.4	7108	23.8	8070	26.7	6699	26.8	4794
10	0.25	18.9	10485	26.1	5911	25.6	6766	28.2	5401	28.0	3930
10	0.1	21.3	9483	28.7	4642	28.5	5224	30.7	4256	29.8	3194
20	5	22.8	12534	31.2	5993	29.7	8283	30.2	5750	29.9	4608
20	4	23.5	11697	31.9	5535	29.4	7407	31.0	5201	28.9	4245
20	2	24.7	10099	32.7	4320	30.4	5916	32.2	4094	30.4	3405
20	1	26.3	8220	33.7	3345	31.7	4710	32.8	3214	32.0	2630
20	0.5	27.6	6862	33.9	2716	32.5	3775	33.8	2498	33.5	2034
20	0.25	28.2	5719	33.1	2181	35	2958	36.3	1779	35.2	1560
20	0.1	30.9	4480	34.5	1511	38.7	2268	35.7	1427	35.4	1194
30	5	26.2	5563	35	1985	35	3017	32.5	2586	36.4	1723
30	4	26.1	5391	35.7	1790	36.7	2697	33.5	2231	36.6	1622
30	2	28.6	4175	35.1	1443	36.9	2110	35.3	1629	37.0	1169
30	1	28.2	3549	36.9	1030	37.3	1591	34.6	1284	35.8	964
30	0.5	30.6	2660	36.6	805	37.5	1207	37.4	890	36.3	785
30	0.25	29.8	2214	36	617	36.5	1156	34.5	859	37.2	555
30	0.1	31.5	1669	35.6	540	36.4	694	33.8	558	35.5	445
40	5	35.2	2574	32.4	979	40.1	891	34.5	999	35.3	815
40	4	34.38	2734	34	821	38.3	808	33.9	967	35.6	710
40	2	35.8	2006	31.9	688	33.5	757	32.7	789	35.8	587
40	1	34.8	1547	31.6	535	33.6	523	35.3	532	34.5	442
40	0.5	36.6	1445	31.7	395	32.7	431	32.3	579	34.1	395
40	0.25	37.1	946	31.7	392	33	360	34.9	368	34.5	317
40	0.1	35.9	774	30.7	408	33	236	33.2	279	33.6	229

*Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas
Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión*

Tabla B-1: Valores de ensayo de Módulo dinámico, $|E^*|$, y ángulo de fase, ϕ , mediante la metodología de Tracción Indirecta (cont)

T (°C)	fe (Hz)	CA30		AM3		2%SBP		H1		H2	
		ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)
0	5	14.3	19482	8.2	17167	10.7	17208	15.0	15816	18.5	11489
0	4	11.3	20458	13.1	17739	10.1	16725	15.4	15182	18.6	10968
0	2	11	18189	15.5	15679	10.3	15763	16.1	13551	19.8	9806
0	1	10	17603	17.5	14435	11.2	14826	17.0	12109	20.5	8490
0	0.5	10.7	15711	16.8	12872	11.8	13693	18.5	10728	22.0	7433
0	0.25	10.2	14920	17.8	11218	13.2	12487	19.5	9287	23.7	6369
0	0.1	13.7	13541	19.9	9695	15.7	10868	21.4	7775	26.3	5049
10	5	25	15688	25.5	12292	19.1	11151	17.7	10664	22.5	8311
10	4	22.6	16155	25.5	13170	16.9	12066	19.5	10676	23.6	8115
10	2	21.6	13699	24.5	9929	18.3	10630	20.9	9355	24.3	6720
10	1	22.8	11600	27.1	9951	19.2	9525	22.3	8046	26.1	5750
10	0.5	23.7	10923	28.4	7192	20.6	8207	23.5	6909	27.5	4681
10	0.25	24.2	9203	28.7	5892	22.5	7059	24.9	5933	29.7	3816
10	0.1	28.8	9136	30.9	4716	25.7	5705	26.2	5029	32.5	2843
20	5	19.4	8602	31	6759	24.5	6844	27.4	6166	32.2	4181
20	4	23.4	9611	31.3	5816	24.2	6628	27.8	5883	33.4	3905
20	2	24.4	7567	32	4724	27.4	5338	28.8	4596	34.7	3128
20	1	22.2	6633	32.3	4124	30	4293	30.8	3432	36.8	2577
20	0.5	22.3	5981	35.1	3359	31.9	3426	30.6	2919	38.8	1904
20	0.25	24.7	4911	36.5	2887	32.8	2758	32.4	2161	40.1	1371
20	0.1	26.4	4068	36.2	2239	38.7	2056	32.5	1544	42.0	1150
30	5	29.7	4383	31.3	2609	37.2	2903	39.0	2895	39.7	2212
30	4	31.7	4146	33.8	2163	38.3	2594	38.0	2820	40.2	2074
30	2	31.6	3092	33.3	1783	40.5	1967	38.0	2163	41.2	1281
30	1	31.8	2665	32.4	1813	41	1453	38.6	1840	43.6	984
30	0.5	33.3	2140	33.5	1382	42.9	1139	38.7	1332	44.2	605
30	0.25	34.4	1783	31.8	1452	43.5	1038	39.4	891	45.1	442
30	0.1	36	1404	31.5	898	42.8	706	38.4	632	42.7	291
40	5	30.5	2358	35.5	1401	39.6	1280	38.7	1681	40.2	741
40	4	33.8	2082	35.1	1263	33.3	1194	37.5	1481	44.8	482
40	2	31.2	1905	33.4	1194	36.8	720	36.2	1134	45.7	363
40	1	33.4	1324	33.8	1074	29.4	839	38.8	937	43.2	297
40	0.5	33.2	1241	34.3	790	31.9	554	37.8	741	39.6	311
40	0.25	34	958	35.25	590	34.1	564	38.8	526	37.7	283
40	0.1	33.1	821	33.2	390	34.8	400	36.1	399	41.0	124

ANEXO C. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE MÓDULO DINÁMICO EN VIGA SEMICIRCULAR EN FLEXIÓN

Tabla C-1: Valores de ensayo de Módulo dinámico, $|E^*|$, y ángulo de fase, ϕ , mediante la metodología de Viga Semicircular en Flexión

T (°C)	fe (Hz)	CA30		AM3		2%SBP		H1		H2	
		ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)
0	5	15.5	19091	16.2	18321	11.5	14990	17.0	19204	17.5	12986
0	4	15.6	20138	15.4	17677	12.0	13913	16.9	18986	17.6	12919
0	2	15.7	19081	15.3	16322	10.0	12498	17.0	17072	18.5	11470
0	1	16.1	18217	15.4	14757	11.0	12077	17.7	15113	19.6	10120
0	0.5	15.9	15861	15.8	13127	12.2	10919	19.0	13411	20.8	8901
0	0.25	17.4	14991	17.1	11712	14.5	10158	22.0	11967	22.7	7728
0	0.1	19.0	14191	20.4	9104	16.7	9125	24.5	9161	25.5	6190
10	5	20.5	15583	20.2	12376	17.3	11682	20.4	13563	23.0	8853
10	4	20.4	15033	19.9	11986	20.0	11524	20.3	13164	23.5	9165
10	2	20.2	13908	21.0	7807	21.6	10269	22.2	11510	25.6	6687
10	1	20.6	11974	21.9	9371	20.0	9120	23.8	9837	27.2	5525
10	0.5	22.7	10609	23.0	8032	24.0	8011	25.6	8461	29.3	4653
10	0.25	24.5	9034	24.5	7216	24.9	6621	28.5	7132	31.8	3773
10	0.1	26.0	7158	26.7	5791	28.1	4929	30.3	5217	33.0	2690
20	5	27.1	7837	26.5	6686	26.9	6959	28.0	7584	27.1	4054
20	4	27.1	7486	28.7	5489	29.9	6484	27.6	7371	26.8	3792
20	2	27.9	6169	30.8	4410	26.9	5455	28.4	5936	28.7	3037
20	1	29.2	5075	33.4	3368	27.4	4466	30.2	4608	29.7	2585
20	0.5	30.7	4200	33.5	2655	29.9	3747	31.7	3825	31.2	2031
20	0.25	33.3	3382	34.8	2128	32.6	3126	34.8	2719	32.4	1602
20	0.1	36.1	2632	36.3	1734	37.2	2354	33.3	2196	32.8	1183
30	5	34.4	3531	33.3	2835	33.8	3877	35.7	3248	36.8	1938
30	4	35.3	3390	32.8	2714	35.1	3652	33.7	3225	33.5	1782
30	2	33.9	2690	34.5	1964	36.5	2782	36.1	2324	32.4	1563
30	1	35.6	2081	36.0	1432	36.8	2157	37.5	1747	33.6	1196
30	0.5	37.7	1511	35.5	1154	41.9	1557	35.8	1716	35.5	904
30	0.25	38.0	1225	36.0	864	42.3	1402	37.8	1148	34.9	706
30	0.1	38.0	869	34.6	701	44.2	919	35.0	968	35.5	546
40	5	38.3	1797	35.1	1099	39.9	1409	31.3	1540	37.8	744
40	4	34.6	1802	33.3	1106	33.7	1532	33.9	1506	36.3	749
40	2	35.4	1367	36.9	676	35.4	1174	34.6	1621	38.2	561
40	1	35.8	1222	35.2	627	36.1	958	37.2	953	38.8	366
40	0.5	36.1	836	33.8	549	33.5	739	36.8	445	39.2	347
40	0.25	36.6	702	34.1	384	36.0	646	35.5	642	38.0	300
40	0.1	36.2	502	32.9	281	40.7	390	32.6	506	35.6	246

*Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas
Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión*

Tabla C-1: Valores de ensayo de Módulo dinámico, $|E^*|$, y ángulo de fase, ϕ , mediante la metodología de Viga Semicircular en Flexión (cont)

T (°C)	fe (Hz)	CA30		AM3		2%SBP		H1		H2	
		ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)
0	5	9.9	20117	15.8	19318	11.5	14990	13.0	13936	18.2	17601
0	4	10.0	19539	16.1	18456	12.0	13913	13.5	13613	18.5	17242
0	2	10.1	18327	16.4	16940	10.0	12498	14.4	12245	19.1	15769
0	1	10.7	17153	15.7	15109	11.0	12077	15.8	10850	19.4	13939
0	0.5	11.3	15791	16.5	13845	12.2	10919	17.7	9500	20.4	12367
0	0.25	12.1	14410	17.6	12170	14.5	10158	20.1	8054	22.0	10506
0	0.1	13.8	12419	19.8	10215	16.7	9125	23.3	6372	24.8	8476
10	5	13.1	13520	20.9	11979	17.3	11682	17.0	10703	22.9	12499
10	4	13.8	13054	20.5	11267	20.0	11524	17.9	10320	23.1	11921
10	2	15.5	11844	20.7	9859	21.6	10269	19.1	8864	24.1	10245
10	1	16.4	10582	21.7	8510	20.0	9120	21.2	7743	25.0	8540
10	0.5	18.1	9347	22.8	7319	24.0	8011	23.1	6604	27.0	7343
10	0.25	19.6	8066	24.3	6112	24.9	6621	25.4	5473	19.5	5923
10	0.1	22.3	6466	27.2	4636	28.1	4929	29.1	3960	31.3	4364
20	5	21.1	8096	27.7	6300	26.9	6959	26.8	6276	29.6	5568
20	4	21.4	7701	27.6	5926	29.9	6484	27.2	6062	29.2	5351
20	2	23.3	6587	28.4	4804	26.9	5455	30.5	4974	30.8	4480
20	1	25.4	5487	29.8	3831	27.4	4466	30.9	3911	31.9	3547
20	0.5	27.0	4528	30.6	3141	29.9	3747	32.8	3037	34.0	2800
20	0.25	29.1	3686	31.8	2399	32.6	3126	34.8	2459	35.5	2093
20	0.1	31.2	2855	33.3	1767	37.2	2354	36.3	1705	35.7	1581
30	5	28.9	4106	33.9	2846	33.8	3877	34.3	2950	37.5	2735
30	4	29.4	3774	33.9	2664	35.1	3652	31.6	2861	35.9	2483
30	2	31.1	3038	34.3	2048	36.5	2782	31.9	1951	37.1	2033
30	1	32.9	2372	34.5	1642	36.8	2157	30.6	1516	38.9	1653
30	0.5	34.7	1829	34.3	1267	41.9	1557	30.4	1269	37.2	1309
30	0.25	35.7	1437	35.7	934	42.3	1402	30.1	1035	36.4	981
30	0.1	36.1	1039	35.5	666	44.2	919	30.2	777	36.3	621
40	5	35.2	1455	32.9	1406	39.9	1409	31.4	893	36.4	1077
40	4	33.2	1662	32.1	1340	33.7	1532	33.2	992	35.7	922
40	2	34.1	1294	34.6	843	35.4	1174	31.9	810	35.3	783
40	1	38.9	769	32.6	985	36.1	958	30.5	713	37.8	494
40	0.5	36.3	691	34.9	558	33.5	739	32.4	749	37.5	415
40	0.25	36.4	509	36.8	357	36.0	646	32.8	473	36.3	308
40	0.1	33.5	475	33.4	299	40.7	390	31.8	370	38.1	171

ANEXO D. RESULTADOS DE MÓDULO DINÁMICO PARA EL MODELO DE HUET-SAYET

Tabla D-1: Valores estimados de Módulo dinámico, $|E^*|$, y ángulo de fase, ϕ , por el Modelo de HUET-SAYET a partir de la metodología de Compresión Uniaxial

T (°C)	fe (Hz)	CA30		AM3		2%SBP		H1		H2	
		ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)
0	5	7.5	24007	9.6	18902	7.4	20710	9.4	12386	9.1	13334
0	4	8.0	23574	10.0	18459	7.9	20340	10.1	12108	9.7	13036
0	2	9.8	22080	11.3	17031	9.7	19065	12.5	11145	11.4	12044
0	1	11.9	20370	12.8	15544	11.7	17605	15.2	10045	13.2	10971
0	0.5	14.1	18473	14.3	14022	13.9	15987	18.1	8848	15.1	9842
0	0.25	16.5	16442	15.9	12495	16.2	14257	20.9	7608	17.0	8693
0	0.1	19.7	13677	18.1	10518	19.2	11902	24.5	6011	19.5	7206
10	5	16.9	16084	15.8	12626	16.7	13835	12.8	11019	12.9	11177
10	4	17.7	15411	16.3	12138	17.5	13261	13.7	10674	13.5	10821
10	2	20.1	13320	18.0	10644	19.8	11481	16.5	9525	15.4	9688
10	1	22.4	11290	19.7	9210	22.0	9758	19.3	8301	17.3	8539
10	0.5	24.6	9396	21.5	7861	24.0	8152	22.2	7062	19.2	7413
10	0.25	26.6	7691	23.2	6617	25.8	6707	24.8	5872	20.9	6341
10	0.1	28.9	5772	25.4	5161	27.9	5079	27.8	4461	23.0	5056
20	5	26.4	7909	22.5	7071	25.7	6807	20.5	7786	20.4	6625
20	4	27.0	7396	23.1	6681	26.3	6375	21.4	7386	21.0	6290
20	2	28.7	5950	24.8	5552	27.8	5160	24.1	6178	22.6	5306
20	1	30.1	4729	26.5	4552	29.1	4132	26.5	5058	24.0	4424
20	0.5	31.3	3720	28.0	3684	30.1	3281	28.6	4068	25.2	3651
20	0.25	32.3	2903	29.4	2946	31.0	2586	30.1	3225	26.2	2988
20	0.1	33.4	2070	31.0	2156	31.8	1873	31.5	2337	27.2	2269
30	5	32.0	3217	28.6	3401	30.7	2815	27.1	4814	25.7	3332
30	4	32.2	2968	29.0	3164	30.9	2606	27.7	4490	26.0	3123
30	2	33.0	2302	30.3	2511	31.6	2044	29.5	3581	26.8	2542
30	1	33.6	1775	31.4	1973	32.1	1596	30.8	2821	27.5	2057
30	0.5	33.9	1364	32.2	1538	32.5	1242	31.6	2204	28.0	1657
30	0.25	33.9	1047	32.6	1192	32.8	965	32.0	1714	28.3	1331
30	0.1	33.5	737	32.4	848	33.0	689	31.7	1229	28.6	994
40	5	33.9	1247	32.2	1489	32.6	1125	30.9	2773	28.1	1580
40	4	33.9	1145	32.4	1372	32.7	1037	31.2	2563	28.2	1472
40	2	33.8	878	32.6	1061	32.9	805	31.8	1998	28.5	1181
40	1	33.3	675	32.3	820	33.0	623	32.0	1553	28.6	947
40	0.5	32.3	521	31.5	636	33.0	483	31.7	1207	28.5	758
40	0.25	30.8	405	29.9	498	33.0	374	30.9	942	28.4	608
40	0.1	27.9	297	26.9	368	32.8	267	29.2	688	27.9	455

*Caracterización de las Propiedades Viscoelásticas de Mezclas Asfálticas
Mediante el Empleo de una Viga Semicircular en Flexión*

Tabla D-2: Valores estimados de Módulo dinámico, $|E^*|$, y ángulo de fase, ϕ , por el Modelo de HUET-SAYET a partir de la metodología de Viga Semicircular en Flexión

T (°C)	fe (Hz)	CA30		AM3		2%SBP		H1		H2	
		ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)	$ E^* $ (MPa)
0	5	7.9	21854	11.2	19495	7.0	15979	12.1	17251	13.8	16351
0	4	8.4	21440	11.8	18958	7.5	15717	13.0	16747	14.6	15795
0	2	10.3	20018	13.7	17217	9.5	14786	16.1	15029	17.2	13990
0	1	12.3	18400	15.6	15398	11.8	13677	19.4	13132	19.8	12130
0	0.5	14.6	16619	17.6	13554	14.5	12401	22.7	11156	22.3	10296
0	0.25	16.9	14730	19.6	11739	17.3	10995	25.9	9219	24.7	8567
0	0.1	20.1	12191	22.2	9473	21.1	9041	29.6	6898	27.4	6537
10	5	16.2	15345	19.0	12276	14.9	12181	19.2	13263	21.4	11008
10	4	16.9	14730	19.7	11699	15.8	11734	20.3	12631	22.2	10423
10	2	19.3	12805	21.7	9968	18.7	10286	23.6	10654	24.5	8684
10	1	21.6	10922	23.6	8364	21.6	8802	26.7	8745	26.7	7105
10	0.5	23.7	9149	25.4	6917	24.4	7356	29.4	7006	28.5	5722
10	0.25	25.6	7542	27.0	5644	26.9	6015	31.7	5500	30.1	4548
10	0.1	27.8	5718	29.0	4233	29.8	4478	33.9	3901	31.7	3304
20	5	24.5	8475	26.1	6353	24.2	7463	29.0	7287	28.8	5549
20	4	25.1	7961	26.6	5948	25.0	7014	29.8	6762	29.3	5158
20	2	26.9	6494	28.2	4808	27.5	5707	32.0	5294	30.7	4078
20	1	28.4	5231	29.6	3842	29.7	4559	33.7	4082	31.9	3194
20	0.5	29.6	4170	30.9	3038	31.5	3586	34.9	3113	32.8	2482
20	0.25	30.6	3297	32.0	2379	32.9	2786	35.6	2358	33.5	1918
20	0.1	31.7	2392	33.3	1700	34.4	1967	35.8	1625	34.2	1355
30	5	29.8	4019	31.1	2910	31.0	3850	34.6	3326	33.1	2229
30	4	30.1	3728	31.5	2691	31.5	3558	35.0	3044	33.3	2051
30	2	31.0	2937	32.6	2098	33.0	2763	35.6	2305	33.9	1579
30	1	31.8	2300	33.5	1623	34.1	2126	35.8	1739	34.3	1212
30	0.5	32.3	1793	34.2	1247	35.0	1623	35.5	1313	34.6	927
30	0.25	32.8	1393	34.8	953	35.7	1233	34.8	995	34.8	709
30	0.1	33.1	994	35.1	664	36.3	852	33.1	698	34.9	496
40	5	32.3	1822	34.2	1262	34.6	1851	35.7	1531	34.6	958
40	4	32.5	1680	34.4	1158	34.9	1697	35.6	1399	34.7	879
40	2	32.8	1305	34.9	884	35.6	1290	35.0	1059	34.8	672
40	1	33.1	1011	35.1	672	36.1	976	33.9	806	34.9	513
40	0.5	33.3	781	34.9	511	36.4	737	32.3	621	34.9	391
40	0.25	33.4	604	34.3	388	36.6	555	30.1	485	34.7	299
40	0.1	33.4	429	32.7	273	36.6	382	26.6	360	34.4	210