

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

Valparaíso, Chile



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

**“EFECTO DE REJUVENECEDORES LÍQUIDOS Y
ENCAPSULADOS BASADOS EN PIRÓLISIS DE
NEUMÁTICOS EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS
DE UN LIGANTE ASFÁLTICO”**

ARACELI ESTEFANÍA GONZÁLEZ FAJARDO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL

Profesor Guía: Rodrigo Delgadillo

Junio - 2023

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile, a través del programa FONDEF Concurso IDeA I+D 2021 código ID21I10127 y Programa FONDECYT código 1190027.

Quiero agradecer al profesor Rodrigo Delgadillo, a Ixa Marzal y al personal de LEMCO por ser el apoyo académico durante la elaboración de este trabajo. A mis padres por siempre apoyarme en mis locuras, a mi hermana y amigos por soportarme y a mis gatitos simplemente por existir.

Y a mi querida gimnasia, por ser mi pilar durante toda la etapa universitaria.

Resumen

El presente documento tiene como fin mostrar un estudio sobre el efecto de un rejuvenecedor en las propiedades reológicas de un ligante asfáltico CA-24 con envejecimiento secundario, sintetizado a partir de la pirolisis de neumáticos fuera de uso.

El estudio realizado se divide en dos etapas: La primera consiste en mezclar el rejuvenecedor líquido directamente con el cemento asfáltico en diferentes proporciones del 1% al 6% y 9% p/p. La segunda etapa, por su parte consiste en utilizar el rejuvenecedor líquido contenido en cápsulas biopoliméricas y mezclarlas con el ligante asfáltico en dosis de 6%, 9% y 12% p/p.

La eficiencia de ambos formatos de rejuvenecedor, líquido y encapsulado, fue evaluado a través de su capacidad para restaurar las propiedades reológicas fundamentales del cemento asfáltico. Las cuales se evaluaron mediante ensayos de barrido de frecuencia - temperatura realizados en un reómetro de corte dinámico. Los resultados se presentan mediante curvas maestras.

Los resultados mostraron que los rejuvenecedores líquidos y encapsulados afectaron el comportamiento reológico del ligante, donde las muestras con un 6% de líquido pirolítico y 12% de cápsulas presentaron un comportamiento más cercano al ligante sin envejecer y al ligante con un envejecimiento primario (RTFO), respectivamente. La rigidez del material disminuyó a mayor contenido de líquido o cápsulas, presentando un comportamiento no homogéneo en todo el rango de frecuencias ensayado. Finalmente, el ángulo de fase se vio menos afectado con el contenido de líquido o cápsulas, donde el comportamiento viscoso del material aumentó en un menor grado.

Dada la naturaleza de las muestras al consistir en una primera elaboración y a la falta de otros ensayos, no es posible determinar un porcentaje óptimo de rejuvenecedor pese a que se demuestra la eficacia del líquido pirolítico como un agente rejuvenecedor.

Abstract

This report shows a study about the effect of a rejuvenator on the rheological properties in a CA-24 asphalt binder with secondary aging, synthesized from the pyrolysis of waste tyres.

The study was divided into two stages: The first consisted in mixing the liquid rejuvenator directly with the asphalt binder in different proportions from 1% to 6% and 9% w/w. The second stage consisted in using the liquid rejuvenator contained in biopolymeric capsules and mixing them with the asphalt binder in doses of 6%, 9% and 12% w/w.

The efficiency of both liquid and encapsulated rejuvenator was evaluated through their ability to restore the fundamental rheological properties of the asphalt cement. These were evaluated by frequency-temperature sweep tests performed in a dynamic shear rheometer (DSR). The results were present in Master Curves.

The results showed that liquid and encapsulated rejuvenators affected the rheological behavior of the binder, where the samples with 6% pyrolytic liquid and 12% capsules presented a behavior closer to the unaged binder and the binder with primary aging (RTFO), respectively. The stiffness of the material decreased with higher liquid or capsule content, presenting a non-homogeneous behavior in the frequency range. Finally, the phase angle was less affected with liquid or capsule content, where the viscous behavior of the material increased, but a lesser degree.

Given the nature of the samples, consisting of a first processing and the lack of other tests, it is not possible to determine an optimum percentage of rejuvenator, although the effectiveness of the pyrolytic liquid as a rejuvenating agent is demonstrated.

Glosario

ASTM	American Society for Testing Materials.
δ	Ángulo de fase.
CA	Cemento asfáltico.
CA-SE	Cemento asfáltico sin envejecer.
CA-RTFO	Cemento asfáltico sometido a envejecimiento primario.
CA-PAV	Cemento asfáltico sometido a envejecimiento secundario.
PO	Contiene líquido pirolítico.
POC	Contiene líquido pirolítico encapsulado.
ϵ_0	Deformación axial máxima aplicada.
γ_{max}	Deformación de corte máxima.
DSR	Dynamic Shear Rheometer (Reómetro de Corte Dinámico).
σ_{max}	Esfuerzo axial máxima aplicada.
τ_{max}	Esfuerzo de corte máximo aplicado.
α_r	Factor de corrimiento.
ω	Frecuencia angular de carga.
f	Frecuencia de carga.
ω_r	Frecuencia reducida.
°	Grados.
°C	Grados Celsius.
g	Gramos.
HPDR	Horno de Película Delgada Rotatorio.
LEMCO	Laboratorio de Ensayo de Materiales y Control de Obras.
LAS	Linear amplitude sweep (barrido de amplitud lineal)
LPN	Líquido pirolítico.
G´	Módulo de Almacenamiento.
G’’	Módulo de Pérdida.
μ	Módulo de Poisson.
E*	Módulo Dinámico axial.
G*	Módulo Dinámico de corte.
NFU	neumático fuera de uso.
Pa	Pascal.

PAV	Preassure Aging Vassel (Envejecimiento en Cámara de Presión).
Rad/s	Radianes por segundo.
rpm	Revoluciones por minuto.
TR	Temperatura de referencia.
T	Temperatura.
η	Viscosidad absoluta
WLF	William-Landel-Ferry

Índice

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	3
Glosario.....	4
Índice.....	6
Índice de tablas.....	9
Índice de figuras.....	11
Índice de ecuaciones.....	18
1 Introducción.....	19
1.1 Descripción general.....	19
1.2 Objetivos generales.....	20
1.3 Objetivos específicos.....	20
1.4 Alcance del estudio.....	21
1.5 Estructura.....	21
2 Marco Teórico.....	22
2.1 Caracterización Reológica del asfalto.....	22
2.2 Comportamiento viscoelástico.....	23
2.3 Susceptibilidad del asfalto.....	25
2.3.1 Susceptibilidad a la temperatura y a la frecuencia de carga.....	25
2.3.2 Susceptibilidad al envejecimiento.....	26
2.4 Tipos de falla en pavimentos asfálticos.....	27
2.4.1 Agrietamiento por fatiga.....	27
2.4.2 Ahuellamiento.....	28
2.4.3 Agrietamiento térmico.....	28
2.5 Principio de superposición de tiempo – temperatura.....	29
2.5.1 Curva Maestra.....	29
2.5.2 Isócronas.....	30
2.5.3 Diagrama de Black.....	30
2.6 Rejuvenecedores líquidos y encapsulados.....	31
2.6.1 Aplicaciones de rejuvenecedores.....	32
2.6.2 Rejuvenecedores en la industria del asfalto.....	33
3 Estudio experimental.....	34
3.1 Materiales y preparación de la muestra.....	34

3.1.1	Materiales	34
3.1.2	Síntesis del líquido pirolítico.....	35
3.1.3	Síntesis del rejuvenecedor encapsulado	35
3.1.4	Mezclado del cemento asfáltico PAV con los rejuvenecedores líquidos y encapsulados ...	36
3.2	Metodología de ensayos	37
3.2.1	Caracterización reológica mediante barrido de frecuencia – temperatura.....	37
4	Resultados barridos de frecuencia – temperatura.....	41
4.1	Variabilidad de resultados en las muestras.....	41
4.2	Muestras de referencia.....	42
4.3	Muestras con rejuvenecedor líquido.....	44
4.3.1	Curvas maestras de módulo dinámico de corte	44
4.3.2	Curvas maestras de ángulo de fase	46
4.4	Muestras con rejuvenecedor encapsulado	47
4.4.1	Curva maestra de módulo dinámico de corte	48
4.4.2	Curva maestra de ángulo de fase	49
4.5	Comparación de resultados	50
4.6	Dosis óptima.....	52
5	Conclusiones	56
5.1	General	56
5.2	Futura investigación	57
6	Bibliografía.....	58
7	Anexo: Uso de reómetro de corte dinámico (DSR).....	62
7.1	Equipos complementarios	63
7.2	Preparación de la muestra.....	64
7.3	Uso del software RheoCompass para la realización del barrido de frecuencia y temperatura....	65
8	Anexo: Método automatizado para la confección de las curvas maestras.....	72
9	Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura	76
9.1	Cemento asfáltico CA-24	76
9.2	Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor líquido	79
9.3	Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor encapsulado	86
10	Anexo: Gráficos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura	89
10.1	Cemento asfáltico CA-24	89
10.2	Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor líquido	93
10.3	Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor encapsulado	

11	Anexo: Diagrama De Black	106
11.1	Cemento asfáltico CA-24	106
11.2	Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor líquido	108
11.3	Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor encapsulado 113	
12	Anexo: Curvas Maestras	116
12.1	Cemento asfáltico CA-24	116
12.2	Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor líquido	118
12.3	Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor encapsulado 126	
12.4	Coefficientes de variación (αT) y constantes de ecuación WLF	129

Índice de tablas

Tabla 2-1 Efecto de rejuvenecedores en las propiedades de los ligantes asfálticos. (Behnood, 2019).....	32
Tabla 3-1. Propiedades del ligante asfáltico CA-24 según el certificado de calidad proporcionado por Clasa S.A Asfaltos. (Clasa S.A Asfaltos).....	34
Tabla 3-2. Detalle y simbología de muestras de ligante asfáltico ensayadas. (Elaboración propia)	36
Tabla 3-3. Rango de temperaturas para utilización de platos paralelos del DSR. (Á. González, 2012)	38
Tabla 4-1. Criterio de precisión estimada para repetición de ensayos. Fuente: Tabla 3, ASTM D7175, 2015	41
Tabla 4-2. Porcentajes promedio de variación de resultados para 2 ensayos por muestras, destacando aquellas muestras que no cumplen con el criterio de aceptabilidad de repetición. (Elaboración propia) ...	41
Tabla 4-3. Resumen de resultados de ensayos para clasificación según criterios Superpave para las muestras de referencia. (Elaboración propia).....	42
Tabla 4-4 Cantidad de ensayos realizados por muestra. (Elaboración propia).....	44
Tabla 4-5 Criterio de falla por ahuellamiento y fatiga para todas las muestras ensayadas. (Elaboración propia)	52
Tabla 4-6 Intercepto de las curvas maestras para módulo dinámico de 6% y 9% de líquido pirolítico con la curva de ligante sin envejecer. (Elaboración propia)	54
Tabla 7-1 Masa de muestra de ligante asfáltico según plato de ensayo. (Á. González, 2012).....	65
Tabla 9-1. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-SE_P0. (Elaboración propia).....	76
Tabla 9-2. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-SE_P1. (Elaboración propia).....	76
Tabla 9-3. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-SE_P2. (Elaboración propia).....	77
Tabla 9-4. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-RTFO_P0. (Elaboración propia)	77
Tabla 9-5. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-RTFO_P1. (Elaboración propia)	78
Tabla 9-6. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-RTFO_P2. (Elaboración propia)	78
Tabla 9-7. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-PAV. (Elaboración propia).....	79
Tabla 9-8. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO1. (Elaboración propia)	79
Tabla 9-9. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia)	80
Tabla 9-10. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO3_P0. (Elaboración propia).....	80
Tabla 9-11. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO3_P1. (Elaboración propia).....	81
Tabla 9-12. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO3_P2. (Elaboración propia).....	81
Tabla 9-13. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO4_P1. (Elaboración propia).....	82
Tabla 9-14. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO4_P2. (Elaboración propia).....	82

Tabla 9-15. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO5_P1. (Elaboración propia).....	83
Tabla 9-16. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO5_P2. (Elaboración propia).....	83
Tabla 9-17. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO6_P1. (Elaboración propia).....	84
Tabla 9-18. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO6_P2. (Elaboración propia).....	84
Tabla 9-19. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO9_P1. (Elaboración propia).....	85
Tabla 9-20. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO9_P2. (Elaboración propia).....	85
Tabla 9-21. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia)	86
Tabla 9-22. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia)	86
Tabla 9-23. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC12_P0. (Elaboración propia)	87
Tabla 9-24. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC12_P1. (Elaboración propia)	87
Tabla 9-25. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia)	88
Tabla 12-1 Coeficientes de variación (αT) para curvas maestras del módulo dinámico de corte $ G^* $	129
Tabla 12-2 Coeficientes de variación (αT) para curvas maestras del ángulo de fase δ° . (Elaboración propia)	130
Tabla 12-3 Constantes K1 y k2 para ajuste mediante ecuación WLF de la curva maestra de módulo dinámico $ G^* $. (Elaboración propia)	131
Tabla 12-4 Constantes K1 y k2 para ajuste mediante ecuación WLF de la curva maestra de ángulo de fase δ° . (Elaboración propia)	131

Índice de figuras

Figura 2.1 Gráfico cualitativo del esfuerzo de corte en función de la tasa de deformación para materiales newtonianos y no newtonianos. (Papagiannakis et al., 2008)	22
Figura 2.2. Deformación cualitativa de un material viscoelástico frente a una carga constante en el tiempo. (Papagiannakis et al., 2008)	23
Figura 2.3 Desfase entre esfuerzo de corte y deformación (Á. González, 2012)	23
Figura 2.4 Desfase entre esfuerzo de corte y deformación: (a) Representa cuando no hay desfase entre las curvas y el ángulo de fase es 0°. (b) Representa cuando se alcanza el máximo desfase entre las curvas y el ángulo de fase en 90°. (Á. González, 2012)	24
Figura 2.5 Comparación del comportamiento viscoelástico entre dos ligantes asfálticos. (Á. González, 2012).....	25
Figura 2.6 Comparación cualitativa de las propiedades viscoelásticas de un ligante asfáltico frente a la acción de la temperatura y el tiempo de carga. T_1 y T_2 son temperaturas donde T_1 es mayor que T_2 , t_1 y t_2 son los tiempos de carga. (Papagiannakis et al., 2008).....	26
Figura 2.7 Variación a través del tiempo de la composición química de un ligante asfáltico (Read et al., 2003).....	27
Figura 2.8 Grafica ejemplo de la relación entre la rigidez y el tiempo de carga en el ensayo con el reómetro de viga de flexión.(Delgadillo Rodrigo, 2019)	29
Figura 2.9 (a) Familia de curvas de un cemento asfáltico a diferentes temperaturas, para mediciones del módulo dinámico en función del tiempo de carga. (b) Curvas ajustadas a la temperatura de referencia T_2 variando los tiempos de carga. (Papagiannakis et al., 2008).....	30
Figura 2.10 Gráfico a modo de ejemplo de isócrona con frecuencia de referencia de 10 rad/s para residuos de emulsiones a base de asfalto. (WARDLAW & Kenneth, 1992)	30
Figura 2.11. Ejemplo de diagrama de Black para resultados: (a) sin errores de medición y (b) con errores de medición. (Marasteanu & Anderson, 2001)	31
Figura 2.12 Mecanismo de ruptura de cápsulas con rejuvenecedor. Fuente: (García et al., 2011)); (Wang & Hao, 2021)	33
Figura 3.1 Proceso de pirólisis realizado en una planta a escala de gramos, utilizando un reactor de lecho fijo con neumáticos fuera de uso para producir líquido pirolítico. (Norambuena-Contreras et al., 2021)..	35
Figura 3.2. Proceso de encapsulamiento del líquido pirolítico en cápsulas bpoliméricas. (A. González et al., 2022).....	36
Figura 3.3. Reómetro de corte Dinámico Anton Paar modelo MCR 301, presente en el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) de la universidad técnica Federico Santa María. (Elaboración propia).....	37
Figura 3.4. Platos paralelos DSR. (a) plato inferior de 8 mm I-PP08, (b) plato inferior de 25 mm I-PP25, (c) Plato superior 25 mm PP25 y (d) plato superior de 8 mm PP08. (Á. González, 2012)	38
Figura 3.5 Ejemplo de la confección de curva maestra de G^* para muestra con 4% de líquido pirolítico. (a) Familia de curvas obtenidas directamente del ensayo de barrido de frecuencia – temperatura. (b) Curva maestra ajustada a 25°C tras realizar el desplazamiento de las curvas según el principio de superposición de tiempo – temperatura. (Elaboración propia)	40
Figura 3.6 Ejemplo de la confección de curva maestra de δ° para muestra con 4% de líquido pirolítico. (a) Familia de curvas obtenidas directamente del ensayo de barrido de frecuencia – temperatura. (b) Curva maestra ajustada a 25°C tras realizar el desplazamiento de las curvas según el principio de superposición de tiempo – temperatura. (Elaboración propia).....	40
Figura 4.1 Diagrama de Black para ligante original, envejecido en RTFO y envejecido en PAV. (Elaboración propia).....	43

Figura 4.2 (a) Curva maestra de módulo dinámico para las muestras de referencia. (b) Curvas maestras del ángulo de fase para las muestras de referencia. (Elaboración propia).....	43
Figura 4.3 Diagrama de Black de muestras con rejuvenecedor líquido. (Elaboración propia)	44
Figura 4.4 Curva maestra del módulo dinámico (G^*) de muestras con rejuvenecedor líquido. (Elaboración propia)	45
Figura 4.5 Curva maestra del módulo dinámico (G^*) de muestras con rejuvenecedor líquido, para frecuencias menores a 0,1 rad/s. (Elaboración propia).....	46
Figura 4.6 Curva maestra del módulo dinámico (G^*) de muestras con rejuvenecedor líquido, para frecuencias mayores a 0,1 rad/s. (Elaboración propia).....	46
Figura 4.7 Curva maestra del ángulo de fase (δ°) de muestras con rejuvenecedor líquido. (Elaboración propia)	47
Figura 4.8 Diagrama de Black de muestras con rejuvenecedor encapsulado. (Elaboración propia).....	48
Figura 4.9 Curva maestra del módulo dinámico (G^*) de muestras con rejuvenecedor encapsulado. (Elaboración propia).....	49
Figura 4.10 Curva maestra del ángulo de fase (δ°) de muestras con rejuvenecedor encapsulado. (Elaboración propia).....	49
Figura 4.11 Comparación de resultados módulo dinámico de corte entre muestras con rejuvenecedor líquido y encapsulado: (a) curva maestra del módulo dinámico de corte para muestras con menor diferencia; (b) valores del módulo dinámico de corte asociados a frecuencias 0,001 rad/s, 10 rad/s, 1.000 rad/s. (Elaboración propia).....	51
Figura 4.12 Comparación de resultados ángulo de fase entre muestras con rejuvenecedor líquido y encapsulado: (a) curva maestra de ángulo de fase para muestras con menor diferencia; (b) valores del ángulo de fase asociados a frecuencias 0,001 rad/s, 10 rad/s, 1.000 rad/s. (Elaboración propia)	51
Figura 4.13 (a) Curvas maestras de módulo dinámico de 6% y 9% de líquido pirolítico y del ligante sin envejecer; (b) Ajuste cuadrático para las curvas con 6% y 9% de líquido pirolítico y ligante sin envejecer. (Elaboración propia).....	54
Figura 4.14 Comparación entre muestra PAV-PO6 y PAV-PO9. (a) curvas maestras de G^* para bajas frecuencias; (b) Curvas maestras de δ° para altas frecuencias. (Elaboración propia)	54
Figura 4.15 Diferencia porcentual de las muestras PAV-PO6 y PAV-PO9 con respecto al ligante sin envejecer a diferentes frecuencias. (a) Diferencia porcentual del módulo dinámico G^* ; (b) Diferencia porcentual del ángulo de fase δ° . (Elaboración propia).....	55
Figura 7.1 Esquema del mecanismo de funcionamiento del reómetro de corte dinámico. (Papagiannakis et al., 2008).....	62
Figura 7.2 Equipos complementarios al reómetro de corte dinámico. (a) Compresor de aire; (b) Sistema de filtros; (c) Condensador; (d) Peltier H-PTD 200. (Á. González, 2012) y (Elaboración propia)	63
Figura 7.3 Muestras de ligante asfáltico de referencia, Ligante PAV con rejuvenecedor líquido y Ligante PAV con rejuvenecedor encapsulado. (Elaboración propia).....	64
Figura 7.4 Molde de silicona con muestra de ligante asfáltico para los platos paralelos de 8 mm. (Elaboración propia).....	65
Figura 7.5 Captura del software RheoCompass donde se presentan plantillas de ensayos para asfaltos. Señalando ensayos relacionados a superposición de tiempo – temperatura. (Elaboración propia).....	66
Figura 7.6 Captura del software RheoCompass, inicialización del dispositivo. (Elaboración propia)	66
Figura 7.7 Captura del software RheoCompass. (a) Posición de carga; (b) posición de preparación de la muestra. (Elaboración propia)	67
Figura 7.8 Captura del software RheoCompass. Ajuste de temperatura para ablandamiento de la muestra. (Elaboración propia).....	67

Figura 7.9 Captura del software RheoCompass. Temperatura de ajuste para realizar ensayo del plato de 25 mm. (Elaboración propia).....	68
Figura 7.10. (a) Ajuste para lo posición de medición; (b) Ejemplo de muestra colocada entre los platos de 8 mm. (Elaboración propia).....	68
Figura 7.11 Captura del software RheoCompass. Etapa de realización del ensayo de barrido de frecuencia – temperatura. (Elaboración propia).....	69
Figura 7.12 Esquema del bucle para realizar el ensayo. (Elaboración propia).....	69
Figura 7.13 Ejemplo de configuración de los datos de ingreso para el barrido de temperatura. (Elaboración propia)	69
Figura 7.14 Ejemplo de la configuración para el barrido de frecuencias. (Elaboración propia)	70
Figura 7.15 Captura del software RheoCompass de etapas del proceso de retiro de la muestra ensayada. (a) aumento de temperatura; (b) separación de los platos y (c) Disminución de temperatura para poder retirar los platos del DSR. (Elaboración propia).....	70
Figura 7.16 Ejemplo de la familia de curvas del barrido de frecuencia – temperatura, entregado por el software RheoCompass. (Elaboración propia)	71
Figura 7.17 Ejemplo de tabla de datos del barrido de frecuencia – temperatura, entregado por el software RheoCompass. (Elaboración propia).....	71
Figura 8.1 Captura ejemplo de planilla Excel para realizar el ajuste de la curva maestra a la curva de referencia de 25°C. En la imagen se destacan los datos de entrada correspondiendo a la frecuencia (destacado azul), el módulo dinámico (destacado en morado) y la temperatura de la curva a ser ajustada (destacado rojo), además de los factores de ajuste obtenidos mediante la estimación lineal para la temperatura señalada. Que corresponden a el “factor” como “a” y el “exponente” como “b”. (Elaboración propia)	72
Figura 8.2. gráfico donde se representa como se desplazan las curvas al aplicar el factor de corrimiento auxiliar. (Elaboración propia).....	73
Figura 8.3 Captura ejemplo de planilla Excel, donde se destacan los valores “corridos” al aplicar el factor de corrimiento auxiliar, los valores medidos de la curva de referencia con la que se busca generar el ajuste (destacado rojo) y las diferencias cuadradas que se buscan minimizar (destacado azul). (Elaboración propia)	74
Figura 8.4 Presenta la suma de todas las diferencias cuadradas y el Otón que activa la iteración de la macro. (Elaboración propia).....	74
Figura 8.5 Código que minimiza la diferencia de la SSE_{Total} . (Elaboración propia)	74
Figura 8.6 Captura de planilla Excel a modo de ejemplo para calcular las constantes k1 y k2 mediante la ecuación WLF, de la cual mediante Macro se iteran los valores para minimizar la suma de las diferencias cuadráticas entre el factor de corrimiento y la ecuación WLF. (Elaboración propia).....	75
Figura 8.7 Código de Macro para encontrar las constantes K1 y K2 de la ecuación WLF. (Elaboración propia)	75
Figura 10.1. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-SE_P0. (Elaboración propia).....	89
Figura 10.2. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-SE_P0. (Elaboración propia).....	89
Figura 10.3. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-SE_P1. (Elaboración propia).....	90
Figura 10.4. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-SE_P1. (Elaboración propia).....	90
Figura 10.5. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P0. (Elaboración propia).....	90

Figura 10.6. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P0. (Elaboración propia).....	91
Figura 10.7. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P1. (Elaboración propia).....	91
Figura 10.8. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P1. (Elaboración propia).....	91
Figura 10.9. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P2. (Elaboración propia).....	92
Figura 10.10. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P2. (Elaboración propia).....	92
Figura 10.11. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA_PAV. (Elaboración propia).....	92
Figura 10.12. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-PAV. (Elaboración propia).....	93
Figura 10.13. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO1. (Elaboración propia).....	93
Figura 10.14. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO1. (Elaboración propia).....	94
Figura 10.15. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia).....	94
Figura 10.16. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia).....	94
Figura 10.17. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_P0. (Elaboración propia).....	95
Figura 10.18. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_P0. (Elaboración propia).....	95
Figura 10.19. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_P1. (Elaboración propia).....	95
Figura 10.20. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_P1. (Elaboración propia).....	96
Figura 10.21. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_P2. (Elaboración propia).....	96
Figura 10.22. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_P2. (Elaboración propia).....	96
Figura 10.23. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO4_P1. (Elaboración propia).....	97
Figura 10.24. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO4_P1. (Elaboración propia).....	97
Figura 10.25. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO4_P2. (Elaboración propia).....	97
Figura 10.26. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO4_P2. (Elaboración propia).....	98
Figura 10.27. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO5_P1. (Elaboración propia).....	98
Figura 10.28. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO5_P1. (Elaboración propia).....	98

Figura 10.29. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO5_P2. (Elaboración propia).....	99
Figura 10.30. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO5_P2. (Elaboración propia).....	99
Figura 10.31. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO6_P1	99
Figura 10.32. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO6_P1. (Elaboración propia).....	100
Figura 10.33. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO6_P2. (Elaboración propia).....	100
Figura 10.34. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO6_P2. (Elaboración propia).....	100
Figura 10.35. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO9_P1. (Elaboración propia).....	101
Figura 10.36. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO9_P1. (Elaboración propia).....	101
Figura 10.37. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO9_P2. (Elaboración propia).....	101
Figura 10.38. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO9_P2. (Elaboración propia).....	102
Figura 10.39. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia).....	102
Figura 10.40. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia).....	103
Figura 10.41. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia).....	103
Figura 10.42. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia).....	103
Figura 10.43. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P0. (Elaboración propia).....	104
Figura 10.44. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P0. (Elaboración propia).....	104
Figura 10.45. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P1. (Elaboración propia).....	104
Figura 10.46. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P1. (Elaboración propia).....	105
Figura 10.47. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia).....	105
Figura 10.48. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia).....	105
Figura 11.1 Diagrama de Black muestra CA-SE_P0. (Elaboración propia)	106
Figura 11.2 Diagrama de Black muestra CA-SE_P1. (Elaboración propia)	106
Figura 11.3 Diagrama de Black muestra CA-SE_P2. (Elaboración propia)	107
Figura 11.4 Diagrama de Black muestra CA-RTFO_P0. (Elaboración propia).....	107
Figura 11.5 Diagrama de Black muestra CA-RTFO_P1. (Elaboración propia).....	107
Figura 11.6 Diagrama de Black muestra CA-RTFO_P2. (Elaboración propia).....	108
Figura 11.7 Diagrama de Black muestra CA-PAV. (Elaboración propia)	108
Figura 11.8 Diagrama de Black muestra PAV-PO1. (Elaboración propia).....	109

Figura 11.9 Diagrama de Black muestra PAV-PO2. (Elaboración propia).....	109
Figura 11.10 Diagrama de Black muestra PAV-PO3_P0. (Elaboración propia)	109
Figura 11.11 Diagrama de Black muestra PAV-PO3_P1. (Elaboración propia)	110
Figura 11.12 Diagrama de Black muestra PAV-PO3_P2. (Elaboración propia)	110
Figura 11.13 Diagrama de Black muestra PAV-PO4_P1. (Elaboración propia)	110
Figura 11.14 Diagrama de Black muestra PAV-PO4_P2. (Elaboración propia)	111
Figura 11.15 Diagrama de Black muestra PAV-PO5_P1. (Elaboración propia)	111
Figura 11.16 Diagrama de Black muestra PAV-PO5_P2. (Elaboración propia)	111
Figura 11.17 Diagrama de Black muestra PAV-PO6_P1. (Elaboración propia)	112
Figura 11.18 Diagrama de Black muestra PAV-PO6_P2. (Elaboración propia)	112
Figura 11.19 Diagrama de Black muestra PAV-PO9_P1. (Elaboración propia)	112
Figura 11.20 Diagrama de Black muestra PAV-PO9_P2. (Elaboración propia)	113
Figura 11.21 Diagrama de Black muestra PAV-POC6. (Elaboración propia) . (Elaboración propia).....	113
Figura 11.22 Diagrama de Black muestra PAV-POC9. (Elaboración propia).....	114
Figura 11.23 Diagrama de Black muestra PAV-POC12_P0. (Elaboración propia).....	114
Figura 11.24 Diagrama de Black muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia).....	114
Figura 11.25 Diagrama de Black muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia).....	115
Figura 12.1 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra CA-SE. (Elaboración propia).....	116
Figura 12.2 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra CA-SE. (Elaboración propia)	116
Figura 12.3 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra CA-RTFO. (Elaboración propia)	117
Figura 12.4 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra CA-RTFO. (Elaboración propia).....	117
Figura 12.5 Curva maestra de módulo dinámico para la muestra CA-PAV. (Elaboración propia)	118
Figura 12.6 Curva maestra de ángulo de fase para la muestra CA-PAV. (Elaboración propia)	118
Figura 12.7 Curva maestra de módulo dinámico de la muestra PAV-PO1. (Elaboración propia).....	119
Figura 12.8 Curva maestra de ángulo de fase de la muestra PAV-PO1. (Elaboración propia).....	119
Figura 12.9 Curva maestra de módulo dinámico de la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia).....	120
Figura 12.10 Curva maestra de ángulo de fase de la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia).....	120
Figura 12.11 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO3. (Elaboración propia).....	121
Figura 12.12 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO3. (Elaboración propia).....	121
Figura 12.13 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO4. (Elaboración propia).....	122
Figura 12.14 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO4. (Elaboración propia).....	122
Figura 12.15 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO5. (Elaboración propia).....	123
Figura 12.16 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO5. (Elaboración propia) . (Elaboración propia).....	123
Figura 12.17 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO6. (Elaboración propia).....	124
Figura 12.18 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO6. (Elaboración propia).....	124

Figura 12.19 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO9. (Elaboración propia).....	125
Figura 12.20 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO9. (Elaboración propia).....	125
Figura 12.21 Curva maestra de módulo dinámico de la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia)	126
Figura 12.22 Curva maestra de ángulo de fase de la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia)	126
Figura 12.23 Curva maestra de módulo dinámico de la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia)	127
Figura 12.24 Curva maestra de ángulo de fase de la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia)	127
Figura 12.25 Curva maestra de módulo dinámico del ensayo P1 de la muestra PAV-POC12. (Elaboración propia)	128
Figura 12.26 Curva maestra de ángulo de fase del ensayo P1 de la muestra PAV-POC12. (Elaboración propia)	128

Índice de ecuaciones

Ecuación 2-1.....	24
Ecuación 2-2.....	24
Ecuación 2-3.....	24
Ecuación 2-4.....	25
Ecuación 2-5.....	25
Ecuación 2-6.....	28
Ecuación 2-7.....	28
Ecuación 2-8.....	28
Ecuación 2-9.....	28
Ecuación 2-10.....	29
Ecuación 2-11.....	30
Ecuación 2-12.....	30
Ecuación 3-1.....	39
Ecuación 3-2.....	39
Ecuación 7-1.....	62
Ecuación 7-2.....	62
Ecuación 8-1.....	72
Ecuación 8-2.....	73
Ecuación 8-3.....	74

1 Introducción

1.1 Descripción general

Se estima que Chile posee una red de carreteras interurbanas cuya longitud se aproxima a los 86000 Km, de las cuales al menos un 34% se encuentra construido mediante pavimentos asfálticos o presenta algún tratamiento superficial mediante este material. Siendo las mezclas asfálticas uno de los materiales más utilizados para la construcción de pavimentos de carreteras y pistas de aeropuertos en el mundo. Donde en Chile el 86% de la red vial pavimentada, que es equivalente a 18000 Km, se encuentra construida con mezclas asfálticas. (Dirección de Vialidad, 2020). Dado lo anterior, con el fin de garantizar la calidad de las infraestructuras viales y, por lo tanto, asegurar su duración en el paso del tiempo, es necesario que estas se construyan con materiales apropiados buscando la fabricación de mezclas asfálticas más duraderas (Valdés-Vidal et al., 2015).

Los pavimentos asfálticos durante la vida de servicio se ven expuestos a diferentes condiciones ambientales que, combinadas con las cargas de tráfico, en el paso del tiempo terminan por deteriorar el material al reducir sus propiedades químicas y físico-mecánicas. Algunos de los principales deterioros que experimentan los pavimentos asfálticos durante su vida de servicio son el agrietamiento térmico y el agrietamiento por fatiga, este último debido a la repetición de cargas de tráfico. El agrietamiento de los pavimentos asfálticos se ve facilitado debido al envejecimiento del cemento asfáltico, causado por la oxidación y evaporación de sus componentes volátiles, lo que resulta en una rigidización del material (G. D. Airey, 2003).

Para conservar las propiedades de los pavimentos asfálticos y en consecuencia poder aumentar su vida de servicio, estos deben ser reparados mediante diversos métodos de mantenimiento, suponiendo un costo adicional a los organismos encargados del mantenimiento vial (Thenoux et al., 2007).

Para tratar los efectos del envejecimiento de los pavimentos asfálticos, existen soluciones basadas en agentes rejuvenecedoras que tienen la capacidad de alterar las propiedades reológicas fundamentales de los ligantes asfálticos envejecidos, asemejándolas a un estado de menor envejecimiento (Karlsson & Isacson, 2003).

Una de las técnicas más utilizadas es aplicar el rejuvenecedor en la superficie del pavimento asfáltico, sin embargo, este proceso está limitado sólo a los primeros centímetros del pavimento (Chiu & Lee, 2006). A partir de esto, durante los últimos años se han desarrollado nuevas soluciones que incluyen el uso de rejuvenecedores encapsulados con la capacidad de promover la autorreparación de microgrietas en el interior de las mezclas asfálticas envejecidas (Gonzalez-Torre & Norambuena-Contreras, 2020). Esta solución consiste en cápsulas que contienen rejuvenecedores en su interior, que son adicionadas a la mezcla asfáltica en su proceso inicial de fabricación. Una vez que las cápsulas están dentro del pavimento asfáltico envejecido, estas se rompen por el efecto combinado de las cargas de tráfico y el agrietamiento del cemento asfáltico, liberando el agente rejuvenecedor contenido en su interior y restaurando la composición química del material envejecido. Esto hace que el cemento asfáltico reduzca su viscosidad fluyendo a través de las microgrietas abiertas, sellándolas de forma autónoma (García et al., 2010).

Estudios recientes (Norambuena-Contreras et al., 2018), han demostrado que los rejuvenecedores encapsulados pueden recuperar hasta en un 60% la resistencia mecánica original de las mezclas asfálticas, convirtiendo a los rejuvenecedores encapsulados en una tecnología de alto valor para extender la vida útil de los pavimentos. En Chile, el desarrollo de las tecnologías de rejuvenecedores encapsulados para la autorreparación de grietas en cementos asfálticos envejecidos es aún incipiente, y sus primeros desarrollos sólo se limitan a la preparación de cápsulas basadas en polímeros y usando técnicas convencionales de encapsulamiento (Norambuena-Contreras et al., 2020).

Frente a las limitaciones ambientales que implica el uso de soluciones líquidas polimerizadas derivadas del petróleo, o en su defecto, soluciones encapsuladas basadas en polímeros sintéticos, se buscan y estudian alternativas más sustentables, algunas de estas alternativas tienen el fin de convertir materiales de desecho urbanos en materias primas para la producción industrial, reduciendo el consumo de recursos naturales y mejorando el reciclaje de materiales de desecho (Piao et al., 2021).

Entre los diferentes residuos generados en las áreas urbanas se encuentran los neumáticos fuera de uso (NFU), en Chile se estima que se producen 140000 toneladas de NFUs, de los cuales solo el 17% tienen un manejo ambiental adecuado (Cámara de la industria del neumático de Chile, 2019).

Investigaciones recientes de Norambuena-Contreras et al. han demostrado que la fracción líquida obtenida del proceso de pirólisis de NFU contiene hasta un 98% p/p de maltenos (incl. compuestos aromáticos, cicloalquenos e hidrocarburos alifáticos). Además, se ha probado la efectividad de este líquido como rejuvenecedor, demostrando capacidad para reducir la viscosidad y reparar microgrietas en ligantes envejecidos hasta en un 100% (Norambuena-Contreras et al., 2021). Por lo que puede ser utilizado como un producto rejuvenecedor de alto valor.

1.2 Objetivos generales

El objetivo de este estudio se centró en evaluar experimentalmente el efecto de rejuvenecedores líquidos y encapsulados, desarrollados a partir de la pirólisis de neumáticos fuera de uso, en las propiedades reológicas de un ligante asfáltico con envejecimiento secundario. Para lograr este objetivo se analizaron los datos de módulo dinámico y ángulo de fase, recopilados de ensayos de barrido de frecuencia-temperatura. Los ensayos se realizaron mediante la utilización de un Reómetro de Corte Dinámico (DSR Anton Paar, MCR-301). Los resultados de estos ensayos permiten estimar la eficacia del líquido pirolítico a base de NFU como un rejuvenecedor en función de las propiedades reológicas, además de mostrar que proporciones de líquido o cápsulas generan mayor variación respecto al ligante asfáltico envejecido sin rejuvenecedor.

1.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos contemplan la realización de curvas maestras para las diferentes proporciones de rejuvenecedor líquido y encapsulado, tanto para el módulo dinámico como el ángulo de fase. La comparación entre los resultados de las muestras con rejuvenecedor y de las muestras sin rejuvenecedor en los diferentes niveles de envejecimiento, Además de realizar una comparación entre muestras con rejuvenecedor líquido y rejuvenecedor encapsulado.

1.4 Alcance del estudio

El estudio se realizó utilizando un ligante CA-24 el que correspondió a una clasificación PG 64-22 en Superpave y los resultados obtenidos no pueden ser extrapolado a otros tipos de ligantes.

No se puede interpolar o extrapolar los resultados para proporciones de rejuvenecedor no analizadas, pues su comportamiento se encuentra fuera del alcance de este estudio.

Los resultados de las curvas maestras no pueden utilizarse para definir la resistencia a la fatiga y al ahuellamiento de la clasificación Superpave y solo pueden utilizarse a modo comparativo o de referencia.

Este estudio no contempla la sensibilidad del rejuvenecedor frente al envejecimiento ni el comportamiento del ligante a temperaturas inferiores a los 5°C ni superiores a los 75°C.

1.5 Estructura

La memoria se encuentra estructurada en 6 capítulos, los cuales son descritos a continuación.

Capítulo 1: Introducción

Capítulo 2: Describe el comportamiento viscoelástico del asfalto y se detallando los principales parámetros que caracterizan dicho comportamiento. Presenta el efecto de las variaciones de frecuencia de carga y temperatura, así como el efecto del envejecimiento. Presenta las características, tipos y usos de rejuvenecedores.

Capítulo 3: Presenta los materiales y la metodología de los ensayos realizados.

Capítulo 4: Presenta los resultados, análisis y comparaciones.

Capítulo 5: Se presentan las conclusiones del estudio.

Capítulo 6: Bibliografía.

El resto de los capítulos corresponden a los anexos de este trabajo.

2 Marco Teórico

2.1 Caracterización Reológica del asfalto

La reología estudia la capacidad de un material de deformarse o fluir al encontrarse bajo efecto de esfuerzos generados por cargas externas. La composición de los materiales ocasiona diferentes formas de responder a la acción de estas cargas. Aquellos materiales que tras ser deformados bajo la acción de cargas, recuperan completamente su forma presentan un comportamiento elástico, cumpliendo con la Ley de Hook. En el caso contrario, cuando los materiales actúan como un fluido y sufren deformaciones irreversibles frente a la acción de esfuerzos, presentan un comportamiento viscoso. Si la relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de deformación presentan un comportamiento lineal (Figura 2.1) se tiene un fluido newtoniano donde la pendiente de la curva representa la viscosidad absoluta (η). Este tipo de relación presenta que la viscosidad es independiente de la tasa de deformación, en el caso de un fluido newtoniano toda la energía aplicada es disipada y el líquido no vuelve a su estado original cuando la carga es retirada. El termino no newtoniano se emplea cuando la viscosidad si es dependiente de la tasa de deformación de corte.

Los ligantes asfálticos presentan un comportamiento mixto, es decir, viscoelástico el cual dependerá de sus propiedades y de las condiciones de carga y temperatura a las que se encuentre sometido. En la Figura 2.2 se presenta el comportamiento de deformación de un material asfáltico al ser sometido a una carga constante durante un tiempo determinado. En el tramo inicial de deformación se observa una deformación instantánea, al momento que se aplica la carga, seguida por un aumento de deformación a una tasa decreciente en el tiempo. Luego de retirada la carga el material se recupera paulatinamente de la deformación sin llegar a su estado inicial. Lo recuperado corresponde a la deformación elástica, en cambio la deformación irrecuperable corresponde a la deformación viscosa del material.

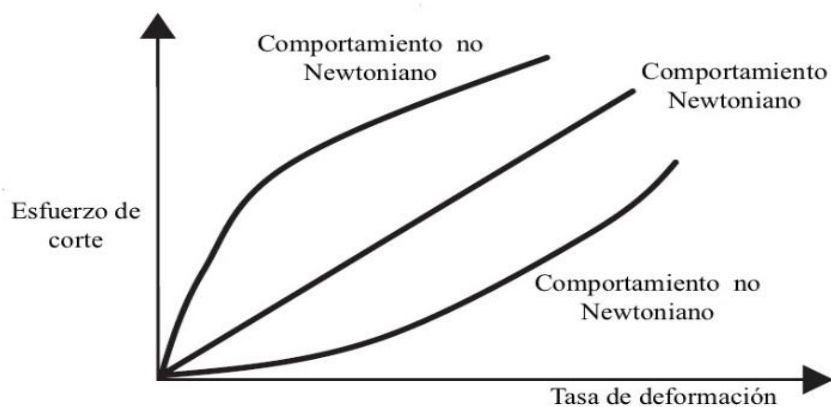


Figura 2.1 Gráfico cualitativo del esfuerzo de corte en función de la tasa de deformación para materiales newtonianos y no newtonianos. (Papagiannakis et al., 2008)

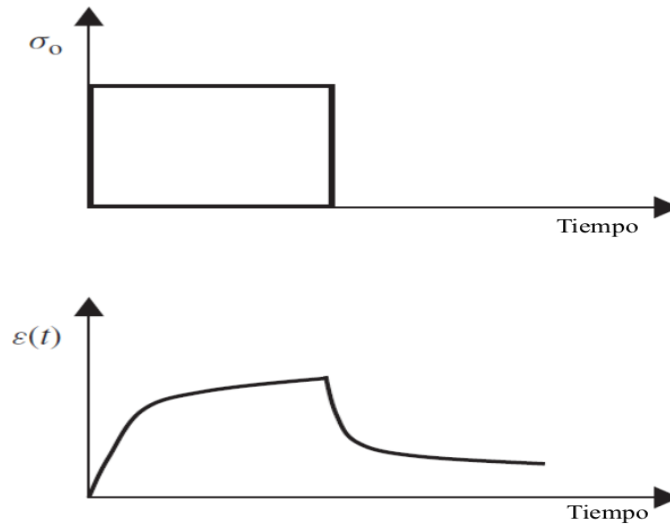


Figura 2.2. Deformación cualitativa de un material viscoelástico frente a una carga constante en el tiempo. (Papagiannakis et al., 2008)

2.2 Comportamiento viscoelástico

Los materiales viscoelásticos combinan el comportamiento de un sólido elástico y un líquido viscoso, donde para caracterizar estos materiales son sometidos a esfuerzos sinusoidales cuya respuesta de deformación también presenta forma sinusoidal, pero presentando un desfase entre ambas curvas, tal como se presenta en la Figura 2.3. Al desfase entre las curvas se le denomina ángulo de fase. Si el ángulo de fase es 0° , es decir, no existe un desfase entre la carga sinusoidal y la respuesta de deformación, el material se comporta como un sólido elástico, en cambio si este desfase es de 90° lo que implica que las curvas se encuentran completamente desfazadas una de la otra, el material se comporta como un líquido viscoso, esto se puede apreciar en la Figura 2.4 (a) y (b) respectivamente.

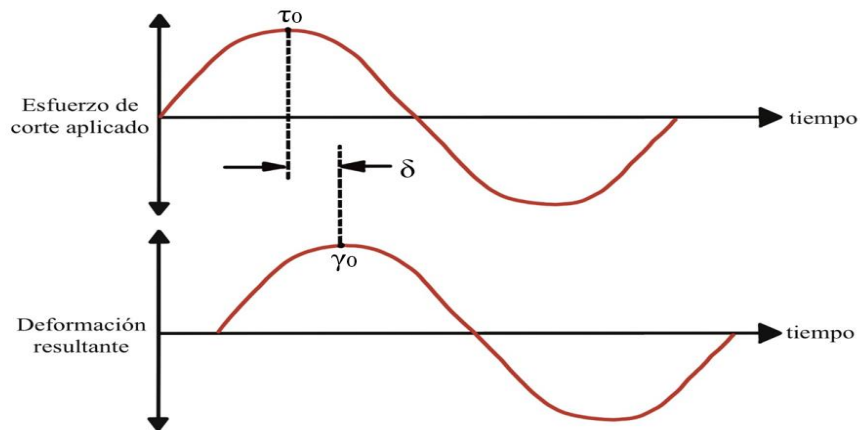


Figura 2.3 Desfase entre esfuerzo de corte y deformación (Á. González, 2012)

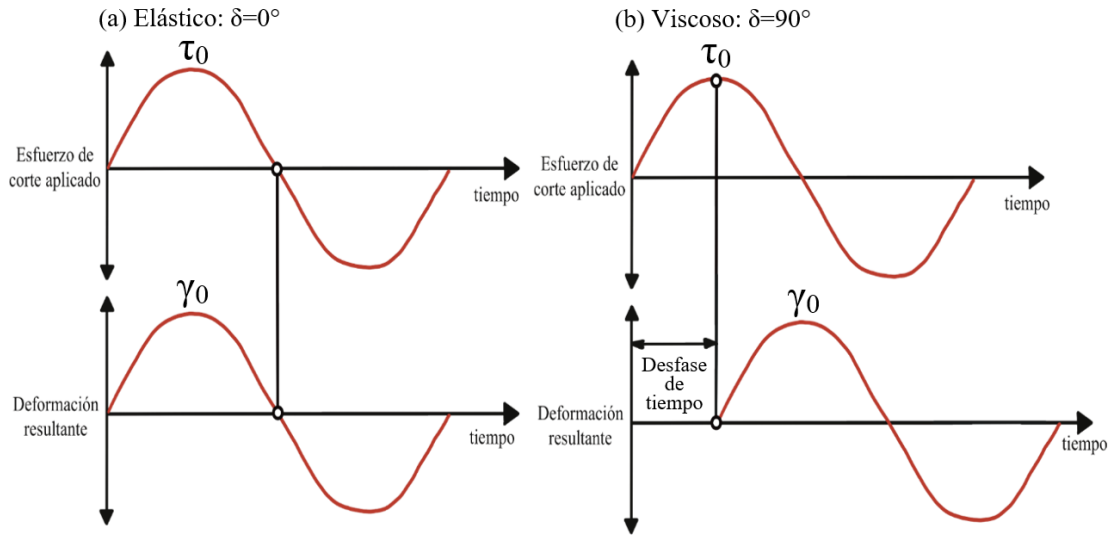


Figura 2.4 Desfase entre esfuerzo de corte y deformación: (a) Representa cuando no hay desfase entre las curvas y el ángulo de fase es 0° . (b) Representa cuando se alcanza el máximo desfase entre las curvas y el ángulo de fase en 90° . (Á. González, 2012)

Por otra parte, el cociente entre la amplitud de esfuerzo y la amplitud de deformación se conoce como módulo dinámico y sirve para caracterizar la rigidez del ligante asfáltico. En las Ecuación 2-1 y Ecuación 2-2 se presenta el módulo dinámico que se denota como módulo dinámico axial (E^*) para esfuerzos axiales y como módulo dinámico de corte (G^*) para esfuerzos de corte. Ambos parámetros se pueden relacionar entre sí según la Ecuación 2-3, que depende del módulo de Poisson (μ), esta relación considera a los betunes asfálticos como materiales isotrópicos e incompresibles.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1 + \mu(t))} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Finalmente, el módulo dinámico y el ángulo de fase son las propiedades fundamentales necesarias para describir el comportamiento viscoelástico de los ligantes asfálticos. Donde estos parámetros se pueden relacionar entre sí y descomponerse en el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') los cuales son indicadores de del grado de elasticidad y viscosidad de un ligante. Estos parámetros se presentan en la Ecuación 2-4 y Ecuación 2-5 respectivamente. En la Figura 2.5 se aprecia la relación entre el módulo dinámico y el ángulo de fase, se debe notar que no hay una relación proporcional entre el módulo y el ángulo de fase, pudiendo haber dos ligantes con igual módulo dinámico de corte, pero diferentes ángulos de fase, lo que implicaría que, aunque

tengan la misma rigidez uno tendrá un comportamiento más viscoso y por lo tanto será más susceptible a las deformaciones. Para este caso G^*_1 presenta un comportamiento más viscoso y menos elástico que G^*_2 .

$$G' = |G^*| \cos(\delta) \quad \text{Ecuación 2-4}$$

$$G'' = |G^*| \text{sen}(\delta) \quad \text{Ecuación 2-5}$$

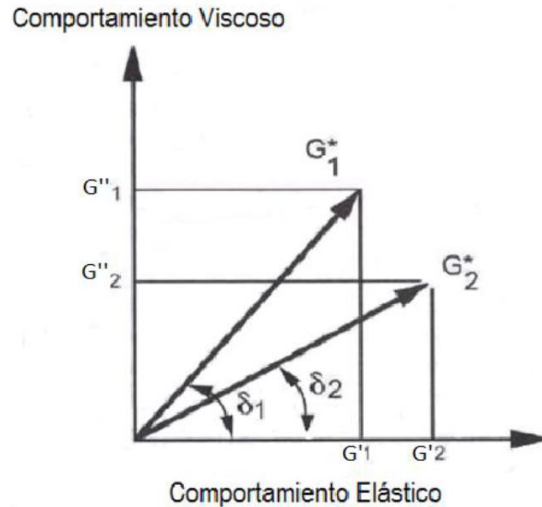


Figura 2.5 Comparación del comportamiento viscoelástico entre dos ligantes asfálticos. (Á. González, 2012)

2.3 Susceptibilidad del asfalto

Los ligantes asfálticos no presentan propiedades fijas, es decir, tanto el módulo dinámico como el ángulo de fase son variables dependientes, sujetos a efectos externos como la temperatura, las variaciones en el tiempo de carga y al envejecimiento.

2.3.1 Susceptibilidad a la temperatura y a la frecuencia de carga

La proporción entre el comportamiento elástico y viscoso del asfalto depende de la temperatura y la frecuencia de carga a la que es sometido. El aumento de temperatura genera aumento en el comportamiento viscoso y reducción del comportamiento elástico volviendo el material más blando y con menor viscosidad, lo que se traduce en un mayor ángulo de fase y menor módulo dinámico. La misma situación ocurre al disminuir la frecuencia de carga, esto se refiere a que el material se encontrará más tiempo bajo una carga, por ejemplo, un vehículo circulando a baja velocidad. En el caso contrario, si se disminuye la temperatura o se aumenta la frecuencia de carga, el asfalto se vuelve más rígido obteniendo valores más altos de módulo y menores ángulos de fase.

En la Figura 2.6 se observa el comportamiento mencionado para el módulo dinámico, el cual disminuye con el aumento de la temperatura y el tiempo de carga (inversamente proporcional a la frecuencia de carga).

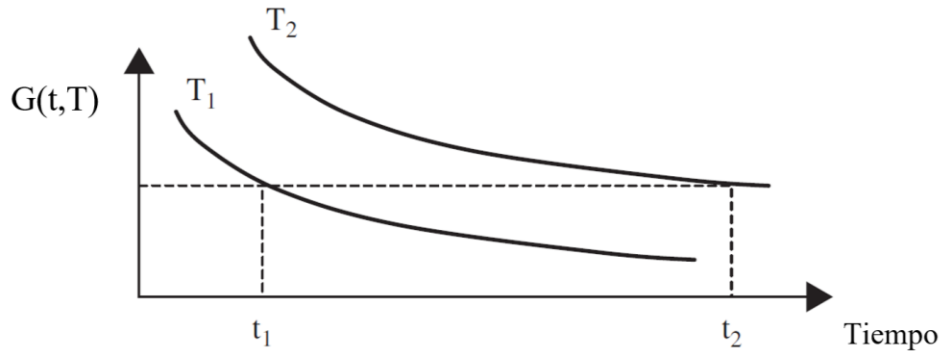


Figura 2.6 Comparación cualitativa de las propiedades viscoelásticas de un ligante asfáltico frente a la acción de la temperatura y el tiempo de carga. T_1 y T_2 son temperaturas donde T_1 es mayor que T_2 , t_1 y t_2 son los tiempos de carga. (Papagiannakis et al., 2008)

2.3.2 Susceptibilidad al envejecimiento

El envejecimiento hace referencia a los cambios generados en la estructura o composición molecular del asfalto por efecto de la temperatura y el oxígeno, ocasionando que el material se vuelva más rígido y frágil.

El ligante asfáltico se puede definir como un sistema que se separa en cuatro fracciones conocidas como fracciones SARA, siendo estos, en orden creciente de peso molecular, los saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos.

El envejecimiento puede ser causado por diferentes mecanismos, como la volatilización de los hidrocarburos, la ruptura entre enlaces moleculares, formándose así nuevas estructuras moleculares y a la oxidación, proceso donde el oxígeno reacciona con las moléculas orgánicas que componen el asfalto alterando su composición original. Ocasionado aumento de la fracción de mayor peso molecular siendo estas las resinas y asfaltenos de manera que el ligante asfáltico incrementa su dureza, viscosidad y punto de ablandamiento.

En términos simples la composición química de los ligantes asfálticos se puede dividir en 2 tipos de componentes: asfaltenos y maltenos que engloba a los saturados, aromáticos y resinas. Donde, los mecanismos de envejecimiento mencionados anteriormente terminan por alterar la relación entre estos componentes ocasionando la reducción de maltenos y el incremento del contenido de asfaltenos (Behnood, 2019) que explica la rigidización del material que facilitará su agrietamiento.

Se identifican dos tipos de envejecimiento a lo largo de la vida del betún asfáltico, envejecimiento primario y envejecimiento secundario. El envejecimiento primario corresponde al envejecimiento que se produce durante el proceso de mezclado en planta, almacenamiento y colocación de la mezcla asfáltica. Se atribuye principalmente a la pérdida de volátiles y a la oxidación, Este envejecimiento es simulado en laboratorio mediante ensaye de película delgada rotatoria (rolling thin-film oven - RTFO), de acuerdo a ASTM D 2872, 2019. Por otra parte, el envejecimiento secundario Corresponde al envejecimiento que sufre el asfalto durante la vida de servicio del pavimento. Se debe principalmente a las condiciones ambientales que afecten al pavimento (Á. González, 2012). Es simulado en laboratorio mediante cámara de envejecimiento a presión (pressure aging vessel - PAV) que es descrito en la norma (ASTM D6521, 2019). En la Figura 2.7

se observa el comportamiento de los componentes de un ligante asfáltico durante los diferentes mecanismos de envejecimiento.

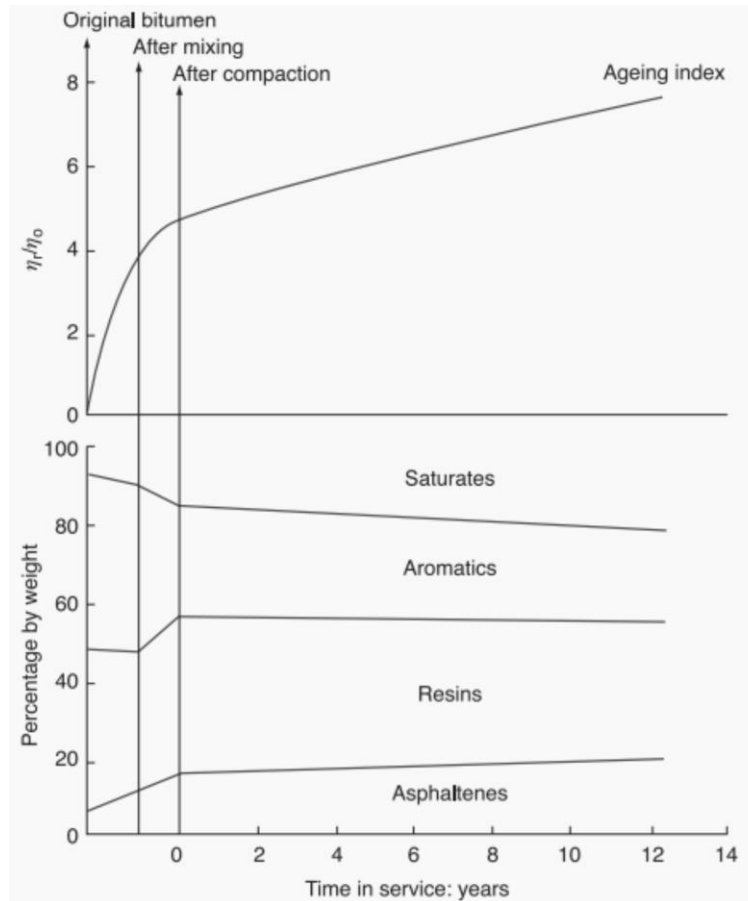


Figura 2.7 Variación a través del tiempo de la composición química de un ligante asfáltico (Read et al., 2003).

2.4 Tipos de falla en pavimentos asfálticos

2.4.1 Agrietamiento por fatiga

El agrietamiento por fatiga en los pavimentos asfálticos es ocasionado por múltiples repeticiones de cargas de tráfico. Existen dos mecanismos de daño por fatiga en pavimentos que dependen de donde se comienza la falla, esta puede comenzar en la parte inferior de la superficie asfáltica y propagarse hacia la superficie, debido a una alta concentración de esfuerzos asociadas a la flexión. Esta es la falla más común por fatiga y se representa en el pavimento como una serie de grietas conectadas conocidas como piel de cocodrilo. El otro mecanismo corresponde cuando la falla comienza en la superficie bajo el camino de la rueda y se propaga hacia el interior del pavimento. Se manifiesta en forma de grietas longitudinales que se extienden por el camino de las ruedas.

Los ensayos para simular el agrietamiento por fatiga se realizan a temperaturas intermedias. Es un tipo de falla que ocurre más fácilmente en etapas tardías de la vida del pavimento, es decir, cuando se encuentra envejecido debido a la rigidización del material.

Para caracterizar fatiga en ligantes asfálticos, las especificaciones superpave (ASTM D6373, 2021) se desarrollan bajo el supuesto de que un ligante más blando y elástico reduce el agrietamiento por

fatiga, donde se debe cumplir la condición descrita en la Ecuación 2-6 para un nivel de deformación del 1% y una frecuencia del 10 rad/s.

$$|G^*| \text{seno}(\delta) < 6000 \text{ [kPa]} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

2.4.2 Ahuellamiento

Corresponde a un tipo de falla que normalmente ocurre a altas temperaturas de servicio y al inicio de la vida de servicio del pavimento, cuando este se encuentra menos rígido. Se suele producir una falta de soporte de la subrasante o porque la mezcla asfáltica es inestable, encontrándose mal diseñada con exceso de ligante asfáltico o una calidad deficiente de los agregados pétreos.

El ahuellamiento se visualiza por encontrar deformaciones notables en el perfil transversal del pavimento, la cual se extiende longitudinalmente a lo largo de la zona de circulación de los vehículos.

Para caracterizar fatiga en ligantes asfálticos, las especificaciones Superpave (ASTM D6373, 2021) se desarrollan bajo el supuesto de que un ligante más blando y con comportamiento viscoso facilita el ahuellamiento, y se busca que se cumplan las condiciones de las Ecuación 2-7 y Ecuación 2-8 para un ligante original y ligante con envejecimiento primario respectivamente.

$$\frac{|G^*|}{\text{seno}(\delta)} > 1 \text{ [kPa]} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

$$\frac{|G^*|}{\text{seno}(\delta)} > 2,2 \text{ [kPa]} \quad \text{Ecuación 2-8}$$

2.4.3 Agrietamiento térmico

Este tipo de falla se relaciona a la disminución de las temperaturas que generan esfuerzos de tracción en las capas asfálticas del pavimento ocasionando grietas transversales. Se produce a bajas temperaturas de servicio y se relaciona con pavimentos que presentan una alta susceptibilidad térmica o ligantes que presenten una elevada rigidez a bajas temperaturas. El pavimento se vuelve más susceptible a este tipo de falla cuando se encuentra más envejecido.

Las especificaciones superpave (ASTM D6373, 2021) definen el criterio de falla Con rigidez máxima a los 60 segundos de 300 [Mpa] y un valor mínimo de 0,3 para la pendiente de la rigidez en fluencia en función del tiempo de carga, como se presenta en la Figura 2.8. Este ensayo se realiza con el BBR (Reometro de viga de flexión) según la especificación (ASTM D6648-08, 2016). En la Ecuación 2-9 se define el cálculo de la rigidez para este ensayo.

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3d(t)} \quad \text{Ecuación 2-9}$$

Siendo S(t) la rigidez en MPa en el tiempo t; P la carga aplicada en Newton; L el largo entre apoyos (102 mm); b el ancho de la viga (12,5 mm); h la altura de la viga (6,25mm) y d(t) la deflexión de la viga en mm en el tiempo t.

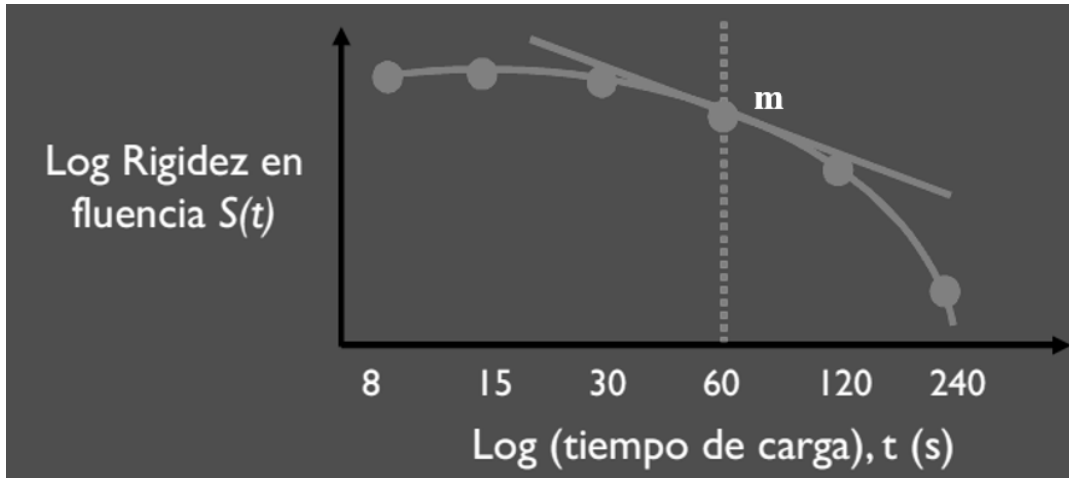


Figura 2.8 Grafica ejemplo de la relación entre la rigidez y el tiempo de carga en el ensayo con el reómetro de viga de flexión. (Delgadillo, 2019)

2.5 Principio de superposición de tiempo – temperatura

La mayoría de los cementos asfálticos se pueden considerar como materiales termorreológicamente simples, esto quiere decir que el efecto generado en las propiedades por un determinado tiempo de carga asociado a una temperatura será el mismo efecto que genera otro tiempo de carga a una temperatura diferente (Papagiannakis et al., 2008), lo cual se denota en la Ecuación 2-10 donde si t_2 es mayor que t_1 , T_2 debe ser menor que T_1 . Esta característica resulta útil para obtener las propiedades reológicas de un ligante asfáltico en un amplio rango de tiempos de carga y temperaturas. La superposición de tiempo temperatura se puede aplicar a las mediciones experimentales de las propiedades viscoelásticas mediante la utilización de curvas maestras, isócronas y factores de corrimiento.

$$f(t_1, T_1) = f(t_2, T_2) \quad \text{Ecuación 2-10}$$

2.5.1 Curva Maestra

La curva maestra sirve para describir alguna propiedad viscoelástica a una única temperatura de referencia, en un amplio rango de frecuencia o tiempo de carga. Resulta útil pues puede presentar rangos de carga que podrían presentarse en un pavimento en servicio pero que resultan poco prácticos en ensayos de laboratorio. El factor de corrimiento, por su parte es una función que relaciona el tiempo de carga real al que se realiza el ensayo con aquel equivalente respecto a la temperatura de referencia.

El procedimiento para establecer la curva maestra y los factores de corrimiento asociados, se pueden describir asumiendo que la propiedad reológica a estudiar sigue la relación establecida en la Ecuación 2-10. La Figura 2.9(a) ilustra cualitativamente una serie de curvas del módulo dinámico a diferentes temperatura y tiempo de carga. El factor de corrimiento, por su parte, es una función que relaciona los tiempos de cargas de la curva original con la curva de referencia según la Ecuación 2-12 y es único para cada temperatura. Luego como se presenta en la Figura 2.9(b) se

varía el factor de corrimiento tal de desplazar las curvas hacia la temperatura de referencia mediante la variación del tiempo de carga. En la sección 3.2.1.2 se presenta un proceso iterativo más detallado para la construcción de las curvas maestras.

$$G(t) = G_1 t^m \rightarrow \text{Log}(G(t)) = \text{Log}(G_1) + m \text{Log}(t) \quad \text{Ecuación 2-11}$$

$$\alpha_T = \frac{t}{t_r} \quad \text{Ecuación 2-12}$$

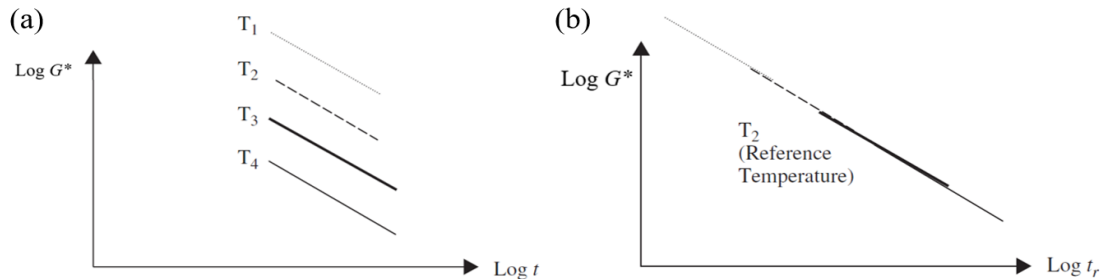


Figura 2.9 (a) Familia de curvas de un cemento asfáltico a diferentes temperaturas, para mediciones del módulo dinámico en función del tiempo de carga. (b) Curvas ajustadas a la temperatura de referencia T_2 variando los tiempos de carga. (Papagiannakis et al., 2008)

2.5.2 Isócronas

Las isócronas son curvas que al igual que las curvas maestras se basan en el principio de superposición de tiempo temperatura con la diferencia que estas curvas describen alguna propiedad viscoelástica a una única frecuencia o tiempo de carga, en un amplio rango de temperatura (G. Garcia, 2007). Su construcción es idéntica a la de las curvas maestras solo que la variable es la temperatura y el factor de corrimiento será único para cada frecuencia según la frecuencia de referencia. En la Figura 2.10 se presenta a modo de ejemplo un gráfico de isócronas.

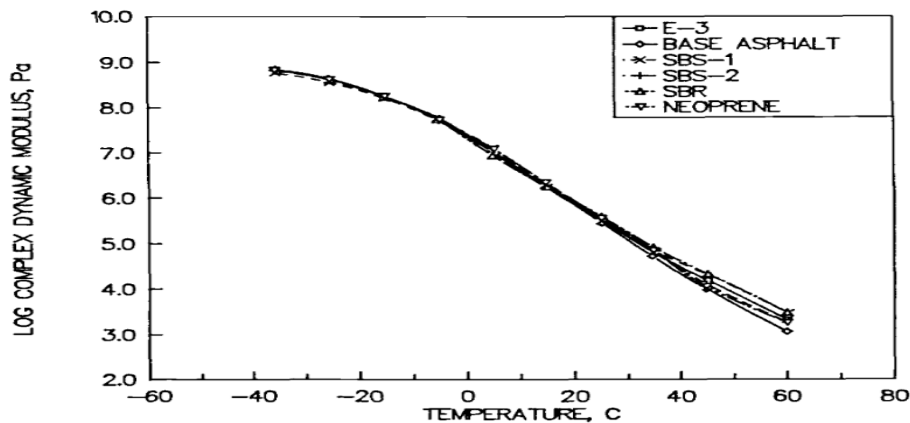


Figura 2.10 Gráfico a modo de ejemplo de isócrona con frecuencia de referencia de 10 rad/s para residuos de emulsiones a base de asfalto. (WARDLAW & Kenneth, 1992)

2.5.3 Diagrama de Black

El diagrama de Black es una herramienta que permite identificar potenciales errores de medición durante ensayos de frecuencia y temperaturas realizados en el reómetro de corte dinámico. Consiste

en una curva que relaciona el ángulo de fase con el módulo dinámico de corte eliminando las variables de frecuencia y temperatura del gráfico. Se caracteriza porque a diferencia de las curvas maestras no requiere de ningún ajuste en los datos de medición (G. Airey, 2002).

El diagrama de Black debe presentar una curva única, suave y continua, donde la ausencia de saltos o discontinuidades en la curva son indicadores de que el material ensayado cumple con el principio de superposición de tiempo-temperatura. (G. Airey, 2002)

Las discontinuidades pueden indicar errores de medición durante el ensayo, que el material no presenta un comportamiento termoreológicamente simple o es un material altamente modificado con polímeros. En Figura 2.11 se presentan ejemplos del diagrama de Black de una muestra sin errores de medición y otra con errores de medición.

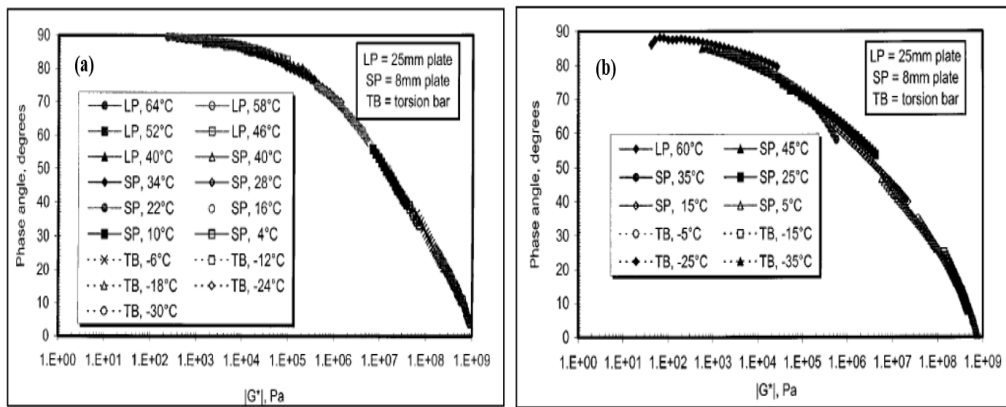


Figura 2.11. Ejemplo de diagrama de Black para resultados: (a) sin errores de medición y (b) con errores de medición. (Marasteanu & Anderson, 2001)

2.6 Rejuvenecedores líquidos y encapsulados

Los agentes rejuvenecedores son aceites de baja viscosidad con un alto contenido de maltenos, cuyo fin es modificar las propiedades termomecánicas y reológicas fundamentales de los cementos asfálticos envejecidos, (Karlsson & Isacsson, 2003). El objetivo de los rejuvenecedores no es revertir el envejecimiento sino tratar el efecto del envejecimiento en las propiedades del material mediante la restauración de su microestructura. (Behnood, 2019)

En general los agentes rejuvenecedores deberían incrementar la penetración, la ductilidad y el ángulo de fase. En cambio, reducir el punto de ablandamiento, la viscosidad y el módulo dinámico de corte. Además, mejorar la elasticidad, la susceptibilidad a la temperatura y la vida de fatiga. En la Tabla 2-1 se presenta a mayor detalle el efecto de los rejuvenecedores en las distintas propiedades de un ligante asfáltico.

Una dosis apropiada de rejuvenecedor es capaz de presentar valores de ángulo de fase y módulo dinámico de corte cercanos a los de un ligante sin envejecer. En cambio, una excesiva cantidad de rejuvenecedor podría reducir la resistencia a la deformación y el rendimiento de recuperación elástica del ligante. En las mezclas asfálticas una excesiva cantidad de rejuvenecedor puede reducir las propiedades de adhesión entre el ligante y el árido (Behnood, 2019).

Aunque los rejuvenecedores son capaces de mejorar las propiedades reológicas de los ligantes envejecidos, el material rejuvenecido suele ser más susceptible al envejecimiento que aquellos ligantes sin envejecer, es decir, un ligante rejuvenecido envejecerá más rápido que uno en su estado original. (Cai et al., 2019).

Tabla 2-1 Efecto de rejuvenecedores en las propiedades de los ligantes asfálticos. (Behnood, 2019)

Propiedad	Método de ensayo	Efectos
Propiedades a temperaturas altas	Reómetro de corte dinámico (DSR)	Reducción de rigidez disminución de la viscosidad Disminución del factor de formación de baches
	Prueba grado de penetración	Aumento de la flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) por tensión múltiple en prueba de recuperación (MSCR) Reducción módulo dinámico ($ G^* $) Aumento del ángulo de fase (δ)
	Punto de ablandamiento de anillo y bola	Disminución del punto de ablandamiento Mayor grado de penetración Mayor ductilidad
Propiedades a temperaturas intermedias	Reómetro de corte dinámico (DSR)	reducción de rigidez Mejoramiento del número de ciclos a falla de fatiga
Propiedades a temperaturas bajas	Reómetro de viga a flexión (BBR)	Reducción de rigidez
	Punto de ruptura de Frass	Incremento del valor-m
Composición química	SARA™	La composición química depende del tipo, cantidad de rejuvenecedor y composición química del ligante envejecido
	SAR-AD™	La adición de rejuvenecedores generalmente aumenta los saturados y aromáticos, lo que a su vez reduce las fracciones de resina y asfaltenos
"Oxidation kinetics"	FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)	Depende del tipo y cantidad de rejuvenecedor
		Disminuye el índice carbonilo (C=O)
		Disminuye el índice sulfoxido (S=O)

2.6.1 Aplicaciones de rejuvenecedores

Se utilizan tres métodos de aplicación de rejuvenecedores asfálticos; utilizar el rejuvenecedor líquido en mezclas asfálticas con alto contenido de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), aplicarlo como tratamiento en la superficie de los pavimentos o mediante la encapsulación del rejuvenecedor.

La mezcla con RAP es el más común de los usos y se realiza a altas temperaturas, entre, 140°C a 160°C. Su fin es poder incorporar altos porcentajes de RAP en las mezclas asfálticas, ayudando a que el contenido RAP no perjudique el rendimiento de la mezcla.

El uso de los rejuvenecedores al aplicarlos en la superficie del pavimento se utiliza como un método de mantenimiento preventivo a una vida temprana del pavimento (de 3 a 4 años), el cual es útil para retrasar el inicio del agrietamiento superficial (Lin et al., 2014), pero su acción logra solo limitarse a los primeros centímetros de la superficie del pavimento (Chiu & Lee, 2006).

El método de usar rejuvenecedores encapsulados con el fin de permitir la autocuración en los pavimentos asfálticos puede proporcionar un aumento significativo en la vida útil de los pavimentos asfálticos (Aguirre et al., 2016; García et al., 2015; Su et al., 2013a). En términos simples las cápsulas son añadidas a la mezcla asfáltica, las cuales debido a la acción de cargas externas se rompen liberando el rejuvenecedor y sellando las grietas del pavimento como se presenta en la Figura 2.12 (Aguirre et al., 2016; A. Garcia et al., 2015). Las cápsulas deben dispersarse homogéneamente en las mezclas asfálticas y ser capaces de sobrevivir al mezclado y la compactación de las mezclas asfálticas (García et al., 2010, 2011). El rendimiento de las microcápsulas en las mezclas asfálticas se ve afectado por varios factores como la distribución del tamaño, la proporción de encapsulación y las propiedades de la cápsula (por ejemplo, el grosor y la resistencia) (A. Garcia et al., 2016; Nesterova et al., 2011). Cabe destacar que el momento en que las cápsulas se rompen influyen altamente en su rendimiento, puesto que si es en una etapa temprana de la vida del pavimento este tendrá un comportamiento más blando del esperado y con mayor susceptibilidad a sufrir ahuellamiento. Por otro lado, si su ruptura es tardía los efectos beneficiosos de su adición podrían no lograrse (Behnood, 2019).

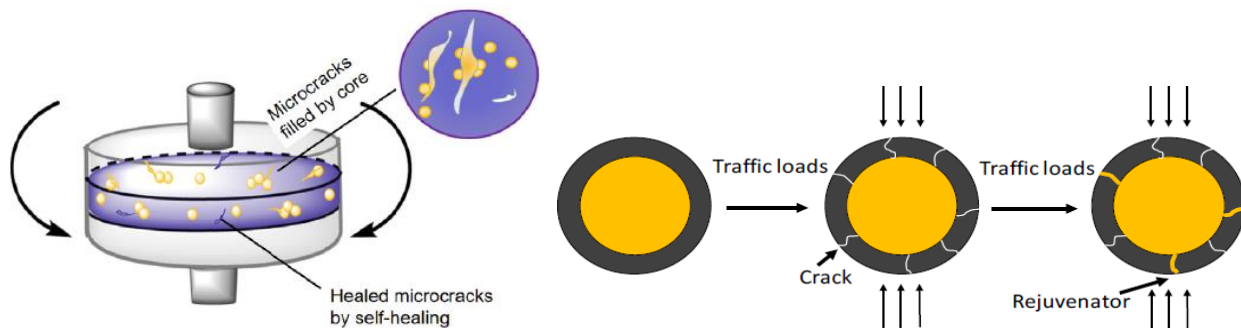


Figura 2.12 Mecanismo de ruptura de cápsulas con rejuvenecedor. Fuente: (García et al., 2011)); (Wang & Hao, 2021)

2.6.2 Rejuvenecedores en la industria del asfalto

En la industria del asfalto se han utilizado una gran variedad de rejuvenecedores tales como ligantes asfálticos “super-soft” (con muy bajo contenido de asfaltenos), aceites vegetales y aceites derivados de residuos. La norma ASTM D4552 clasifica los rejuvenecedores en seis grupos diferentes en función de su viscosidad a 60 °C. La clasificación define los grados RA (recycling agents). La elección del grado RA dependerá de la cantidad y dureza del ligante asfáltico en el pavimento envejecido. Aquellos rejuvenecedores con menor viscosidad tendrán mayor eficiencia de ablandamiento y difusividad pero mayor susceptibilidad térmica (Ma et al., 2015; Ongel & Hugener, 2015).

3 Estudio experimental

3.1 Materiales y preparación de la muestra

3.1.1 Materiales

En este estudio se utilizaron rejuvenecedores líquidos y encapsulados basados en pirólisis de neumáticos fuera de uso (NFU) y biopolímeros procedentes de la biomasa marina, respectivamente. El rejuvenecedor fue líquido pirolítico (LPN) con una densidad de 0,89 g/cm³, viscosidad 7,89 cP @ 20°C y pH 6,27 @ 25°C. El rejuvenecedor encapsulado (cápsulas) fue sintetizado en base a un biopolímero de alginato de sodio de baja viscosidad (viscosidad ≤ 300 mPa·s, densidad 1,02 g/cm³ en una solución al 2% p/p), proporcionado por Buchi (Suiza) y cloruro de calcio dihidratado con 77% de pureza, proporcionado por Winkler (Chile) (A. González et al., 2022).

El cemento asfáltico utilizado consistió en un CA-24 proporcionado por Clasa S.A Asfaltos. Las propiedades del asfalto se resumen en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Propiedades del ligante asfáltico CA-24 según el certificado de calidad proporcionado por Clasa S.A Asfaltos. (Clasa S.A Asfaltos)

Ensayes	Resultados	Especificación	Norma
Penetración a 25° C, 100g, 5s, (0,1 mm)	53	Mín. 40	MC 8.302.3
Viscosidad Original a 60°C, (Poise)	2650	Mín. 2400	MC 8.302.15
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	>100	Mín. 100	MC 8.302.8
Ensayo de la Mancha con Hep./Xil., (% xilol)	<30	Máx. 30	MC 8.302.7
Punto Inflamación copa abierta, (°C)	310	Mín. 232	MC 8.302.9
Punto de Ablandamiento, (°C)	52,5	Informar	MC 8.302.16
Indice de Penetración (IP)	-0,8	Mín -2,0 /Máx. 1,0	MC 8.302.18
Solubilidad en Tricloetileno (%)	99,6	Mín. 99	MC 8.302.11
Ensaye de película delgada rotatoria			
Perdida por calentamiento (%)	-0,6	Máx. 0,8	MC 8.302.33
Viscosidad de residuo a 60°C, (Poise)	9730	Informar	MC 8.302.15
Ductilidad de residuo a 25°C, 5cm/min, (cm)	>100	Mín. 100	MC 8.302.8
Indice de Durabilidad	3,7	Máx. 4	Residuo/original
Curva de viscosidad			
Viscosidad Rotacional 120°C, (cP) Sp: 21 55,7% torque 20 RPM	928	Informar	MC 8.302.24
Viscosidad Rotacional 135°C, (cP) Sp: 21 24,0% torque 30 RPM	400	Informar	MC 8.302.25
Viscosidad Rotacional 150°C, (cP) Sp: 21 21,0% torque 50 RPM	210	Informar	MC 8.302.26
T° Fabricación de Mezcla, (°C) a 1,7 (P)	153,6	Informar	N.A
T° Compactación de Mezcla, (°C) a 2,8 (P)	143,5	Informar	N.A

El cemento asfáltico fue sometido a envejecimiento de largo plazo (PAV) en condiciones de laboratorio, de acuerdo con las normas ASTM D 2872, 2019 y ASTM D6521, 2019

3.1.2 Síntesis del líquido pirolítico

El líquido pirolítico fue obtenido a partir de la fracción polimérica de Neumáticos fuera de uso, mediante un proceso de pirólisis. La pirólisis es un proceso de descomposición termoquímica de los componentes orgánicos de los neumáticos, realizada en la ausencia de oxígeno (sin combustión) y en un rango de temperatura entre 400-750°C, dando como resultado la obtención de tres fracciones: Líquida, Sólida, y Gaseosa. (Williams, 2013).

Los NFU fueron obtenidos en forma de gránulos, los cuales fueron secados (105°C durante 24 h), triturados y tamizados (Gilson ASTME11) a tamaños entre 75–180 μm y posteriormente almacenados herméticamente para su utilización. El proceso de pirólisis se realizó en un reactor de lecho fijo, según lo propuesto por Menares et al., 2020 y Norambuena-Contreras et al., 2021, respectivamente. Como resultado, el LPN se obtuvo por condensación de los vapores de pirólisis a 15°C, resultando en un rendimiento entre 0,41 – 0,44 (gLPN/gNFU). El procedimiento de generación del líquido pirolítico se puede observar en la Figura 3.1

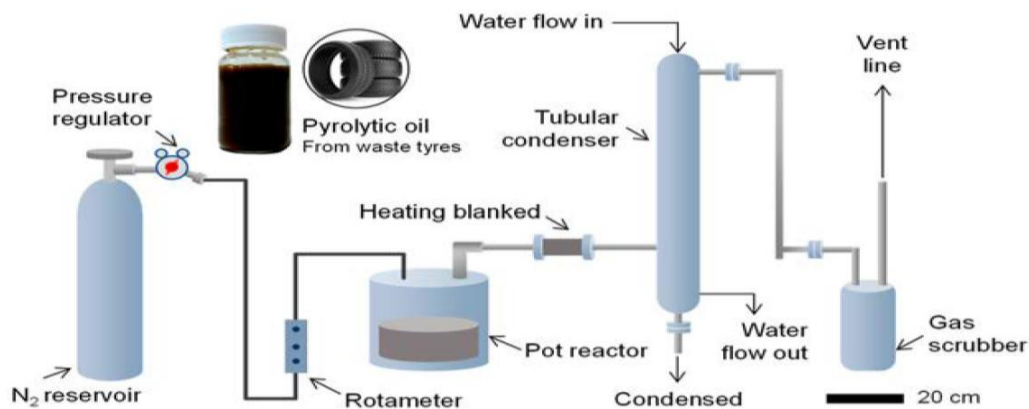


Figura 3.1 Proceso de pirólisis realizado en una planta a escala de gramos, utilizando un reactor de lecho fijo con neumáticos fuera de uso para producir líquido pirolítico. (Norambuena-Contreras et al., 2021)

3.1.3 Síntesis del rejuvenecedor encapsulado

El rejuvenecedor pirolítico a base de NFU fue confinado en cápsulas bipoliméricas polinucleares obtenidas por el proceso de gelificación iónica entre el alginato de sodio y los iones de calcio, descrito por Norambuena-Contreras et al., 2022. La preparación de las cápsulas consistió en tres pasos. Primero, se preparó una solución acuosa de alginato de sodio al 2% p/p usando un agitador magnético (SCI550-S) a 250 rpm durante 24 h. Luego, la solución fue agitada mecánicamente (OS40-Pro-LB) a 1200 rpm durante 40 min. incorporando el LPN gota a gota en una relación en masa alginato:líquido pirolítico 1:5 como se presenta en Figura 3.2 (a) resultando en una emulsión. Segundo, se utilizó un microencapsulador Buchi (B-390) para producir cápsulas mediante la técnica de aspersión por vibrado. La emulsión fue bombeada a una presión de 450 mbar hacia una boquilla con apertura de 250 μm y acoplada a una unidad vibratoria configurada a una frecuencia de 350 Hz. Con estos parámetros, la emulsión fue extruída en forma de pequeñas gotas siendo colectadas en una solución acuosa endurecedora de cloruro de calcio al 5% p/p y agitada

magnéticamente a 350 rpm (Figura 3.2 (b)). Finalmente, habiendo terminado el proceso de precipitación de la emulsión, las cápsulas fueron: filtradas de la solución de cloruro de calcio, lavadas en 500 mL de agua desionizada, secadas en un horno desecador a 30°C durante 24 horas (Figura 3.2), para luego ser almacenadas en un congelador a -10°C, evitando la oxidación y reacción del líquido pirolítico encapsulado. Como resultado de este proceso se obtuvieron cápsulas con un tamaño de 397 μm y una eficiencia de encapsulamiento de 92,51%. (A. González et al., 2022).

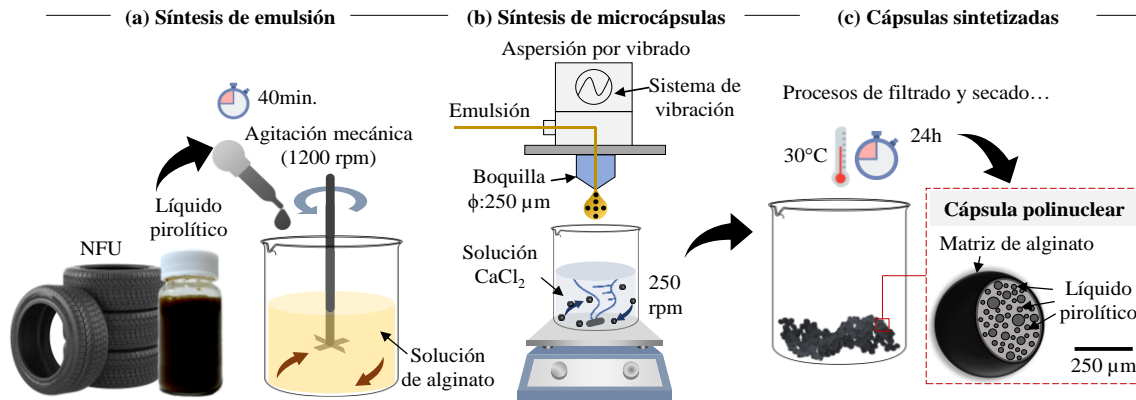


Figura 3.2. Proceso de encapsulamiento del líquido pirolítico en cápsulas bipoliméricas. (A. González et al., 2022)

3.1.4 Mezclado del cemento asfáltico PAV con los rejuvenecedores líquidos y encapsulados

El mezclado del ligante envejecido PAV con rejuvenecedor líquido (LPN) fue realizado según la metodología publicada por (Concha et al., 2022). Para ello, primero, se vertieron 30 g de cemento asfáltico PAV en un frasco de vidrio de 100 mL. y calentado a 140°C en una placa calefactora, siendo mecánicamente agitado a 300 rpm durante 20 minutos. Durante este proceso, se incorporó el LPN gota a gota en 5 diferentes proporciones de líquido respecto del ligante PAV. Usando los mismos pasos de mezclado, se incorporaron las cápsulas de alginato con LPN en el ligante PAV en 3 diferentes contenidos del peso de ligante. Las muestras ensayadas con rejuvenecedor líquido, rejuvenecedor encapsulados y las muestras de referencia, en diferentes niveles de envejecimiento se presentan en la Tabla 3-2 junto con su respectiva proporción y nomenclatura.

Tabla 3-2. Detalle y simbología de muestras de ligante asfáltico ensayadas. (Elaboración propia)

Tipo de ligante	Simbología	Cantidad (g)	Detalle
Ligante asfáltico de referencia	CA-SE	45	Ligante asfáltico CA-24
	CA-RTFO	45	Ligante asfáltico CA-24 envejecido mediante el horno de película delgada rotatorio (RTFO).
	CA-PAV	45	Ligante asfáltico CA-24 con envejecimiento RTFO y posteriormente envejecido mediante el método superpave de envejecimiento acelerado en cámara de presión (PAV).
PAV + Líquido pirolítico	PAV-PO1	30	CA-PAV con 1% de líquido pirolítico (PO) por peso de ligante.
	PAV-PO2	30	CA-PAV con 2% de líquido pirolítico (PO) por peso de ligante.

Tipo de ligante	Simbología	Cantidad (g)	Detalle
	PAV-PO3	30	CA-PAV con 3% de líquido pirolítico (PO) por peso de ligante.
	PAV-PO4	30	CA-PAV con 4% de líquido pirolítico (PO) por peso de ligante.
	PAV-PO5	30	CA-PAV con 5% de líquido pirolítico (PO) por peso de ligante.
	PAV-PO6	15	CA-PAV con 6% de líquido pirolítico (PO) por peso de ligante.
	PAV-PO9	15	CA-PAV con 9% de líquido pirolítico (PO) por peso de ligante.
PAV + Líquido pirolítico encapsulado	PAV-POC6	30	CA-PAV con 6% de cápsulas con líquido pirolítico (POC) por peso de ligante.
	PAV-POC9	30	CA-PAV con 9% de cápsulas con líquido pirolítico (POC) por peso de ligante.
	PAV-POC12	30	CA-PAV con 12% de cápsulas con líquido pirolítico (POC) por peso de ligante.

3.2 Metodología de ensayos

3.2.1 Caracterización reológica mediante barrido de frecuencia – temperatura

Las muestras fueron sometidas a una caracterización reológica con pruebas de barrido de frecuencia a múltiples temperaturas para determinar sus propiedades viscoelásticas lineales. Las propiedades de interés a definir consistieron en el módulo dinámico de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). Las pruebas se realizaron según la metodología presentada en “Reómetro de Corte Dinámico (DSR) Physica MCR-301, Manual de Usuario” (Á. González, 2012) y las especificación ASTM D7175, 2015.

Para la realización de los ensayos se utilizó un Reómetro de Corte Dinámico (DSR, modelo MCR 301) provisto del software Anton Paar RheoCompass. En la Figura 3.3 se presenta el equipo.



Figura 3.3. Reómetro de corte Dinámico Anton Paar modelo MCR 301, presente en el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) de la universidad técnica Federico Santa María. (Elaboración propia)

Para los ensayos se utilizaron los platos paralelos de 8 mm (I-PP08 y PP08) y 25 mm (I-PP25 y PP25) cuyo criterio de uso depende del nivel de la rigidez en que se encuentre la muestra a ensayar, lo que dependerá de la temperatura del ensayo y el nivel del envejecimiento de la muestra. En la Figura 3.4 se presentan los platos paralelos mencionados.

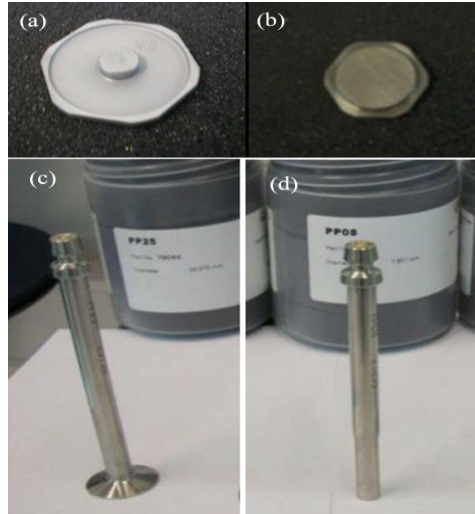


Figura 3.4. Platos paralelos DSR. (a) plato inferior de 8 mm I-PP08, (b) plato inferior de 25 mm I-PP25, (c) Plato superior 25 mm PP25 y (d) plato superior de 8 mm PP08. (Á. González, 2012)

Las frecuencias de ensayo variaron entre 100 a 0,1 [rad/s], obteniéndose un total de 15 mediciones, mientras que las temperaturas de prueba variaron entre los 5°C a 75°C, con aumentos de 5°C por cada medición y estabilización de la temperatura durante 5 minutos. Al concluir cada medición de temperatura se realizó un intermedio de 60°C, sin tiempo de estabilización, para liberar esfuerzos remanentes de la medición anterior. En los ensayos la deformación se mantuvo constante a 0,5%.

En la Tabla 3-3 se presentan la utilización de los platos paralelos según la temperatura de ensayo y el nivel de envejecimiento de la muestra. Aquellas muestras de CA-24 con rejuvenecedor líquido o encapsulado utilizaron las temperaturas equivalentes al ligante envejecido en PAV.

Tabla 3-3. Rango de temperaturas para utilización de platos paralelos del DSR. (Á. González, 2012)

Estado del ligante asfáltico	Temperatura mínima		Temperatura máxima	
	Plato paralelo de 8 mm	Plato paralelo de 25 mm	Plato paralelo de 8 mm	Plato paralelo de 25 mm
Original	5	35	30	75
Envejecido en HPDR	5	30-35	30-35	75
Envejecido en PAV	5	45	40	75

3.2.1.1 Diagrama de Black

Para la realización de los diagramas de Black se utilizaron los datos obtenidos del barrido de frecuencia y temperatura, graficando el ángulo de fase en función de módulo dinámico de corte. En los casos de que el gráfico obtenido presentara discontinuidades o quiebres en las curvas resultantes, el ensayo fue repetido para corroborar de que no se presentaran errores de medición.

3.2.1.2 Curvas Maestras

Las curvas maestras fueron construidas siguiendo el principio de superposición de tiempo y temperatura, utilizando un sistema iterativo y la Ecuación 3-1 de William-Landel-Ferry (WLF).

$$\log(\alpha_T) = \frac{-k_1(T - T_R)}{k_2 + T - T_R} \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Donde α_T es el factor de corrimiento adimensional, k_1 y k_2 son constantes que dependen del material, T es la temperatura de la curva en °C y T_R es la temperatura de referencia en °C.

El sistema iterativo presenta el siguiente procedimiento para las curvas maestras del módulo dinámico:

Escoger la temperatura de referencia, para este análisis se escoge la temperatura de 25°C, por ser la temperatura media del ligante CA-24. Para el resto de las curvas de temperaturas se asume un factor de corrimiento $\alpha_T(T_i)$.

Usando el factor de corrimiento se calculan las frecuencias reducidas según la Ecuación 3-2

$$\omega_{r(T_i)} = \alpha_T(T_i) \cdot \omega \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde $\omega_{r(T_i)}$ es la frecuencia reducida en Rad/s, T_i es la temperatura de la curva en °C y ω es la frecuencia original en Rad/s

Se compara el gráfico del módulo dinámico en función de las frecuencias reducidas para cada temperatura con el gráfico de la temperatura de referencia, que es equivalente a que $\alpha_T(25[^\circ\text{C}]) = 1$. Si el gráfico no sigue la misma trayectoria que la curva de referencia se iteran los factores de corrimiento. El objetivo es desplazar las curvas, tal que se alineen con la curva de referencia, minimizando la diferencia entre la curva a desplazar y la curva de referencia.

Finalmente, se ajustan los factores de corrimiento utilizando la Ecuación 3-2 con el fin de obtener los factores k_1 y k_2 , que corresponden a constantes que dependen del material, minimizando la suma de los errores cuadrados entre los α_T y los α_T ajustados mediante la ecuación WLF.

El mismo procedimiento se aplica para las curvas maestras del ángulo de fase, Nótese que la ecuación WLF está diseñada para usarse con el módulo dinámico de corte, por lo que su uso para el ángulo de fase presenta mayores errores.

En la Figura 3.5 y Figura 3.6 se puede observar, a modo de ejemplo, la conversión de la familia de curvas de una de las muestras a la curva maestra para el módulo dinámico y el ángulo de fase respectivamente.

Con el fin de minimizar el error durante el ajuste de las curvas y optimizar la obtención de los factores de corrimiento en el anexo 8 se describe un método automático del ajuste de las curvas maestras.

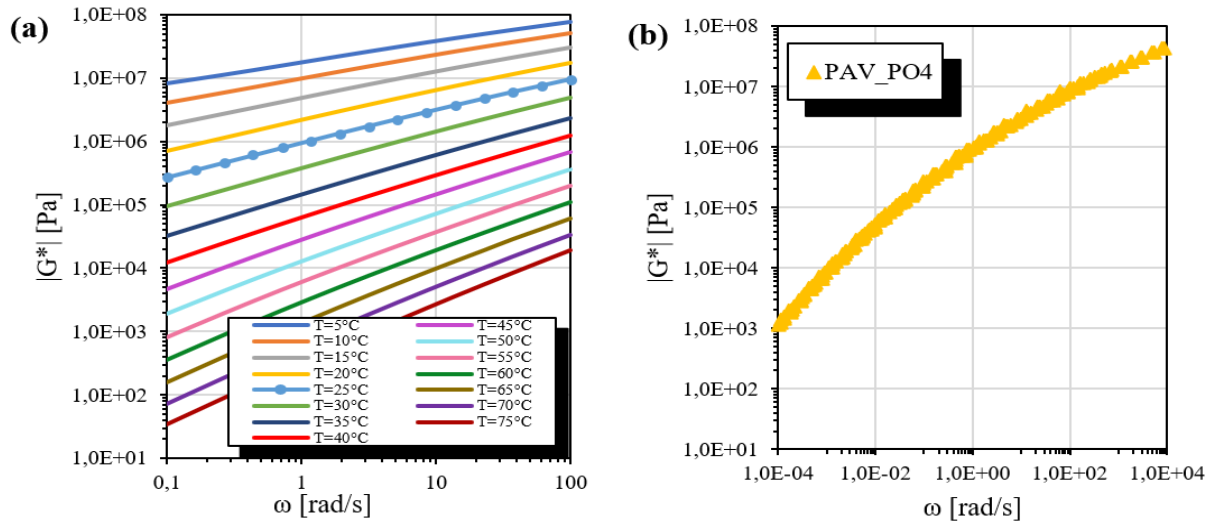


Figura 3.5 Ejemplo de la confección de curva maestra de G^* para muestra con 4% de líquido pirolítico. (a) Familia de curvas obtenidas directamente del ensayo de barrido de frecuencia – temperatura. (b) Curva maestra ajustada a 25°C tras realizar el desplazamiento de las curvas según el principio de superposición de tiempo – temperatura. (Elaboración propia)

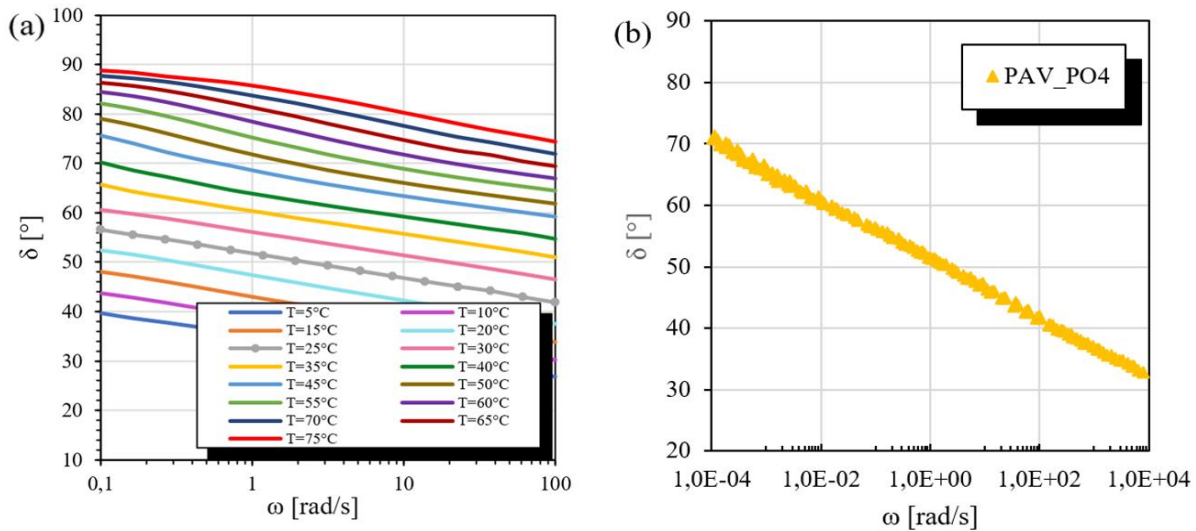


Figura 3.6 Ejemplo de la confección de curva maestra de δ° para muestra con 4% de líquido pirolítico. (a) Familia de curvas obtenidas directamente del ensayo de barrido de frecuencia – temperatura. (b) Curva maestra ajustada a 25°C tras realizar el desplazamiento de las curvas según el principio de superposición de tiempo – temperatura. (Elaboración propia)

4 Resultados barridos de frecuencia – temperatura

Los rejuvenecedores son usados en los ligantes envejecidos para restaurar las propiedades reológicas del material, asemejándolas a un estado inicial o a una etapa de menor envejecimiento. En los resultados de este estudio se compararon las propiedades reológicas de las diferentes muestras ensayadas principalmente mediante curvas maestras, para obtener la rigidez del ligante ante cualquier condición de carga y temperatura que vaya a estar expuesto el pavimento asfáltico. Para todos los casos evaluados se muestra la comparación con el ligante en estado original, con envejecimiento primario y envejecimiento secundario.

4.1 Variabilidad de resultados en las muestras

La variabilidad de los ensayos se puede medir según la Tabla 4-1 mediante las especificaciones de la norma ASTM D7175 (2015), en la cual se presenta el porcentaje de variación aceptable entre 2 muestras. En la Tabla 4-2 se presenta el promedio del porcentaje de error entre las repeticiones de muestra según la temperatura de ensayo.

Solo se repitieron ensayos de aquellas muestras que presentaron alguna anomalía en sus resultados, por ejemplo, incongruencias en el diagrama de Black. De las repeticiones se obtiene que un 37,1% de todos los datos promedio no cumplieron con el criterio de repetibilidad expresado por la norma, presentando la muestra del 9% de rejuvenecedor líquido la mayor variación. Cabe destacar que los datos comparados corresponden a las muestras presentadas como Prueba 1 (P1) y Prueba 2 (P2) en el Anexo 9. Para la construcción de las curvas maestras se utilizó el valor promedio de las propiedades reológicas medidas (ángulo de fase y módulo dinámico) para aquellas muestras que cuentan con repetición de ensayo.

Tabla 4-1. Criterio de precisión estimada para repetición de ensayos. Fuente: Tabla 3, ASTM D7175, 2015

Condición	Coefficiente de variación (1s%)	Rango aceptable de dos resultados (d2S%)
Precisión para un mismo operador		
Asfalto Original G*/seno δ (kPa)	2,3	6,4
Residuo PDR G*/sen δ (kPa)	3,2	9
Residuo PAV G*sen δ (kPa)	4,9	13,8

Tabla 4-2. Porcentajes promedio de variación de resultados para 2 ensayos por muestras, destacando aquellas muestras que no cumplen con el criterio de aceptabilidad de repetición. (Elaboración propia)

Promedio %	Temperatura °C														
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
CA-SE	1,4	1,5	2,4	2,7	2,0	1,7	14,4	15,7	15,6	15,0	14,6	13,7	14,0	11,5	8,5
CA-RTFO	27,7	29,1	29,5	29,3	28,1	27,2	1,1	1,7	1,7	2,0	1,7	1,4	1,9	2,5	3,5
PAV-PO3	14,3	14,0	12,8	11,9	10,0	8,3	6,7	4,8	9,4	12,3	11,2	8,8	8,7	8,0	6,8
PAV-PO4	13,4	14,4	14,9	15,2	15,2	15,6	15,4	14,6	5,5	3,3	3,0	3,5	2,7	2,9	3,6
PAV-PO5	13,5	13,0	12,7	12,1	11,5	10,7	9,4	7,2	6,5	6,0	5,6	5,3	5,0	3,8	2,4
PAV-PO6	27,3	27,2	26,7	25,7	24,6	25,2	22,0	16,5	2,2	1,5	0,8	0,5	0,9	0,6	1,5
PAV-PO9	5,2	5,3	4,7	4,9	4,6	4,2	4,2	3,3	27,4	28,8	31,6	34,6	40,5	42,4	44,4

4.2 Muestras de referencia

Se realizaron 7 ensayos a los ligantes asfálticos de referencia, 3 ensayos al ligante sin envejecimiento, 3 al ligante envejecido mediante RTFO y un ensayo al ligante con envejecimiento PAV, además de ser clasificados mediante Superpave obteniendo los resultados presentados en la Tabla 4-3, definiendo al asfalto con un PG 64-22 según los criterios presentados en ASTM D6373.

Tabla 4-3. Resumen de resultados de ensayos para clasificación según criterios Superpave para las muestras de referencia. (Elaboración propia)

Ahuellamiento				
Muestra de ligante	T° Falla [°C]	G*/sin(δ) [kpa]	Criterio	
CA-SE	70	0,893	G*/sin(δ) > 1	
CA-RTFO	76	1,106	G*/sin(δ) > 2,2	
Fatiga				
Muestra de ligante	T° [°C]	G*sin(δ) [kpa]	Criterio	
CA-PAV	25	5975,67	G*sin(δ) < 6000	
Agrietamiento Térmico				
Muestra de ligante	T° [°C]	S [Mpa]	m [Mpa/s]	Criterio
CA-PAV	-12	222,34	0,36	S 60s; max 300 Mpa. m-value; min. 0,300
	-18	485,87	0,26	

En la Figura 4.1 se presentan los diagramas de Black para las diferentes muestras. Al comparar los Diagrama de Black se observa que las muestras ensayadas presentaron curvas continuas y suaves lo cual denota que los resultados de los ensayos realizados se consideran aceptables.

El envejecimiento en los cementos asfálticos ocasiona la rigidización del material, lo que se ve reflejado en la magnitud del módulo dinámico de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). El módulo aumenta con el envejecimiento, mientras que el ángulo de fase disminuye su valor. En la Figura 4.1 se observa la relación entre el ángulo de fase y el módulo cuando el material se somete a envejecimiento. En la gráfica, las curvas se desplazan hacia abajo y hacia la derecha cuando se aumenta el nivel de envejecimiento del ligante asfáltico, es decir se aprecia el orden de las curvas teniendo el ligante sin envejecimiento en la parte superior izquierda, seguido del ligante con envejecimiento RTFO y finalmente en la parte inferior y desplazado hacia la derecha el ligante con envejecimiento PAV, lo que sustenta la teoría mencionada anteriormente.

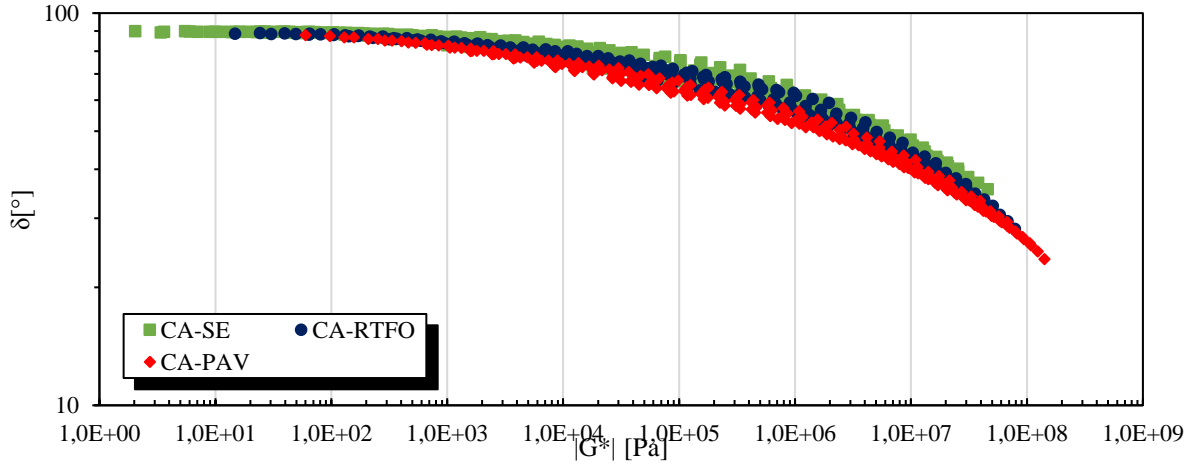


Figura 4.1 Diagrama de Black para ligante original, envejecido en RTFO y envejecido en PAV. (Elaboración propia)

A diferencia del diagrama de Black, las curvas maestras no eliminan la variable de la frecuencia de carga y permiten observar de forma visual más claramente el comportamiento de las curvas a diferentes niveles de envejecimiento. Las curvas maestras presentadas en la Figura 4.2 (a) y (b) corresponden a las curvas de módulo dinámico y ángulo de fase respectivamente. En estas al igual que lo que ocurría con el diagrama de Black se corrobora la teoría donde el módulo dinámico aumenta con el envejecimiento, mientras que el ángulo de fase disminuye. Lo que se observa en el orden definido que tienen las curvas.

Se observa una relación con la frecuencia de carga, donde a mayor frecuencia de carga, equivalente a disminución de la temperatura, mayor es el módulo dinámico y menor es el ángulo de fase. Esto coincide con la teoría mencionada en la sección 2.3.1 que explica la relación entre las propiedades reológicas fundamentales y los cambios de temperatura y frecuencia. Por otro lado, para la Figura 4.2 (a) se puede observar como las curvas parecen converger a altas frecuencias, pero esto solo es un efecto visual debido a la escala logarítmica en la que se presentan los gráficos. A diferencia de lo que ocurre con la Figura 4.2 (b) que las curvas si convergen a bajas frecuencias a los 90° que corresponde al ángulo de fase donde el ligante asfáltico se comporta como un líquido viscoso.

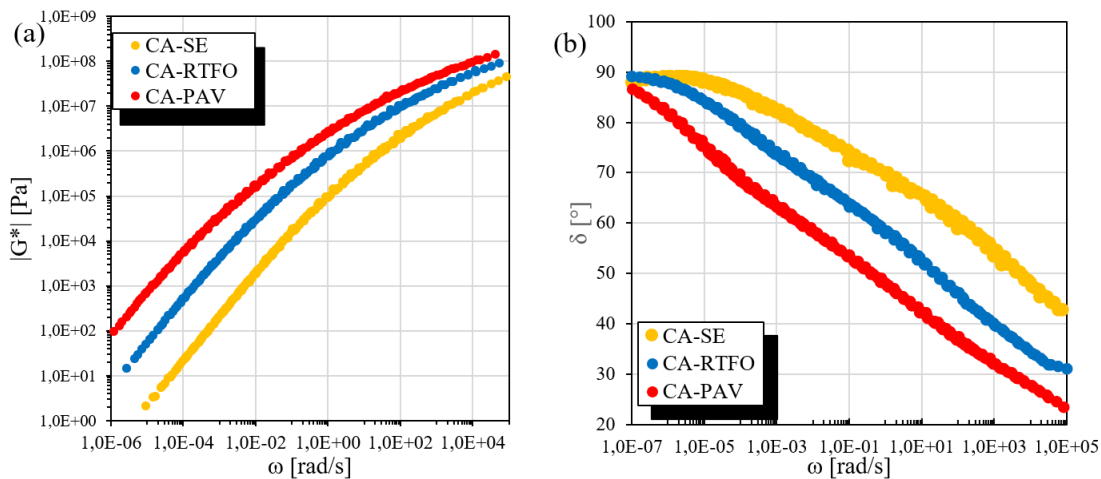


Figura 4.2 (a) Curva maestra de módulo dinámico para las muestras de referencia. (b) Curvas maestras del ángulo de fase para las muestras de referencia. (Elaboración propia)

4.3 Muestras con rejuvenecedor líquido

Se realizaron en total 13 ensayos de muestra con rejuvenecedor líquido, la cantidad de ensayos de cada muestra se resume en la Tabla 4-4.

Al observar los diagramas de Black, presentados en la Figura 4.3, para el caso de rejuvenecedores líquidos el orden de las curvas no resulta evidente como ocurre con las muestras de referencia, las curvas de las muestras con rejuvenecedor parecen aglomerarse a la misma altura, es decir, la variación del ángulo de fase no es apreciable visualmente mediante el diagrama de Black. Por otro lado, el desplazamiento de las curvas hacia la derecha es apreciable a bajas frecuencias. Encontrando que las muestras con 6% y 9% p/p de rejuvenecedor presentan los valores más bajos de módulo dinámico y la muestra con 1% p/p de rejuvenecedor es la curva que parte con los valores más altos, es decir presenta un comportamiento más rígido. A altas frecuencias la variación no es apreciable de forma visual. Dado lo anterior, el diagrama de Black no entrega información suficiente para comparar el efecto de las diferentes proporciones de rejuvenecedor líquido.

Tabla 4-4 Cantidad de ensayos realizados por muestra. (Elaboración propia)

Muestra	Número de Repeticiones
PAV-PO1	1
PAV-PO2	1
PAV-PO3	3
PAV-PO4	2
PAV-PO5	2
PAV-PO6	2
PAV-PO9	2

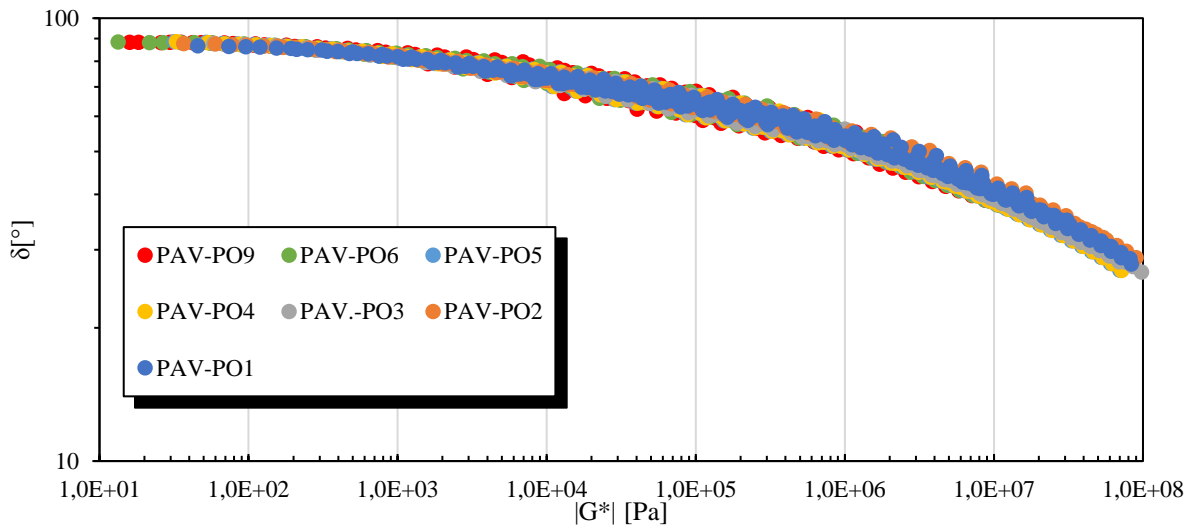


Figura 4.3 Diagrama de Black de muestras con rejuvenecedor líquido. (Elaboración propia)

4.3.1 Curvas maestras de módulo dinámico de corte

A partir de resultados de curvas maestras en la Figura 4.4 se observa que, de manera general, todas las muestras presentaron el mismo comportamiento, donde el módulo aumentó con la frecuencia de carga, equivalente a ensayos a bajas temperaturas. El ligante original (CA-SE) presentó menores

módulos que el resto de las muestras (es decir, es menos rígido), mientras que el ligante con envejecimiento secundario (CA-PAV) presentó los mayores valores de módulos, significando un comportamiento más rígido.

Por otra parte, se diferencian dos comportamientos de las curvas según el nivel de frecuencia de carga. A bajas frecuencias ($\leq 0,1$ rad/s) que se puede observar más detalladamente en la figura Figura 4.4, las curvas se distinguen claramente desplazándose paralelamente a la muestra con envejecimiento secundario (CA-PAV). A mayores frecuencias, las curvas tienden a agruparse, entrecruzarse y a disminuir la pendiente con que aumenta el módulo (Figura 4.6). En estos rangos no se distinguió claramente la contribución a la disminución del módulo debido al porcentaje de líquido pirolítico. De lo anterior se concluye que el rejuvenecedor no actúa de la misma forma para diferentes rangos de frecuencias o temperaturas, presentando un mayor acercamiento a las propiedades iniciales del ligante a las altas frecuencias de carga.

De la Figura 4.4 también se puede observar que las muestras con líquido en concentraciones del 1%, 2%, 3%, 4% y 5% se encuentran por debajo del ligante envejecido en PAV y por encima del ligante envejecido por RTFO, demostrando que el líquido pirolítico restaura las propiedades del ligante envejecido al disminuir el módulo complejo de corte. Es decir, a mayor cantidad de contenido de líquido menor es el módulo del ligante, a excepción de la muestra con 3%, que tiene mayores módulos que la muestra de 2%, de manera general en el rango de frecuencias. Lo anterior se considera un caso anómalo y atribuible a problemas de mezclado en la producción de la muestra. Por el contrario, las muestras con 6% y 9% tienen módulos menores a la muestra CA-RTFO, alcanzando incluso valores menores que el ligante original a frecuencias altas. Los resultados obtenidos demuestran que el líquido pirolítico a base de NFU se comporta como un rejuvenecedor asfáltico, modificando las propiedades reológicas del ligante envejecido según lo esperando. A mayor concentración de líquido en el ligante asfáltico envejecido, este genera una mayor disminución en el módulo, transformándolo en un material menos rígido y similar al ligante sin envejecer, aunque este comportamiento no es homogéneo en todo el rango de frecuencias.

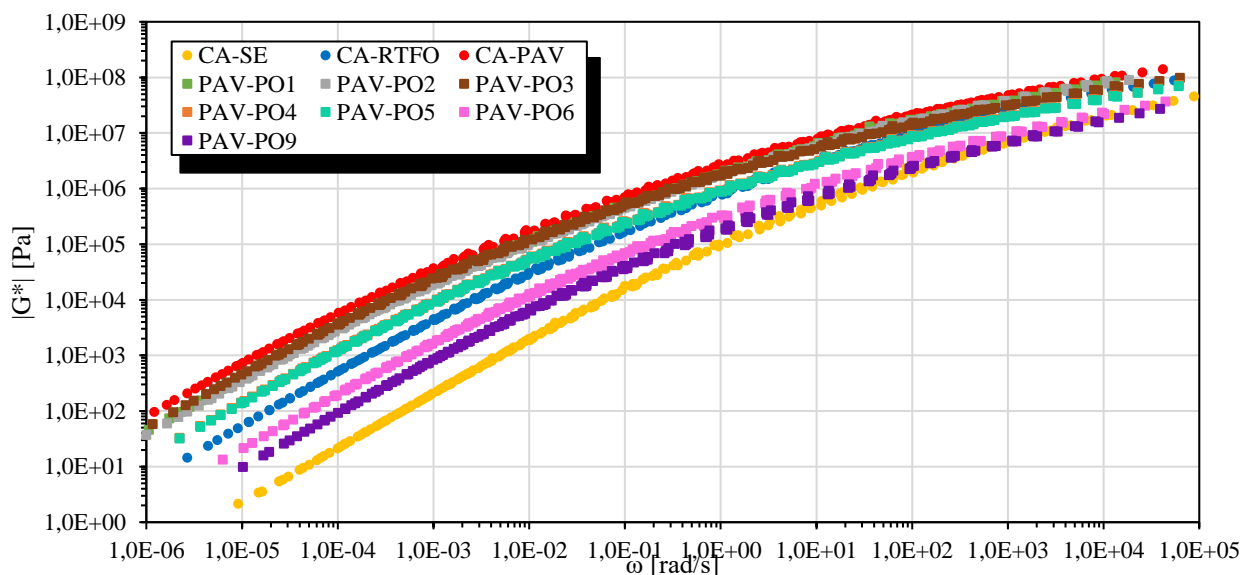


Figura 4.4 Curva maestra del módulo dinámico (G^*) de muestras con rejuvenecedor líquido. (Elaboración propia)

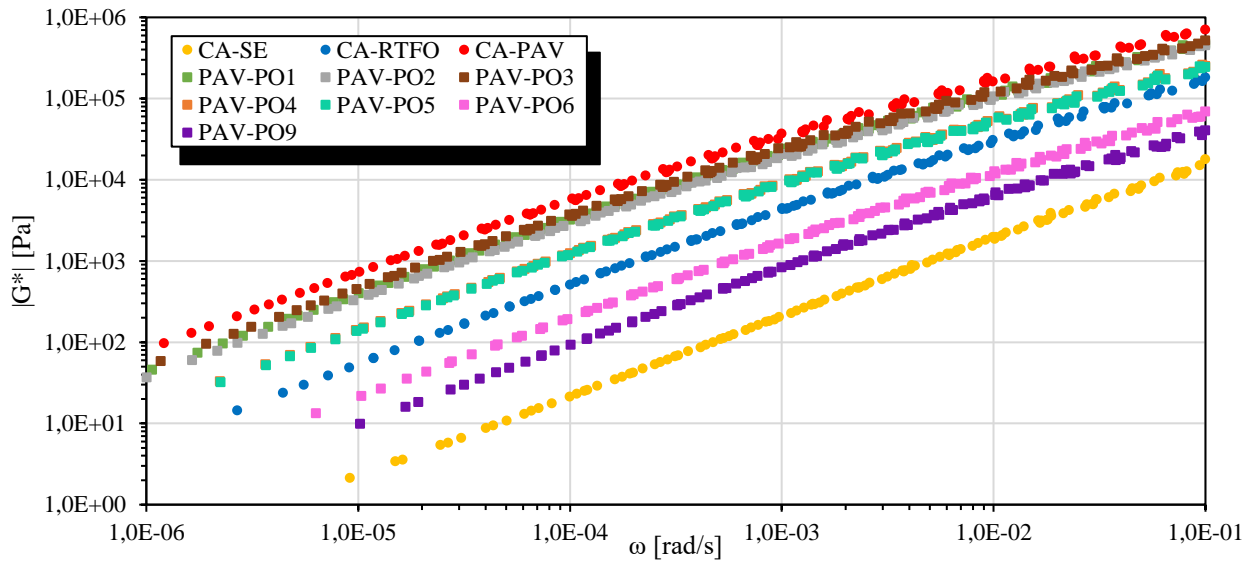


Figura 4.5 Curva maestra del módulo dinámico (G^*) de muestras con rejuvenecedor líquido, para frecuencias menores a 0,1 rad/s. (Elaboración propia)

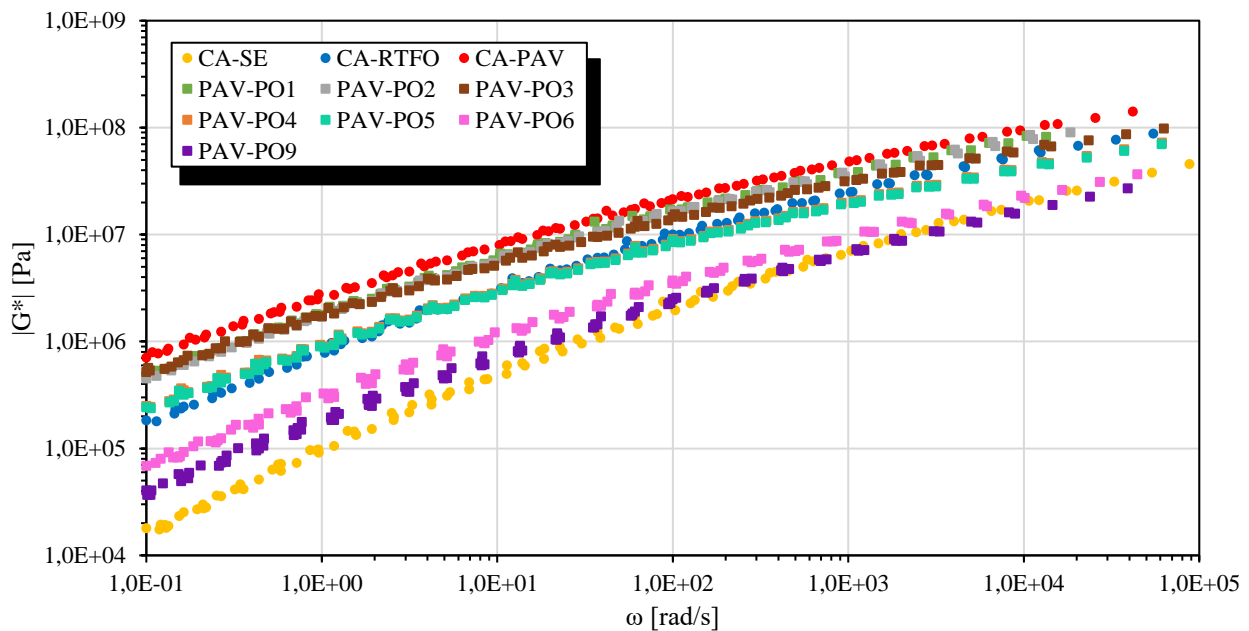


Figura 4.6 Curva maestra del módulo dinámico (G^*) de muestras con rejuvenecedor líquido, para frecuencias mayores a 0,1 rad/s. (Elaboración propia)

4.3.2 Curvas maestras de ángulo de fase

En las curvas maestras del ángulo de fase (Figura 4.7), para todas las muestras se visualiza un aumento en los ángulos de fase al disminuir la frecuencia de carga, es decir, el material disminuye su viscosidad, tendiendo a los 90° que corresponde al valor Máximo donde el material se comporta como un líquido viscoso.

Se puede observar que el ligante de referencia sin envejecer (CA-SE) tiene mayores ángulos de fase que el resto de las muestras, presentando mayor sensibilidad a los cambios de frecuencia de carga y teniendo un comportamiento más viscoso. El resto de las muestras, a diferencia de lo

observado en las curvas maestras del módulo dinámico (ver Figura 4.4), no presentan un comportamiento tan claro, entrecruzándose entre sí. Las muestras con 6% y 9% se asemejan a la muestra CA-RTFO, presentando ángulos de fase mayores para frecuencias sobre 1 rad/s. En cambio, las muestras con 1%, 2%, 3%, 4% y 5% presentan ángulos de fase que se distancian poco a los valores de la muestra CA-PAV, al igual que lo ocurrido con las curvas de módulo dinámico el efecto del rejuvenecedor es más notorio a altas frecuencias para el ángulo de fase, encontrando que las curvas se alejan de la curva CA-PAV para frecuencias mayores a 0,1 rad/s.

Se puede decir que el efecto como rejuvenecedor del líquido pirolítico es más relevante en la propiedad del módulo dinámico (G^*) que en el ángulo de fase (δ).

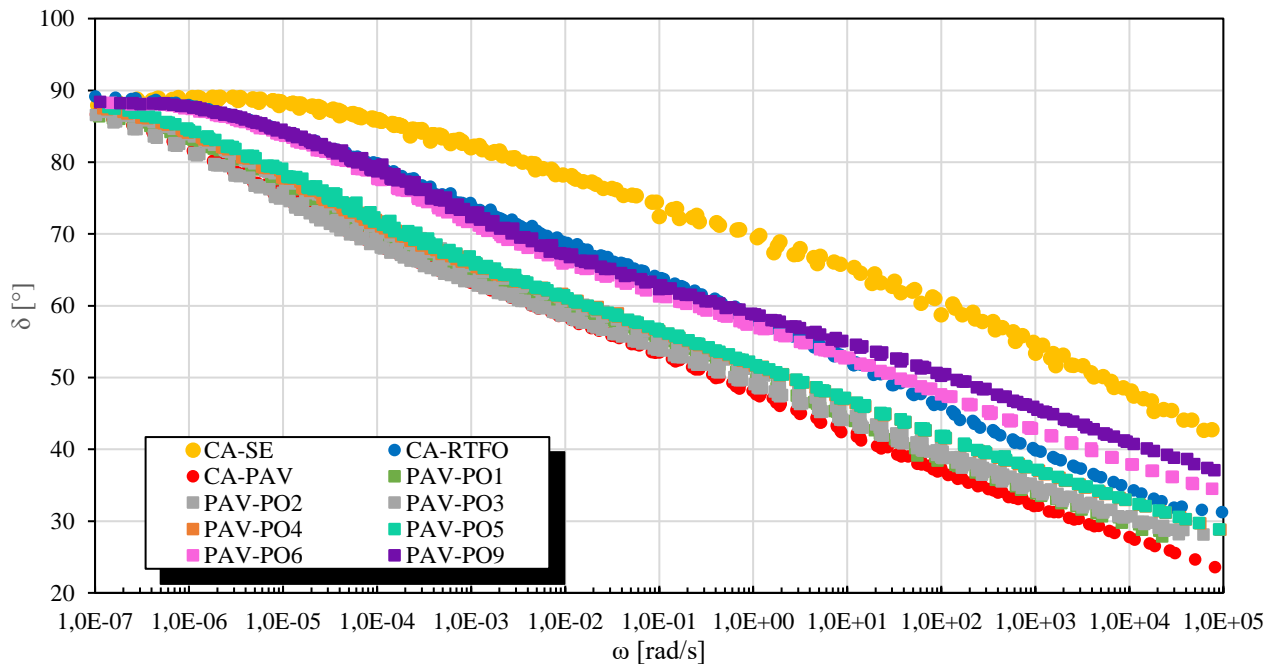


Figura 4.7 Curva maestra del ángulo de fase (δ°) de muestras con rejuvenecedor líquido. (Elaboración propia)

4.4 Muestras con rejuvenecedor encapsulado

Tal como ocurría para las muestras con rejuvenecedor líquido, el diagrama de Black de las muestras con rejuvenecedor encapsulado no presenta gran distinción entre las curvas.

Para mayores valores de módulo dinámico la muestra con 12% p/p tiene los menores valores ángulos de fase, seguida por la muestra 9% y finalmente la muestra con mayores ángulos de fase es el ligante con 6% de rejuvenecedor encapsulado. La relación de altos valores módulo dinámico y bajos ángulos de fase corresponden a ensayos a bajas temperaturas y altas frecuencias de carga, lo que indica que, para estas condiciones, mientras mayor es la cantidad de rejuvenecedor encapsulado el ligante presenta un comportamiento menos viscoso.

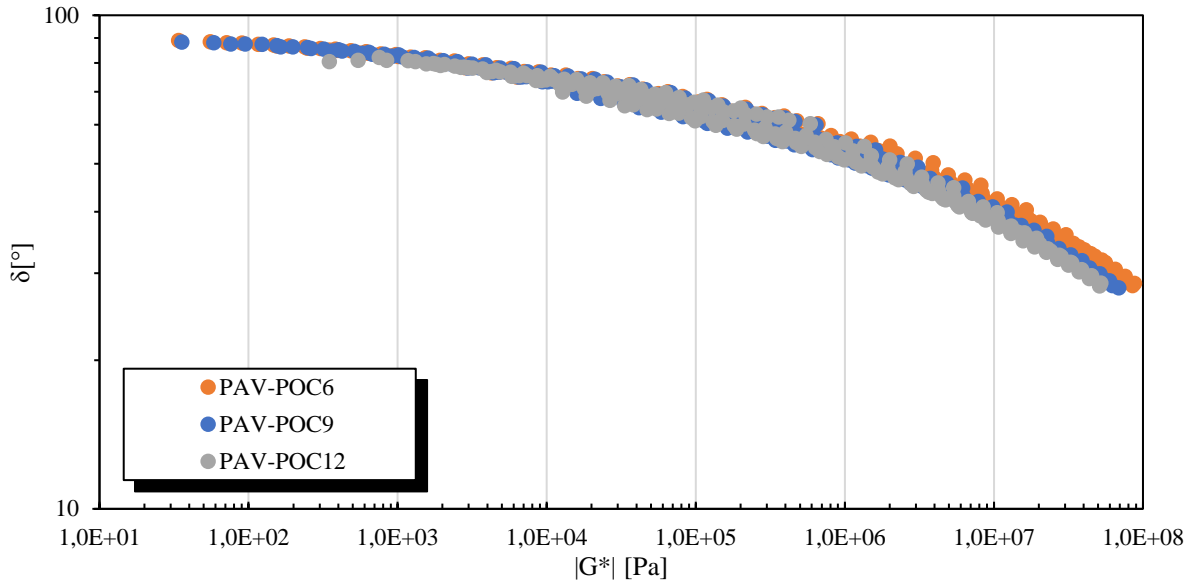


Figura 4.8 Diagrama de Black de muestras con rejuvenecedor encapsulado. (Elaboración propia)

Cabe mencionar que la curva para muestras con 12% de cápsulas recorre un menor rango de frecuencias, esto debido a que los ensayos a bajas frecuencias y altas temperaturas entregaban resultados anómalos. Los resultados obtenidos pueden atribuirse a la gran cantidad de cápsulas que interfieren con el ensayo del DSR.

4.4.1 Curva maestra de módulo dinámico de corte

En las curvas maestras de los rejuvenecedores encapsulados (Figura 4.9), al igual que para las muestras con rejuvenecedor líquido, el ligante original tiene menores módulos que el resto de las muestras siendo menos rígido, mientras que el ligante con envejecimiento secundario tiene mayores módulos, presentando un comportamiento más rígido.

Con respecto a la influencia de la frecuencia de carga, a menores frecuencias ($\leq 0,1$ rad/s), las curvas se distinguen claramente y se desplazan paralelamente entre sí. A mayores frecuencias, las curvas disminuyen la pendiente con la que aumenta el módulo de corte.

A mayor cantidad de cápsulas con líquido pirolítico, menor es el módulo del ligante, por lo que se restauran las propiedades del material. A frecuencias mayores a 10 rad/s, la muestra con 12% de cápsulas disminuye el módulo hasta el comportamiento con envejecimiento primario. De esto, se deduce que el líquido pirolítico encapsulado se está liberando (en cierta cantidad) bajo la acción de las frecuencias de carga y temperaturas aplicadas sobre la muestra. A diferencia de las muestras solo con líquido (Figura 4.4), ningún material alcanza módulos similares a la curva del ligante sin envejecer.

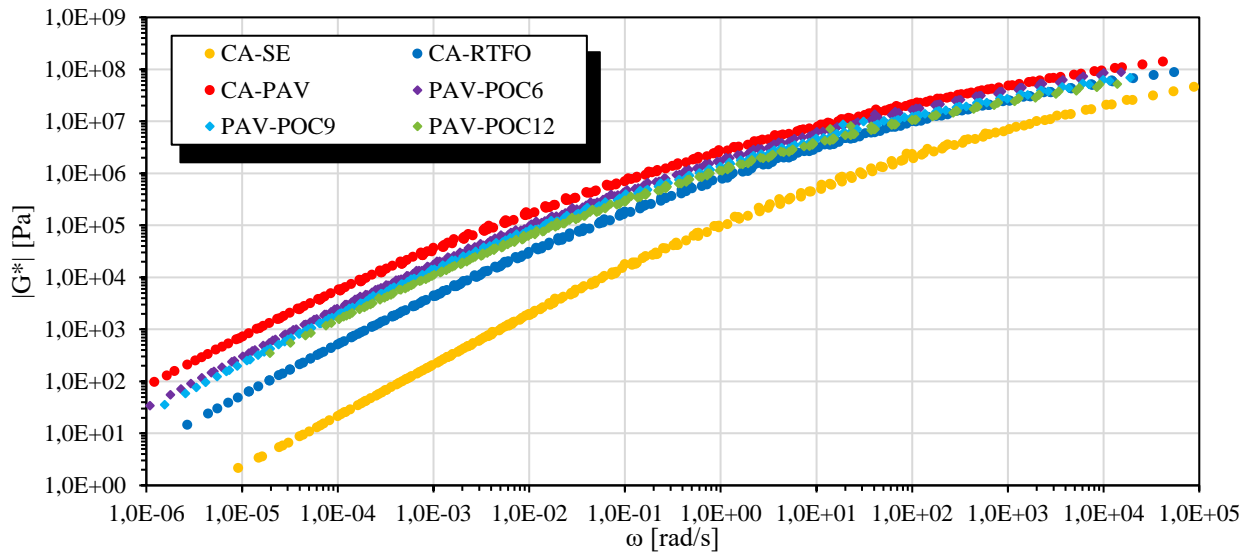


Figura 4.9 Curva maestra del módulo dinámico (G^*) de muestras con rejuvenecedor encapsulado. (Elaboración propia)

4.4.2 Curva maestra de ángulo de fase

Al obtener las curvas maestras (Figura 4.10), se puede observar que el ligante original tiene mayores ángulos de fase que el resto de las muestras, teniendo un comportamiento más viscoso. Los ángulos de fase de las muestras con líquido pirolítico encapsulado se encuentran por debajo y alejados de la curva del ligante con envejecimiento primario.

Las tres muestras presentan resultados similares entre sí y cercanos a la curva del envejecimiento secundario. A diferencia de lo ocurrido con las muestras con rejuvenecedor líquido que alcanza resultados similares al ligante con envejecimiento primario (Figura 4.7), el rejuvenecedor encapsulado no genera gran efecto en el ángulo de fase y no se vuelve más relevante su efecto a altas frecuencias, manteniéndose las curvas cercanas a la curva del ligante con envejecimiento PAV en todo el rango de frecuencias.

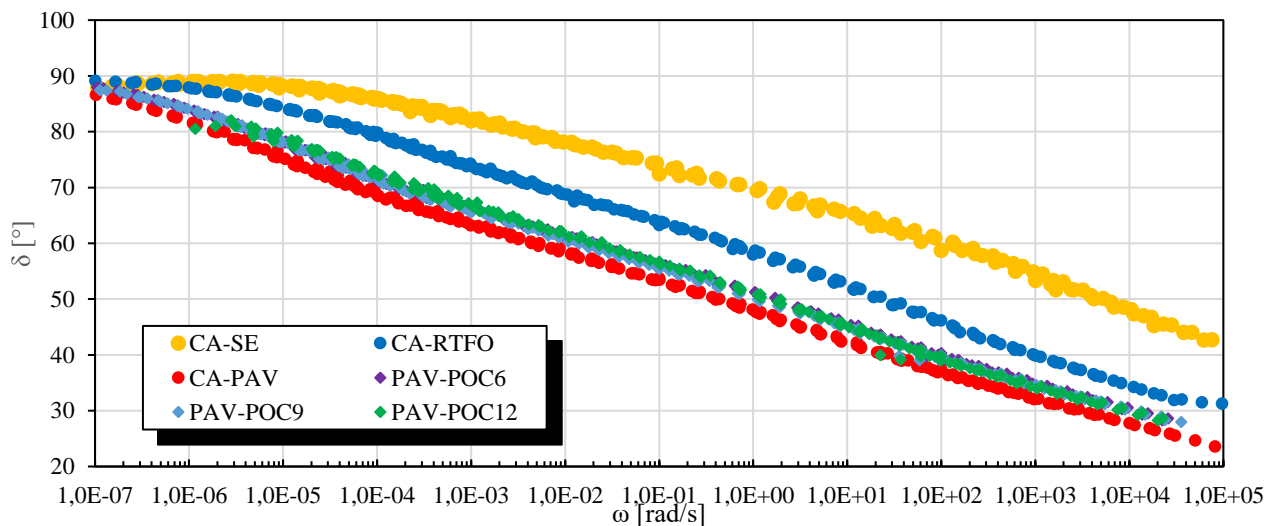


Figura 4.10 Curva maestra del ángulo de fase (δ°) de muestras con rejuvenecedor encapsulado. (Elaboración propia)

4.5 Comparación de resultados

En la Figura 4.11(a) se presentan las curvas maestras del módulo dinámico de corte para las muestras de rejuvenecedor líquido y rejuvenecedor encapsulado que más se asemejan en sus resultados, acotadas a un rango de frecuencia entre 0,01 rad/s a 1.000 rad/s. Por su parte, en la Figura 4.11(b) se presentan los valores del módulo dinámico para todas las muestras analizadas asociados a las frecuencias 0,01 rad/s, 10 rad/s y 1.000 rad/s. Se comparan las muestras con rejuvenecedor líquido, rejuvenecedor encapsulado y el ligante original en diferentes niveles de envejecimiento. Se observa que el ligante con 6% de cápsulas se asemeja al ligante con un 2% de líquido; el ligante con 9% de cápsulas se asemeja a la muestra con 3% de líquido, y la muestra con 12% de cápsulas al ligante con un 4% de rejuvenecedor líquido.

De forma complementaria, en la Figura 4.12(a) y Figura 4.12(b) se visualizan las curvas maestras del ángulo de fase y los ángulos de fase para las frecuencias de 0,01 rad/s, 10 rad/s y 1.000 rad/s respectivamente. Las muestras con 6%, 9% y 12 % de cápsulas presentaron valores de ángulos de fase similares y todas las muestras se asemejan al ligante con 2% de líquido pirolítico en el rango de frecuencias presentado.

La composición de las cápsulas, como se mencionó anteriormente, se encuentra en una relación 1:5 de alginato y líquido pirolítico. Dado esto, las muestras corresponden a un 5%, 7,5% y 10% p/p del ligante, solo en líquido, para las muestras PAV-POC6, PAV-POC9 y PAV-POC12, respectivamente. En función de esto, las muestras con cápsulas presentan resultados que señalan un comportamiento más rígido de lo que se esperaría de sus homólogas solo con líquido. Esto se puede deber mayormente a la cantidad de líquido que está siendo liberado desde las cápsulas al ligante en diferentes cantidades. Además, se desconoce el efecto que genera sobre el ligante envejecido el material del que se componen las cápsulas. Es decir, no existe conocimiento sobre el efecto de la cápsula desde el punto de vista de la cantidad de líquido rejuvenecedor en la superficie de la cápsula que puede estar afectando las propiedades reológicas, así como la interacción físico-química de la superficie polisacárida de la cápsula con la matriz del ligante.

Se debe resaltar que las muestras con rejuvenecedor encapsulado presentan variación en sus resultados para el módulo dinámico al aumentar la concentración de cápsulas y los resultados se asemejan a muestras con rejuvenecedor líquido en diferentes proporciones. En esto coincide que si aumenta la concentración de capsulas en la muestra también aumenta la concentración en la muestra con rejuvenecedor líquido a la que se asemeja, pero esto no ocurre con los resultados de ángulo de fase.

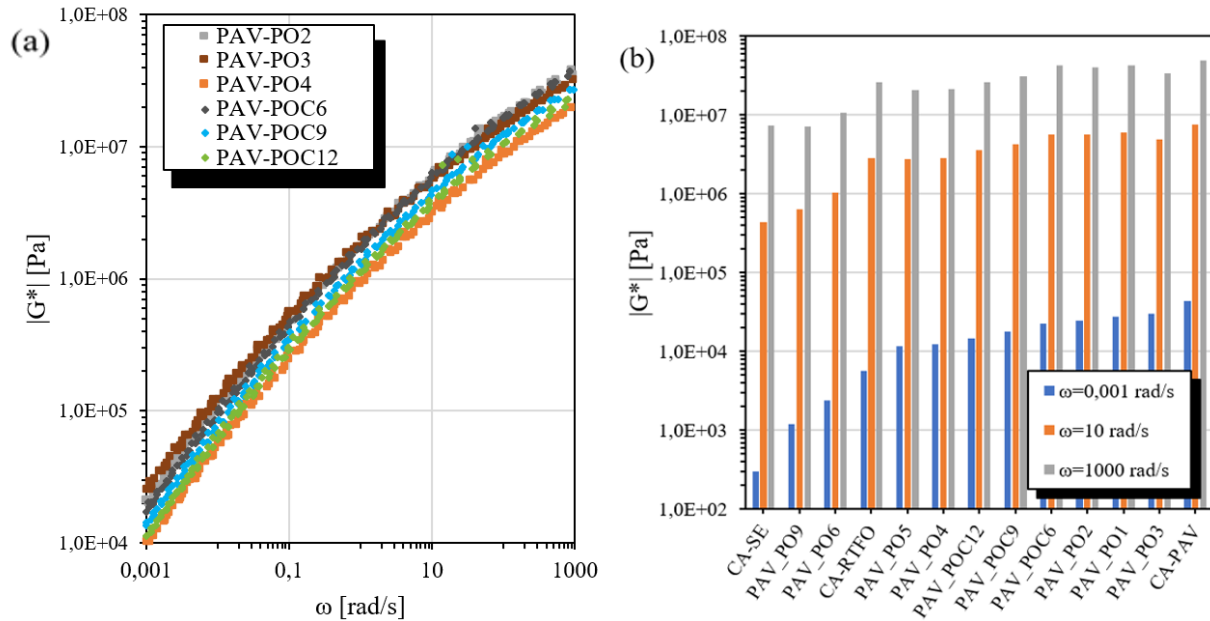


Figura 4.11 Comparación de resultados módulo dinámico de corte entre muestras con rejuvenecedor líquido y encapsulado: (a) curva maestra del módulo dinámico de corte para muestras con menor diferencia; (b) valores del módulo dinámico de corte asociados a frecuencias 0,001 rad/s, 10 rad/s, 1.000 rad/s. (Elaboración propia)

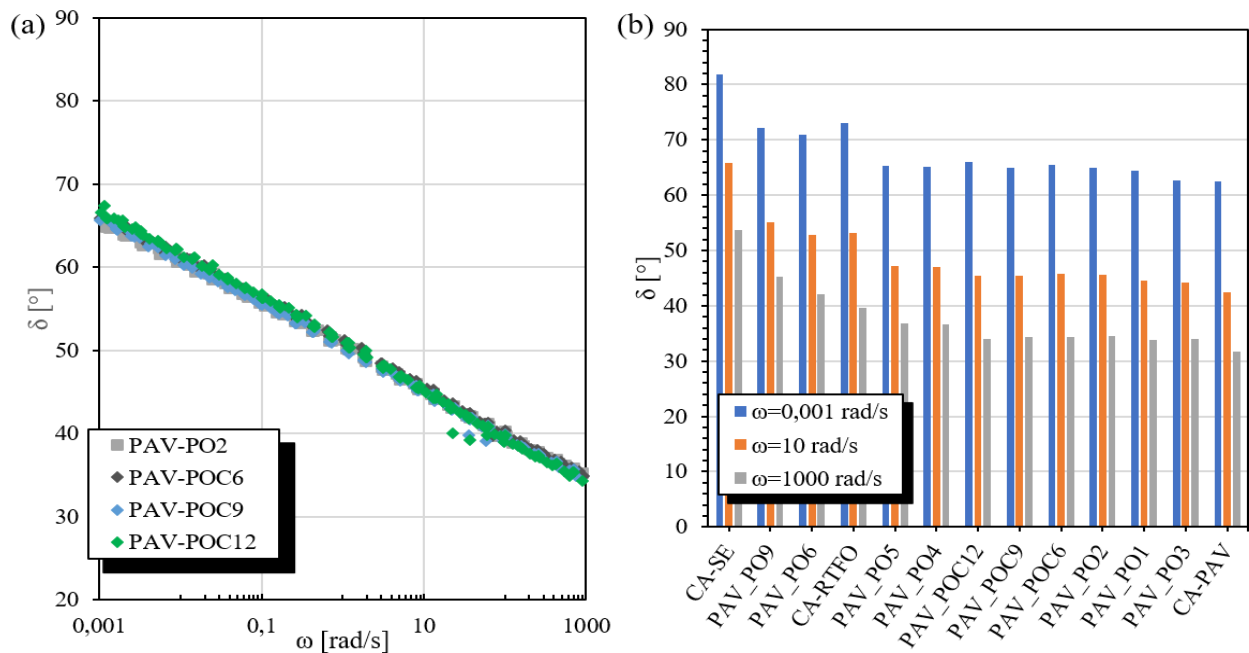


Figura 4.12 Comparación de resultados ángulo de fase entre muestras con rejuvenecedor líquido y encapsulado: (a) curva maestra de ángulo de fase para muestras con menor diferencia; (b) valores del ángulo de fase asociados a frecuencias 0,001 rad/s, 10 rad/s, 1.000 rad/s. (Elaboración propia)

4.6 Dosis óptima

El objetivo del uso de un agente rejuvenecedor, como se ha mencionado anteriormente, es mejorar las propiedades viscoelásticas y reológicas de un ligante envejecido, restaurándolas a su estado sin envejecer o a un nivel de envejecimiento menor. Dado lo anterior el ligante rejuvenecido no puede presentar peores propiedades que las que tiene el ligante original, en otras palabras, la calidad del ligante asfáltico no puede disminuir con la adición de un rejuvenecedor. Varios autores han planteado metodologías para estimar el contenido óptimo de un rejuvenecedor, donde se espera que las diferentes propiedades del ligante mejoren a menores temperaturas y sean similares a las del ligante sin envejecer a altas temperaturas (Behnood, 2019).

En la sección 4.2 Muestras de referencia, el ligante original se clasificó como un PG 64-22. En la Tabla 4-5 se presenta la resistencia al ahuellamiento y a la fatiga de las muestras con rejuvenecedor líquido y encapsulado según el criterio de ASTM D6373, los valores se calcularon interpolando los datos obtenidos mediante el barrido de frecuencia y temperatura, por lo que no sigue las especificaciones superpave para la clasificación según su grado de desempeño (PG). Se observó que los resultados para la muestra CA-SE y CA-PAV no coinciden con los resultados de la clasificación presentada en la Tabla 4-3, siendo los resultados extraídos de las curvas maestras menos rígidos, no cumpliendo con el criterio de ahuellamiento para un ligante sin envejecer. Lo cual se debe a la diferencia de condiciones entre ensayos, al estar expuesta la muestra a un amplio rango de frecuencias de carga y temperatura a comparación de las especificaciones para determinar el grado de desempeño de un ligante asfáltico.

Considerando lo anterior, se puede inferir que tanto para el criterio de falla por ahuellamiento como por fatiga se están subestimando los valores, aun así, a excepción de la muestra CA-SE en ahuellamiento todas las muestras con rejuvenecedor líquido y encapsulado cumplen con el criterio de ahuellamiento y fatiga para ser clasificado como un PG 64-22. Por otro lado, no es posible extrapolar los datos para estimar el agrietamiento térmico de los ensayos realizados.

Tabla 4-5 Criterio de falla por ahuellamiento y fatiga para todas las muestras ensayadas. (Elaboración propia)

Muestra	Ahuellamiento	Fatiga
	Criterio: T°= 64°C G/sin(δ)>1 [kPa] Ligante original G/sin(δ)>2,2 [kPa] Ligante RTFO	Criterio: T°= 25°C G*sin(δ) <6000 [kPa]
CA-SE	0,73	455,67
CA-RTFO	5,79	2380,93
CA-PAV	19,51	5503,08
PAV-PO1	14,92	4196,09
PAV-PO2	12,63	4100,58
PAV-PO3	18,63	3771,34
PAV-PO4	11,08	2193,01
PAV-PO5	10,69	2129,34
PAV-PO6	4,60	866,48
PAV-PO9	3,05	565,66
PAV-POC6	11,98	4124,92
PAV-POC9	12,42	3077,24
PAV-POC12	11,72	2649,94

Dado lo anterior y lo observado en las Figura 4.4 y Figura 4.7, las muestras que presentan mejores resultados para los rejuvenecedores líquidos son PAV_PO6 (ligante con envejecimiento PAV con un 6% de líquido pirolítico) y PAV_PO9 (ligante con envejecimiento PAV con un 9% de líquido pirolítico) al presentar los resultados más cercanos a la muestra CA-SE (ligante sin envejecer).

En condiciones generales, los ligantes rejuvenecidos no deben presentar resultados por debajo de las propiedades del ligante sin envejecer, dado que esto puede implicar un uso excesivo de cantidad de rejuvenecedor reduciendo la resistencia a la deformación, el rendimiento en recuperación elástica y las propiedades de adhesión.

A bajas frecuencias (altas temperaturas) es preferible que el ligante sea más rígido y tenga un comportamiento menos viscoso, pues en estas condiciones es más factible que se presenten fallas por ahuellamiento. Por otro lado, a altas frecuencias (bajas temperaturas) el ligante se encuentra más rígido y es propenso a sufrir fallas por fatiga y agrietamiento térmico por lo que es preferible que los resultados sean menos rígidos y con comportamiento más viscoso.

En la Figura 4.13(a) se presentan las curvas maestras de modulo dinámico para las muestras CA-SE, PAV-PO6 y PAV-PO9, Para frecuencias mayores a 10 rad/s. En la Figura 4.13(b) se presenta un ajuste de curva cuadrática para las mismas muestras. El intercepto de las muestras PAV-PO6 y PAV-PO9 con el ligante sin envejecer se resume en la Tabla 4-6, estos puntos señalan donde las muestras mencionadas anteriormente presentan menores valores de módulo dinámico que el ligante sin envejecer. La muestra PAV-PO9 tiene resultados menos rígidos por lo que queda por debajo de la curva CA-SE a frecuencias menores que la muestra PAV-PO6. Dado que estos cruces con el ligante sin envejecer ocurren a altas frecuencias su efecto no es tan relevante y no deberían traer consecuencias negativas como se mencionaron anteriormente.

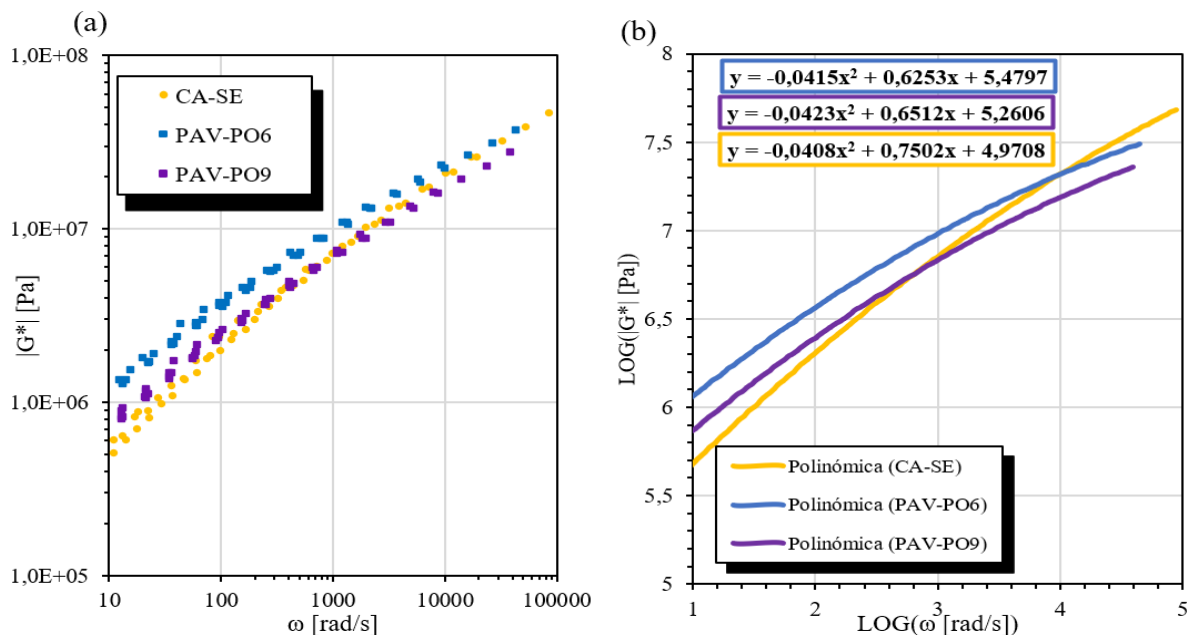


Figura 4.13 (a) Curvas maestras de módulo dinámico de 6% y 9% de líquido pirolítico y del ligante sin envejecer; (b) Ajuste cuadrático para las curvas con 6% y 9% de líquido pirolítico y ligante sin envejecer. (Elaboración propia)

Tabla 4-6 Intercepto de las curvas maestras para módulo dinámico de 6% y 9% de líquido pirolítico con la curva de ligante sin envejecer. (Elaboración propia)

Intercepto con curva CA-SE		
Muestra	ω (rad/s)	G* [Pa]
PAV-PO6	9592,43	2,05E+07
PAV-PO9	634,79	5,66E+06

Para los resultados a bajas frecuencias de las curvas de módulo dinámico, se aprecia que la muestra PAV-PO6 presentó resultados más rígidos que la muestra PAV-PO9 (Figura 4.14a). En la Figura 4.15(b) se presentan los porcentajes de variación de ambas muestras respecto al ligante original para frecuencias menores a 1 rad/s donde hay una diferencia notable entre ambas muestras. En cambio, la curva de ángulo de fase a bajas frecuencias (< 1 rad/s) no presenta gran variabilidad entre la muestra con un 6% y 9% de líquido (Figura 4.7) y a altas frecuencias (> 1 rad/s), la variación porcentual entre ambas muestras es menor, como se puede apreciar en la Figura 4.14 (b) y Figura 4.15(b), a comparación de la variación que se presenta en el módulo dinámico.

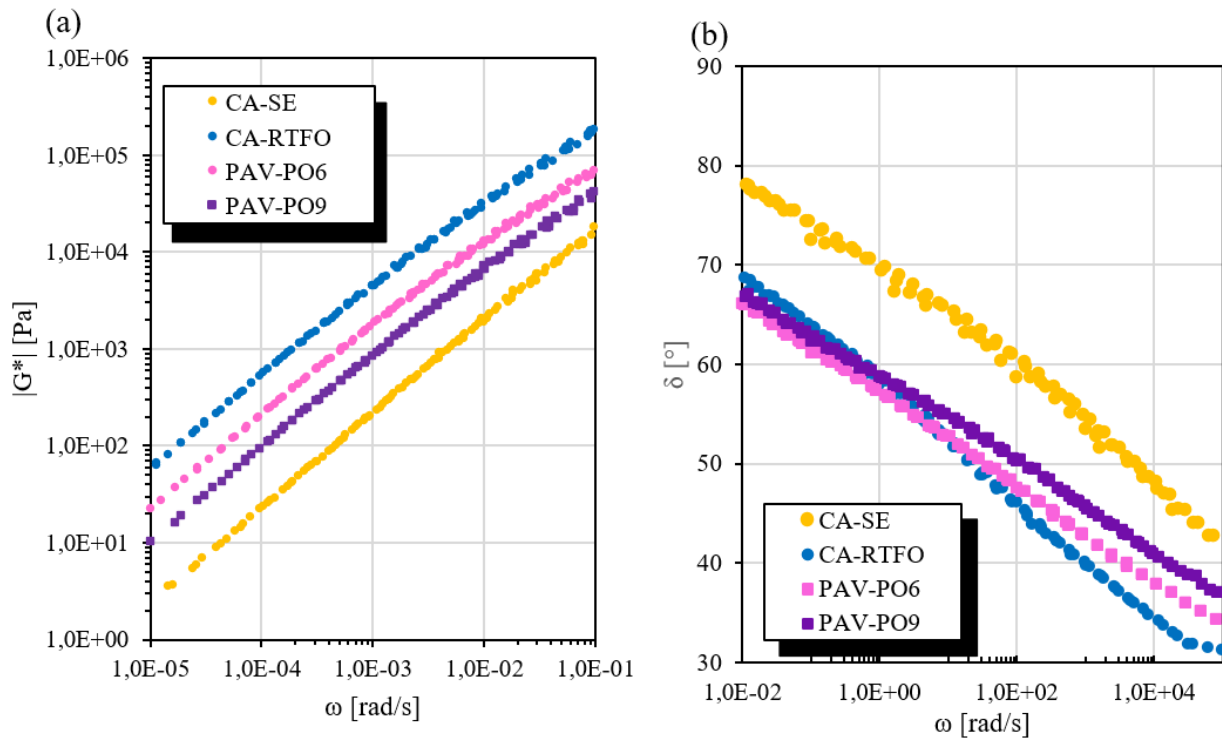


Figura 4.14 Comparación entre muestra PAV-PO6 y PAV-PO9. (a) curvas maestras de G^* para bajas frecuencias; (b) Curvas maestras de δ° para altas frecuencias. (Elaboración propia)

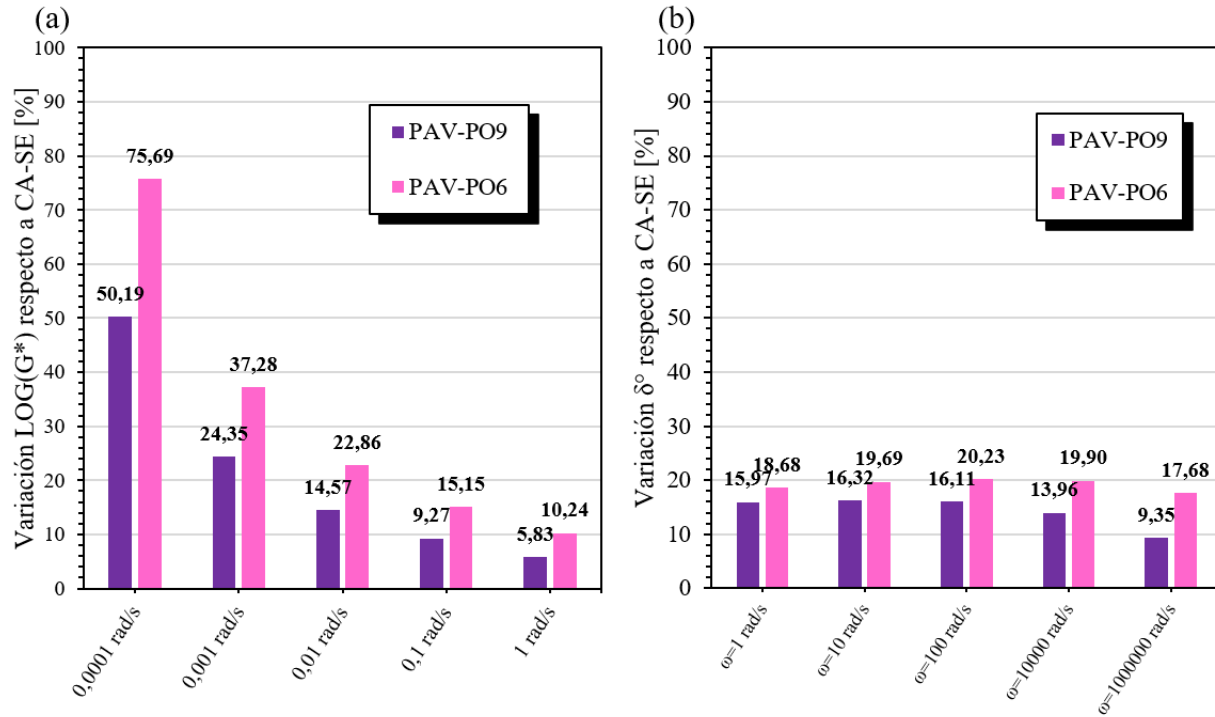


Figura 4.15 Diferencia porcentual de las muestras PAV-PO6 y PAV-PO9 con respecto al ligante sin envejecer a diferentes frecuencias. (a) Diferencia porcentual del módulo dinámico G^* ; (b) Diferencia porcentual del ángulo de fase δ° . (Elaboración propia)

Considerando todo lo anterior, para el contenido óptimo de rejuvenecedor se seleccionó la muestra con un 6% de líquido pirolítico, al presentar resultados más conservadores y tener un mejor comportamiento a bajas frecuencias.

En las muestras con rejuvenecedor encapsulado se opta por aquella muestra que tenga los resultados más similares a un ligante con envejecimiento primario, puesto que el objetivo de estas cápsulas es que al romperse sellen grietas y presenten condiciones similares a las que se espera de del pavimento que comienza su vida útil. La muestra que mejor cumple esta condición es PAV_POC12 (ligante con envejecimiento PAV con un 12% de cápsulas). Pues es la muestra que más se asemeja al ligante con envejecimiento primario (CA-RTFO) para módulo dinámico y los resultados de ángulo de fase fueron similares en todas las muestras.

Nótese que, aunque se optó por definir un óptimo, los ensayo realizados no son suficientes para determinar el contenido óptimo de rejuvenecedor y se requiere observar su efecto frente a otros ensayos, por ejemplo, medir la resistencia al agrietamiento térmico. Además, de conocer la susceptibilidad de las muestras rejuvenecidas al envejecimiento.

5 Conclusiones

5.1 General

En este estudio se realizaron ensayos de barrido de frecuencia y temperatura a muestras de CA-24 envejecido, mezcladas con rejuvenecedor en estado líquido y encapsulado obtenidos a partir de la pirólisis de neumáticos fuera de uso y la utilización de métodos de encapsulamiento físico-mecánicos. El ensayo se realizó con el fin de evaluar el efecto de estos aditivos en las propiedades reológicas del ligante asfáltico, y si estos coinciden con los efectos esperados de un material rejuvenecedor.

Dentro de los resultados se observó que las muestras con rejuvenecedor encapsulado generaron mayores problemas en el momento de realizar los ensayos, especialmente con la muestra de 12% de rejuvenecedor encapsulado la cual a bajas frecuencias y altas temperaturas tendía a rebalsar el plato de ensayo no permitiendo mediciones.

Los resultados de repetibilidad de ensayos demuestran que las muestras son altamente sensibles, dificultando obtener el porcentaje mínimo de variación aceptado por la normativa. En general, esta mayor variabilidad se da a frecuencias bajas y altas temperaturas. La alta sensibilidad de las muestras también se observa al comparar los resultados de la clasificación PG del ligante asfáltico de referencia con los resultados extraídos de las curvas maestras. Se presentan valores menores en las condiciones de falla para ahuellamiento y fatiga en los datos extraídos de las curvas maestras, al estar expuesta a un mayor rango de frecuencia de carga y temperatura que en el ensayo realizado específicamente para la clasificación PG del ligante.

En general, se comprobó que la incorporación del líquido pirolítico ya sea de forma directa o en cápsulas, actuó como un rejuvenecedor alterando las propiedades reológicas del cemento asfáltico envejecido: disminuyendo el módulo de corte dinámico y aumentando el ángulo de fase donde, a mayor concentración del líquido en el ligante, mayor fue el efecto sobre las propiedades reológicas en la mayoría de los casos. Las excepciones se aprecian en las muestras con rejuvenecedor encapsulado en las cuales el ángulo de fase no mostró una variación notable al aumentar el contenido de cápsulas.

Los resultados no fueron homogéneos en todo el rango de frecuencias de carga. El efecto del rejuvenecedor fue más notorio a altas frecuencias (bajas temperaturas) que a bajas frecuencias (altas temperaturas). Además, el efecto fue más destacado en los resultados del módulo dinámico de corte, que en los del ángulo de fase, alcanzando en el primero, resultados similares a un ligante sin envejecer. En cambio, el ángulo de fase solo alcanzó valores cercanos a un ligante sometido a envejecimiento primario.

Aunque las muestras con cápsulas generaron el rejuvenecimiento de las propiedades reológicas del ligante, su efecto fue en menor cantidad que sus homólogos en estado líquido, de las cuales se desconoció cuántas cápsulas liberaron líquido y en qué proporción se liberó. También se desconoce qué efecto generó en el ligante la superficie de alginato de las cápsulas (cápsulas vacías).

5.2 Futura investigación

Con el fin de complementar los resultados obtenidos en este estudio, se puede analizar qué ocurre con las muestras tras realizado el ensayo de barrido de frecuencia y temperatura, analizando en la muestra las variaciones en sus grupos funcionales carbonilo y sulfóxido por caracterización ATR-FTIR. Asimismo, también se recomienda ensayar muestras de ligante con cápsulas vacías para conocer el efecto de la estructura polinuclear del aditivo sobre las propiedades reológicas del ligante.

Finalmente, dado a que se considera que el ensayo de barrido de frecuencia y temperatura no resulta suficiente para estimar el contenido óptimo de rejuvenecedor, a partir del análisis de módulo dinámico y ángulo de fase. Los ensayos que pueden complementar los resultados corresponden a respuestas a la fatiga y ensayos de agrietamiento térmico.

Se debe conocer cómo reaccionan las muestras del ligante rejuvenecidas al ser sometidas nuevamente a envejecimiento mediante RTFO y PAV. De esta forma, volver a analizar las propiedades fundamentales y comparar los resultados con las muestras en las mismas condiciones, pero que no han sido rejuvenecidas.

Dentro de los ensayos para resistencia a la fatiga una opción es realizar el ensayo LAS (Linear Amplitud Sweep), además de la caracterización a la fatiga de las especificaciones Superpave ((ASTM D6373, 2021) puesto que el enfoque de este ensayo carece de la capacidad de caracterizar de forma real la resistencia al daño por fatiga donde los ensayos son realizados en pocos ciclos de carga y a un bajo nivel de deformación (Hintz, 2012). Por otra parte, el ensayo LAS somete al ligante asfáltico a múltiples ciclos de carga aumentando el nivel de deformación con el fin de simular el daño por fatiga en la muestra.

6 Bibliografía

- Aguirre, M. A., Hassan, M. M., Shirzad, S., Daly, W. H., & Mohammad, L. N. (2016). Micro-encapsulation of asphalt rejuvenators using melamine-formaldehyde. *Construction and Building Materials*, *114*, 29–39. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.157>
- Airey, G. (2002). Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data. *Road Materials and Pavement Design*, *3*, 403–424. <https://doi.org/10.1080/14680629.2002.9689933>
- Airey, G. D. (2003). State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *International Journal of Pavement Engineering*, *4*(3), 165–176. <https://doi.org/10.1080/1029843042000198568>
- ASTM D 2872. (2019). Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test). En *ASTM International*.
- ASTM D6373. (2021). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. En *ASTM International*.
- ASTM D6521. (2019). Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV). En *ASTM International*. Annual Book of ASTM Standards USA.
- ASTM D6648-08. (2016). Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). En *ASTM International*.
- ASTM D7175. (2015). Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. *ASTM International*, *8*.
- Behnood, A. (2019). Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 231). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>
- Cai, X., Zhang, J., Xu, G., Gong, M., Chen, X., & Yang, J. (2019). Internal aging indexes to characterize the aging behavior of two bio-rejuvenated asphalts. *Journal of Cleaner Production*, *220*, 1231–1238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.203>
- Cámara de la industria del neumático de Chile. (2019). *Generación de neumáticos fuera de uso*. CINC.
- Chiu, C. te, & Lee, M. G. (2006). Effectiveness of seal rejuvenators for bituminous pavement surfaces. *Journal of Testing and Evaluation*, *34*(5), 390–394. <https://doi.org/10.1520/JTE100056>
- Concha, J., Arteaga-Pérez, L., Alpizar-Reyes, E., Segura, C., Gonzalez-Torre, I., Kanellopoulos, A., & Norambuena-Contreras, J. (2022). Effect of rejuvenating oil type on the synthesis and properties of alginate-based polynuclear capsules for asphalt self-healing. *Road Materials and Pavement Design*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2092026>
- Delgadillo, R. (2019). Apuntes Curso Laboratorio Vial. En *Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María*.
- Dirección de Vialidad. (2020). *Red Vial Nacional-Dimensionamiento y Características*. Ministerio de Obras Públicas.

- García, A., Austin, C. J., & Jelfs, J. (2016). Mechanical properties of asphalt mixture containing sunflower oil capsules. *Journal of Cleaner Production*, 118, 124–132. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.072>
- García, A., Jelfs, J., & Austin, C. J. (2015). Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. *Construction and Building Materials*, 101, 309–316. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.062>
- García, Á., Schlangen, E., & van de Ven, M. (2011). Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Fuel*, 90(2), 583–591. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.09.033>
- García, Á., Schlangen, E., van de Ven, M., & Sierra-Beltrán, G. (2010). Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1–3), 603–611. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.08.078>
- García, G. (2007). *HMA DYNAMIC MODULUS PREDICTIVE MODELS A REVIEW*. <https://www.researchgate.net/publication/237399336>
- González, Á. (2012). “DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS DE BETUNES ASFÁLTICOS TRADICIONALES Y MODIFICADOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR)” [Memoria de titulación para optar al título de Ingeniero Civil]. Universidad Técnica Federico Santa María.
- González, A., Marzal Ixa, Delgadillo Rodrigo, Concha José L, Arteaga-Perez Luis E., Segura Cristina, & Norambuena-Contreras José. (2022). EFECTO DE REJUVENECEDORES LÍQUIDOS Y ENCAPSULADOS BASADOS EN PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE UN LIGANTE ASFÁLTICO. En *Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto 2022 (XXI CILA), Punta Del Este, Uruguay*.
- Gonzalez-Torre, I., & Norambuena-Contreras, J. (2020). Recent advances on self-healing of bituminous materials by the action of encapsulated rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 258, 119568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119568>
- Hintz, C. (2012). *Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue* [A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy]. University of Wisconsin.
- Karlsson, R., & Isacson, U. (2003). Investigations on bitumen rejuvenator diffusion and structural stability. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, 72, 463–501.
- Lin, J., Hong, J., Huang, C., Liu, J., & Wu, S. (2014). Effectiveness of rejuvenator seal materials on performance of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 55, 63–68. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.018>
- Ma, T., Huang, X., Zhao, Y., & Zhang, Y. (2015). Evaluation of the diffusion and distribution of the rejuvenator for hot asphalt recycling. *Construction and Building Materials*, 98, 530–536. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.135>

- Marasteanu, M., & Anderson, D. (2001). Techniques for Determining Errors in Asphalt Binder Rheological Data. *Transportation Research Record*, 1766, 32–39. <https://doi.org/10.3141/1766-05>
- Menares, T., Herrera, J., Romero, R., Osorio, P., & Arteaga-Pérez, L. E. (2020). Waste tires pyrolysis kinetics and reaction mechanisms explained by TGA and Py-GC/MS under kinetically-controlled regime. *Waste Management*, 102, 21–29. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.10.027>
- Nesterova, T., Dam-Johansen, K., & Kiil, S. (2011). Synthesis of durable microcapsules for self-healing anticorrosive coatings: A comparison of selected methods. *Progress in Organic Coatings*, 70(4), 342–352. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2010.09.032>
- Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Pérez, L., Concha, J., & Gonzalez-Torre, I. (2021). Pyrolytic oil from waste tyres as a promising encapsulated rejuvenator for the extrinsic self-healing of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*, 22, 1–17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1907216>
- Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Perez, L. E., Guadarrama-Lezama, A. Y., Briones, R., Vivanco, J. F., & Gonzalez-Torre, I. (2020). Microencapsulated Bio-Based Rejuvenators for the Self-Healing of Bituminous Materials. *Materials* 2020, Vol. 13, Page 1446, 13(6), 1446. <https://doi.org/10.3390/MA13061446>
- Norambuena-Contreras, J., Concha, J. L., Arteaga-Pérez, L. E., & Gonzalez-Torre, I. (2022). Synthesis and Characterisation of Alginate-Based Capsules Containing Waste Cooking Oil for Asphalt Self-Healing. *Applied Sciences*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/app12052739>
- Norambuena-Contreras, J., Yalcin, E., Garcia, A., Al-Mansoori, T., Yilmaz, M., & Hudson-Griffiths, R. (2018). Effect of mixing and ageing on the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures containing polymeric capsules. *Construction and Building Materials*, 175, 254–266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.153>
- Ongel, A., & Hugener, M. (2015). Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, 94, 467–474. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.07.030>
- Papagiannakis, A. T., Masad, E. A. P. E., & Wiley, J. (2008). *Pavement Design and Materials*. <http://www.wiley.com/go/permissions>.
- Piao, Z., Mikhailenko, P., Kakar, M. R., Bueno, M., Hellweg, S., & Poulikakos, L. D. (2021). Urban mining for asphalt pavements: A review. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124916. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124916>
- Read, J., Whiteoak, D., & Hunter, R. N. (2003). *The shell bitumen handbook*. Thomas Telford.
- Thenoux, G., González, Á., & Dowling, R. (2007). Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resources, Conservation and Recycling*, 49(4), 325–339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.02.005>
- Valdés-Vidal, G., Calabi-Floody, A., Miró-Recasens, R., & Norambuena-Contreras, J. (2015). Mechanical behavior of asphalt mixtures with different aggregate type. *Construction and Building Materials*, 101, 474–481. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.050>

- Wang, Y., & Hao, P. (2021). Rheological and fatigue-healing durability of asphalt containing synthesized microcapsules with refined waste oil core. *Construction and Building Materials*, 274, 121964. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121964>
- WARDLAW, & Kenneth, R. (1992). *Polymer modified asphalt binders* (ASTM International).
- Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. *Waste Management*, 33(8), 1714–1728. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2013.05.003>

7 Anexo: Uso de reómetro de corte dinámico (DSR)

El reómetro de corte dinámico (DSR – Dynamic Shear Rheometer) es un dispositivo utilizado comúnmente para evaluar las propiedades viscoelásticas de los ligantes asfálticos. Este dispositivo consta de 2 platos paralelos entre los cuales se coloca una muestra a la que se le aplica deformaciones o esfuerzos de corte bajo condiciones de temperatura y frecuencia controlada. El mecanismo de funcionamiento consiste en que el plato inferior se mantiene fijo, mientras el plato superior rota aplicando cargas de torsión a la muestra de ligante asfáltico (Papagiannakis et al., 2008). En la Figura 7.1 se representa el mecanismo de platos paralelos y la deformación sinusoidal que genera. El esfuerzo de corte y deformación máxima para el DSR son calculados según la Ecuación 7-1 y Ecuación 7-2.

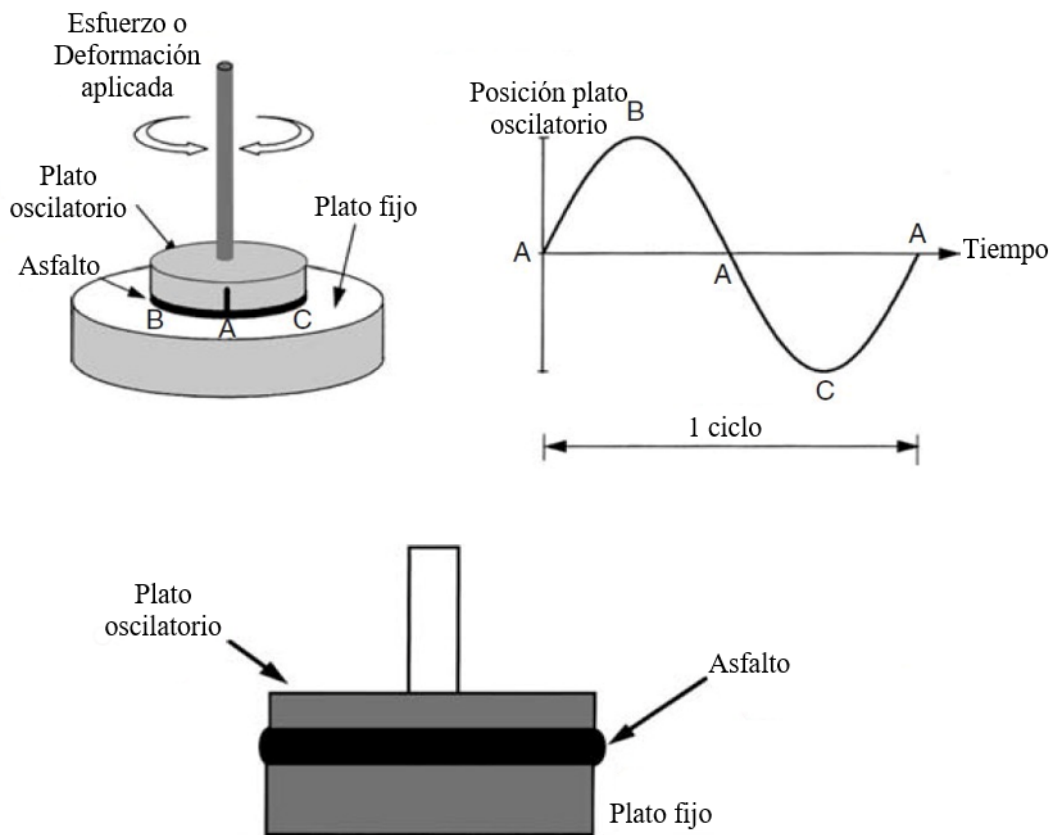


Figura 7.1 Esquema del mecanismo de funcionamiento del reómetro de corte dinámico. (Papagiannakis et al., 2008)

$$\tau_{max} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad \text{Ecuación 7-1}$$

$$\gamma_{max} = \frac{\theta r}{h} \quad \text{Ecuación 7-2}$$

Donde T es el máximo torque aplicado, r es el radio del plato, θ es el ángulo y h es la altura del cilindro de asfalto.

7.1 Equipos complementarios

Para el funcionamiento del reómetro de corte dinámico se requieren otros dispositivos complementarios para su funcionamiento de los cuales se incluye un computador, un compresor de aire, sistema de filtros, condensador y el equipo Peltier H-PTD 200.

El computador funciona como centro de mando donde se controla el reómetro de corte dinámico mediante el software Anton Paar RheoCompass. El compresor de aire (Figura 7.2 a) corresponde a un equipo externo que se encarga de brindar un flujo continuo de aire a una presión determinada, de manera de proporcionar protección al motor del reómetro frente al roce, se recomienda que mantenga una presión entre 5[bar] y 10 [bar] (Á. González, 2012). Por su parte, el sistema de filtros (Figura 7.2 b) es necesario para que el aire entregado por el compresor se encuentre libre de partículas de polvo y humedad. El condensador (Figura 7.2 c) se encarga de regular las diferencias de temperatura del reómetro, mediante un flujo de agua constante, lo cual permite que el reómetro funcione en un amplio rango de temperaturas. Finalmente, el equipo Peltier H-PTD 200 (Figura 7.2 d) es una cámara cuya finalidad es regular las temperaturas de ensayo y cubrir la muestra para protegerla de elementos externos.

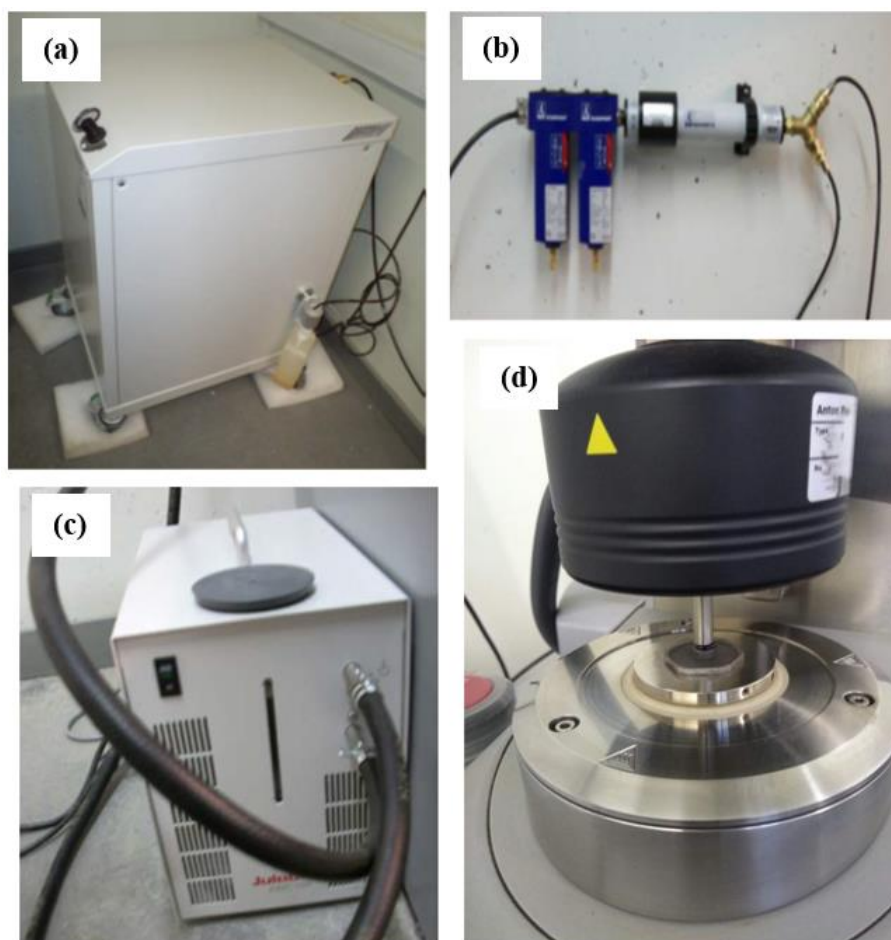


Figura 7.2 Equipos complementarios al reómetro de corte dinámico. (a) Compresor de aire; (b) Sistema de filtros; (c) Condensador; (d) Peltier H-PTD 200. (Á. González, 2012) y (Elaboración propia)

7.2 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra se realizó en frío utilizando moldes de silicona, para esto se utilizaron dos métodos de extracción de la muestra; el primero consiste en calentar una espátula metálica directamente en un mechero y utilizarla para extraer la muestra. El problema con este método es que no se tiene control de la temperatura pudiendo sobrecalentar el material, además que dificultaba la extracción, pues a veces el ligante asfáltico se volvía demasiado blando o no se ablandaba lo suficiente para poder obtener la muestra. El segundo método consistió en calentar en un horno el frasco contenedor de la muestra de ligante a una temperatura de 60°C por no más de 10 minutos. Este método tiene la ventaja en que la muestra tiene una consistencia homogénea por lo que es más sencillo extraerla, pero implica tener que volver a calentar la muestra cada vez que se requiera realizar una repetición del ensayo. En ambos casos los resultados no mostraron mayor variabilidad respecto a realizar el ensayo utilizando el mismo método de extracción. En la Figura 7.3 se pueden observar los recipientes con todas las muestras que fueron ensayadas.

El tamaño de la muestra a extraer depende del plato del ensayo, para lo cual se utilizan los moldes de silicona que ajustan su volumen al de la muestra (Figura 7.4), la cual luego de ser colocada en el reómetro debe ser recortada para evitar exceso de material que puede alterar los resultados del ensayo. Dado lo anterior en el “manual de usuario de reómetro de corte dinámico” (Á. González, 2012) se establece una masa determinada para cada tipo de plato y de esta forma evitar el recorte de la muestra. En la Tabla 7-1 se especifica la masa según el plato paralelo a utilizar.

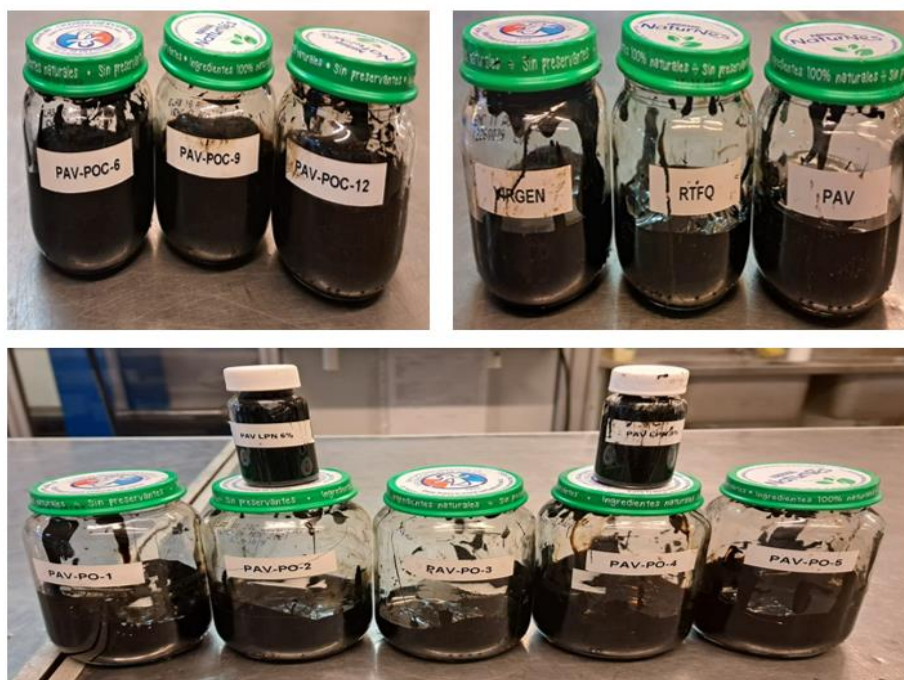


Figura 7.3 Muestras de ligante asfáltico de referencia, Ligante PAV con rejuvenecedor líquido y Ligante PAV con rejuvenecedor encapsulado. (Elaboración propia)



Figura 7.4 Molde de silicona con muestra de ligante asfáltico para los platos paralelos de 8 mm. (Elaboración propia)

Tabla 7-1 Masa de muestra de ligante asfáltico según plato de ensayo. (Á. González, 2012)

Masa (g)	Platos paralelos
0,1125	Platos paralelos de 8 mm (I-PP08 y PP08)
0,5211	Platos paralelos de 25 mm (I-PP25 y PP25)

7.3 Uso del software RheoCompass para la realización del barrido de frecuencia y temperatura

Los ensayos realizados con el reómetro de corte dinámico modelo Anton Paar MCR-301 son controlados desde un computador mediante el software Anton Paar RheoCompass, este permite regular todas las características del ensayo. El software presenta los diferentes pasos para realizar los ensayos mediante pestañas y diagramas de flujo que van indicando la acción que ejecutara el reómetro.

Para la realización del ensayo se modificaron dos plantillas base del software para ajustarla a los requisitos de los ensayos. Los ensayos editados consistieron en “Frequency sweep higher temperatures” y “Frequency sweep lower temperatures” como se presenta en la Figura 7.5. El ensayo varía según el sistema de platos paralelos a operar con el equipo. Correspondiendo el ensayo “Frequency sweep higher temperatures” a los platos de 25 mm y el ensayo “Frequency sweep lower temperatures” a los platos de 8 mm.

Se creó un nuevo proyecto desde la pestaña “File” y se seleccionó de la lista una de las plantillas mencionadas anteriormente dependiendo del sistema de platos a utilizar. Los cuales dependen del nivel de envejecimiento y la temperatura según lo presentado en la Tabla 3-3 del capítulo 3.2.

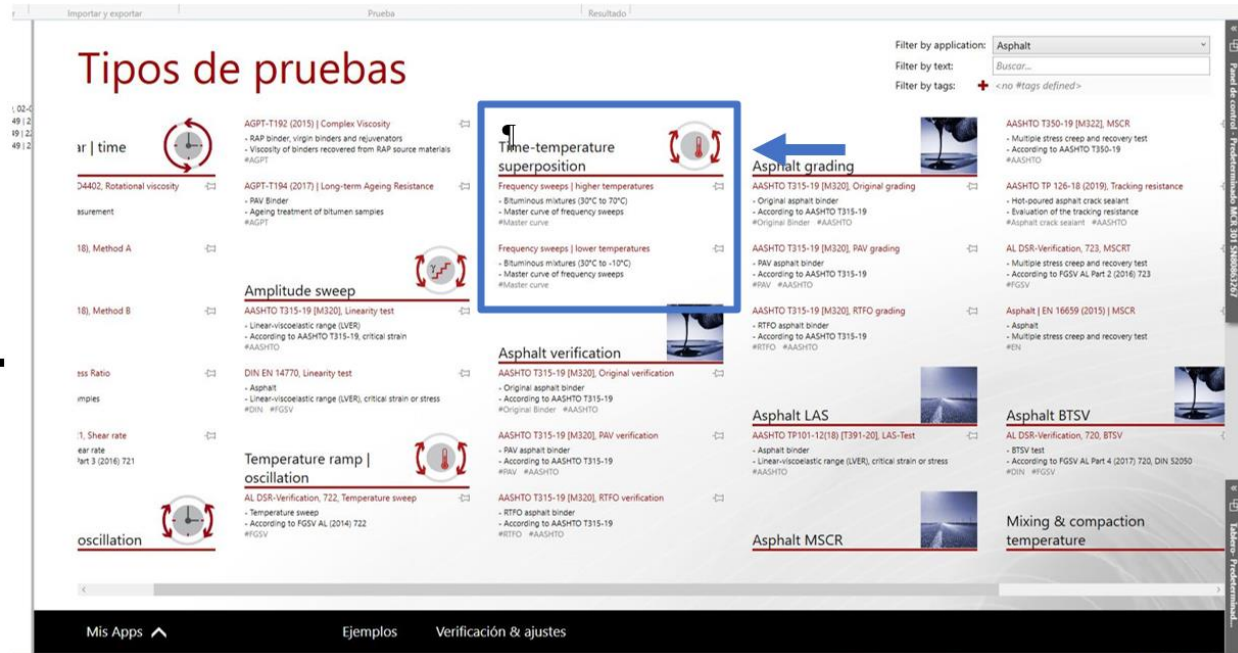


Figura 7.5 Captura del software RheoCompass donde se presentan plantillas de ensayos para asfaltos. Señalando ensayos relacionados a superposición de tiempo – temperatura. (Elaboración propia)

El primer paso consiste en inicializar el reómetro de corte dinámico en la pestaña “set-up”, durante esta etapa el programa reconoce al equipo, verifica que el sistema de platos instalado corresponda al ensayo a realizar y calibra la altura entre los platos estableciendo el “zero-gap” que corresponde a cuando no hay espacio entre los platos. Lo anterior se detalla en la Figura 7.6.

Luego, se procede a la pestaña “Load Sample” que corresponde a la colocación de la muestra. Se establece una separación entre los platos de 50 mm (Figura 7.7a), para poder colocar la muestra en el plato inferior. Posteriormente se baja a una altura suficiente tal que el plato superior no toque la muestra, pero la cámara Peltier H-PTD 200 logre cubrirla (Figura 7.7b).



Figura 7.6 Captura del software RheoCompass, inicialización del dispositivo. (Elaboración propia)

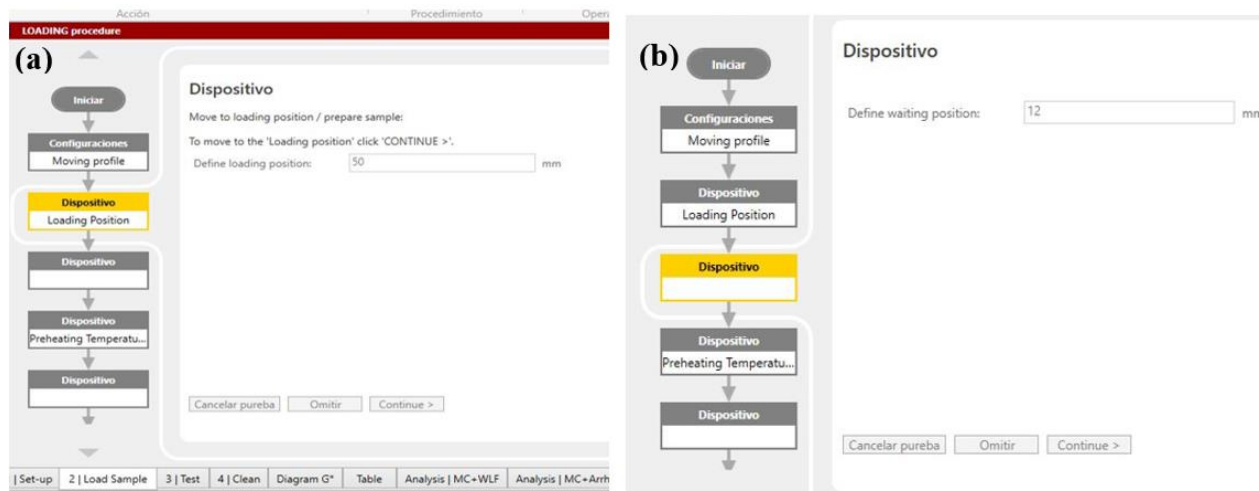


Figura 7.7 Captura del software RheoCompass. (a) Posición de carga; (b) posición de preparación de la muestra. (Elaboración propia)

Se ajusta la temperatura tal que la muestra pueda extenderse en el plato utilizando 100°C y 64°C para el plato de 25 mm y 8 mm respectivamente. Con una tolerancia de 0,5°C por al menos 2 minutos (Figura 7.8).

Para el caso del plato de 25 mm, luego que la muestra se extienda en el plato, se reduce la temperatura a 64°C y se da un tiempo de estabilización de 1 minuto como se presenta en la Figura 7.9.

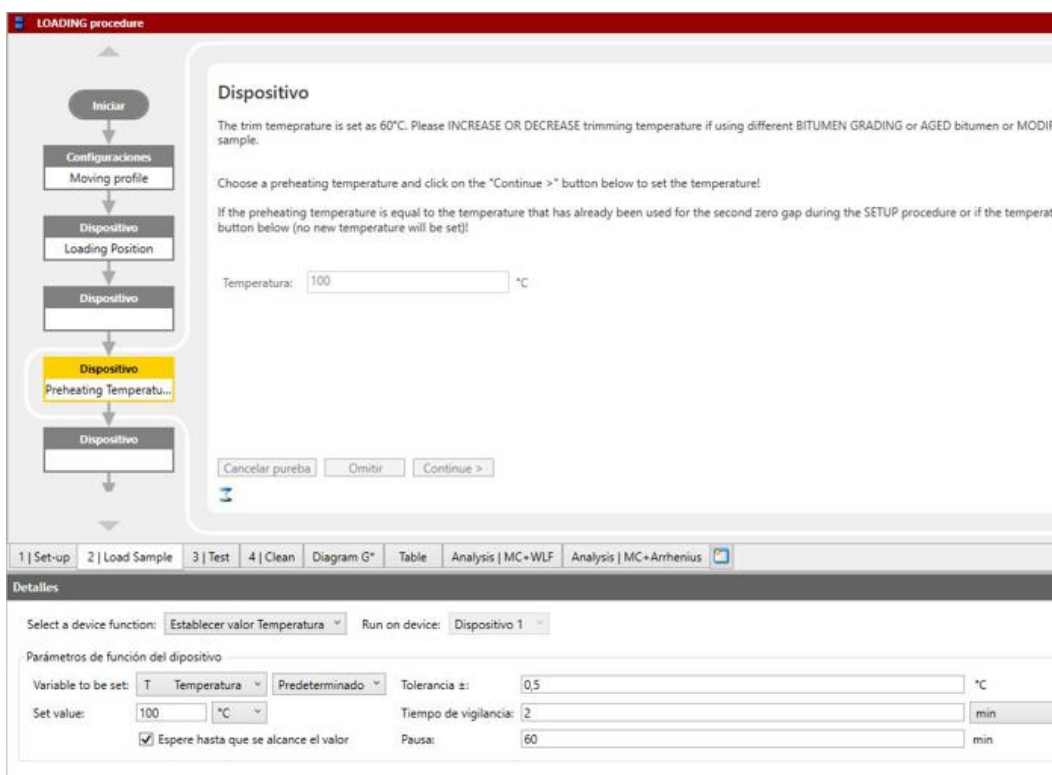


Figura 7.8 Captura del software RheoCompass. Ajuste de temperatura para ablandamiento de la muestra. (Elaboración propia)

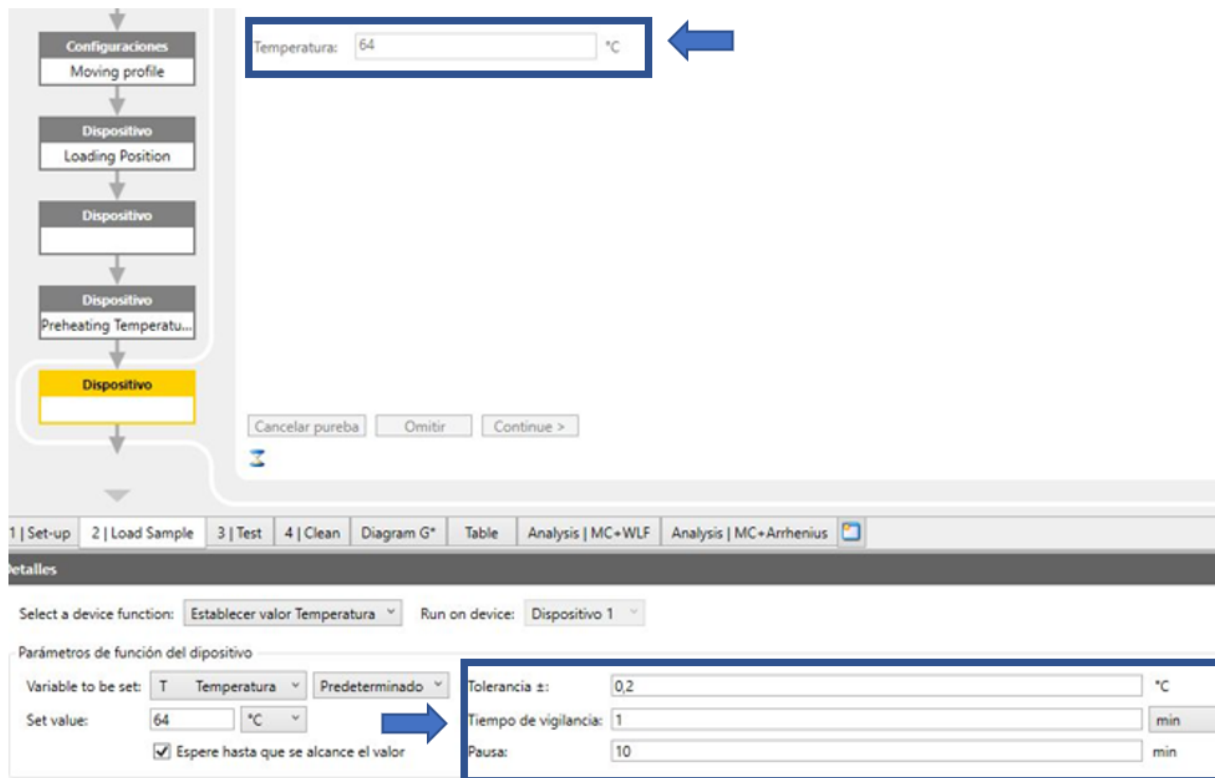


Figura 7.9 Captura del software RheoCompass. Temperatura de ajuste para realizar ensayo del plato de 25 mm. (Elaboración propia)

Finalmente se procede a aplastar la muestra entre los platos utilizando una separación de 2 mm para el plato de 8 mm y 1 mm para el plato de 25 mm (ASTM D7175, 2015). Como se presenta en las Figura 7.10(a) y Figura 7.10(b)

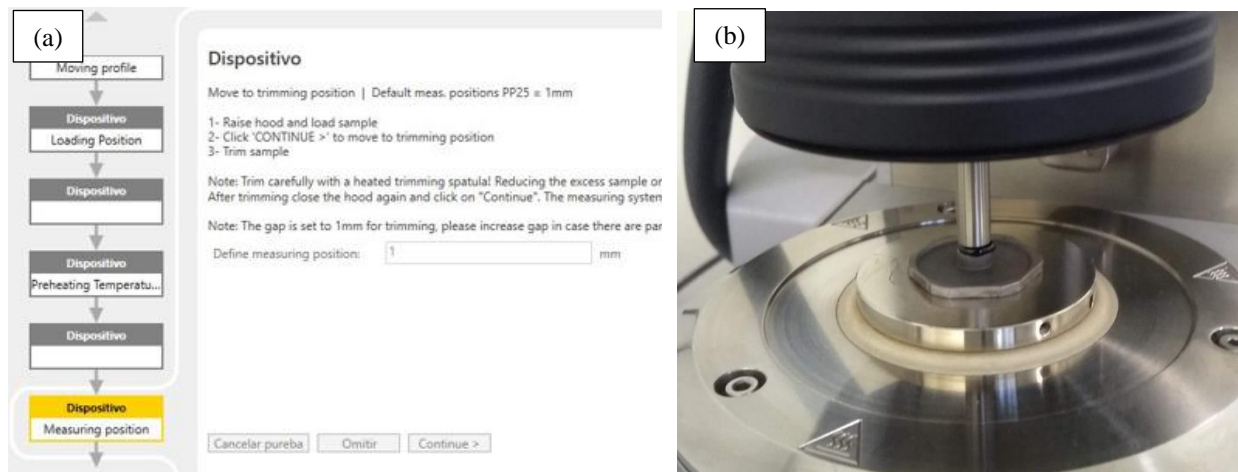


Figura 7.10. (a) Ajuste para lo posición de medición; (b) Ejemplo de muestra colocada entre los platos de 8 mm. (Elaboración propia)

En la tercera pestaña “Test”(Figura 7.11) comienza el ensayo. En esta etapa se establece un bucle para realizar el barrido de frecuencia-Temperatura, tal como se esquematiza en la Figura 7.12.

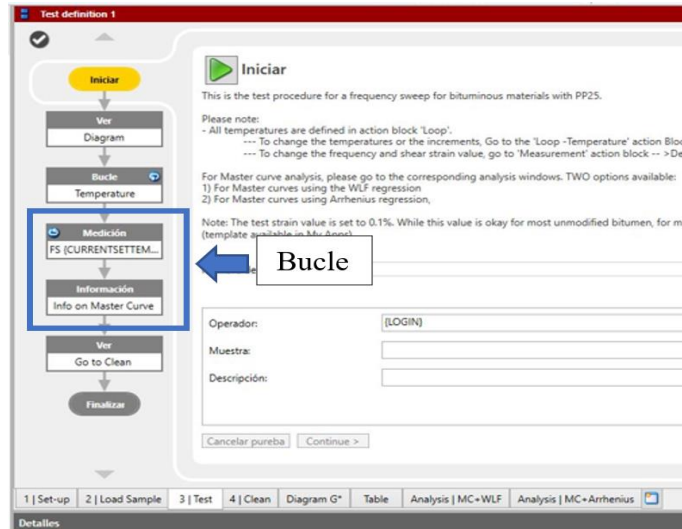


Figura 7.11 Captura del software RheoCompass. Etapa de realización del ensayo de barrido de frecuencia – temperatura. (Elaboración propia)

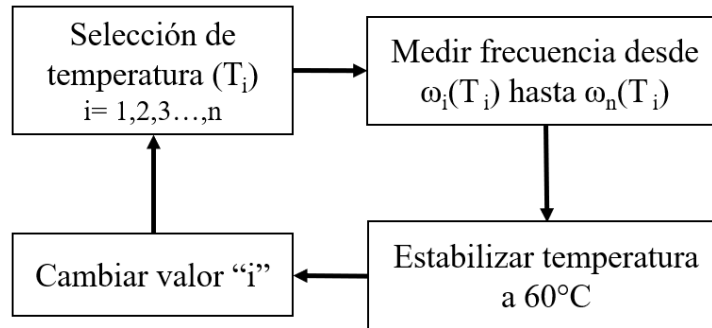


Figura 7.12 Esquema del bucle para realizar el ensayo. (Elaboración propia)

La Figura 7.13 presenta la configuración para realizar el barrido de temperatura. Aquí se detalla la temperatura inicial, final e incremento para cada medición, junto con las condiciones necesarias para comenzar el barrido de frecuencia, donde se solicita que la temperatura de medición se mantenga en al menos por 5 minutos con tolerancia de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

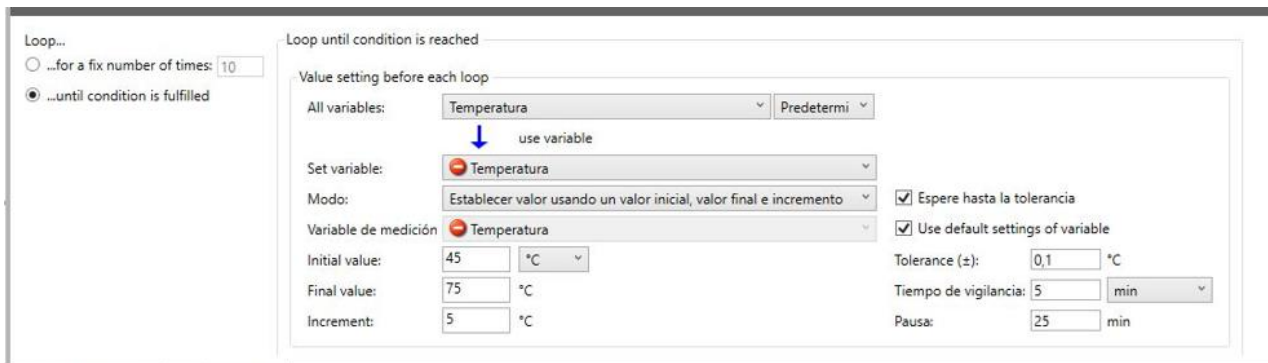


Figura 7.13 Ejemplo de configuración de los datos de ingreso para el barrido de temperatura. (Elaboración propia)

Luego, de definir la temperatura de ensayo se prosigue al barrido de frecuencia cuya configuración se presenta en la Figura 7.14, en la cual se establece la cantidad de mediciones de frecuencia, el

rango de las frecuencias, el nivel de deformación además de la temperatura y tiempo de estabilización entre cambio de temperatura de ensayo.

Terminado el ciclo de mediciones se puede acceder a la pestaña “Clean” (Figura 7.15), para poder retirar la muestra. El primer paso consiste en calentar la muestra a 90°C para ablandarla y poder separar los platos de medición sin dañar el DSR, luego se reduce la temperatura hasta 25°C con el fin de poder retirar los platos paralelos, limpiarlos y poder realizar un nuevo ensayo.



Figura 7.14 Ejemplo de la configuración para el barrido de frecuencias. (Elaboración propia)

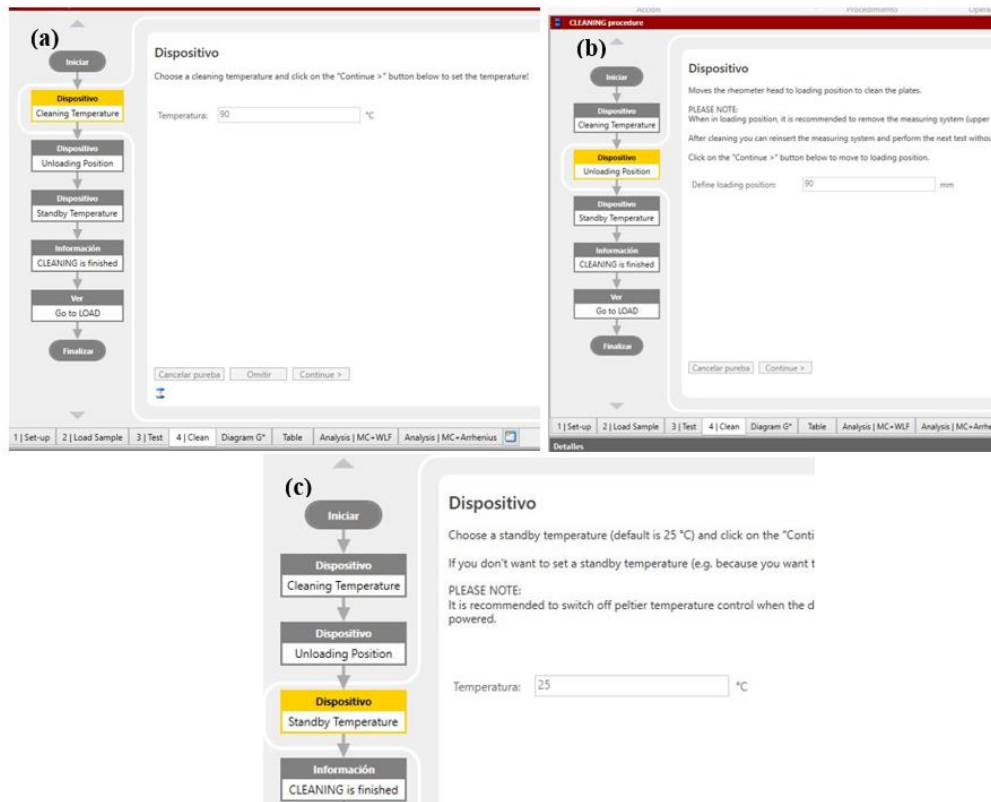


Figura 7.15 Captura del software RheoCompass de etapas del proceso de retiro de la muestra ensayada. (a) aumento de temperatura; (b) separación de los platos y (c) Disminución de temperatura para poder retirar los platos del DSR. (Elaboración propia)

En la pestaña “Diagram G*” y “Table” se encuentran las gráficas de barridos de frecuencia para cada temperatura de módulo dinámico y ángulo de fase y la tabla de los datos medidos como se presentan en la Figura 7.16 y Figura 7.17. Las pestañas “Analysis MC+WLF” y “Analysis MC+Arrhenius” son complementos del software para la construcción automática de las curvas maestras, pero no se cuenta con estas licencias en el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) de la universidad Federico Santa María.

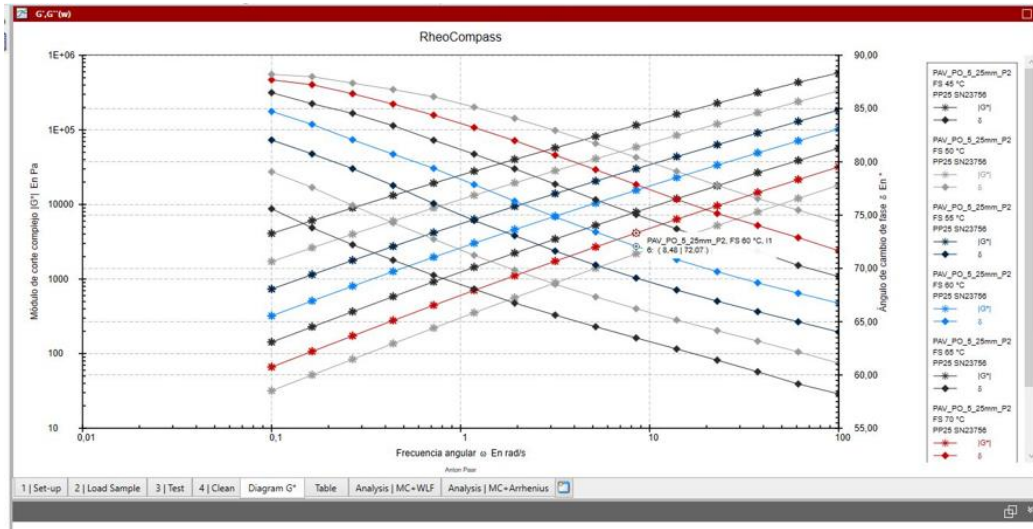


Figura 7.16 Ejemplo de la familia de curvas del barrido de frecuencia – temperatura, entregado por el software RheoCompass. (Elaboración propia)

Número de punto Nº	Temperatura T [°C]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Módulo de almacenamiento G' [Pa]	Módulo de pérdida G'' [Pa]	Factor de pérdida tan(δ) [°]	Deformación de corte γ [%]	Esfuerzo de corte τ [Pa]	Torque M [mNm]	Estado Stat	Módulo de corte complejo [G*] [Pa]	Ángulo de cambio de fase δ [°]	Frecuencia f [Hz]
1	45.0	100	3.0903E+05	4.9412E+05	1,615	0,498	2896,1	13,287	TruStrain™	5,0121E+05	58,23	15,9
2	45.0	67,1	2,227E+05	3,7254E+05	1,675	0,5	2172,8	9,9687	TruStrain™	4,5487E+05	59,16	9,72
3	45.0	37,3	1,5666E+05	2,7462E+05	1,753	0,5	1581,4	7,2554	TruStrain™	3,1616E+05	60,30	5,93
4	45.0	22,8	1,0897E+05	1,9977E+05	1,833	0,5	1187,8	5,2204	TruStrain™	2,2755E+05	61,39	3,62
5	45.0	13,9	75275	1,4422E+05	1,916	0,5	813,36	3,7316	TruStrain™	1,6268E+05	62,44	2,21
6	45.0	8,48	51920	1,0342E+05	2,004	0,5	577,97	2,6517	TruStrain™	1,1559E+05	63,48	1,35
7	45.0	5,18	35133	73750	2,099	0,5	408,48	1,8741	TruStrain™	81691	64,53	0,824
8	45.0	3,16	23707	52309	2,205	0,5	287,16	1,3175	TruStrain™	57431	65,62	0,503
9	45.0	1,93	15968	36925	2,327	0,5	200,99	0,92186	TruStrain™	40190	66,74	0,307
10	45.0	1,18	10432	25899	2,483	0,5	139,59	0,54041	TruStrain™	27921	68,06	0,188
11	45.0	0,72	6810	18074	2,654	0,5	96,564	0,44305	TruStrain™	19315	69,35	0,115
12	45.0	0,439	4352,2	12480	2,868	0,5	66,087	0,3032	TruStrain™	13217	70,78	0,0699
13	45.0	0,268	2744,3	8557,8	3,118	0,5	44,936	0,20616	TruStrain™	8967	72,22	0,0427
14	45.0	0,164	1695,4	5940,0	3,445	0,5	30,41	0,13952	TruStrain™	6061,9	73,81	0,0261
15	45.0	0,1	1015,7	3953,4	3,802	0,5	20,400	0,093636	TruStrain™	4081,8	75,59	0,0159

Figura 7.17 Ejemplo de tabla de datos del barrido de frecuencia – temperatura, entregado por el software RheoCompass. (Elaboración propia)

8 Anexo: Método automatizado para la confección de las curvas maestras

Para la construcción de las curvas maestras se utiliza una planilla de cálculo Excel, en la cual como datos de entrada se tienen para cada temperatura entre 5 y 75 °C; las 15 frecuencias de 100 a 0,1 rad/s y los valores de modulo dinámico y ángulo de fase que van asociados a cada una de estas frecuencias (Figura 8.1).

f [rad/s]	T=5°C				¿Extrapolar?	fr [rad/s]
	G* [Pa]		aG(f) =	3,18E+00		
	Medido	Ajustado	Corrido	Diferencia		
100,00	1,41E+08	1,48E+08	1,03E+08	9,85E-05	No Extrapolar	4,19E+04
61,10	1,23E+08	1,27E+08	8,85E+07	2,03E-04	No Extrapolar	2,56E+04
37,30	1,08E+08	1,09E+08	7,59E+07	3,07E-04	No Extrapolar	1,56E+04
22,80	9,42E+07	9,33E+07	6,51E+07	3,39E-04	No Extrapolar	9,55E+03
13,90	8,17E+07	8,00E+07	5,58E+07	3,02E-04	No Extrapolar	5,82E+03
8,48	7,06E+07	6,85E+07	4,78E+07	2,05E-04	No Extrapolar	3,55E+03
5,18	6,05E+07	5,88E+07	4,10E+07	9,64E-05	No Extrapolar	2,17E+03
3,16	5,18E+07	5,04E+07	3,51E+07	4,20E-06	No Extrapolar	1,32E+03
1,93	4,42E+07	4,32E+07	3,01E+07	4,02E-05	No Extrapolar	8,09E+02
1,18	3,77E+07	3,70E+07	2,58E+07	3,48E-04	No Extrapolar	4,94E+02
0,72	3,19E+07	3,18E+07	2,21E+07	9,95E-04	No Extrapolar	3,02E+02
0,44	2,70E+07	2,72E+07	1,90E+07	2,22E-03	No Extrapolar	1,84E+02
0,27	2,29E+07	2,33E+07	1,63E+07		Extrapolar	1,12E+02
0,16	1,95E+07	2,00E+07	1,40E+07		Extrapolar	6,87E+01
0,10	1,67E+07	1,71E+07	1,20E+07		Extrapolar	4,19E+01
SSE				5,16E-03		
		→ b				
Exponente	0,312026747	17,37591015				
Factor	35177250,89	→ a				

Figura 8.1 Captura ejemplo de planilla Excel para realizar el ajuste de la curva maestra a la curva de referencia de 25°C. En la imagen se destacan los datos de entrada correspondiendo a la frecuencia (destacado azul), el módulo dinámico (destacado en morado) y la temperatura de la curva a ser ajustada (destacado rojo), además de los factores de ajuste obtenidos mediante la estimación lineal para la temperatura señalada. Que corresponden a el "factor" como "a" y el "exponente" como "b". (Elaboración propia)

Para cada curva de temperatura se realiza un ajuste de curva potencial mediante la función "Estimación.Lineal()", aplicando logaritmo natural (función LN()) a los datos de módulo dinámico o ángulo de fase y frecuencia obteniendo una función dependiente de la frecuencia como se presenta en la Ecuación 8-1.

$$G_T(f) = a \cdot f^b \quad \text{o} \quad \delta_T(f) = a \cdot f^b \quad \text{Ecuación 8-1}$$

Donde "a" es una constante que se obtiene de la función "Estimación.Lineal()", siendo el parámetro "Factor" de la planilla correspondiendo al exponencial del segundo valor entregado por la función. La constante "b" se obtiene directamente de la función y en la planilla se denomina "Exponente" y $G_T(f)$ o $\delta_T(f)$ es el módulo dinámico o ángulo de fase en función de la frecuencia para la temperatura "T".

Para disminuir el error de diferencia respecto a la curva de referencia a 25°C, se utiliza siempre la curva más cercana en temperatura a la temperatura de referencia, utilizando un factor de corrimiento auxiliar. Por ejemplo, la curva de 20°C se relaciona con la curva de 25°C y la de 15°C con la de 20°C como se presenta en la Figura 8.2. Donde la nueva función de ajuste queda definida según la Ecuación 8-2.

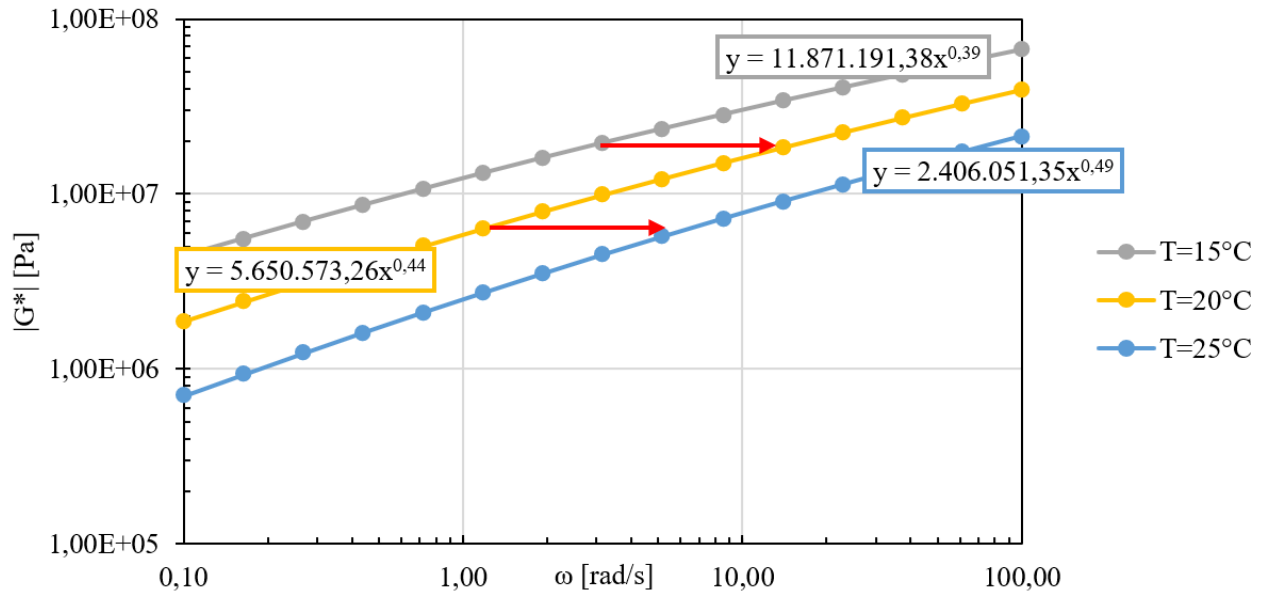


Figura 8.2. gráfico donde se representa como se desplazan las curvas al aplicar el factor de corrimiento auxiliar. (Elaboración propia)

$$G_{aT}(f) = a \cdot \left(\frac{f}{aG_T}\right)^b \quad \text{o} \quad \delta_{aT}(f) = a \cdot \left(\frac{f}{a\delta_T}\right)^b \quad \text{Ecuación 8-2}$$

Donde aG_T y $a\delta_T$ son los factores de corrimiento auxiliar para el módulo dinámico y el ángulo de fase respectivamente.

Luego, el objetivo es reducir la diferencia cuadrática (SSE) entre la propiedad reológica de referencia respecto al valor modificado, al iterar el factor de corrimiento auxiliar minimizando la diferencia entre el valor “Corrido” y el “Medido”, como se presenta en la Figura 8.3. Para el cálculo de SSE se ignoran aquellos valores que se extrapolen a la curva de referencia.

T=20°C				¿Extrapolación?	fr [rad/s]	T=25°C	
[G*] [Pa]	aG(f) =	5,35E+00	Medido			Ajustado	
Medido	Ajustado	Corrido	Diferencia			Medido	Ajustado
3,94E+07	4,28E+07	2,05E+07	3,60E-04	No Extrapolación	5,35E+02	2,14E+07	2,34E+07
3,28E+07	3,45E+07	1,65E+07	5,01E-04	No Extrapolación	3,27E+02	1,74E+07	1,83E+07
2,72E+07	2,78E+07	1,33E+07	6,81E-04	No Extrapolación	2,00E+02	1,41E+07	1,44E+07
2,25E+07	2,24E+07	1,07E+07	6,18E-04	No Extrapolación	1,22E+02	1,13E+07	1,13E+07
1,84E+07	1,80E+07	8,60E+06	5,46E-04	No Extrapolación	7,44E+01	9,07E+06	8,83E+06
1,51E+07	1,45E+07	6,92E+06	3,55E-04	No Extrapolación	4,54E+01	7,23E+06	6,91E+06
1,22E+07	1,17E+07	5,57E+06	1,24E-04	No Extrapolación	2,77E+01	5,71E+06	5,42E+06
9,89E+06	9,37E+06	4,48E+06	4,70E-06	No Extrapolación	1,69E+01	4,50E+06	4,25E+06
7,95E+06	7,55E+06	3,61E+06	1,29E-04	No Extrapolación	1,03E+01	3,51E+06	3,33E+06
6,35E+06	6,08E+06	2,91E+06	7,19E-04	No Extrapolación	6,31E+00	2,73E+06	2,61E+06
5,04E+06	4,89E+06	2,34E+06	1,97E-03	No Extrapolación	3,85E+00	2,11E+06	2,05E+06
3,97E+06	3,93E+06	1,88E+06	4,26E-03	No Extrapolación	2,35E+00	1,62E+06	1,60E+06
3,11E+06	3,17E+06	1,51E+06		Extrapolación	1,43E+00	1,23E+06	1,26E+06
2,42E+06	2,55E+06	1,22E+06		Extrapolación	8,78E-01	9,33E+05	9,85E+05
1,88E+06	2,05E+06	9,81E+05		Extrapolación	5,35E-01	7,03E+05	7,72E+05
SSE			1,03E-02				
Exponente	0,439903	15,54727				Exponente	0,49380723
Factor	5650573					Factor	2406051,35

Figura 8.3 Captura ejemplo de planilla Excel, donde se destacan los valores “corridos” al aplicar el factor de corrimiento auxiliar, los valores medidos de la curva de referencia con la que se busca generar el ajuste (destacado rojo) y las diferencias cuadradas que se buscan minimizar (destacado azul). (Elaboración propia)

Se suman todas las SSE (SSE_{Total}) y se continúan iterando los valores de aG_T o $a\delta_T$ tal de minimizar la SSE_{Total} . Para esto se utiliza una Macro en Excel, dando un valor inicial de 0,1 a todos los factores de corrimiento auxiliares. Como se presenta en la Figura 8.4 y en el código de la Macro de la Figura 8.5.

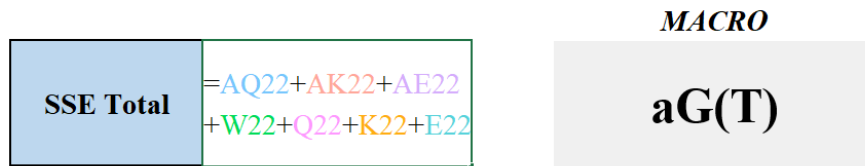


Figura 8.4 Presenta la suma de todas las diferencias cuadradas y el Otón que activa la iteración de la macro. (Elaboración propia)

```

Sub a_Gf()
' a_Gf Macro
'
'
SolverOk SetCell:="$CO$18", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:= _
"$AW$5,$AQ$5,$AK$5,$AE$5,$W$5,$Q$5,$K$5,$E$5" _
, Engine:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
SolverSolve
End Sub
    
```

Figura 8.5 Código que minimiza la diferencia de la SSE_{Total} . (Elaboración propia)

Realizado lo anterior se utilizan los factores de corrimiento auxiliares para obtener los factores de corrimiento según la Ecuación 8-3 para cada temperatura.

$$aT_i = aG_T \cdot aT_{i-1} \quad o \quad aT_i = a\delta_T \cdot aT_{i-1} \quad \text{Ecuación 8-3}$$

Donde aT_i es el factor de corrimiento para la temperatura T_i , aG_T o $a\delta_T$ es el factor de corrimiento auxiliar y aT_{i-1} es el factor de corrimiento a la temperatura T_i siguiente más cercana a la temperatura de referencia.

Finalmente, con los factores de corrimiento se pueden obtener las frecuencias reducidas según Ecuación 3-2 de la sección 3-Estudio experimental. Pudiendo graficar la curva maestra.

Adicionalmente se utiliza una macro de Excel para obtener las constantes (K1 y K2) de la ecuación WLF (Ecuación 3-1). Según lo mostrado en la Figura 8.6 y el código de Macro de la Figura 8.7.

T °C	a(T)	Log (a(T))	Factores Corrimiento	
			Ec. WLF	SSEi
5	419,06	2,622273755	2,925622443	0,092020426
10	131,95	2,120400805	2,138211959	0,000317237
15	27,29	1,4359701	1,389996567	0,002113566
20	5,35	0,728455957	0,678120804	0,002533628
25	1	0	0	0,000000000
30	0,18259	-0,738532421	-0,646711079	0,008431159
35	0,03697	-1,432159642	-1,264145325	0,028228811
40	0,00962	-2,0166702	-1,854246794	0,026381363
45	0,00177	-2,751607061	-2,418791146	0,110766434
50	0,00065	-3,187009874	-2,959403496	0,051804663
55	0,00024	-3,616588165	-3,477574038	0,019324928
60	0,00009	-4,029812423	-3,974671755	0,003040493
65	0,00004	-4,421242218	-4,451956508	0,000943368
70	0,00002	-4,786402437	-4,910589688	0,015422473
75	0,00001	-5,131163541	-5,351643654	0,048611480
SSE				0,4099

Constantes	
K1	27,92
K2	210,90
Tr [°C]	25

Me doy como valor semilla k1=10 y k2=100
k1 y k2

Figura 8.6 Captura de planilla Excel a modo de ejemplo para calcular las constantes k1 y k2 mediante la ecuación WLF, de la cual mediante Macro se iteran los valores para minimizar la suma de las diferencias cuadráticas entre el factor de corrimiento y la ecuación WLF. (Elaboración propia)

```

Sub kl_2 ()
'
' kl_2 Macro
'
'
' SolverOk SetCell:="$E$45", MaxMinVal:=2, ValueOf:=0, ByChange:="$B$49:$B$50", _
' Engine:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
' SolverSolve
End Sub
    
```

Figura 8.7 Código de Macro para encontrar las constantes K1 y K2 de la ecuación WLF. (Elaboración propia)

9 Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

9.1 Cemento asfáltico CA-24

Tabla 9-1. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-SE_PO. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]						Plato 25 [mm]																							
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C						
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]		
100	1,0E+07	34	5,8E+06	38	3,0E+06	44	2,6E+06	53	1,2E+06	59	4,2E+05	67	2,5E+05	74	1,2E+05	77	5,7E+04	79	2,9E+04	81	1,5E+04	82	7,8E+03	84	4,3E+03	86	2,4E+03	88	1,5E+03	86
61,1	8,3E+06	36	4,7E+06	40	2,4E+06	45	1,9E+06	54	8,7E+05	61	2,9E+05	69	1,7E+05	75	7,6E+04	78	3,7E+04	80	1,8E+04	82	9,4E+03	83	4,9E+03	85	2,7E+03	87	1,5E+03	88	9,1E+02	87
37,3	6,8E+06	37	3,8E+06	41	1,9E+06	47	1,4E+06	56	6,2E+05	62	2,0E+05	69	1,1E+05	76	4,9E+04	79	2,4E+04	81	1,2E+04	83	5,9E+03	84	3,1E+03	85	1,7E+03	87	9,4E+02	88	5,6E+02	87
22,8	5,6E+06	38	3,0E+06	42	1,4E+06	49	1,1E+06	57	4,4E+05	63	1,4E+05	70	7,3E+04	77	3,2E+04	80	1,5E+04	82	7,5E+03	83	3,7E+03	85	1,9E+03	86	1,0E+03	87	5,8E+02	88	3,5E+02	88
13,9	4,5E+06	39	2,4E+06	44	1,1E+06	50	7,8E+05	58	3,1E+05	64	9,3E+04	71	4,8E+04	78	2,1E+04	81	9,7E+03	82	4,7E+03	84	2,3E+03	85	1,2E+03	87	6,5E+02	88	3,6E+02	89	2,1E+02	89
8,5	3,7E+06	40	1,9E+06	45	8,3E+05	52	5,6E+05	59	2,2E+05	65	6,3E+04	72	3,1E+04	79	1,3E+04	81	6,2E+03	83	3,0E+03	85	1,5E+03	86	7,5E+02	87	4,0E+02	88	2,2E+02	89	1,3E+02	89
5,2	3,0E+06	42	1,5E+06	47	6,2E+05	53	4,1E+05	60	1,5E+05	66	4,2E+04	73	2,0E+04	80	8,4E+03	82	3,9E+03	84	1,9E+03	86	9,1E+02	87	4,6E+02	88	2,5E+02	89	1,4E+02	89	8,0E+01	89
3,2	2,4E+06	43	1,1E+06	49	4,6E+05	55	3,0E+05	61	1,1E+05	66	2,8E+04	73	1,3E+04	81	5,4E+03	83	2,4E+03	85	1,2E+03	86	5,6E+02	87	2,8E+02	88	1,5E+02	89	8,3E+01	89	4,9E+01	89
1,9	1,9E+06	45	8,7E+05	50	3,4E+05	56	2,1E+05	62	7,4E+04	67	1,9E+04	74	8,3E+03	82	3,4E+03	84	1,5E+03	86	7,2E+02	87	3,5E+02	88	1,7E+02	89	9,2E+01	89	5,1E+01	89	3,0E+01	89
1,2	1,5E+06	46	6,6E+05	52	2,5E+05	57	1,6E+05	62	5,2E+04	67	1,3E+04	75	5,3E+03	83	2,1E+03	85	9,5E+02	86	4,5E+02	88	2,1E+02	88	1,1E+02	89	5,6E+01	89	3,1E+01	89	1,8E+01	89
0,7	1,2E+06	48	5,0E+05	53	1,8E+05	58	1,1E+05	62	3,6E+04	68	8,4E+03	75	3,4E+03	83	1,3E+03	86	5,9E+02	87	2,8E+02	88	1,3E+02	89	6,5E+01	89	3,5E+01	89	1,9E+01	89	1,1E+01	89
0,4	9,1E+05	49	3,8E+05	54	1,4E+05	59	8,4E+04	62	2,5E+04	68	5,6E+03	75	2,1E+03	84	8,3E+02	86	3,7E+02	88	1,7E+02	88	8,1E+01	89	4,0E+01	89	2,1E+01	89	1,2E+01	89	6,9E+00	90
0,3	7,1E+05	50	2,8E+05	55	9,9E+04	59	6,3E+04	62	1,8E+04	68	3,8E+03	76	1,3E+03	85	5,2E+02	87	2,3E+02	88	1,0E+02	89	4,9E+01	89	2,4E+01	89	1,3E+01	89	7,2E+00	90	4,3E+00	87
0,2	5,5E+05	52	2,2E+05	56	7,3E+04	60	4,8E+04	61	1,3E+04	67	2,5E+03	76	8,5E+02	86	3,2E+02	88	1,4E+02	88	6,3E+01	89	3,0E+01	89	1,5E+01	90	7,8E+00	89	4,5E+00	89	2,8E+00	90
0,1	4,4E+05	52	1,6E+05	56	5,4E+04	60	3,7E+04	60	9,1E+03	66	1,7E+03	76	5,4E+02	86	2,0E+02	88	8,5E+01	89	3,9E+01	89	1,8E+01	89	9,1E+00	89	5,0E+00	89	2,9E+00	87	1,6E+00	90

Tabla 9-2. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-SE_P1. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]						Plato 25 [mm]																							
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C						
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]		
100	4,6E+07	36	2,5E+07	40	1,3E+07	45	5,7E+06	52	2,3E+06	59	8,5E+05	66	3,3E+05	72	1,5E+05	75	7,6E+04	77	3,9E+04	79	2,1E+04	81	1,1E+04	83	6,1E+03	84	3,4E+03	85	1,9E+03	87
61,1	3,8E+07	37	2,0E+07	42	9,9E+06	48	4,3E+06	53	1,7E+06	60	5,9E+05	67	2,3E+05	73	1,0E+05	76	4,9E+04	78	2,5E+04	80	1,3E+04	82	7,2E+03	83	3,9E+03	85	2,1E+03	86	1,2E+03	87
37,3	3,1E+07	38	1,6E+07	43	7,7E+06	49	3,2E+06	55	1,2E+06	62	4,1E+05	68	1,5E+05	74	6,8E+04	77	3,2E+04	79	1,6E+04	81	8,4E+03	83	4,5E+03	84	2,4E+03	86	1,3E+03	86	7,4E+02	88
22,8	2,6E+07	39	1,3E+07	44	5,9E+06	50	2,4E+06	57	8,7E+05	63	2,9E+05	69	1,0E+05	75	4,4E+04	78	2,1E+04	80	1,0E+04	82	5,3E+03	84	2,8E+03	85	1,5E+03	86	8,2E+02	87	4,6E+02	88
13,9	2,1E+07	41	1,0E+07	46	4,5E+06	52	1,8E+06	58	6,2E+05	64	2,0E+05	70	6,8E+04	76	2,9E+04	79	1,3E+04	81	6,6E+03	83	3,4E+03	84	1,8E+03	86	9,4E+02	87	5,0E+02	88	2,8E+02	89
8,5	1,7E+07	42	8,1E+06	47	3,4E+06	53	1,3E+06	60	4,4E+05	66	1,3E+05	71	4,5E+04	77	1,9E+04	80	8,6E+03	82	4,2E+03	84	2,1E+03	85	1,1E+03	86	5,8E+02	87	3,1E+02	88	1,7E+02	89
5,2	1,4E+07	43	6,3E+06	49	2,6E+06	55	9,4E+05	61	3,1E+05	67	9,2E+04	72	3,0E+04	78	1,2E+04	80	5,5E+03	83	2,6E+03	84	1,3E+03	86	6,9E+02	87	3,6E+02	88	1,9E+02	89	1,0E+02	89
3,2	1,1E+07	45	4,9E+06	50	1,9E+06	56	6,8E+05	62	2,2E+05	68	6,2E+04	73	1,9E+04	78	7,8E+03	81	3,5E+03	83	1,7E+03	85	8,3E+02	86	4,3E+02	88	2,2E+02	88	1,2E+02	89	6,4E+01	89
1,9	8,7E+06	46	3,8E+06	52	1,4E+06	58	4,9E+05	63	1,5E+05	69	4,2E+04	74	1,3E+04	79	5,0E+03	82	2,2E+03	84	1,0E+03	86	5,1E+02	87	2,6E+02	88	1,4E+02	89	7,1E+01	89	3,9E+01	90
1,2	7,0E+06	47	2,9E+06	53	1,1E+06	59	3,5E+05	64	1,0E+05	70	2,8E+04	75	8,3E+03	80	3,2E+03	83	1,4E+03	85	6,5E+02	87	3,2E+02	88	1,6E+02	89	8,3E+01	89	4,4E+01	90	2,4E+01	90
0,7	5,5E+06	49	2,3E+06	55	7,9E+05	60	2,5E+05	65	7,3E+04	70	1,9E+04	76	5,4E+03	81	2,0E+03	84	8,7E+02	86	4,0E+02	87	2,0E+02	88	1,0E+02	89	5,1E+01	89	2,7E+01	90	1,5E+01	90
0,4	4,4E+06	50	1,7E+06	56	5,9E+05	61	1,8E+05	66	5,1E+04	71	1,3E+04	77	3,5E+03	81	1,3E+03	84	5,4E+02	86	2,5E+02	88	1,2E+02	89	6,1E+01	89	3,1E+01	90	1,6E+01	90	8,9E+00	90
0,3	3,5E+06	51	1,3E+06	57	4,5E+05	62	1,3E+05	66	3,6E+04	72	8,6E+03	77	2,3E+03	82	8,2E+02	85	3,4E+02	87	1,5E+02	88	7,4E+01	89	3,7E+01	89	1,9E+01	90	9,9E+00	89	5,5E+00	90
0,2	2,9E+06	52	1,0E+06	58	3,4E+05	62	9,8E+04	67	2,5E+04	72	5,8E+03	78	1,5E+03	82	5,2E+02	86	2,1E+02	88	9,4E+01	89	4,5E+01	89	2,3E+01	89	1,1E+01	90	6,0E+00	90	3,4E+00	89
0,1	2,3E+06	53	8,2E+05	58	2,6E+05	63	7,2E+04	67	1,8E+04	72	4,0E+03	79	1,0E+03	83	3,3E+02	86	1,3E+02	88	5,8E+01	89	2,8E+01	89	1,4E+01	89	7,0E+00	89	3,6E+00	89	2,0E+00	90

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-3. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-SE_P2. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]						Plato 25 [mm]																							
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]															
100	4,5E+07	35	2,6E+07	40	1,3E+07	45	5,9E+06	52	2,4E+06	59	8,6E+05	66	3,0E+05	73	1,4E+05	76	6,6E+04	78	3,4E+04	80	1,8E+04	82	9,8E+03	83	5,3E+03	85	2,9E+03	85	1,7E+03	86
61,1	3,8E+07	36	2,1E+07	41	1,0E+07	47	4,5E+06	53	1,7E+06	61	6,0E+05	67	2,0E+05	74	9,0E+04	77	4,3E+04	79	2,2E+04	81	1,1E+04	83	6,2E+03	84	3,3E+03	85	1,8E+03	86	1,1E+03	87
37,3	3,1E+07	37	1,7E+07	42	7,9E+06	48	3,4E+06	55	1,3E+06	62	4,2E+05	69	1,4E+05	75	5,9E+04	78	2,8E+04	80	1,4E+04	82	7,2E+03	83	3,9E+03	85	2,1E+03	86	1,1E+03	87	6,5E+02	87
22,8	2,6E+07	38	1,3E+07	44	6,1E+06	50	2,5E+06	57	9,0E+05	63	2,9E+05	70	9,0E+04	76	3,8E+04	79	1,8E+04	81	8,8E+03	83	4,6E+03	84	2,5E+03	85	1,3E+03	86	7,0E+02	87	4,0E+02	88
13,9	2,1E+07	40	1,1E+07	45	4,6E+06	52	1,8E+06	58	6,4E+05	65	2,0E+05	71	5,9E+04	77	2,5E+04	80	1,1E+04	82	5,6E+03	83	2,9E+03	85	1,5E+03	86	8,0E+02	87	4,3E+02	88	2,5E+02	88
8,5	1,7E+07	41	8,3E+06	47	3,5E+06	53	1,3E+06	60	4,5E+05	66	1,3E+05	72	3,9E+04	78	1,6E+04	80	7,3E+03	83	3,5E+03	84	1,8E+03	85	9,5E+02	87	4,9E+02	88	2,7E+02	88	1,5E+02	88
5,2	1,4E+07	42	6,5E+06	48	2,6E+06	55	9,7E+05	61	3,1E+05	67	9,1E+04	73	2,6E+04	79	1,0E+04	81	4,6E+03	83	2,2E+03	85	1,1E+03	86	5,9E+02	87	3,0E+02	88	1,6E+02	88	9,4E+01	89
3,2	1,1E+07	43	5,1E+06	50	2,0E+06	56	7,0E+05	62	2,2E+05	68	6,1E+04	74	1,7E+04	80	6,6E+03	82	2,9E+03	84	1,4E+03	86	7,0E+02	87	3,7E+02	88	1,9E+02	88	1,0E+02	89	5,8E+01	88
1,9	8,9E+06	45	3,9E+06	51	1,5E+06	58	5,0E+05	64	1,5E+05	69	4,1E+04	75	1,1E+04	80	4,2E+03	83	1,8E+03	85	8,7E+02	86	4,4E+02	87	2,3E+02	88	1,2E+02	89	6,2E+01	89	3,6E+01	88
1,2	7,1E+06	46	3,0E+06	53	1,1E+06	59	3,6E+05	65	1,1E+05	70	2,8E+04	76	7,0E+03	81	2,7E+03	84	1,2E+03	86	5,4E+02	87	2,7E+02	88	1,4E+02	88	7,1E+01	89	3,8E+01	89	2,2E+01	88
0,7	5,7E+06	48	2,3E+06	54	8,1E+05	60	2,6E+05	66	7,4E+04	71	1,9E+04	76	4,5E+03	82	1,7E+03	85	7,2E+02	86	3,4E+02	87	1,7E+02	88	8,6E+01	89	4,4E+01	89	2,4E+01	88	1,4E+01	88
0,4	4,6E+06	49	1,8E+06	56	6,0E+05	62	1,9E+05	66	5,1E+04	71	1,2E+04	77	2,9E+03	83	1,1E+03	86	4,5E+02	87	2,1E+02	88	1,0E+02	88	5,3E+01	89	2,7E+01	88	1,5E+01	88	8,6E+00	87
0,3	3,7E+06	50	1,4E+06	57	4,5E+05	63	1,3E+05	67	3,6E+04	72	8,4E+03	78	1,9E+03	84	6,7E+02	86	2,8E+02	87	1,3E+02	88	6,3E+01	88	3,2E+01	89	1,6E+01	88	9,0E+00	88	5,3E+00	86
0,2	3,0E+06	51	1,0E+06	58	3,3E+05	63	9,8E+04	67	2,5E+04	72	5,6E+03	78	1,2E+03	84	4,2E+02	87	1,7E+02	88	7,9E+01	88	3,9E+01	88	2,0E+01	88	1,0E+01	88	5,6E+00	87	3,4E+00	84
0,1	2,4E+06	53	8,1E+05	59	2,5E+05	64	7,1E+04	68	1,8E+04	73	3,8E+03	79	7,7E+02	85	2,6E+02	87	1,1E+02	88	4,9E+01	88	2,4E+01	88	1,2E+01	88	6,2E+00	88	3,5E+00	87	2,2E+00	81

Tabla 9-4. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-RTFO_P0. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]						Plato 25 [mm]																							
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]															
100	7,0E+07	28	5,0E+07	31	2,9E+07	35	1,5E+07	40	7,6E+06	45	3,5E+06	52	1,6E+06	56	4,5E+04	64	2,3E+04	67	1,2E+04	69	6,3E+03	72	3,3E+03	74	1,8E+03	76	9,9E+02	79	5,6E+02	80
61,1	6,0E+07	29	4,2E+07	32	2,4E+07	36	1,2E+07	41	5,9E+06	47	2,6E+06	53	1,2E+06	58	3,1E+04	65	1,6E+04	68	8,3E+03	70	4,2E+03	73	2,2E+03	75	1,2E+03	77	6,4E+02	80	3,6E+02	81
37,3	5,1E+07	30	3,5E+07	33	2,0E+07	38	9,8E+06	42	4,6E+06	48	2,0E+06	54	8,4E+05	59	2,2E+04	66	1,1E+04	69	5,6E+03	71	2,8E+03	73	1,5E+03	76	7,7E+02	78	4,2E+02	80	2,3E+02	82
22,8	4,3E+07	31	2,9E+07	34	1,6E+07	39	7,7E+06	44	3,5E+06	49	1,5E+06	56	6,0E+05	61	1,5E+04	67	7,6E+03	69	3,8E+03	72	1,9E+03	74	9,7E+02	77	5,0E+02	79	2,7E+02	81	1,5E+02	83
13,9	3,6E+07	33	2,4E+07	35	1,3E+07	40	6,1E+06	45	2,7E+06	51	1,1E+06	57	4,3E+05	62	1,0E+04	68	5,2E+03	71	2,6E+03	73	1,2E+03	76	6,3E+02	78	3,2E+02	80	1,7E+02	82	9,2E+01	84
8,5	3,0E+07	34	2,0E+07	37	1,0E+07	41	4,7E+06	46	2,0E+06	52	7,8E+05	58	3,1E+05	63	7,2E+03	69	3,5E+03	71	1,7E+03	74	8,3E+02	77	4,1E+02	79	2,1E+02	81	1,1E+02	83	5,8E+01	85
5,2	2,5E+07	35	1,6E+07	38	8,2E+06	42	3,7E+06	48	1,5E+06	54	5,7E+05	59	2,2E+05	64	4,9E+03	70	2,4E+03	73	1,1E+03	75	5,4E+02	78	2,7E+02	80	1,3E+02	82	6,8E+01	84	3,6E+01	85
3,2	2,1E+07	37	1,3E+07	39	6,5E+06	44	2,8E+06	49	1,1E+06	55	4,1E+05	61	1,5E+05	65	3,4E+03	71	1,6E+03	73	7,5E+02	76	3,5E+02	79	1,7E+02	81	8,5E+01	83	4,3E+01	85	2,3E+01	87
1,9	1,7E+07	38	1,1E+07	41	5,1E+06	45	2,1E+06	51	8,3E+05	56	2,9E+05	62	1,1E+05	66	2,3E+03	72	1,1E+03	75	4,9E+02	77	2,3E+02	80	1,1E+02	82	5,3E+01	84	2,7E+01	86	1,4E+01	87
1,2	1,4E+07	39	8,5E+06	42	4,0E+06	47	1,6E+06	52	6,0E+05	58	2,1E+05	63	7,3E+04	68	1,5E+03	73	7,0E+02	76	3,2E+02	79	1,5E+02	81	6,9E+01	83	3,4E+01	85	1,7E+01	86	8,6E+00	87
0,7	1,1E+07	41	6,8E+06	43	3,1E+06	48	1,2E+06	54	4,4E+05	59	1,5E+05	64	5,0E+04	68	1,0E+03	74	4,6E+02	77	2,1E+02	80	9,4E+01	82	4,4E+01	84	2,1E+01	86	1,0E+01	88	5,3E+00	88
0,4	9,3E+06	42	5,4E+06	45	2,4E+06	50	9,0E+05	55	3,2E+05	60	1,0E+05	65	3,5E+04	69	6,9E+02	75	3,0E+02	79	1,3E+02	81	5,9E+01	84	2,7E+01	85	1,3E+01	87	6,4E+00	88	3,2E+00	89
0,3	7,6E+06	43	4,2E+06	46	1,8E+06	51	6,7E+05	57	2,3E+05	62	7,2E+04	66	2,4E+04	71	4,6E+02	77	2,0E+02	80	8,5E+01	82	3,7E+01	85	1,7E+01	86	7,9E+00	87	3,9E+00	88	2,0E+00	90
0,2	6,2E+06	45	3,3E+06	48	1,4E+06	53	4,9E+05	58	1,6E+05	63	5,0E+04	67	1,6E+04	71	3,0E+02	78	1,3E+02	81	5,4E+01	84	2,3E+01	86	1,1E+01	87	4,8E+00	89	2,3E+00	87	1,2E+00	90
0,1	5,2E+06	46	2,6E+06	50	1,0E+06	54	3,6E+05	59	1,2E+05	64	3,5E+04	68	1,1E+04	72	2,0E+02	79	8,1E+01	82	3,4E+01	85	1,5E+01	87	6,6E+00	88	3,0E+00	89	1,4E+00	90	7,5E-01	87

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-5. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-RTFO_P1. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Plato 8 [mm]														Temperatura [°C]															
	T=5°C		T=10°C		T=15°C		T=20°C		T=25°C		T=30°C		T=35°C		T=40°C		T=45°C		T=50°C		T=55°C		T=60°C		T=65°C		T=70°C		T=75°C	
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
100	9,7E+07	34	7,1E+07	32	4,2E+07	36	2,3E+07	41	1,2E+07	46	5,4E+06	52	1,9E+06	59	9,6E+05	63	4,8E+05	66	2,4E+05	69	1,3E+05	71	6,9E+04	73	3,7E+04	76	2,0E+04	78	1,1E+04	80
61,1	8,7E+07	33	6,0E+07	33	3,5E+07	37	1,8E+07	42	9,0E+06	47	4,1E+06	53	1,4E+06	60	6,8E+05	64	3,3E+05	67	1,7E+05	70	8,7E+04	72	4,6E+04	74	2,4E+04	77	1,3E+04	79	6,9E+03	81
37,3	7,7E+07	32	5,1E+07	34	2,8E+07	38	1,5E+07	43	7,0E+06	49	3,1E+06	54	1,0E+06	62	4,8E+05	65	2,3E+05	68	1,1E+05	70	5,8E+04	73	3,1E+04	75	1,6E+04	78	8,3E+03	80	4,4E+03	82
22,8	6,7E+07	32	4,3E+07	35	2,3E+07	39	1,2E+07	44	5,4E+06	50	2,3E+06	56	7,2E+05	63	3,4E+05	66	1,6E+05	69	7,8E+04	71	3,9E+04	74	2,0E+04	76	1,0E+04	79	5,3E+03	81	2,8E+03	83
13,9	5,8E+07	33	3,5E+07	36	1,9E+07	41	9,2E+06	46	4,1E+06	51	1,7E+06	57	5,1E+05	64	2,3E+05	67	1,1E+05	70	5,2E+04	72	2,6E+04	75	1,3E+04	77	6,7E+03	80	3,4E+03	82	1,8E+03	84
8,5	4,9E+07	34	2,9E+07	37	1,5E+07	42	7,2E+06	47	3,1E+06	53	1,2E+06	58	3,6E+05	65	1,6E+05	68	7,4E+04	71	3,5E+04	73	1,7E+04	76	8,6E+03	78	4,3E+03	81	2,2E+03	83	1,1E+03	85
5,2	4,1E+07	35	2,4E+07	39	1,2E+07	43	5,6E+06	48	2,3E+06	54	9,1E+05	59	2,5E+05	66	1,1E+05	69	5,0E+04	72	2,3E+04	74	1,1E+04	77	5,6E+03	80	2,7E+03	82	1,4E+03	84	7,0E+02	86
3,2	3,5E+07	36	2,0E+07	40	9,7E+06	45	4,3E+06	50	1,7E+06	55	6,6E+05	61	1,8E+05	67	7,7E+04	70	3,4E+04	73	1,6E+04	76	7,4E+03	78	3,6E+03	81	1,7E+03	83	8,6E+02	85	4,3E+02	86
1,9	2,9E+07	37	1,6E+07	41	7,7E+06	46	3,3E+06	51	1,3E+06	57	4,8E+05	62	1,2E+05	68	5,2E+04	71	2,3E+04	74	1,0E+04	77	4,8E+03	79	2,3E+03	82	1,1E+03	84	5,4E+02	86	2,7E+02	87
1,2	2,4E+07	38	1,3E+07	42	6,0E+06	47	2,5E+06	53	9,6E+05	58	3,4E+05	63	8,6E+04	69	3,6E+04	72	1,5E+04	75	6,8E+03	78	3,1E+03	81	1,5E+03	83	6,9E+02	85	3,4E+02	87	1,7E+02	88
0,7	2,0E+07	40	1,1E+07	44	4,8E+06	49	1,9E+06	54	7,1E+05	59	2,5E+05	64	5,9E+04	70	2,4E+04	73	1,0E+04	76	4,4E+03	79	2,0E+03	82	9,3E+02	84	4,3E+02	86	2,1E+02	87	1,0E+02	88
0,4	1,7E+07	41	8,5E+06	45	3,7E+06	50	1,5E+06	55	5,3E+05	60	1,8E+05	65	4,1E+04	71	1,6E+04	74	6,6E+03	78	2,8E+03	81	1,3E+03	83	5,8E+02	85	2,7E+02	87	1,3E+02	88	6,3E+01	89
0,3	1,4E+07	42	6,9E+06	46	2,9E+06	51	1,1E+06	57	3,9E+05	61	1,3E+05	66	2,8E+04	72	1,1E+04	76	4,3E+03	79	1,8E+03	82	8,0E+02	84	3,6E+02	86	1,7E+02	87	7,8E+01	88	3,8E+01	89
0,2	1,2E+07	43	5,6E+06	47	2,3E+06	53	8,5E+05	58	2,9E+05	62	9,2E+04	66	1,9E+04	73	7,1E+03	77	2,8E+03	80	1,2E+03	83	5,0E+02	85	2,3E+02	87	1,0E+02	88	4,8E+01	89	2,3E+01	89
0,1	1,0E+07	44	4,6E+06	49	1,8E+06	54	6,5E+05	59	2,1E+05	63	6,6E+04	67	1,3E+04	74	4,7E+03	78	1,8E+03	81	7,3E+02	84	3,2E+02	86	1,4E+02	87	6,3E+01	88	2,9E+01	89	1,4E+01	90

Tabla 9-6. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-RTFO_P2. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Plato 8 [mm]														Temperatura [°C]															
	T=5°C		T=10°C		T=15°C		T=20°C		T=25°C		T=30°C		T=35°C		T=40°C		T=45°C		T=50°C		T=55°C		T=60°C		T=65°C		T=70°C		T=75°C	
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
100	7,9E+07	28	5,1E+07	32	3,0E+07	37	1,6E+07	41	8,4E+06	47	4,0E+06	53	2,0E+06	59	9,8E+05	62	4,9E+05	66	2,5E+05	69	1,3E+05	71	7,0E+04	73	3,7E+04	76	2,0E+04	78	1,1E+04	80
61,1	6,8E+07	29	4,3E+07	33	2,4E+07	38	1,3E+07	43	6,5E+06	48	3,0E+06	54	1,4E+06	60	6,9E+05	64	3,4E+05	67	1,7E+05	69	8,8E+04	72	4,6E+04	74	2,4E+04	77	1,3E+04	79	7,1E+03	81
37,3	5,8E+07	31	3,6E+07	35	2,0E+07	39	1,0E+07	44	5,1E+06	50	2,3E+06	55	1,0E+06	62	4,9E+05	65	2,3E+05	68	1,2E+05	70	5,9E+04	73	3,1E+04	75	1,6E+04	78	8,5E+03	80	4,5E+03	82
22,8	5,0E+07	32	3,0E+07	36	1,6E+07	40	8,2E+06	45	3,9E+06	51	1,7E+06	57	7,3E+05	63	3,4E+05	66	1,6E+05	69	7,9E+04	71	4,0E+04	74	2,0E+04	76	1,0E+04	79	5,5E+03	81	2,9E+03	83
13,9	4,2E+07	33	2,5E+07	37	1,3E+07	42	6,4E+06	47	2,9E+06	52	1,2E+06	58	5,2E+05	64	2,4E+05	67	1,1E+05	70	5,3E+04	72	2,6E+04	75	1,3E+04	77	6,8E+03	80	3,5E+03	82	1,8E+03	84
8,5	3,6E+07	34	2,0E+07	38	1,1E+07	43	5,0E+06	48	2,2E+06	54	9,0E+05	59	3,7E+05	65	1,6E+05	68	7,5E+04	71	3,6E+04	73	1,8E+04	76	8,8E+03	78	4,4E+03	81	2,2E+03	83	1,2E+03	85
5,2	3,0E+07	35	1,7E+07	39	8,4E+06	44	3,9E+06	49	1,7E+06	55	6,5E+05	60	2,6E+05	66	1,1E+05	69	5,1E+04	72	2,4E+04	74	1,2E+04	77	5,7E+03	79	2,8E+03	82	1,4E+03	84	7,2E+02	85
3,2	2,5E+07	36	1,4E+07	40	6,7E+06	45	3,0E+06	51	1,2E+06	56	4,7E+05	61	1,8E+05	67	7,8E+04	70	3,4E+04	73	1,6E+04	75	7,6E+03	78	3,7E+03	81	1,8E+03	83	8,8E+02	85	4,5E+02	86
1,9	2,1E+07	37	1,1E+07	42	5,3E+06	47	2,3E+06	52	9,2E+05	57	3,4E+05	62	1,3E+05	68	5,3E+04	71	2,3E+04	74	1,1E+04	77	4,9E+03	79	2,3E+03	82	1,1E+03	84	5,5E+02	86	2,8E+02	87
1,2	1,8E+07	39	9,0E+06	43	4,2E+06	48	1,8E+06	53	6,8E+05	59	2,5E+05	63	8,7E+04	69	3,6E+04	72	1,5E+04	75	6,9E+03	78	3,2E+03	81	1,5E+03	83	7,1E+02	85	3,5E+02	86	1,7E+02	88
0,7	1,5E+07	40	7,3E+06	44	3,3E+06	49	1,3E+06	55	5,0E+05	60	1,8E+05	65	6,0E+04	70	2,4E+04	73	1,0E+04	76	4,5E+03	79	2,0E+03	82	9,5E+02	84	4,4E+02	86	2,1E+02	87	1,1E+02	88
0,4	1,2E+07	41	5,9E+06	46	2,6E+06	51	1,0E+06	56	3,7E+05	61	1,3E+05	66	4,1E+04	71	1,6E+04	74	6,7E+03	77	2,9E+03	80	1,3E+03	83	5,9E+02	85	2,7E+02	87	1,3E+02	88	6,5E+01	88
0,3	1,0E+07	42	4,8E+06	47	2,0E+06	52	7,7E+05	57	2,7E+05	62	9,0E+04	66	2,8E+04	72	1,1E+04	75	4,4E+03	79	1,9E+03	82	8,2E+02	84	3,7E+02	86	1,7E+02	87	8,1E+01	88	4,0E+01	89
0,2	8,6E+06	43	3,9E+06	48	1,6E+06	53	5,9E+05	58	2,0E+05	63	6,5E+04	67	1,9E+04	73	7,3E+03	77	2,9E+03	80	1,2E+03	83	5,1E+02	85	2,3E+02	86	1,0E+02	88	4,9E+01	88	2,4E+01	89
0,1	7,2E+06	44	3,2E+06	49	1,3E+06	54	4,5E+05	59	1,5E+05	63	4,7E+04	68	1,3E+04	74	4,8E+03	78	1,8E+03	81	7,5E+02	84	3,2E+02	86	1,4E+02	87	6,4E+01	88	3,0E+01	88	1,5E+01	89

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-7. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra CA-PAV. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]									Plato 25 [mm]																				
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]												
100	1,4E+08	24	1,1E+08	26	6,7E+07	29	3,9E+07	33	2,1E+07	37	1,1E+07	42	5,4E+06	47	2,8E+06	51	1,1E+06	56	6,0E+05	59	3,3E+05	62	1,8E+05	65	9,8E+04	67	5,4E+04	70	3,0E+04	72
61,1	1,2E+08	25	9,1E+07	27	5,7E+07	30	3,3E+07	34	1,7E+07	38	8,6E+06	43	4,1E+06	48	2,1E+06	52	7,9E+05	57	4,3E+05	60	2,3E+05	63	1,3E+05	66	6,8E+04	68	3,7E+04	71	2,0E+04	73
37,3	1,1E+08	26	7,9E+07	28	4,8E+07	31	2,7E+07	35	1,4E+07	39	6,8E+06	44	3,2E+06	49	1,6E+06	53	5,8E+05	58	3,1E+05	61	1,7E+05	64	8,7E+04	66	4,6E+04	69	2,5E+04	72	1,3E+04	75
22,8	9,4E+07	26	6,8E+07	29	4,1E+07	32	2,2E+07	36	1,1E+07	40	5,3E+06	45	2,4E+06	50	1,2E+06	54	4,2E+05	59	2,2E+05	62	1,2E+05	65	6,1E+04	67	3,2E+04	70	1,7E+04	73	8,9E+03	76
13,9	8,2E+07	27	5,8E+07	30	3,4E+07	33	1,8E+07	37	9,1E+06	42	4,2E+06	46	1,8E+06	51	8,6E+05	55	3,0E+05	60	1,6E+05	63	8,1E+04	66	4,2E+04	68	2,2E+04	71	1,1E+04	74	5,9E+03	77
8,5	7,1E+07	28	4,9E+07	30	2,8E+07	34	1,5E+07	38	7,2E+06	43	3,2E+06	48	1,4E+06	53	6,3E+05	56	2,2E+05	61	1,1E+05	64	5,7E+04	67	2,9E+04	70	1,5E+04	73	7,4E+03	76	3,8E+03	79
5,2	6,1E+07	29	4,2E+07	31	2,4E+07	35	1,2E+07	39	5,7E+06	44	2,5E+06	49	1,0E+06	54	4,6E+05	57	1,6E+05	62	7,9E+04	65	3,9E+04	68	1,9E+04	71	9,7E+03	74	4,9E+03	77	2,5E+03	80
3,2	5,2E+07	30	3,5E+07	32	2,0E+07	36	9,9E+06	40	4,5E+06	45	1,9E+06	50	7,7E+05	55	3,4E+05	59	1,1E+05	63	5,5E+04	66	2,7E+04	69	1,3E+04	72	6,5E+03	76	3,2E+03	79	1,6E+03	81
1,9	4,4E+07	31	3,0E+07	33	1,6E+07	37	8,0E+06	41	3,5E+06	46	1,4E+06	51	5,7E+05	56	2,4E+05	60	7,8E+04	64	3,8E+04	67	1,8E+04	70	8,8E+03	74	4,2E+03	77	2,1E+03	80	1,0E+03	83
1,2	3,8E+07	32	2,5E+07	34	1,3E+07	38	6,3E+06	42	2,7E+06	47	1,1E+06	52	4,2E+05	57	1,8E+05	61	5,5E+04	65	2,7E+04	69	1,3E+04	72	5,9E+03	75	2,8E+03	79	1,3E+03	81	6,4E+02	84
0,7	3,2E+07	33	2,1E+07	35	1,1E+07	39	5,0E+06	44	2,1E+06	48	8,2E+05	53	3,1E+05	58	1,3E+05	62	3,8E+04	67	1,8E+04	70	8,4E+03	74	3,9E+03	77	1,8E+03	80	8,4E+02	83	4,0E+02	85
0,4	2,7E+07	34	1,7E+07	36	8,7E+06	40	4,0E+06	45	1,6E+06	50	6,1E+05	55	2,2E+05	59	9,0E+04	63	2,7E+04	68	1,2E+04	71	5,6E+03	75	2,5E+03	79	1,2E+03	82	5,3E+02	84	2,5E+02	86
0,3	2,3E+07	35	1,4E+07	38	7,0E+06	42	3,1E+06	46	1,2E+06	51	4,5E+05	56	1,6E+05	60	6,4E+04	64	1,8E+04	70	8,4E+03	73	3,7E+03	77	1,6E+03	80	7,3E+02	83	3,3E+02	85	1,6E+02	87
0,2	2,0E+07	36	1,2E+07	39	5,6E+06	43	2,4E+06	48	9,3E+05	52	3,3E+05	57	1,2E+05	62	4,5E+04	66	1,3E+04	71	5,6E+03	75	2,4E+03	78	1,1E+03	82	4,6E+02	84	2,1E+02	86	9,7E+01	87
0,1	1,7E+07	37	9,4E+06	40	4,4E+06	44	1,9E+06	49	7,0E+05	54	2,5E+05	58	8,4E+04	63	3,2E+04	67	8,6E+03	73	3,7E+03	77	1,6E+03	80	6,7E+02	83	2,9E+02	85	1,3E+02	87	6,0E+01	88

9.2 Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor líquido

Tabla 9-8. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POI. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]									Plato 25 [mm]																				
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]
100	8,2E+07	29	8,4E+07	28	5,3E+07	31	3,1E+07	35	1,7E+07	39	8,3E+06	44	4,1E+06	49	2,1E+06	53	7,3E+05	58	4,5E+05	60	2,5E+05	63	1,4E+05	65	7,7E+04	68	4,3E+04	70	2,4E+04	73
61,1	7,1E+07	30	7,2E+07	29	4,5E+07	32	2,5E+07	36	1,3E+07	40	6,5E+06	45	3,1E+06	50	1,6E+06	54	5,3E+05	59	3,2E+05	61	1,8E+05	64	9,7E+04	66	5,3E+04	69	2,9E+04	71	1,6E+04	74
37,3	6,1E+07	30	6,1E+07	30	3,8E+07	33	2,1E+07	37	1,1E+07	41	5,1E+06	46	2,4E+06	51	1,2E+06	55	3,9E+05	60	2,3E+05	62	1,2E+05	65	6,7E+04	67	3,6E+04	70	2,0E+04	72	1,1E+04	75
22,8	5,3E+07	31	5,2E+07	31	3,1E+07	34	1,7E+07	38	8,5E+06	42	3,9E+06	47	1,8E+06	52	8,6E+05	56	2,8E+05	61	1,6E+05	63	8,7E+04	66	4,7E+04	68	2,5E+04	71	1,3E+04	74	7,1E+03	76
13,9	4,5E+07	32	4,4E+07	32	2,6E+07	35	1,4E+07	39	6,8E+06	43	3,0E+06	48	1,4E+06	53	6,3E+05	57	2,0E+05	62	1,2E+05	64	6,1E+04	67	3,2E+04	69	1,7E+04	72	8,8E+03	75	4,6E+03	78
8,5	3,8E+07	33	3,7E+07	32	2,2E+07	36	1,1E+07	40	5,3E+06	45	2,3E+06	50	1,0E+06	54	4,6E+05	58	1,4E+05	63	8,1E+04	65	4,2E+04	68	2,2E+04	71	1,1E+04	73	5,8E+03	76	3,0E+03	79
5,2	3,2E+07	34	3,1E+07	33	1,8E+07	37	9,0E+06	41	4,2E+06	46	1,8E+06	51	7,5E+05	55	3,4E+05	59	1,0E+05	64	5,7E+04	66	2,9E+04	69	1,5E+04	72	7,4E+03	75	3,8E+03	78	1,9E+03	80
3,2	2,7E+07	35	2,6E+07	34	1,5E+07	38	7,2E+06	42	3,2E+06	47	1,3E+06	52	5,5E+05	56	2,4E+05	60	7,1E+04	65	4,0E+04	67	2,0E+04	70	9,9E+03	73	4,9E+03	76	2,5E+03	79	1,2E+03	82
1,9	2,3E+07	36	2,2E+07	36	1,2E+07	39	5,7E+06	43	2,5E+06	48	1,0E+06	53	4,0E+05	57	1,7E+05	61	5,0E+04	66	2,7E+04	68	1,3E+04	72	6,6E+03	75	3,2E+03	78	1,6E+03	81	7,9E+02	83
1,2	2,0E+07	37	1,8E+07	37	9,6E+06	40	4,5E+06	45	1,9E+06	49	7,5E+05	54	3,0E+05	58	1,2E+05	62	3,5E+04	67	1,9E+04	70	9,1E+03	73	4,4E+03	76	2,1E+03	79	1,0E+03	82	5,0E+02	84
0,7	1,7E+07	38	1,5E+07	38	7,7E+06	41	3,6E+06	46	1,5E+06	51	5,6E+05	55	2,1E+05	59	8,8E+04	63	2,5E+04	69	1,3E+04	71	6,1E+03	75	2,8E+03	78	1,3E+03	81	6,4E+02	83	3,1E+02	85
0,4	1,5E+07	38	1,2E+07	39	6,2E+06	43	2,8E+06	47	1,1E+06	52	4,1E+05	56	1,5E+05	61	6,2E+04	65	1,7E+04	70	8,6E+03	73	4,0E+03	76	1,8E+03	79	8,5E+02	82	4,0E+02	84	1,9E+02	86
0,3	1,3E+07	39	9,9E+06	40	4,9E+06	44	2,2E+06	48	8,5E+05	53	3,0E+05	57	1,1E+05	62	4,4E+04	66	1,2E+04	71	5,8E+03	74	2,6E+03	78	1,2E+03	81	5,4E+02	83	2,5E+02	85	1,2E+02	86
0,2	1,4E+07	38	8,1E+06	41	3,9E+06	45	1,7E+06	50	6,3E+05	54	2,2E+05	59	7,9E+04	63	3,1E+04	67	8,3E+03	73	3,8E+03	76	1,7E+03	79	7,5E+02	82	3,4E+02	84	1,5E+02	86	7,4E+01	86
0,1	1,2E+07	39	6,6E+06	42	3,1E+06	47	1,3E+06	51	4,8E+05	55	1,6E+05	60	5,6E+04	64	2,1E+04	69	5,8E+03	74	2,5E+03	78	1,1E+03	81	4,8E+02	83	2,1E+02	85	9,6E+01	86	4,6E+01	87

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-9. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]															
100	9,0E+07	29	8,6E+07	29	5,4E+07	32	3,0E+07	36	1,6E+07	40	8,2E+06	45	3,7E+06	50	2,0E+06	54	6,4E+05	59	3,9E+05	61	2,2E+05	64	1,2E+05	66	6,7E+04	69	3,7E+04	71	2,1E+04	73
61,1	7,8E+07	30	7,3E+07	30	4,5E+07	33	2,5E+07	37	1,3E+07	41	6,4E+06	46	2,8E+06	51	1,5E+06	55	4,6E+05	60	2,8E+05	62	1,5E+05	65	8,3E+04	67	4,6E+04	70	2,5E+04	72	1,4E+04	75
37,3	6,7E+07	31	6,2E+07	31	3,8E+07	34	2,0E+07	38	1,0E+07	42	5,0E+06	47	2,1E+06	52	1,1E+06	56	3,3E+05	61	2,0E+05	63	1,1E+05	66	5,7E+04	68	3,1E+04	71	1,7E+04	73	9,1E+03	76
22,8	5,7E+07	32	5,3E+07	31	3,1E+07	35	1,7E+07	39	8,3E+06	43	3,8E+06	48	1,6E+06	53	8,2E+05	57	2,4E+05	62	1,4E+05	64	7,4E+04	66	4,0E+04	69	2,1E+04	72	1,1E+04	74	6,0E+03	77
13,9	4,9E+07	33	4,4E+07	32	2,6E+07	36	1,3E+07	40	6,6E+06	44	2,9E+06	49	1,2E+06	54	6,0E+05	57	1,7E+05	63	9,8E+04	65	5,1E+04	67	2,7E+04	70	1,4E+04	73	7,4E+03	76	3,9E+03	78
8,5	4,1E+07	33	3,7E+07	33	2,1E+07	37	1,1E+07	41	5,1E+06	45	2,3E+06	50	8,8E+05	55	4,4E+05	58	1,2E+05	64	6,8E+04	66	3,5E+04	69	1,8E+04	71	9,5E+03	74	4,9E+03	77	2,5E+03	80
5,2	3,5E+07	34	3,1E+07	34	1,8E+07	38	8,6E+06	42	4,0E+06	47	1,7E+06	51	6,5E+05	56	3,2E+05	59	8,6E+04	65	4,8E+04	67	2,4E+04	70	1,2E+04	73	6,3E+03	76	3,2E+03	79	1,6E+03	81
3,2	2,9E+07	35	2,6E+07	35	1,4E+07	39	6,9E+06	43	3,1E+06	48	1,3E+06	52	4,8E+05	57	2,3E+05	61	6,0E+04	66	3,3E+04	68	1,6E+04	71	8,2E+03	74	4,1E+03	77	2,1E+03	80	1,0E+03	82
1,9	2,5E+07	36	2,1E+07	36	1,2E+07	40	5,4E+06	44	2,4E+06	49	9,7E+05	53	3,5E+05	59	1,6E+05	62	4,2E+04	67	2,3E+04	69	1,1E+04	73	5,5E+03	76	2,7E+03	79	1,3E+03	81	6,5E+02	84
1,2	2,1E+07	37	1,8E+07	37	9,3E+06	41	4,3E+06	45	1,8E+06	50	7,2E+05	55	2,5E+05	60	1,2E+05	63	2,9E+04	68	1,5E+04	71	7,4E+03	74	3,6E+03	77	1,7E+03	80	8,3E+02	83	4,1E+02	85
0,7	1,8E+07	38	1,4E+07	39	7,5E+06	42	3,3E+06	47	1,4E+06	51	5,4E+05	56	1,8E+05	61	8,2E+04	64	2,0E+04	69	1,0E+04	72	4,9E+03	76	2,3E+03	79	1,1E+03	82	5,3E+02	84	2,6E+02	86
0,4	1,6E+07	39	1,2E+07	40	6,0E+06	43	2,6E+06	48	1,1E+06	52	4,0E+05	57	1,3E+05	62	5,8E+04	65	1,4E+04	71	7,0E+03	74	3,2E+03	77	1,5E+03	80	7,0E+02	83	3,3E+02	85	1,6E+02	86
0,3	1,4E+07	40	9,6E+06	41	4,7E+06	45	2,0E+06	49	8,0E+05	54	2,9E+05	58	9,6E+04	63	4,1E+04	66	9,7E+03	72	4,7E+03	75	2,1E+03	79	9,5E+02	82	4,4E+02	84	2,0E+02	86	9,8E+01	87
0,2	1,4E+07	39	7,8E+06	42	3,7E+06	46	1,5E+06	50	6,0E+05	55	2,1E+05	59	6,9E+04	64	2,8E+04	68	6,7E+03	74	3,1E+03	77	1,4E+03	80	6,0E+02	83	2,7E+02	85	1,3E+02	86	6,0E+01	87
0,1	1,2E+07	40	6,4E+06	43	2,9E+06	47	1,2E+06	52	4,5E+05	56	1,6E+05	60	4,9E+04	65	2,0E+04	69	4,6E+03	75	2,0E+03	79	8,7E+02	82	3,8E+02	84	1,7E+02	86	7,8E+01	87	3,7E+01	88

Tabla 9-10. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO3_PO. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]	G* [Pa] δ[°]															
100	8,0E+07	27	7,7E+07	27	4,7E+07	30	2,9E+07	34	1,6E+07	38	8,2E+06	43	4,0E+06	48	2,1E+06	52	8,7E+05	57	5,3E+05	60	2,8E+05	62	1,6E+05	65	9,0E+04	67	5,0E+04	70	2,8E+04	72
61,1	6,9E+07	28	6,6E+07	28	4,0E+07	31	2,4E+07	35	1,3E+07	39	6,5E+06	44	3,1E+06	49	1,6E+06	53	6,4E+05	58	3,8E+05	60	2,0E+05	63	1,1E+05	66	6,2E+04	68	3,4E+04	71	1,9E+04	73
37,3	6,0E+07	29	5,7E+07	29	3,4E+07	32	2,0E+07	36	1,0E+07	40	5,1E+06	45	2,3E+06	50	1,2E+06	54	4,6E+05	59	2,7E+05	61	1,4E+05	64	7,9E+04	67	4,3E+04	69	2,3E+04	72	1,3E+04	74
22,8	5,2E+07	30	4,9E+07	30	2,8E+07	33	1,6E+07	37	8,4E+06	41	4,0E+06	46	1,8E+06	51	8,6E+05	55	3,3E+05	60	1,9E+05	62	1,0E+05	65	5,5E+04	68	2,9E+04	70	1,5E+04	73	8,4E+03	76
13,9	4,5E+07	31	4,2E+07	31	2,4E+07	34	1,3E+07	38	6,7E+06	42	3,1E+06	47	1,3E+06	52	6,4E+05	56	2,4E+05	61	1,4E+05	63	7,0E+04	66	3,8E+04	69	2,0E+04	71	1,0E+04	74	5,5E+03	77
8,5	3,8E+07	32	3,5E+07	31	2,0E+07	35	1,1E+07	39	5,3E+06	43	2,4E+06	48	1,0E+06	53	4,7E+05	57	1,7E+05	62	9,7E+04	64	4,9E+04	67	2,6E+04	70	1,3E+04	73	6,9E+03	76	3,6E+03	78
5,2	3,3E+07	33	3,0E+07	32	1,6E+07	36	8,8E+06	40	4,2E+06	44	1,8E+06	49	7,5E+05	54	3,4E+05	58	1,2E+05	63	6,8E+04	65	3,4E+04	68	1,8E+04	71	8,9E+03	74	4,5E+03	77	2,3E+03	80
3,2	2,8E+07	33	2,5E+07	33	1,3E+07	37	7,1E+06	41	3,3E+06	46	1,4E+06	50	5,6E+05	55	2,5E+05	59	8,7E+04	64	4,8E+04	66	2,3E+04	69	1,2E+04	72	5,9E+03	76	2,9E+03	79	1,5E+03	81
1,9	2,4E+07	34	2,1E+07	34	1,1E+07	38	5,6E+06	42	2,6E+06	47	1,1E+06	52	4,1E+05	56	1,8E+05	60	6,2E+04	65	3,3E+04	68	1,6E+04	71	8,0E+03	74	3,9E+03	77	1,9E+03	80	9,5E+02	83
1,2	2,0E+07	35	1,7E+07	35	8,9E+06	39	4,5E+06	43	2,0E+06	48	7,9E+05	53	3,0E+05	57	1,3E+05	61	4,3E+04	66	2,3E+04	69	1,1E+04	72	5,3E+03	75	2,5E+03	79	1,2E+03	81	6,0E+02	84
0,7	1,7E+07	36	1,4E+07	37	7,2E+06	41	3,5E+06	45	1,5E+06	49	5,9E+05	54	2,2E+05	58	9,2E+04	62	3,0E+04	68	1,6E+04	70	7,2E+03	74	3,5E+03	77	1,6E+03	80	7,7E+02	83	3,8E+02	85
0,4	1,5E+07	37	1,2E+07	38	5,8E+06	42	2,8E+06	46	1,2E+06	51	4,4E+05	55	1,6E+05	60	6,6E+04	63	2,1E+04	69	1,1E+04	72	4,8E+03	75	2,3E+03	79	1,0E+03	82	4,8E+02	84	2,3E+02	86
0,3	1,3E+07	38	9,7E+06	39	4,7E+06	43	2,2E+06	47	8,8E+05	52	3,3E+05	56	1,2E+05	61	4,6E+04	65	1,5E+04	70	7,1E+03	74	3,2E+03	77	1,5E+03	80	6,6E+02	83	3,0E+02	85	1,5E+02	87
0,2	1,3E+07	38	7,9E+06	40	3,7E+06	44	1,7E+06	49	6,7E+05	53	2,4E+05	58	8,3E+04	62	3,3E+04	66	1,0E+04	72	4,7E+03	75	2,1E+03	79	9,3E+02	82	4,1E+02	84	1,9E+02	86	8,9E+01	87
0,1	1,2E+07	38	6,5E+06	41	3,0E+06	46	1,3E+06	50	5,0E+05	54	1,8E+05	59	6,0E+04	63	2,3E+04	67	7,2E+03	73	3,2E+03	77	1,4E+03	80	5,9E+02	83	2,6E+02	85	1,2E+02	87	5,5E+01	88

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-11. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO3_P1. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	8,5E+07	29	6,3E+07	28	4,1E+07	31	2,4E+07	35	1,4E+07	39	7,3E+06	43	3,7E+06	48	2,0E+06	51	9,6E+05	56	5,3E+05	59	2,9E+05	62	1,6E+05	64	9,0E+04	67	5,0E+04	69	2,8E+04	72
61,1	7,5E+07	29	5,5E+07	29	3,5E+07	32	2,0E+07	36	1,1E+07	40	5,7E+06	44	2,8E+06	49	1,5E+06	52	7,0E+05	57	3,8E+05	60	2,1E+05	63	1,1E+05	65	6,2E+04	68	3,4E+04	70	1,9E+04	73
37,3	6,7E+07	30	4,8E+07	30	2,9E+07	33	1,7E+07	37	9,0E+06	41	4,5E+06	45	2,2E+06	50	1,1E+06	53	5,1E+05	58	2,8E+05	61	1,5E+05	63	8,0E+04	66	4,3E+04	69	2,3E+04	72	1,3E+04	74
22,8	5,9E+07	30	4,1E+07	31	2,5E+07	34	1,4E+07	38	7,2E+06	42	3,5E+06	46	1,7E+06	51	8,4E+05	54	3,7E+05	59	2,0E+05	62	1,0E+05	64	5,6E+04	67	2,9E+04	70	1,6E+04	73	8,4E+03	75
13,9	5,2E+07	30	3,5E+07	31	2,1E+07	35	1,1E+07	39	5,8E+06	43	2,8E+06	47	1,3E+06	52	6,2E+05	55	2,7E+05	60	1,4E+05	63	7,3E+04	65	3,8E+04	68	2,0E+04	71	1,0E+04	74	5,5E+03	77
8,5	4,6E+07	31	3,0E+07	32	1,7E+07	36	9,2E+06	40	4,6E+06	44	2,1E+06	48	9,6E+05	53	4,6E+05	56	1,9E+05	61	1,0E+05	63	5,1E+04	66	2,6E+04	69	1,3E+04	72	6,9E+03	75	3,6E+03	78
5,2	4,1E+07	31	2,6E+07	33	1,4E+07	37	7,4E+06	41	3,6E+06	45	1,6E+06	49	7,2E+05	54	3,4E+05	57	1,4E+05	62	7,0E+04	64	3,5E+04	67	1,8E+04	71	9,0E+03	74	4,6E+03	77	2,3E+03	80
3,2	3,6E+07	31	2,2E+07	34	1,2E+07	38	6,0E+06	42	2,9E+06	46	1,3E+06	50	5,4E+05	55	2,5E+05	58	1,0E+05	63	4,9E+04	66	2,4E+04	69	1,2E+04	72	6,0E+03	75	3,0E+03	78	1,5E+03	81
1,9	3,1E+07	32	1,8E+07	35	9,8E+06	39	4,9E+06	43	2,2E+06	47	9,7E+05	51	4,0E+05	56	1,8E+05	59	7,1E+04	64	3,5E+04	67	1,7E+04	70	8,2E+03	73	4,0E+03	77	1,9E+03	80	9,6E+02	82
1,2	2,7E+07	33	1,5E+07	36	8,0E+06	40	3,9E+06	44	1,8E+06	48	7,4E+05	52	3,0E+05	57	1,3E+05	60	5,0E+04	65	2,4E+04	68	1,1E+04	71	5,5E+03	75	2,6E+03	78	1,2E+03	81	6,1E+02	83
0,7	2,3E+07	34	1,3E+07	37	6,6E+06	41	3,1E+06	45	1,4E+06	49	5,7E+05	53	2,2E+05	58	9,5E+04	61	3,5E+04	66	1,7E+04	69	7,7E+03	73	3,6E+03	77	1,7E+03	80	7,9E+02	82	3,8E+02	85
0,4	2,0E+07	34	1,1E+07	38	5,4E+06	42	2,5E+06	46	1,1E+06	50	4,3E+05	55	1,6E+05	59	6,8E+04	63	2,5E+04	68	1,1E+04	71	5,2E+03	75	2,4E+03	78	1,1E+03	81	5,0E+02	84	2,4E+02	86
0,3	1,7E+07	35	9,0E+06	39	4,4E+06	43	2,0E+06	47	8,4E+05	51	3,3E+05	56	1,2E+05	60	4,9E+04	64	1,7E+04	69	7,6E+03	73	3,4E+03	76	1,5E+03	80	6,8E+02	83	3,1E+02	85	1,5E+02	87
0,2	1,5E+07	36	7,6E+06	40	3,7E+06	44	1,6E+06	48	6,5E+05	52	2,5E+05	56	8,8E+04	61	3,5E+04	65	1,2E+04	70	5,1E+03	74	2,2E+03	78	9,8E+02	81	4,3E+02	84	1,9E+02	86	9,2E+01	87
0,1	1,3E+07	37	6,4E+06	41	3,0E+06	45	1,3E+06	49	5,1E+05	53	1,9E+05	58	6,5E+04	62	2,5E+04	66	8,0E+03	72	3,4E+03	76	1,5E+03	80	6,3E+02	83	2,7E+02	85	1,2E+02	87	5,6E+01	87

Tabla 9-12. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO3_P2. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	1,1E+08	25	7,5E+07	28	4,7E+07	31	2,8E+07	35	1,5E+07	39	8,1E+06	44	4,0E+06	48	2,1E+06	52	1,0E+06	56	6,0E+05	59	3,3E+05	62	1,8E+05	64	9,7E+04	67	5,3E+04	69	3,0E+04	72
61,1	9,7E+07	26	6,4E+07	29	3,9E+07	32	2,3E+07	36	1,2E+07	41	6,3E+06	45	3,1E+06	49	1,6E+06	53	7,7E+05	57	4,3E+05	60	2,3E+05	62	1,2E+05	65	6,7E+04	68	3,7E+04	70	2,0E+04	73
37,3	8,5E+07	26	5,5E+07	30	3,3E+07	33	1,9E+07	37	1,0E+07	41	5,0E+06	46	2,4E+06	50	1,2E+06	54	5,6E+05	58	3,1E+05	61	1,6E+05	63	8,7E+04	66	4,6E+04	69	2,5E+04	72	1,3E+04	74
22,8	7,4E+07	27	4,7E+07	31	2,8E+07	34	1,5E+07	38	8,0E+06	42	3,9E+06	47	1,8E+06	52	8,9E+05	55	4,1E+05	59	2,2E+05	61	1,2E+05	64	6,0E+04	67	3,2E+04	70	1,7E+04	73	8,9E+03	75
13,9	6,5E+07	28	4,0E+07	31	2,3E+07	35	1,3E+07	39	6,4E+06	43	3,0E+06	48	1,4E+06	53	6,5E+05	56	3,0E+05	60	1,6E+05	62	8,2E+04	65	4,2E+04	68	2,2E+04	71	1,1E+04	74	5,9E+03	77
8,5	5,6E+07	29	3,4E+07	32	1,9E+07	36	1,0E+07	40	5,0E+06	44	2,3E+06	49	1,0E+06	54	4,8E+05	57	2,1E+05	61	1,1E+05	63	5,7E+04	66	2,9E+04	69	1,5E+04	72	7,5E+03	75	3,8E+03	78
5,2	4,8E+07	30	2,9E+07	33	1,6E+07	37	8,3E+06	41	4,0E+06	46	1,8E+06	50	7,6E+05	55	3,5E+05	58	1,5E+05	62	7,9E+04	64	4,0E+04	67	2,0E+04	71	9,8E+03	74	4,9E+03	77	2,5E+03	80
3,2	4,1E+07	31	2,4E+07	34	1,3E+07	38	6,7E+06	42	3,1E+06	47	1,4E+06	51	5,7E+05	56	2,6E+05	59	1,1E+05	63	5,6E+04	65	2,7E+04	69	1,3E+04	72	6,5E+03	75	3,2E+03	78	1,6E+03	81
1,9	3,5E+07	32	2,1E+07	35	1,1E+07	39	5,4E+06	43	2,4E+06	48	1,0E+06	52	4,2E+05	56	1,9E+05	60	7,8E+04	64	3,9E+04	67	1,9E+04	70	8,9E+03	73	4,3E+03	77	2,1E+03	80	1,0E+03	82
1,2	3,0E+07	33	1,7E+07	36	8,9E+06	40	4,3E+06	44	1,9E+06	49	7,9E+05	53	3,1E+05	58	1,3E+05	61	5,5E+04	65	2,7E+04	68	1,3E+04	71	6,0E+03	75	2,8E+03	78	1,3E+03	81	6,5E+02	83
0,7	2,6E+07	34	1,4E+07	37	7,3E+06	41	3,4E+06	46	1,5E+06	50	5,9E+05	54	2,3E+05	58	9,7E+04	62	3,9E+04	66	1,9E+04	69	8,6E+03	73	4,0E+03	76	1,8E+03	80	8,6E+02	82	4,1E+02	85
0,4	2,2E+07	35	1,2E+07	38	6,0E+06	42	2,7E+06	47	1,1E+06	51	4,5E+05	55	1,7E+05	59	7,0E+04	63	2,7E+04	68	1,3E+04	71	5,7E+03	75	2,6E+03	78	1,2E+03	81	5,4E+02	84	2,6E+02	86
0,3	1,9E+07	36	1,0E+07	39	4,9E+06	44	2,2E+06	48	8,8E+05	52	3,4E+05	57	1,2E+05	60	5,0E+04	64	1,9E+04	69	8,5E+03	73	3,8E+03	76	1,7E+03	80	7,4E+02	83	3,4E+02	85	1,6E+02	87
0,2	1,6E+07	37	8,5E+06	40	4,0E+06	45	1,7E+06	49	6,8E+05	53	2,5E+05	57	9,1E+04	61	3,5E+04	66	1,3E+04	71	5,7E+03	74	2,5E+03	78	1,1E+03	81	4,7E+02	84	2,1E+02	86	9,8E+01	87
0,1	1,4E+07	38	7,1E+06	41	3,3E+06	46	1,4E+06	50	5,3E+05	54	1,9E+05	58	6,6E+04	62	2,5E+04	67	8,8E+03	72	3,8E+03	76	1,6E+03	79	6,8E+02	83	3,0E+02	85	1,3E+02	87	6,0E+01	88

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-13. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO4_P1. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	7,7E+07	27	5,1E+07	30	3,1E+07	34	1,8E+07	38	9,5E+06	42	4,8E+06	46	2,4E+06	51	1,2E+06	55	6,9E+05	59	3,7E+05	61	2,0E+05	64	1,1E+05	67	6,1E+04	69	3,4E+04	72	1,9E+04	74
61,1	6,7E+07	28	4,4E+07	31	2,6E+07	35	1,4E+07	39	7,5E+06	43	3,7E+06	48	1,8E+06	52	9,2E+05	56	5,0E+05	59	2,6E+05	62	1,4E+05	65	7,7E+04	68	4,2E+04	70	2,3E+04	73	1,3E+04	75
37,3	5,8E+07	29	3,7E+07	32	2,1E+07	36	1,2E+07	40	6,0E+06	44	2,9E+06	49	1,3E+06	53	6,8E+05	57	3,6E+05	60	1,9E+05	63	9,9E+04	66	5,3E+04	68	2,9E+04	71	1,5E+04	74	8,3E+03	76
22,8	5,0E+07	30	3,1E+07	33	1,8E+07	37	9,4E+06	41	4,7E+06	45	2,2E+06	50	1,0E+06	54	5,0E+05	58	2,6E+05	61	1,3E+05	64	6,9E+04	67	3,7E+04	69	1,9E+04	72	1,0E+04	75	5,5E+03	78
13,9	4,3E+07	31	2,6E+07	34	1,5E+07	37	7,6E+06	42	3,7E+06	46	1,7E+06	51	7,5E+05	55	3,6E+05	58	1,8E+05	62	9,2E+04	65	4,8E+04	68	2,5E+04	71	1,3E+04	73	6,7E+03	76	3,6E+03	79
8,5	3,7E+07	31	2,2E+07	35	1,2E+07	38	6,1E+06	43	2,9E+06	47	1,3E+06	52	5,5E+05	56	2,6E+05	59	1,3E+05	63	6,5E+04	66	3,3E+04	69	1,7E+04	72	8,5E+03	75	4,4E+03	78	2,3E+03	80
5,2	3,1E+07	32	1,8E+07	36	9,8E+06	39	4,8E+06	44	2,2E+06	48	9,8E+05	53	4,1E+05	57	1,9E+05	60	9,3E+04	64	4,5E+04	67	2,2E+04	70	1,1E+04	73	5,7E+03	76	2,9E+03	79	1,5E+03	82
3,2	2,6E+07	33	1,5E+07	37	7,9E+06	40	3,8E+06	45	1,7E+06	49	7,4E+05	54	3,0E+05	58	1,4E+05	61	6,5E+04	65	3,1E+04	68	1,5E+04	71	7,6E+03	75	3,7E+03	78	1,8E+03	80	9,4E+02	83
1,9	2,2E+07	34	1,3E+07	38	6,4E+06	42	3,0E+06	46	1,3E+06	50	5,5E+05	55	2,2E+05	59	9,8E+04	62	4,6E+04	66	2,1E+04	69	1,0E+04	73	5,0E+03	76	2,4E+03	79	1,2E+03	82	5,9E+02	84
1,2	1,9E+07	35	1,0E+07	39	5,2E+06	43	2,4E+06	47	1,0E+06	51	4,1E+05	56	1,6E+05	60	7,0E+04	63	3,2E+04	67	1,5E+04	71	6,9E+03	74	3,3E+03	78	1,6E+03	80	7,5E+02	83	3,7E+02	85
0,7	1,6E+07	36	8,6E+06	40	4,2E+06	44	1,9E+06	48	7,9E+05	52	3,1E+05	57	1,2E+05	61	5,0E+04	64	2,2E+04	68	1,0E+04	72	4,6E+03	76	2,2E+03	79	1,0E+03	82	4,8E+02	84	2,3E+02	86
0,4	1,3E+07	37	7,1E+06	41	3,4E+06	45	1,5E+06	49	6,0E+05	53	2,3E+05	58	8,4E+04	62	3,5E+04	66	1,5E+04	70	6,7E+03	74	3,0E+03	77	1,4E+03	81	6,3E+02	83	3,0E+02	85	1,4E+02	87
0,3	1,1E+07	38	5,9E+06	42	2,7E+06	46	1,2E+06	50	4,6E+05	54	1,7E+05	59	6,1E+04	63	2,5E+04	67	1,0E+04	71	4,5E+03	75	2,0E+03	79	8,8E+02	82	4,0E+02	84	1,8E+02	86	8,9E+01	87
0,2	9,7E+06	39	4,9E+06	43	2,2E+06	47	9,1E+05	51	3,5E+05	56	1,3E+05	59	4,4E+04	64	1,7E+04	68	7,0E+03	73	2,9E+03	77	1,3E+03	80	5,6E+02	83	2,5E+02	85	1,1E+02	87	5,5E+01	88
0,1	8,3E+06	40	4,0E+06	44	1,8E+06	48	7,1E+05	52	2,7E+05	56	9,5E+04	61	3,2E+04	65	1,2E+04	70	4,7E+03	75	1,9E+03	79	8,2E+02	82	3,5E+02	84	1,5E+02	86	7,1E+01	87	3,4E+01	88

Tabla 9-14. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO4_P2. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	6,7E+07	27	4,4E+07	30	2,6E+07	34	1,5E+07	38	8,0E+06	42	4,1E+06	46	2,0E+06	51	1,1E+06	55	6,6E+05	59	3,6E+05	62	2,0E+05	64	1,1E+05	67	6,0E+04	69	3,3E+04	72	1,9E+04	74
61,1	5,8E+07	28	3,7E+07	31	2,2E+07	35	1,2E+07	39	6,4E+06	43	3,2E+06	48	1,5E+06	52	7,9E+05	56	4,7E+05	60	2,6E+05	63	1,4E+05	65	7,5E+04	68	4,1E+04	70	2,2E+04	73	1,2E+04	76
37,3	5,0E+07	29	3,2E+07	32	1,8E+07	36	9,8E+06	40	5,1E+06	44	2,4E+06	49	1,1E+06	53	5,8E+05	57	3,4E+05	61	1,8E+05	64	9,7E+04	66	5,2E+04	69	2,8E+04	72	1,5E+04	74	8,1E+03	77
22,8	4,3E+07	30	2,7E+07	33	1,5E+07	37	8,0E+06	41	4,0E+06	45	1,9E+06	50	8,5E+05	54	4,2E+05	58	2,4E+05	62	1,3E+05	64	6,7E+04	67	3,6E+04	70	1,9E+04	73	1,0E+04	75	5,3E+03	78
13,9	3,7E+07	30	2,2E+07	34	1,2E+07	37	6,4E+06	42	3,1E+06	46	1,4E+06	51	6,3E+05	55	3,1E+05	59	1,7E+05	63	9,0E+04	65	4,6E+04	68	2,4E+04	71	1,3E+04	74	6,6E+03	77	3,5E+03	79
8,5	3,2E+07	31	1,9E+07	35	1,0E+07	38	5,1E+06	43	2,4E+06	47	1,1E+06	52	4,7E+05	56	2,3E+05	59	1,2E+05	64	6,3E+04	66	3,2E+04	69	1,6E+04	72	8,3E+03	75	4,3E+03	78	2,2E+03	81
5,2	2,7E+07	32	1,6E+07	36	8,3E+06	39	4,1E+06	44	1,9E+06	48	8,2E+05	53	3,5E+05	57	1,6E+05	60	8,7E+04	65	4,4E+04	67	2,2E+04	70	1,1E+04	74	5,5E+03	77	2,8E+03	79	1,4E+03	82
3,2	2,3E+07	33	1,3E+07	37	6,8E+06	40	3,2E+06	45	1,5E+06	49	6,2E+05	54	2,5E+05	58	1,2E+05	61	6,1E+04	66	3,0E+04	69	1,5E+04	72	7,3E+03	75	3,6E+03	78	1,8E+03	81	9,0E+02	83
1,9	1,9E+07	34	1,1E+07	37	5,5E+06	42	2,6E+06	46	1,1E+06	50	4,7E+05	55	1,9E+05	59	8,4E+04	62	4,3E+04	67	2,1E+04	70	1,0E+04	73	4,8E+03	76	2,3E+03	80	1,1E+03	82	5,7E+02	84
1,2	1,6E+07	35	9,0E+06	38	4,4E+06	43	2,0E+06	47	8,7E+05	51	3,5E+05	56	1,4E+05	60	6,0E+04	63	3,0E+04	68	1,4E+04	71	6,7E+03	75	3,2E+03	78	1,5E+03	81	7,3E+02	83	3,6E+02	85
0,7	1,4E+07	36	7,4E+06	40	3,6E+06	44	1,6E+06	48	6,7E+05	52	2,6E+05	57	9,9E+04	61	4,3E+04	65	2,1E+04	70	9,5E+03	73	4,4E+03	76	2,1E+03	80	9,6E+02	82	4,6E+02	84	2,2E+02	86
0,4	1,2E+07	37	6,1E+06	41	2,9E+06	45	1,3E+06	49	5,1E+05	54	1,9E+05	58	7,1E+04	62	3,0E+04	66	1,4E+04	71	6,4E+03	74	2,9E+03	78	1,3E+03	81	6,1E+02	84	2,9E+02	86	1,4E+02	87
0,3	1,0E+07	38	5,1E+06	42	2,3E+06	46	9,8E+05	50	3,9E+05	55	1,4E+05	59	5,1E+04	63	2,1E+04	67	9,6E+03	72	4,2E+03	76	1,9E+03	80	8,4E+02	82	3,8E+02	85	1,8E+02	86	8,5E+01	88
0,2	8,5E+06	39	4,2E+06	43	1,9E+06	47	7,8E+05	51	3,0E+05	55	1,1E+05	60	3,7E+04	64	1,5E+04	69	6,5E+03	74	2,8E+03	78	1,2E+03	81	5,3E+02	84	2,4E+02	86	1,1E+02	87	5,2E+01	88
0,1	7,3E+06	40	3,5E+06	44	1,5E+06	48	6,1E+05	52	2,3E+05	56	8,0E+04	61	2,7E+04	66	1,0E+04	70	4,3E+03	76	1,8E+03	79	7,7E+02	82	3,3E+02	84	1,5E+02	86	6,8E+01	88	3,2E+01	89

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-15. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO5_P1. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	6,7E+07	27	4,4E+07	30	2,6E+07	34	1,5E+07	38	8,0E+06	42	4,1E+06	46	2,0E+06	51	1,1E+06	55	6,6E+05	59	3,6E+05	62	2,0E+05	64	1,1E+05	67	6,0E+04	69	3,3E+04	72	1,9E+04	74
61,1	5,8E+07	28	3,7E+07	31	2,2E+07	35	1,2E+07	39	6,4E+06	43	3,2E+06	48	1,5E+06	52	7,9E+05	56	4,7E+05	60	2,6E+05	63	1,4E+05	65	7,5E+04	68	4,1E+04	70	2,2E+04	73	1,2E+04	76
37,3	5,0E+07	29	3,2E+07	32	1,8E+07	36	9,8E+06	40	5,1E+06	44	2,4E+06	49	1,1E+06	53	5,8E+05	57	3,4E+05	61	1,8E+05	64	9,7E+04	66	5,2E+04	69	2,8E+04	72	1,5E+04	74	8,1E+03	77
22,8	4,3E+07	30	2,7E+07	33	1,5E+07	37	8,0E+06	41	4,0E+06	45	1,9E+06	50	8,5E+05	54	4,2E+05	58	2,4E+05	62	1,3E+05	64	6,7E+04	67	3,6E+04	70	1,9E+04	73	1,0E+04	75	5,3E+03	78
13,9	3,7E+07	30	2,2E+07	34	1,2E+07	37	6,4E+06	42	3,1E+06	46	1,4E+06	51	6,3E+05	55	3,1E+05	59	1,7E+05	63	9,0E+04	65	4,6E+04	68	2,4E+04	71	1,3E+04	74	6,6E+03	77	3,5E+03	79
8,5	3,2E+07	31	1,9E+07	35	1,0E+07	38	5,1E+06	43	2,4E+06	47	1,1E+06	52	4,7E+05	56	2,3E+05	59	1,2E+05	64	6,3E+04	66	3,2E+04	69	1,6E+04	72	8,3E+03	75	4,3E+03	78	2,2E+03	81
5,2	2,7E+07	32	1,6E+07	36	8,3E+06	39	4,1E+06	44	1,9E+06	48	8,2E+05	53	3,5E+05	57	1,6E+05	60	8,7E+04	65	4,4E+04	67	2,2E+04	74	5,5E+03	77	2,8E+03	79	1,4E+03	82		
3,2	2,3E+07	33	1,3E+07	37	6,8E+06	40	3,2E+06	45	1,5E+06	49	6,2E+05	54	2,5E+05	58	1,2E+05	61	6,1E+04	66	3,0E+04	69	1,5E+04	72	7,3E+03	75	3,6E+03	78	1,8E+03	81	9,0E+02	83
1,9	1,9E+07	34	1,1E+07	37	5,5E+06	42	2,6E+06	46	1,1E+06	50	4,7E+05	55	1,9E+05	59	8,4E+04	62	4,3E+04	67	2,1E+04	70	1,0E+04	73	4,8E+03	76	2,3E+03	80	1,1E+03	82	5,7E+02	84
1,2	1,6E+07	35	9,0E+06	38	4,4E+06	43	2,0E+06	47	8,7E+05	51	3,5E+05	56	1,4E+05	60	6,0E+04	63	3,0E+04	68	1,4E+04	71	6,7E+03	75	3,2E+03	78	1,5E+03	81	7,3E+02	83	3,6E+02	85
0,7	1,4E+07	36	7,4E+06	40	3,6E+06	44	1,6E+06	48	6,7E+05	52	2,6E+05	57	9,9E+04	61	4,3E+04	65	2,1E+04	70	9,5E+03	73	4,4E+03	76	2,1E+03	80	9,6E+02	82	4,6E+02	84	2,2E+02	86
0,4	1,2E+07	37	6,1E+06	41	2,9E+06	45	1,3E+06	49	5,1E+05	54	1,9E+05	58	7,1E+04	62	3,0E+04	66	1,4E+04	71	6,4E+03	74	2,9E+03	78	1,3E+03	81	6,1E+02	84	2,9E+02	86	1,4E+02	87
0,3	1,0E+07	38	5,1E+06	42	2,3E+06	46	9,8E+05	50	3,9E+05	55	1,4E+05	59	5,1E+04	63	2,1E+04	67	9,6E+03	72	4,2E+03	76	1,9E+03	80	8,4E+02	82	3,8E+02	85	1,8E+02	86	8,5E+01	88
0,2	8,5E+06	39	4,2E+06	43	1,9E+06	47	7,8E+05	51	3,0E+05	55	1,1E+05	60	3,7E+04	64	1,5E+04	69	6,5E+03	74	2,8E+03	78	1,2E+03	81	5,3E+02	84	2,4E+02	86	1,1E+02	87	5,2E+01	88
0,1	7,3E+06	40	3,5E+06	44	1,5E+06	48	6,1E+05	52	2,3E+05	56	8,0E+04	61	2,7E+04	66	1,0E+04	70	4,3E+03	76	1,8E+03	79	7,7E+02	82	3,3E+02	84	1,5E+02	86	6,8E+01	88	3,2E+01	89

Tabla 9-16. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO5_P2. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	7,3E+07	27	4,8E+07	30	2,9E+07	34	1,7E+07	38	9,0E+06	42	4,6E+06	46	2,2E+06	51	1,2E+06	55	5,8E+05	58	3,3E+05	61	1,8E+05	64	1,0E+05	67	5,7E+04	69	3,2E+04	72	1,8E+04	74
61,1	6,3E+07	28	4,1E+07	31	2,4E+07	35	1,4E+07	39	7,1E+06	43	3,5E+06	48	1,7E+06	52	8,8E+05	56	4,3E+05	59	2,4E+05	62	1,3E+05	65	7,1E+04	68	3,9E+04	70	2,2E+04	73	1,2E+04	75
37,3	5,5E+07	29	3,5E+07	32	2,0E+07	36	1,1E+07	40	5,7E+06	44	2,7E+06	49	1,3E+06	53	6,4E+05	57	3,2E+05	60	1,7E+05	63	9,1E+04	66	4,9E+04	69	2,7E+04	72	1,4E+04	74	8,0E+03	77
22,8	4,7E+07	30	2,9E+07	33	1,7E+07	37	8,9E+06	41	4,5E+06	45	2,1E+06	50	9,5E+05	54	4,7E+05	58	2,3E+05	61	1,2E+05	64	6,3E+04	67	3,4E+04	70	1,8E+04	72	9,6E+03	75	5,2E+03	78
13,9	4,0E+07	31	2,5E+07	34	1,4E+07	38	7,1E+06	42	3,5E+06	46	1,6E+06	51	7,1E+05	55	3,4E+05	59	1,6E+05	62	8,4E+04	65	4,4E+04	68	2,3E+04	71	1,2E+04	74	6,3E+03	76	3,4E+03	79
8,5	3,4E+07	32	2,1E+07	35	1,1E+07	39	5,7E+06	43	2,7E+06	47	1,2E+06	52	5,3E+05	56	2,5E+05	60	1,2E+05	63	5,9E+04	66	3,0E+04	69	1,6E+04	72	7,9E+03	75	4,1E+03	78	2,2E+03	80
5,2	2,9E+07	33	1,7E+07	36	9,2E+06	40	4,6E+06	44	2,1E+06	48	9,3E+05	53	3,9E+05	57	1,8E+05	60	8,2E+04	65	4,1E+04	67	2,1E+04	70	1,0E+04	73	5,2E+03	76	2,7E+03	79	1,4E+03	82
3,2	2,5E+07	33	1,4E+07	37	7,4E+06	41	3,6E+06	45	1,6E+06	49	7,0E+05	54	2,8E+05	58	1,3E+05	61	5,7E+04	66	2,8E+04	69	1,4E+04	72	7,0E+03	75	3,4E+03	78	1,7E+03	81	8,9E+02	83
1,9	2,1E+07	34	1,2E+07	38	6,0E+06	42	2,9E+06	46	1,3E+06	50	5,3E+05	55	2,1E+05	59	9,3E+04	62	4,0E+04	67	1,9E+04	70	9,4E+03	73	4,6E+03	76	2,2E+03	79	1,1E+03	82	5,6E+02	84
1,2	1,8E+07	35	9,8E+06	39	4,9E+06	43	2,3E+06	47	9,7E+05	51	3,9E+05	56	1,5E+05	60	6,7E+04	64	2,8E+04	68	1,3E+04	71	6,3E+03	75	3,0E+03	78	1,4E+03	81	7,1E+02	83	3,5E+02	85
0,7	1,5E+07	36	8,1E+06	40	3,9E+06	44	1,8E+06	48	7,4E+05	53	2,9E+05	57	1,1E+05	61	4,7E+04	65	1,9E+04	69	9,0E+03	73	4,2E+03	76	2,0E+03	79	9,2E+02	82	4,5E+02	84	2,2E+02	86
0,4	1,3E+07	37	6,7E+06	41	3,2E+06	45	1,4E+06	49	5,7E+05	54	2,2E+05	58	8,0E+04	62	3,3E+04	66	1,3E+04	71	6,0E+03	74	2,7E+03	78	1,3E+03	81	5,8E+02	83	2,8E+02	85	1,4E+02	87
0,3	1,1E+07	38	5,5E+06	42	2,6E+06	46	1,1E+06	50	4,4E+05	55	1,6E+05	59	5,8E+04	63	2,3E+04	67	9,0E+03	72	4,0E+03	76	1,8E+03	79	8,0E+02	82	3,7E+02	85	1,7E+02	86	8,4E+01	87
0,2	9,1E+06	39	4,6E+06	43	2,1E+06	47	8,6E+05	51	3,3E+05	56	1,2E+05	60	4,2E+04	64	1,6E+04	69	6,1E+03	74	2,6E+03	78	1,1E+03	81	5,1E+02	84	2,3E+02	85	1,1E+02	87	5,2E+01	88
0,1	7,8E+06	40	3,8E+06	44	1,7E+06	48	6,8E+05	53	2,6E+05	56	9,1E+04	61	3,0E+04	65	1,1E+04	70	4,1E+03	76	1,7E+03	79	7,3E+02	82	3,2E+02	85	1,4E+02	86	6,6E+01	88	3,2E+01	88

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-17. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO6_P1. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	3,2E+07	32	2,0E+07	35	1,2E+07	39	6,3E+06	43	3,3E+06	48	1,6E+06	53	7,6E+05	57	4,2E+05	61	3,0E+05	63	1,7E+05	66	9,2E+04	68	5,1E+04	71	2,8E+04	73	1,6E+04	75	8,9E+03	77
61,1	2,7E+07	33	1,7E+07	36	9,4E+06	40	5,0E+06	44	2,5E+06	49	1,2E+06	54	5,5E+05	59	3,0E+05	62	2,1E+05	64	1,2E+05	67	6,3E+04	69	3,5E+04	72	1,9E+04	74	1,0E+04	76	5,8E+03	79
37,3	2,3E+07	34	1,4E+07	37	7,6E+06	41	4,0E+06	45	2,0E+06	50	8,8E+05	55	4,0E+05	59	2,2E+05	62	1,5E+05	65	8,1E+04	67	4,3E+04	70	2,4E+04	73	1,3E+04	75	6,9E+03	78	3,8E+03	80
22,8	1,9E+07	34	1,1E+07	38	6,1E+06	42	3,1E+06	46	1,5E+06	51	6,6E+05	56	2,9E+05	60	1,5E+05	63	1,1E+05	66	5,6E+04	68	2,9E+04	71	1,6E+04	74	8,4E+03	76	4,5E+03	79	2,4E+03	81
13,9	1,6E+07	35	9,3E+06	39	4,9E+06	43	2,4E+06	47	1,1E+06	52	4,9E+05	57	2,1E+05	61	1,1E+05	64	7,4E+04	67	3,8E+04	69	2,0E+04	72	1,0E+04	75	5,5E+03	78	2,9E+03	80	1,5E+03	82
8,5	1,3E+07	36	7,6E+06	40	3,9E+06	44	1,9E+06	48	8,6E+05	53	3,6E+05	58	1,5E+05	62	7,6E+04	65	5,1E+04	68	2,6E+04	71	1,3E+04	73	6,9E+03	76	3,6E+03	79	1,9E+03	81	9,7E+02	83
5,2	1,1E+07	37	6,1E+06	41	3,1E+06	45	1,4E+06	50	6,5E+05	54	2,6E+05	59	1,1E+05	63	5,3E+04	66	3,5E+04	69	1,8E+04	72	8,9E+03	75	4,5E+03	78	2,3E+03	80	1,2E+03	82	6,1E+02	84
3,2	9,2E+06	38	5,0E+06	42	2,4E+06	46	1,1E+06	51	4,8E+05	55	1,9E+05	60	7,6E+04	64	3,7E+04	67	2,4E+04	70	1,2E+04	73	5,9E+03	76	2,9E+03	79	1,5E+03	81	7,5E+02	84	3,9E+02	85
1,9	7,6E+06	39	4,0E+06	43	1,9E+06	47	8,5E+05	52	3,6E+05	56	1,4E+05	61	5,4E+04	65	2,6E+04	69	1,6E+04	72	8,0E+03	75	3,9E+03	78	1,9E+03	80	9,4E+02	83	4,7E+02	85	2,4E+02	86
1,2	6,3E+06	40	3,2E+06	44	1,5E+06	48	6,5E+05	53	2,7E+05	57	1,0E+05	62	3,8E+04	66	1,8E+04	70	1,1E+04	73	5,3E+03	76	2,5E+03	79	1,2E+03	82	6,0E+02	84	3,0E+02	85	1,5E+02	87
0,7	5,2E+06	41	2,6E+06	45	1,2E+06	50	5,0E+05	54	2,0E+05	58	7,3E+04	63	2,7E+04	67	1,2E+04	71	7,5E+03	74	3,5E+03	77	1,6E+03	80	7,8E+02	83	3,8E+02	85	1,8E+02	86	9,3E+01	87
0,4	4,3E+06	42	2,1E+06	46	9,1E+05	51	3,8E+05	55	1,5E+05	59	5,3E+04	64	1,9E+04	69	8,3E+03	72	5,0E+03	76	2,3E+03	79	1,0E+03	82	4,9E+02	84	2,4E+02	85	1,1E+02	87	5,8E+01	88
0,3	3,5E+06	43	1,7E+06	47	7,1E+05	52	2,9E+05	56	1,1E+05	60	3,8E+04	65	1,3E+04	70	5,6E+03	74	3,3E+03	77	1,5E+03	80	6,7E+02	83	3,1E+02	85	1,5E+02	86	7,1E+01	87	3,6E+01	88
0,2	2,9E+06	44	1,3E+06	48	5,6E+05	53	2,2E+05	57	8,2E+04	61	2,8E+04	65	9,1E+03	71	3,8E+03	75	2,2E+03	79	9,4E+02	82	4,2E+02	84	1,9E+02	86	9,1E+01	87	4,4E+01	88	2,2E+01	87
0,1	2,4E+06	45	1,1E+06	49	4,4E+05	54	1,7E+05	57	6,1E+04	61	2,0E+04	66	6,4E+03	72	2,5E+03	77	1,4E+03	80	6,0E+02	83	2,7E+02	85	1,2E+02	86	5,6E+01	88	2,7E+01	88	1,3E+01	87

Tabla 9-18. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO6_P2. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	4,1E+07	32	2,6E+07	35	1,5E+07	39	8,0E+06	43	4,1E+06	48	2,0E+06	53	9,2E+05	57	4,9E+05	60	3,0E+05	63	1,7E+05	66	9,2E+04	68	5,1E+04	71	2,8E+04	73	1,6E+04	75	9,1E+03	78
61,1	3,4E+07	33	2,1E+07	36	1,2E+07	40	6,3E+06	44	3,2E+06	49	1,5E+06	54	6,7E+05	58	3,5E+05	62	2,1E+05	64	1,2E+05	67	6,3E+04	69	3,5E+04	72	1,9E+04	74	1,1E+04	77	5,9E+03	79
37,3	2,9E+07	34	1,8E+07	37	9,6E+06	41	5,0E+06	45	2,4E+06	50	1,1E+06	55	4,9E+05	59	2,5E+05	62	1,5E+05	65	8,0E+04	68	4,3E+04	70	2,4E+04	73	1,3E+04	76	6,9E+03	78	3,8E+03	80
22,8	2,5E+07	35	1,5E+07	38	7,7E+06	42	3,9E+06	46	1,9E+06	51	8,2E+05	56	3,5E+05	60	1,8E+05	63	1,0E+05	66	5,5E+04	69	2,9E+04	71	1,6E+04	74	8,3E+03	77	4,5E+03	79	2,5E+03	81
13,9	2,1E+07	35	1,2E+07	39	6,2E+06	43	3,1E+06	47	1,4E+06	52	6,1E+05	57	2,6E+05	61	1,3E+05	64	7,2E+04	67	3,8E+04	70	2,0E+04	72	1,0E+04	75	5,5E+03	78	2,9E+03	80	1,6E+03	82
8,5	1,7E+07	36	9,7E+06	40	4,9E+06	44	2,4E+06	48	1,1E+06	53	4,5E+05	58	1,8E+05	62	8,9E+04	65	5,0E+04	68	2,6E+04	71	1,3E+04	74	6,9E+03	77	3,5E+03	79	1,9E+03	81	9,9E+02	84
5,2	1,4E+07	37	7,8E+06	41	3,9E+06	45	1,8E+06	49	8,1E+05	54	3,3E+05	59	1,3E+05	63	6,2E+04	66	3,4E+04	69	1,7E+04	72	8,8E+03	75	4,5E+03	78	2,3E+03	80	1,2E+03	83	6,2E+02	85
3,2	1,2E+07	38	6,3E+06	42	3,1E+06	46	1,4E+06	51	6,0E+05	55	2,4E+05	59	9,3E+04	64	4,3E+04	67	2,4E+04	71	1,2E+04	73	5,8E+03	76	2,9E+03	79	1,5E+03	82	7,5E+02	84	3,9E+02	86
1,9	9,8E+06	39	5,1E+06	43	2,4E+06	47	1,1E+06	52	4,5E+05	56	1,7E+05	60	6,6E+04	65	3,0E+04	69	1,6E+04	72	7,8E+03	75	3,8E+03	78	1,9E+03	81	9,3E+02	83	4,7E+02	85	2,4E+02	86
1,2	8,1E+06	40	4,1E+06	44	1,9E+06	48	8,2E+05	53	3,4E+05	57	1,3E+05	61	4,7E+04	66	2,1E+04	70	1,1E+04	73	5,2E+03	76	2,5E+03	79	1,2E+03	82	5,9E+02	84	2,9E+02	86	1,5E+02	87
0,7	6,7E+06	41	3,3E+06	45	1,5E+06	50	6,3E+05	54	2,5E+05	58	9,2E+04	62	3,3E+04	67	1,4E+04	71	7,3E+03	75	3,4E+03	78	1,6E+03	80	7,8E+02	83	3,7E+02	85	1,8E+02	86	9,3E+01	88
0,4	5,5E+06	42	2,6E+06	46	1,2E+06	51	4,8E+05	55	1,9E+05	59	6,6E+04	63	2,3E+04	68	9,7E+03	73	4,8E+03	76	2,2E+03	79	1,0E+03	82	4,9E+02	84	2,3E+02	86	1,1E+02	87	5,7E+01	88
0,3	4,5E+06	43	2,1E+06	47	9,0E+05	52	3,6E+05	56	1,4E+05	60	4,8E+04	64	1,6E+04	70	6,5E+03	74	3,2E+03	78	1,4E+03	80	6,6E+02	83	3,1E+02	85	1,4E+02	87	7,0E+01	88	3,5E+01	89
0,2	3,8E+06	44	1,7E+06	48	7,0E+05	53	2,8E+05	57	1,0E+05	61	3,5E+04	65	1,1E+04	71	4,4E+03	76	2,1E+03	79	9,2E+02	82	4,1E+02	84	1,9E+02	86	8,9E+01	87	4,3E+01	88	2,1E+01	89
0,1	3,1E+06	45	1,4E+06	50	5,5E+05	54	2,1E+05	58	7,6E+04	61	2,5E+04	66	7,7E+03	72	3,0E+03	77	1,4E+03	81	5,9E+02	83	2,6E+02	85	1,2E+02	87	5,5E+01	88	2,6E+01	88	1,3E+01	89

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-19. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO9_P1. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	2,8E+07	34	1,7E+07	37	9,3E+06	41	5,0E+06	46	2,5E+06	50	1,2E+06	55	5,7E+05	60	3,1E+05	63	2,0E+05	66	1,2E+05	68	6,7E+04	70	3,9E+04	72	2,5E+04	74	1,5E+04	76	8,8E+03	78
61,1	2,3E+07	35	1,4E+07	39	7,5E+06	42	3,9E+06	47	1,9E+06	51	9,0E+05	56	4,1E+05	61	2,2E+05	64	1,4E+05	67	7,9E+04	69	4,6E+04	71	2,7E+04	73	1,6E+04	75	9,6E+03	77	5,7E+03	79
37,3	1,9E+07	35	1,1E+07	39	6,0E+06	43	3,1E+06	48	1,5E+06	52	6,6E+05	57	3,0E+05	62	1,6E+05	64	9,8E+04	67	5,4E+04	70	3,1E+04	72	1,8E+04	75	1,1E+04	76	6,3E+03	79	3,7E+03	81
22,8	1,6E+07	36	9,0E+06	40	4,7E+06	44	2,4E+06	49	1,1E+06	53	4,9E+05	58	2,1E+05	62	1,1E+05	65	6,8E+04	68	3,7E+04	71	2,1E+04	73	1,2E+04	76	7,1E+03	78	4,1E+03	80	2,4E+03	82
13,9	1,3E+07	37	7,2E+06	41	3,7E+06	45	1,8E+06	50	8,4E+05	54	3,6E+05	59	1,5E+05	63	7,7E+04	66	4,7E+04	69	2,5E+04	72	1,4E+04	74	7,8E+03	77	4,6E+03	79	2,6E+03	81	1,5E+03	83
8,5	1,1E+07	38	5,8E+06	42	2,9E+06	46	1,4E+06	51	6,3E+05	55	2,6E+05	60	1,1E+05	64	5,4E+04	67	3,2E+04	71	1,7E+04	73	9,2E+03	76	5,1E+03	78	3,0E+03	80	1,7E+03	82	9,4E+02	84
5,2	9,0E+06	39	4,7E+06	43	2,3E+06	47	1,1E+06	52	4,7E+05	56	1,9E+05	61	7,6E+04	65	3,7E+04	68	2,2E+04	72	1,1E+04	74	6,1E+03	77	3,3E+03	79	1,9E+03	81	1,1E+03	83	5,9E+02	85
3,2	7,3E+06	40	3,7E+06	44	1,8E+06	48	8,1E+05	53	3,5E+05	57	1,4E+05	61	5,4E+04	66	2,6E+04	69	1,5E+04	73	7,5E+03	76	4,0E+03	78	2,1E+03	81	1,2E+03	82	6,7E+02	84	3,7E+02	86
1,9	6,0E+06	41	3,0E+06	45	1,4E+06	49	6,1E+05	53	2,6E+05	58	9,8E+04	62	3,8E+04	67	1,8E+04	71	9,8E+03	74	5,0E+03	77	2,6E+03	80	1,4E+03	82	7,7E+02	83	4,2E+02	85	2,3E+02	86
1,2	4,9E+06	42	2,4E+06	46	1,1E+06	50	4,6E+05	54	1,9E+05	58	7,0E+04	63	2,6E+04	68	1,2E+04	72	6,6E+03	76	3,3E+03	78	1,7E+03	81	8,7E+02	83	4,9E+02	85	2,6E+02	86	1,4E+02	87
0,7	4,0E+06	43	1,9E+06	47	8,3E+05	51	3,5E+05	55	1,4E+05	59	5,1E+04	64	1,8E+04	69	8,2E+03	73	4,3E+03	77	2,1E+03	80	1,1E+03	82	5,5E+02	84	3,1E+02	85	1,6E+02	87	9,0E+01	88
0,4	3,2E+06	44	1,5E+06	48	6,4E+05	52	2,6E+05	56	1,0E+05	60	3,6E+04	65	1,3E+04	71	5,5E+03	75	2,8E+03	79	1,4E+03	81	6,8E+02	83	3,5E+02	85	1,9E+02	86	1,0E+02	87	5,5E+01	88
0,3	2,7E+06	45	1,2E+06	49	5,0E+05	53	2,0E+05	57	7,6E+04	61	2,6E+04	66	8,7E+03	72	3,7E+03	76	1,8E+03	80	8,7E+02	82	4,3E+02	84	2,2E+02	86	1,2E+02	87	6,2E+01	88	3,4E+01	88
0,2	2,2E+06	46	9,4E+05	50	3,9E+05	54	1,5E+05	58	5,6E+04	62	1,9E+04	67	6,0E+03	73	2,5E+03	77	1,2E+03	81	5,5E+02	84	2,7E+02	85	1,3E+02	87	7,3E+01	88	3,8E+01	88	2,1E+01	89
0,1	1,8E+06	47	7,5E+05	51	3,0E+05	55	1,1E+05	59	4,2E+04	62	1,3E+04	68	4,1E+03	74	1,6E+03	79	7,7E+02	82	3,5E+02	84	1,7E+02	86	8,3E+01	87	4,5E+01	88	2,3E+01	88	1,3E+01	89

Tabla 9-20. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-PO9_P2. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	2,6E+07	34	1,6E+07	37	8,9E+06	41	4,8E+06	46	2,4E+06	50	1,2E+06	55	5,5E+05	59	3,1E+05	63	1,5E+05	67	8,6E+04	69	4,8E+04	71	2,7E+04	74	1,5E+04	76	8,9E+03	78	5,1E+03	81
61,1	2,2E+07	35	1,3E+07	39	7,1E+06	42	3,7E+06	47	1,9E+06	51	8,6E+05	56	4,0E+05	61	2,2E+05	64	1,1E+05	68	5,9E+04	70	3,2E+04	72	1,8E+04	75	1,0E+04	77	5,8E+03	79	3,3E+03	82
37,3	1,8E+07	36	1,0E+07	39	5,7E+06	43	2,9E+06	48	1,4E+06	52	6,4E+05	57	2,9E+05	61	1,5E+05	65	7,3E+04	69	4,0E+04	71	2,2E+04	74	1,2E+04	76	6,6E+03	78	3,7E+03	80	2,1E+03	83
22,8	1,5E+07	36	8,5E+06	40	4,5E+06	44	2,3E+06	49	1,1E+06	53	4,7E+05	58	2,1E+05	62	1,1E+05	65	5,1E+04	70	2,7E+04	72	1,5E+04	75	7,9E+03	77	4,3E+03	79	2,4E+03	81	1,3E+03	83
13,9	1,3E+07	37	6,9E+06	41	3,5E+06	45	1,7E+06	50	8,0E+05	54	3,4E+05	59	1,5E+05	63	7,5E+04	66	3,4E+04	71	1,8E+04	73	9,6E+03	76	5,2E+03	78	2,8E+03	80	1,5E+03	83	8,4E+02	84
8,5	1,0E+07	38	5,5E+06	42	2,8E+06	46	1,3E+06	51	6,0E+05	55	2,5E+05	60	1,0E+05	64	5,2E+04	67	2,3E+04	72	1,2E+04	74	6,3E+03	77	3,4E+03	79	1,8E+03	82	9,6E+02	84	5,3E+02	85
5,2	8,5E+06	39	4,4E+06	43	2,2E+06	47	1,0E+06	52	4,4E+05	56	1,8E+05	61	7,3E+04	65	3,6E+04	68	1,6E+04	73	8,1E+03	76	4,2E+03	78	2,2E+03	81	1,1E+03	83	6,1E+02	85	3,3E+02	86
3,2	6,9E+06	40	3,5E+06	44	1,7E+06	48	7,7E+05	53	3,3E+05	57	1,3E+05	62	5,1E+04	66	2,5E+04	70	1,1E+04	74	5,3E+03	77	2,7E+03	80	1,4E+03	82	7,2E+02	84	3,8E+02	85	2,0E+02	87
1,9	5,7E+06	41	2,8E+06	45	1,3E+06	50	5,8E+05	54	2,4E+05	58	9,4E+04	62	3,6E+04	67	1,7E+04	71	7,0E+03	76	3,5E+03	78	1,7E+03	81	8,8E+02	83	4,5E+02	85	2,4E+02	86	1,3E+02	87
1,2	4,6E+06	42	2,2E+06	46	1,0E+06	51	4,4E+05	55	1,8E+05	59	6,7E+04	63	2,5E+04	68	1,2E+04	72	4,7E+03	77	2,3E+03	80	1,1E+03	82	5,6E+02	84	2,8E+02	86	1,5E+02	87	7,8E+01	88
0,7	3,7E+06	43	1,8E+06	47	7,9E+05	52	3,3E+05	56	1,3E+05	60	4,8E+04	64	1,7E+04	70	7,9E+03	73	3,1E+03	78	1,5E+03	81	7,1E+02	83	3,5E+02	85	1,8E+02	86	9,1E+01	87	4,8E+01	88
0,4	3,0E+06	44	1,4E+06	49	6,1E+05	53	2,5E+05	57	9,7E+04	60	3,5E+04	65	1,2E+04	71	5,3E+03	75	2,0E+03	80	9,3E+02	82	4,5E+02	84	2,2E+02	86	1,1E+02	87	5,6E+01	88	3,0E+01	88
0,3	2,5E+06	45	1,1E+06	50	4,7E+05	54	1,9E+05	57	7,2E+04	61	2,5E+04	66	8,3E+03	72	3,5E+03	76	1,3E+03	81	5,9E+02	83	2,8E+02	85	1,4E+02	87	6,7E+01	88	3,5E+01	88	1,8E+01	88
0,2	2,0E+06	46	8,8E+05	51	3,6E+05	54	1,4E+05	58	5,3E+04	62	1,8E+04	67	5,7E+03	74	2,4E+03	78	8,3E+02	82	3,8E+02	84	1,8E+02	86	8,4E+01	87	4,1E+01	88	2,1E+01	88	1,1E+01	88
0,1	1,7E+06	47	7,0E+05	51	2,8E+05	55	1,1E+05	59	3,9E+04	62	1,3E+04	67	3,9E+03	75	1,6E+03	79	5,3E+02	83	2,4E+02	85	1,1E+02	87	5,2E+01	88	2,6E+01	88	1,3E+01	88	6,9E+00	88

9.3 Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor encapsulado

Tabla 9-21. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	8,8E+07	29	8,5E+07	28	5,3E+07	32	3,1E+07	36	1,7E+07	40	8,2E+06	45	3,9E+06	50	2,0E+06	54	6,6E+05	60	3,9E+05	63	2,2E+05	65	1,2E+05	68	6,5E+04	70	3,6E+04	72	2,0E+04	74
61,1	7,6E+07	30	7,3E+07	29	4,5E+07	33	2,5E+07	37	1,3E+07	41	6,4E+06	46	3,0E+06	51	1,5E+06	55	4,8E+05	61	2,8E+05	63	1,5E+05	66	8,2E+04	68	4,4E+04	71	2,4E+04	73	1,3E+04	76
37,3	6,5E+07	31	6,2E+07	30	3,7E+07	34	2,0E+07	38	1,1E+07	42	5,0E+06	47	2,2E+06	52	1,1E+06	56	3,4E+05	62	2,0E+05	64	1,0E+05	67	5,6E+04	69	3,0E+04	74	8,8E+03	77		
22,8	5,6E+07	32	5,3E+07	31	3,1E+07	35	1,7E+07	39	8,3E+06	44	3,8E+06	49	1,7E+06	53	8,1E+05	57	2,4E+05	63	1,4E+05	65	7,3E+04	68	3,8E+04	70	2,0E+04	73	1,1E+04	76	5,8E+03	78
13,9	4,8E+07	32	4,4E+07	32	2,6E+07	36	1,3E+07	40	6,6E+06	45	2,9E+06	50	1,3E+06	54	5,9E+05	58	1,7E+05	64	9,6E+04	66	5,0E+04	69	2,6E+04	71	1,4E+04	74	7,1E+03	77	3,7E+03	79
8,5	4,0E+07	33	3,7E+07	33	2,1E+07	37	1,1E+07	41	5,1E+06	46	2,2E+06	51	9,3E+05	55	4,3E+05	59	1,2E+05	65	6,7E+04	67	3,4E+04	70	1,7E+04	73	8,9E+03	76	4,6E+03	78	2,4E+03	81
5,2	3,4E+07	34	3,1E+07	34	1,7E+07	38	8,6E+06	42	4,0E+06	47	1,7E+06	52	6,9E+05	56	3,1E+05	60	8,5E+04	66	4,6E+04	68	2,3E+04	71	1,2E+04	74	5,9E+03	77	3,0E+03	80	1,5E+03	82
3,2	2,9E+07	36	2,6E+07	35	1,4E+07	39	6,8E+06	43	3,1E+06	48	1,3E+06	53	5,0E+05	58	2,2E+05	61	5,9E+04	67	3,2E+04	69	1,6E+04	72	7,8E+03	75	3,8E+03	78	1,9E+03	81	9,8E+02	83
1,9	2,4E+07	37	2,1E+07	36	1,1E+07	40	5,4E+06	45	2,4E+06	49	9,5E+05	54	3,7E+05	59	1,6E+05	62	4,1E+04	68	2,2E+04	71	1,1E+04	74	5,1E+03	77	2,5E+03	80	1,2E+03	82	6,1E+02	84
1,2	2,1E+07	38	1,8E+07	38	9,1E+06	41	4,2E+06	46	1,8E+06	50	7,1E+05	55	2,7E+05	60	1,1E+05	63	2,9E+04	69	1,5E+04	72	7,0E+03	75	3,3E+03	78	1,6E+03	81	7,7E+02	83	3,3E+02	85
0,7	1,8E+07	38	1,4E+07	39	7,3E+06	43	3,3E+06	47	1,4E+06	52	5,2E+05	56	1,9E+05	61	8,0E+04	64	2,0E+04	71	9,9E+03	74	4,6E+03	77	2,2E+03	80	1,0E+03	83	4,9E+02	85	2,4E+02	86
0,4	1,5E+07	39	1,2E+07	40	5,8E+06	44	2,6E+06	48	1,0E+06	53	3,8E+05	57	1,4E+05	62	5,6E+04	65	1,3E+04	72	6,6E+03	75	3,0E+03	78	1,4E+03	81	6,4E+02	84	3,0E+02	86	1,5E+02	87
0,3	1,4E+07	40	9,6E+06	41	4,6E+06	45	2,0E+06	50	7,8E+05	54	2,8E+05	59	9,8E+04	63	3,9E+04	67	9,2E+03	74	4,3E+03	77	1,9E+03	80	8,7E+02	83	4,0E+02	85	1,9E+02	87	9,1E+01	88
0,2	1,4E+07	39	7,8E+06	42	3,6E+06	47	1,5E+06	51	5,9E+05	55	2,0E+05	60	7,0E+04	64	2,7E+04	68	6,3E+03	75	2,8E+03	78	1,2E+03	81	5,5E+02	84	2,5E+02	86	1,2E+02	87	5,5E+01	88
0,1	1,2E+07	40	6,3E+06	44	2,9E+06	48	1,2E+06	52	4,4E+05	56	1,5E+05	61	4,9E+04	65	1,9E+04	70	4,3E+03	76	1,8E+03	80	8,0E+02	83	3,5E+02	85	1,5E+02	87	7,1E+01	88	3,4E+01	89

Tabla 9-22. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
[rad/s]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	6,9E+07	28	6,2E+07	28	3,9E+07	32	2,3E+07	36	1,2E+07	40	6,2E+06	45	3,1E+06	49	1,6E+06	53	6,4E+05	60	4,0E+05	62	2,2E+05	64	1,2E+05	67	6,8E+04	70	3,8E+04	72	2,1E+04	74
61,1	6,0E+07	29	5,3E+07	29	3,3E+07	33	1,9E+07	37	9,8E+06	41	4,8E+06	46	2,4E+06	50	1,2E+06	54	4,6E+05	61	2,8E+05	63	1,5E+05	65	8,5E+04	68	4,6E+04	71	2,5E+04	73	1,4E+04	75
37,3	5,1E+07	30	4,5E+07	30	2,7E+07	34	1,5E+07	37	7,9E+06	42	3,7E+06	47	1,8E+06	51	8,9E+05	55	3,3E+05	62	2,0E+05	64	1,1E+05	66	5,8E+04	69	3,1E+04	74	9,2E+03	77		
22,8	4,4E+07	31	3,9E+07	31	2,3E+07	35	1,2E+07	39	6,2E+06	43	2,9E+06	48	1,4E+06	52	6,6E+05	56	2,4E+05	63	1,4E+05	65	7,4E+04	67	4,0E+04	70	2,1E+04	73	1,1E+04	75	6,0E+03	78
13,9	3,7E+07	32	3,3E+07	32	1,9E+07	36	1,0E+07	40	4,9E+06	44	2,2E+06	49	1,0E+06	53	4,8E+05	57	1,7E+05	64	9,8E+04	66	5,1E+04	68	2,7E+04	71	1,4E+04	74	7,5E+03	77	3,9E+03	79
8,5	3,2E+07	33	2,7E+07	33	1,6E+07	37	8,1E+06	41	3,9E+06	45	1,7E+06	50	7,5E+05	54	3,5E+05	58	1,2E+05	65	6,8E+04	67	3,5E+04	69	1,8E+04	72	9,4E+03	75	4,9E+03	78	2,5E+03	81
5,2	2,7E+07	34	2,3E+07	34	1,3E+07	38	6,5E+06	42	3,0E+06	46	1,3E+06	51	5,6E+05	55	2,6E+05	59	8,4E+04	66	4,7E+04	68	2,4E+04	71	1,2E+04	74	6,2E+03	77	3,2E+03	80	1,6E+03	82
3,2	2,3E+07	34	1,9E+07	35	1,0E+07	39	5,2E+06	43	2,3E+06	47	9,8E+05	52	4,1E+05	57	1,8E+05	60	5,9E+04	67	3,3E+04	69	1,6E+04	72	8,1E+03	75	4,1E+03	78	2,0E+03	81	1,0E+03	83
1,9	1,9E+07	36	1,6E+07	36	8,5E+06	40	4,1E+06	44	1,8E+06	49	7,4E+05	53	3,0E+05	58	1,3E+05	61	4,1E+04	68	2,2E+04	70	1,1E+04	74	5,4E+03	77	2,6E+03	80	1,3E+03	82	6,4E+02	84
1,2	1,6E+07	37	1,3E+07	37	6,8E+06	41	3,2E+06	45	1,4E+06	50	5,5E+05	54	2,2E+05	59	9,4E+04	63	2,8E+04	69	1,5E+04	72	7,3E+03	75	3,5E+03	78	1,7E+03	81	8,2E+02	83	4,0E+02	85
0,7	1,4E+07	38	1,1E+07	38	5,5E+06	42	2,5E+06	46	1,1E+06	51	4,1E+05	56	1,6E+05	60	6,7E+04	64	2,0E+04	71	1,0E+04	73	4,8E+03	77	2,3E+03	80	1,1E+03	82	5,1E+02	84	2,5E+02	86
0,4	1,2E+07	38	8,7E+06	40	4,4E+06	43	2,0E+06	47	8,1E+05	52	3,0E+05	57	1,1E+05	61	4,7E+04	65	1,4E+04	72	6,8E+03	75	3,1E+03	78	1,4E+03	81	6,8E+02	83	3,2E+02	85	1,6E+02	87
0,3	1,0E+07	39	7,1E+06	41	3,5E+06	45	1,5E+06	49	6,1E+05	53	2,2E+05	58	8,2E+04	62	3,3E+04	66	9,4E+03	73	4,5E+03	77	2,0E+03	80	9,2E+02	83	4,2E+02	85	2,0E+02	86	9,5E+01	87
0,2	9,9E+06	39	5,8E+06	42	2,8E+06	46	1,2E+06	50	4,6E+05	55	1,6E+05	59	5,9E+04	64	2,3E+04	68	6,5E+03	75	2,9E+03	78	1,3E+03	81	5,8E+02	84	2,6E+02	86	1,2E+02	87	5,8E+01	88
0,1	8,7E+06	40	4,7E+06	43	2,2E+06	47	9,0E+05	51	3,4E+05	56	1,2E+05	60	4,2E+04	65	1,6E+04	69	4,4E+03	76	1,9E+03	80	8,4E+02	82	3,7E+02	85	1,6E+02	86	7,6E+01	87	3,6E+01	88

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-23. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC12_P0. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	5,2E+07	29	5,1E+07	28	3,3E+07	32	1,9E+07	35	1,1E+07	40	5,4E+06	45	2,6E+06	50	1,4E+06	54	6,6E+05	61	3,9E+05	63	2,3E+05	64	1,4E+05	60	9,3E+04	51	7,1E+04	38	6,3E+04	26
61,1	4,5E+07	30	4,4E+07	29	2,7E+07	33	1,6E+07	36	8,5E+06	41	4,2E+06	46	2,0E+06	51	1,0E+06	55	4,8E+05	62	2,7E+05	64	1,6E+05	64	1,0E+05	57	7,1E+04	45	5,9E+04	31	5,7E+04	21
37,3	3,9E+07	31	3,7E+07	30	2,3E+07	34	1,3E+07	37	6,8E+06	42	3,3E+06	47	1,5E+06	52	7,5E+05	56	3,4E+05	62	1,9E+05	65	1,2E+05	62	7,4E+04	53	5,6E+04	39	5,2E+04	25	5,3E+04	16
22,8	3,3E+07	31	3,2E+07	31	1,9E+07	34	1,1E+07	38	5,4E+06	43	2,5E+06	48	1,1E+06	53	5,5E+05	57	2,4E+05	64	1,4E+05	66	8,3E+04	61	5,5E+04	49	4,7E+04	32	4,7E+04	20	5,0E+04	13
13,9	2,8E+07	32	2,7E+07	32	1,6E+07	36	8,7E+06	39	4,2E+06	44	1,9E+06	49	8,5E+05	54	4,0E+05	58	1,7E+05	64	9,6E+04	67	6,0E+04	59	4,3E+04	43	4,1E+04	26	4,4E+04	16	4,9E+04	11
8,5	2,4E+07	33	2,3E+07	33	1,3E+07	37	7,0E+06	41	3,3E+06	45	1,5E+06	50	6,3E+05	55	2,9E+05	59	1,2E+05	65	6,7E+04	67	4,3E+04	56	3,5E+04	36	3,8E+04	21	4,2E+04	13	4,7E+04	9
5,2	2,0E+07	34	1,9E+07	34	1,1E+07	38	5,6E+06	42	2,6E+06	47	1,1E+06	52	4,7E+05	56	2,1E+05	60	8,6E+04	66	4,7E+04	68	3,2E+04	51	3,0E+04	30	3,6E+04	16	4,1E+04	11	4,6E+04	8
3,2	1,7E+07	35	1,6E+07	35	8,8E+06	39	4,5E+06	43	2,0E+06	48	8,5E+05	53	3,4E+05	57	1,5E+05	61	6,0E+04	67	3,3E+04	68	2,5E+04	45	2,7E+04	24	3,4E+04	13	4,0E+04	9	4,5E+04	8
1,9	1,5E+07	36	1,3E+07	36	7,1E+06	40	3,5E+06	44	1,5E+06	49	6,3E+05	54	2,5E+05	58	1,1E+05	62	4,2E+04	68	2,4E+04	68	2,0E+04	38	2,5E+04	19	3,3E+04	11	3,9E+04	9	4,4E+04	7
1,2	1,2E+07	37	1,1E+07	37	5,7E+06	41	2,8E+06	46	1,2E+06	50	4,7E+05	55	1,8E+05	60	7,7E+04	63	2,9E+04	69	1,7E+04	66	1,7E+04	31	2,5E+04	15	3,3E+04	10	3,9E+04	8	4,3E+04	7
0,7	1,1E+07	38	8,8E+06	38	4,6E+06	42	2,2E+06	47	9,0E+05	52	3,5E+05	56	1,3E+05	61	5,4E+04	65	2,0E+04	70	1,2E+04	63	1,6E+04	25	2,4E+04	13	3,2E+04	9	3,8E+04	8	4,2E+04	7
0,4	9,1E+06	39	7,2E+06	40	3,7E+06	44	1,7E+06	48	6,8E+05	53	2,6E+05	58	9,3E+04	62	3,8E+04	66	1,4E+04	72	9,5E+03	57	1,5E+04	19	2,4E+04	11	3,2E+04	9	3,7E+04	8	4,2E+04	7
0,3	8,0E+06	40	5,9E+06	41	2,9E+06	45	1,3E+06	50	5,1E+05	54	1,9E+05	59	6,6E+04	63	2,7E+04	67	9,4E+03	73	7,8E+03	49	1,5E+04	16	2,4E+04	11	3,2E+04	8	3,7E+04	8	4,1E+04	8
0,2	8,1E+06	39	4,8E+06	42	2,3E+06	46	9,9E+05	51	3,8E+05	55	1,4E+05	60	4,7E+04	64	1,8E+04	69	6,2E+03	74	7,2E+03	35	1,5E+04	13	2,5E+04	10	3,1E+04	9	3,8E+04	8	4,0E+04	8
0,1	7,2E+06	40	3,9E+06	44	1,8E+06	48	7,6E+05	52	2,8E+05	57	9,9E+04	61	3,3E+04	66	1,3E+04	70	4,1E+03	75	8,5E+03	24	1,6E+04	12	2,5E+04	9	3,2E+04	8	3,7E+04	8	4,0E+04	9

Tabla 9-24. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC12_P1. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Temperatura [°C]																													
	Plato 8 [mm]								Plato 25 [mm]																					
	T=5°C	T=10°C	T=15°C	T=20°C	T=25°C	T=30°C	T=35°C	T=40°C	T=45°C	T=50°C	T=55°C	T=60°C	T=65°C	T=70°C	T=75°C															
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]														
100	5,2E+07	29	5,1E+07	28	3,3E+07	32	1,9E+07	35	1,1E+07	40	5,4E+06	45	2,6E+06	50	1,4E+06	54	5,9E+05	60	3,6E+05	62	2,0E+05	65	1,1E+05	67	6,3E+04	70	3,6E+04	72	2,0E+04	74
61,1	4,5E+07	30	4,4E+07	29	2,7E+07	33	1,6E+07	36	8,5E+06	41	4,2E+06	46	2,0E+06	51	1,0E+06	55	4,2E+05	61	2,6E+05	63	1,4E+05	66	7,7E+04	68	4,3E+04	71	2,4E+04	73	1,4E+04	75
37,3	3,9E+07	31	3,7E+07	30	2,3E+07	34	1,3E+07	37	6,8E+06	42	3,3E+06	47	1,5E+06	52	7,5E+05	56	3,0E+05	62	1,8E+05	64	9,8E+04	67	5,3E+04	69	2,9E+04	72	1,6E+04	74	8,9E+03	76
22,8	3,3E+07	31	3,2E+07	31	1,9E+07	34	1,1E+07	38	5,4E+06	43	2,5E+06	48	1,1E+06	53	5,5E+05	57	2,2E+05	63	1,3E+05	65	6,8E+04	68	3,6E+04	70	2,0E+04	73	1,1E+04	75	5,9E+03	76
13,9	2,8E+07	32	2,7E+07	32	1,6E+07	36	8,7E+06	39	4,2E+06	44	1,9E+06	49	8,5E+05	54	4,0E+05	58	1,5E+05	64	8,9E+04	66	4,7E+04	69	2,5E+04	71	1,3E+04	74	7,0E+03	76	3,8E+03	77
8,5	2,4E+07	33	2,3E+07	33	1,3E+07	37	7,0E+06	41	3,3E+06	45	1,5E+06	50	6,3E+05	55	2,9E+05	59	1,1E+05	65	6,2E+04	67	3,2E+04	70	1,7E+04	73	8,7E+03	75	4,6E+03	77	2,5E+03	76
5,2	2,0E+07	34	1,9E+07	34	1,1E+07	38	5,6E+06	42	2,6E+06	47	1,1E+06	52	4,7E+05	56	2,1E+05	60	7,6E+04	66	4,3E+04	68	2,2E+04	71	1,1E+04	74	5,7E+03	77	3,0E+03	78	1,6E+03	76
3,2	1,7E+07	35	1,6E+07	35	8,8E+06	39	4,5E+06	43	2,0E+06	48	8,5E+05	53	3,4E+05	57	1,5E+05	61	5,3E+04	67	2,9E+04	69	1,5E+04	72	7,4E+03	75	3,7E+03	78	1,9E+03	79	1,1E+03	74
1,9	1,5E+07	36	1,3E+07	36	7,1E+06	40	3,5E+06	44	1,5E+06	49	6,3E+05	54	2,5E+05	58	1,1E+05	62	3,7E+04	68	2,0E+04	71	9,9E+03	74	4,9E+03	77	2,4E+03	79	1,2E+03	79	7,0E+02	71
1,2	1,2E+07	37	1,1E+07	37	5,7E+06	41	2,8E+06	46	1,2E+06	50	4,7E+05	55	1,8E+05	60	7,7E+04	63	2,6E+04	69	1,4E+04	72	6,6E+03	75	3,2E+03	78	1,6E+03	80	8,0E+02	80	4,7E+02	65
0,7	1,1E+07	38	8,8E+06	38	4,6E+06	42	2,2E+06	47	9,0E+05	52	3,5E+05	56	1,3E+05	61	5,4E+04	65	1,8E+04	71	9,2E+03	74	4,3E+03	77	2,1E+03	79	1,0E+03	80	5,1E+02	79	3,4E+02	57
0,4	9,1E+06	39	7,2E+06	40	3,7E+06	44	1,7E+06	48	6,8E+05	53	2,6E+05	58	9,3E+04	62	3,8E+04	66	1,2E+04	72	6,1E+03	75	2,8E+03	79	1,3E+03	81	6,4E+02	80	3,3E+02	76	2,5E+02	49
0,3	8,0E+06	40	5,9E+06	41	2,9E+06	45	1,3E+06	50	5,1E+05	54	1,9E+05	59	6,6E+04	63	2,7E+04	67	8,5E+03	74	4,0E+03	77	1,8E+03	80	8,4E+02	81	4,1E+02	80	2,1E+02	72	2,3E+02	41
0,2	8,1E+06	39	4,8E+06	42	2,3E+06	46	9,9E+05	51	3,8E+05	55	1,4E+05	60	4,7E+04	64	1,8E+04	69	5,8E+03	75	2,7E+03	78	1,2E+03	81	5,4E+02	81	2,6E+02	77	1,6E+02	62	2,0E+02	27
0,1	7,2E+06	40	3,9E+06	44	1,8E+06	48	7,6E+05	52	2,8E+05	57	9,9E+04	61	3,3E+04	66	1,3E+04	70	4,0E+03	77	1,7E+03	80	7,5E+02	82	3,5E+02	81	1,7E+02	76	1,2E+02	54	1,8E+02	27

Capítulo 9: Anexo: Tablas de datos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

Tabla 9-25. Datos de módulo dinámico y ángulo de fase, obtenidos de la prueba de barrido de frecuencia y temperatura para la muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia)

Frecuencia Angular [rad/s]	Plato 8 [mm]														Plato 25 [mm]																
	T=5°C		T=10°C		T=15°C		T=20°C		T=25°C		T=30°C		T=35°C		T=40°C		T=45°C		T=50°C		T=55°C		T=60°C		T=65°C		T=70°C		T=75°C		
	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]	δ [°]	G* [Pa]
100	5,2E+07	29	5,1E+07	28	3,3E+07	32	1,9E+07	35	1,1E+07	40	5,4E+06	45	2,6E+06	50	1,4E+06	54	5,9E+05	61	3,6E+05	64	2,0E+05	66	1,2E+05	68	7,3E+04	62	6,3E+04	51	5,7E+04	40	
61,1	4,5E+07	30	4,4E+07	29	2,7E+07	33	1,6E+07	36	8,5E+06	41	4,2E+06	46	2,0E+06	51	1,0E+06	55	4,2E+05	62	2,5E+05	65	1,4E+05	67	8,1E+04	67	5,3E+04	60	5,0E+04	47	5,1E+04	36	
37,3	3,9E+07	31	3,7E+07	30	2,3E+07	34	1,3E+07	37	6,8E+06	42	3,3E+06	47	1,5E+06	52	7,5E+05	56	3,0E+05	63	1,8E+05	66	9,7E+04	68	5,7E+04	67	3,8E+04	56	4,3E+04	42	4,7E+04	32	
22,8	3,3E+07	31	3,2E+07	31	1,9E+07	34	1,1E+07	38	5,4E+06	43	2,5E+06	48	1,1E+06	53	5,5E+05	57	2,1E+05	64	1,2E+05	67	6,7E+04	69	3,9E+04	65	2,9E+04	51	3,3E+04	38	4,5E+04	28	
13,9	2,8E+07	32	2,7E+07	32	1,6E+07	36	8,7E+06	39	4,2E+06	44	1,9E+06	49	8,5E+05	54	4,0E+05	58	1,5E+05	65	8,5E+04	68	4,6E+04	70	2,7E+04	62	2,3E+04	46	3,2E+04	33	4,4E+04	24	
8,5	2,4E+07	33	2,3E+07	33	1,3E+07	37	7,0E+06	41	3,3E+06	45	1,5E+06	50	6,3E+05	55	2,9E+05	59	1,1E+05	66	5,9E+04	69	3,2E+04	71	2,0E+04	58	1,9E+04	39	3,0E+04	29	4,3E+04	21	
5,2	2,0E+07	34	1,9E+07	34	1,1E+07	38	5,6E+06	42	2,6E+06	47	1,1E+06	52	4,7E+05	56	2,1E+05	60	7,4E+04	68	4,0E+04	70	2,2E+04	71	1,4E+04	53	1,7E+04	34	2,9E+04	27	4,3E+04	18	
3,2	1,7E+07	35	1,6E+07	35	8,8E+06	39	4,5E+06	43	2,0E+06	48	8,5E+05	53	3,4E+05	57	1,5E+05	61	5,1E+04	69	2,7E+04	71	1,5E+04	71	1,1E+04	45	1,5E+04	29	2,9E+04	25	4,3E+04	12	
1,9	1,5E+07	36	1,3E+07	36	7,1E+06	40	3,5E+06	44	1,5E+06	49	6,3E+05	54	2,5E+05	58	1,1E+05	62	3,5E+04	70	1,8E+04	73	1,1E+04	71	8,9E+03	37	1,5E+04	26	2,8E+04	23	4,3E+04	11	
1,2	1,2E+07	37	1,1E+07	37	5,7E+06	41	2,8E+06	46	1,2E+06	50	4,7E+05	55	1,8E+05	60	7,7E+04	63	2,4E+04	71	1,2E+04	74	7,6E+03	68	7,9E+03	29	1,5E+04	23	3,0E+04	21	4,2E+04	10	
0,7	1,1E+07	38	8,8E+06	38	4,6E+06	42	2,2E+06	47	9,0E+05	52	3,5E+05	56	1,3E+05	61	5,4E+04	65	1,7E+04	73	8,2E+03	76	5,6E+03	64	7,5E+03	23	1,5E+04	22	3,1E+04	19	4,2E+04	9	
0,4	9,1E+06	39	7,2E+06	40	3,7E+06	44	1,7E+06	48	6,8E+05	53	2,6E+05	58	9,3E+04	62	3,8E+04	66	1,1E+04	74	5,5E+03	77	4,4E+03	58	7,2E+03	18	1,8E+04	21	3,6E+04	16	4,1E+04	9	
0,3	8,0E+06	40	5,9E+06	41	2,9E+06	45	1,3E+06	50	5,1E+05	54	1,9E+05	59	6,6E+04	63	2,7E+04	67	7,7E+03	76	3,6E+03	78	3,5E+03	51	7,1E+03	16	1,8E+04	21	3,6E+04	15	4,1E+04	10	
0,2	8,1E+06	39	4,8E+06	42	2,3E+06	46	9,9E+05	51	3,8E+05	55	1,4E+05	60	4,7E+04	64	1,8E+04	69	5,2E+03	77	2,4E+03	80	3,9E+03	27	7,7E+03	14	2,0E+04	21	3,5E+04	12	4,1E+04	10	
0,1	7,2E+06	40	3,9E+06	44	1,8E+06	48	7,6E+05	52	2,8E+05	57	9,9E+04	61	3,3E+04	66	1,3E+04	70	3,5E+03	78	1,7E+03	80	3,8E+03	20	8,4E+03	14	2,2E+04	21	3,5E+04	11	4,0E+04	10	

10 Anexo: Gráficos muestras ensayadas en barrido de frecuencia – temperatura

10.1 Cemento asfáltico CA-24

Se presentan las curvas de módulo dinámico y ángulo de fase en función de la frecuencia de carga para las diferentes temperaturas de estudio, de las muestras de referencia de cemento asfáltico CA-24 sin envejecer (CA-SE), envejecimiento primario (CA-RTFO) y Envejecimiento secundario (CA-PAV).

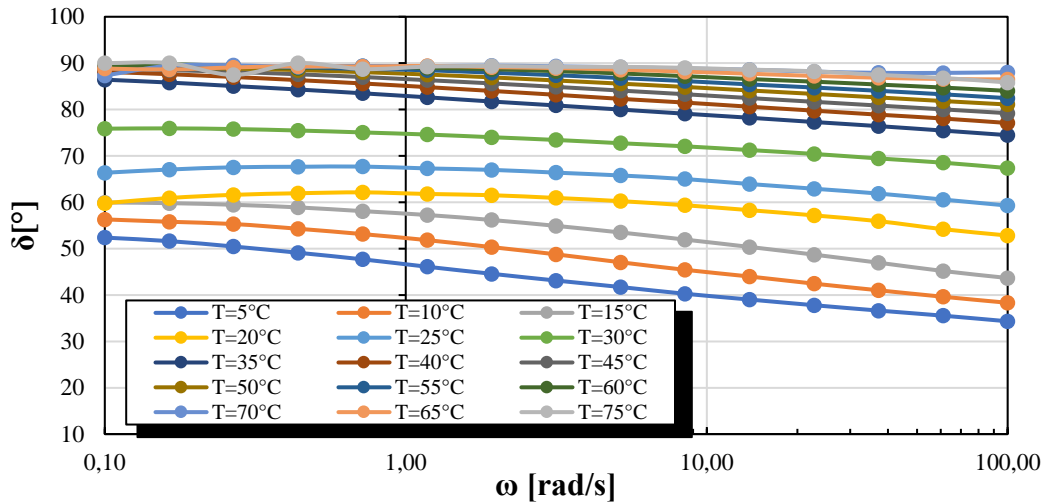


Figura 10.1. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-SE_P0. (Elaboración propia)

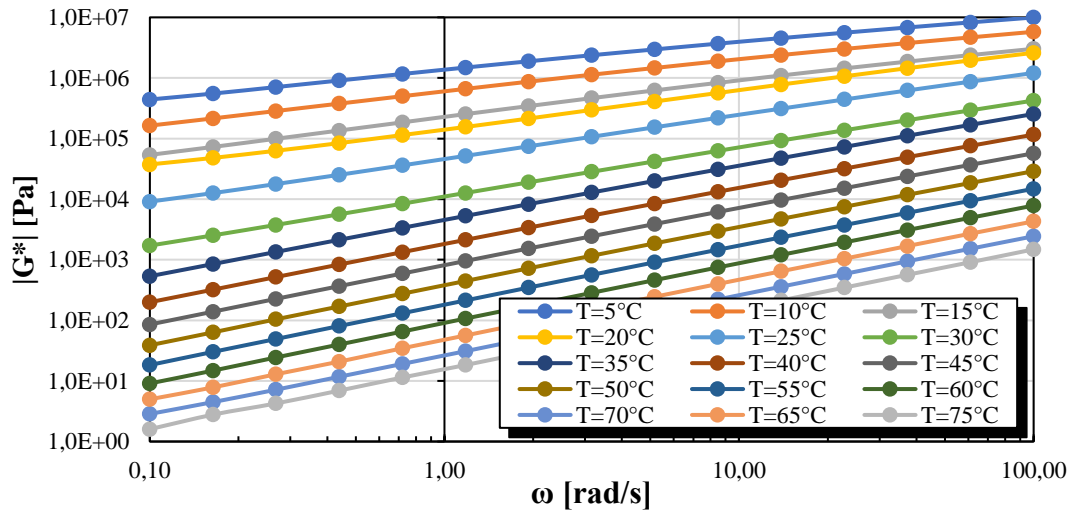


Figura 10.2. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-SE_P0. (Elaboración propia)

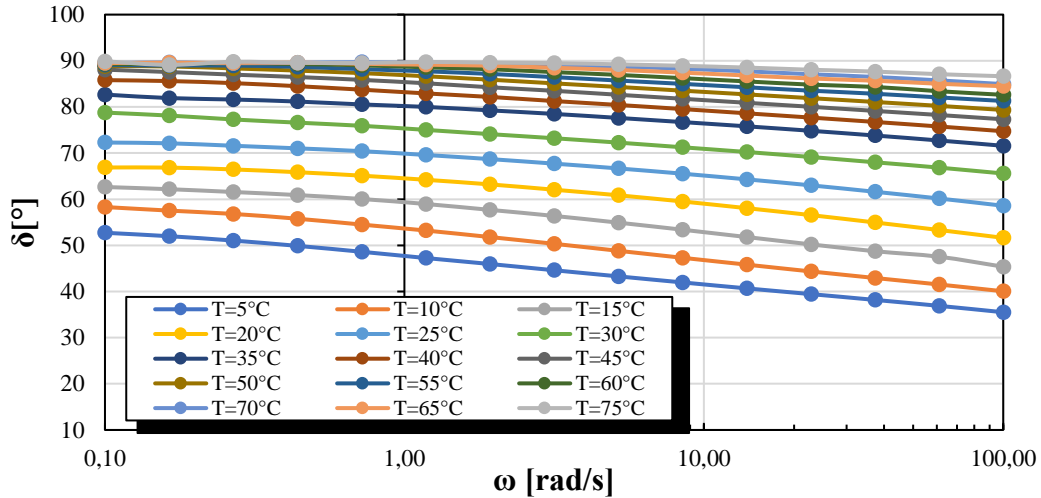


Figura 10.3. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-SE_P1. (Elaboración propia)

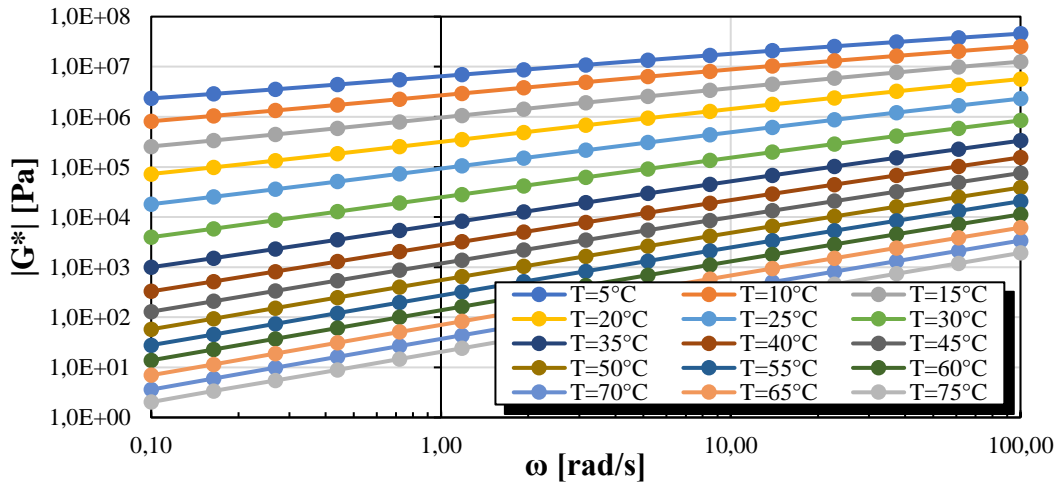


Figura 10.4. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-SE_P1. (Elaboración propia).

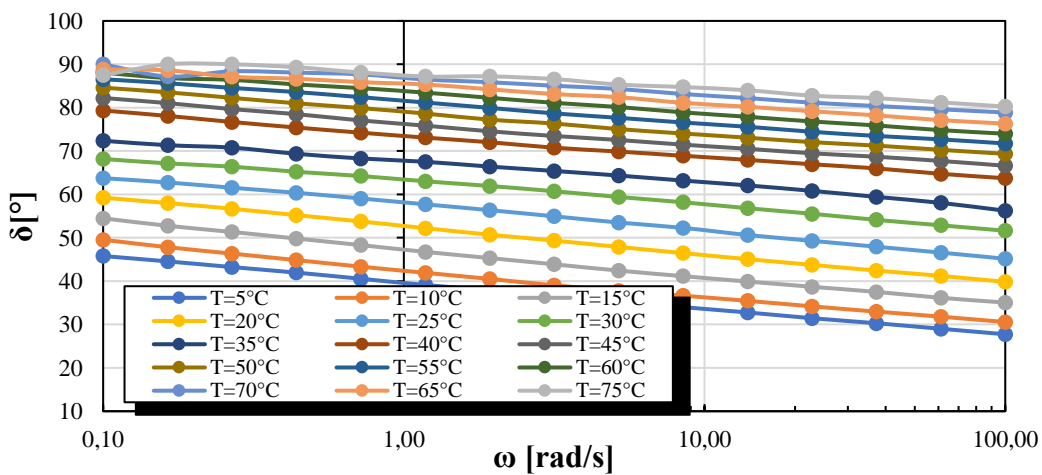


Figura 10.5. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P0. (Elaboración propia)

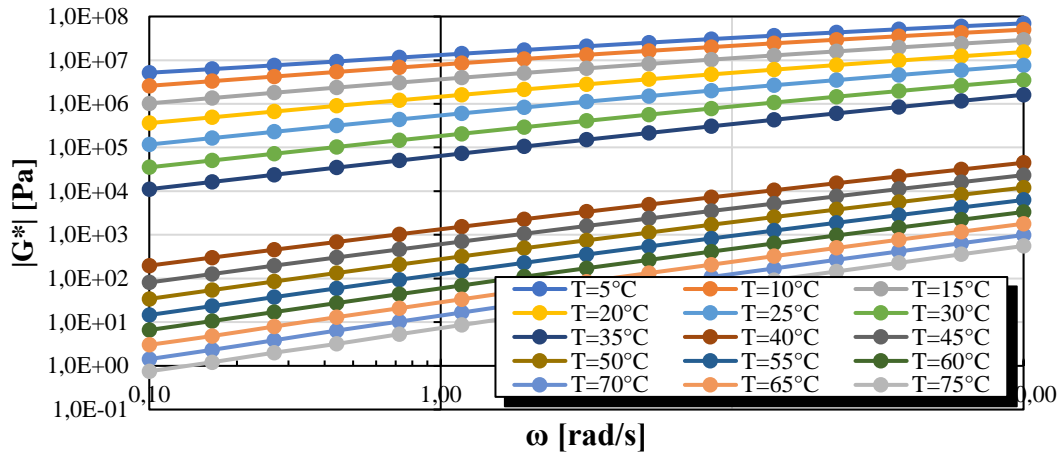


Figura 10.6. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P0. (Elaboración propia)

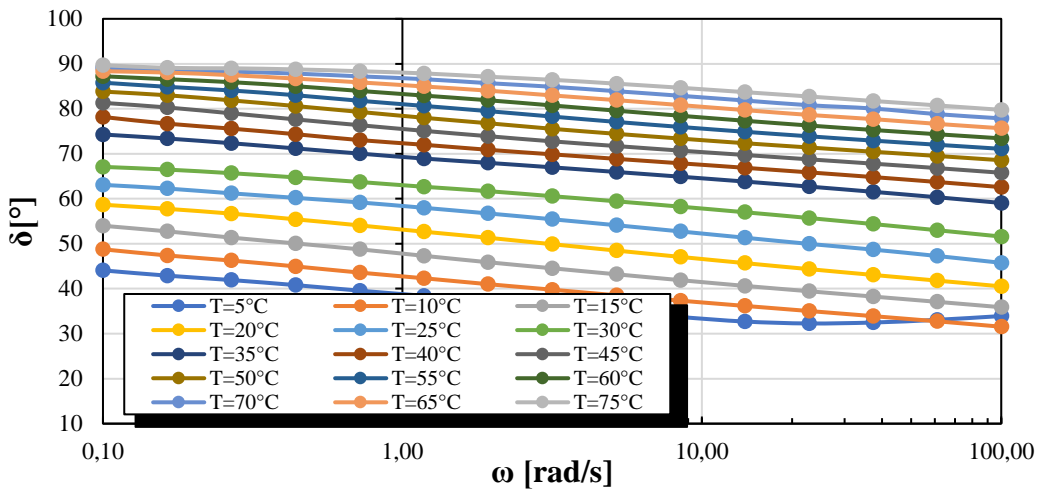


Figura 10.7. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P1. (Elaboración propia)

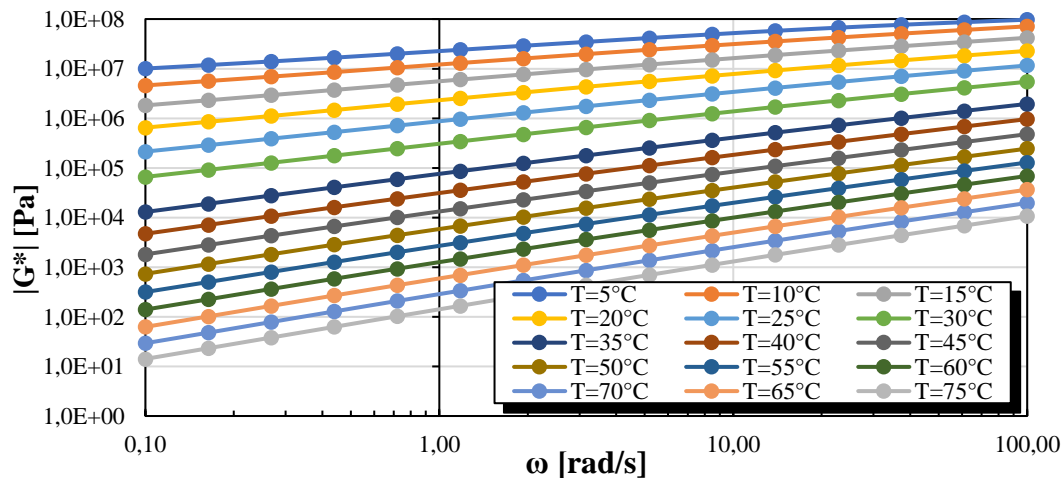


Figura 10.8. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P1. (Elaboración propia)

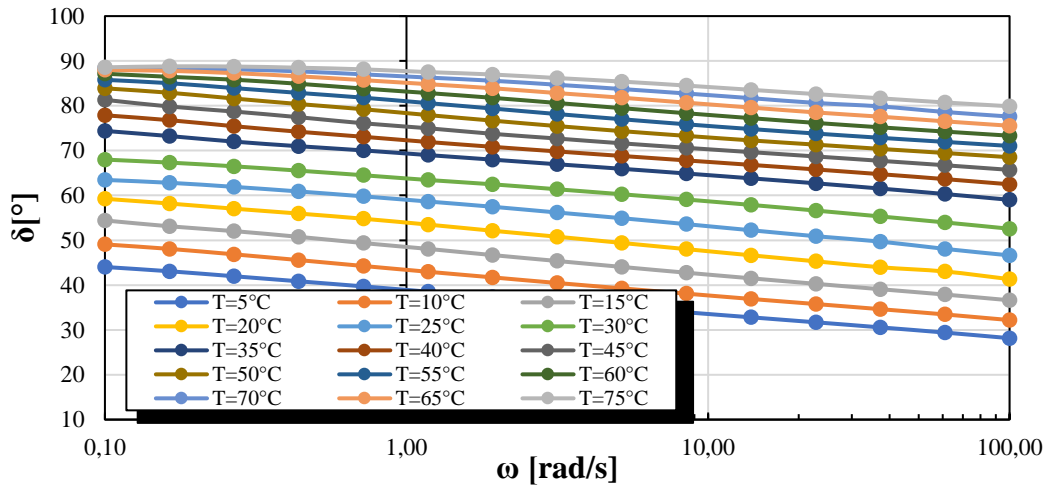


Figura 10.9. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P2. (Elaboración propia)

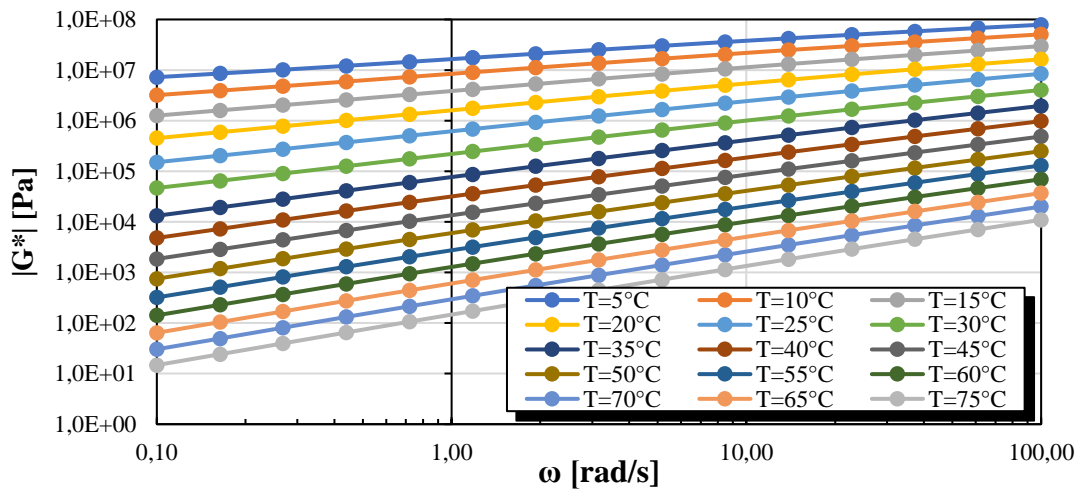


Figura 10.10. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-RTFO_P2. (Elaboración propia)

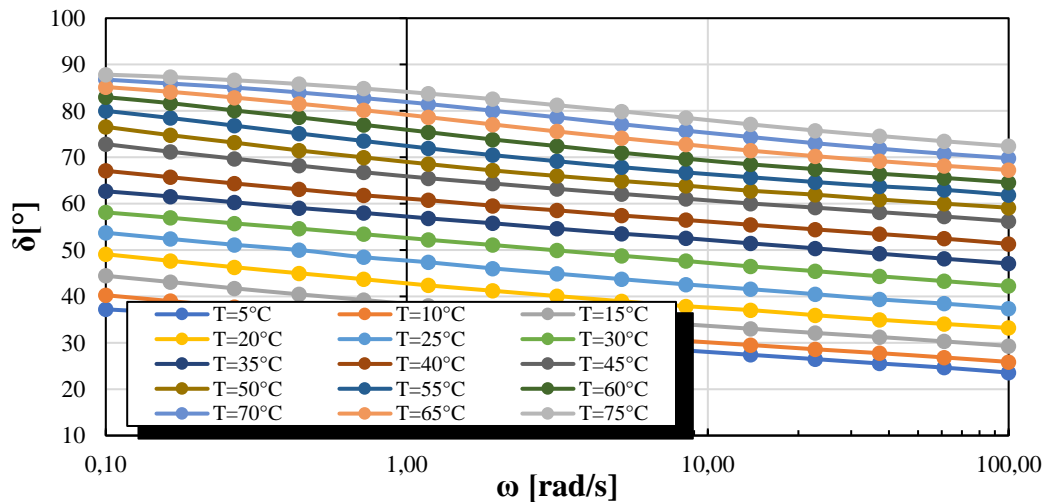


Figura 10.11. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra CA_PAV. (Elaboración propia)

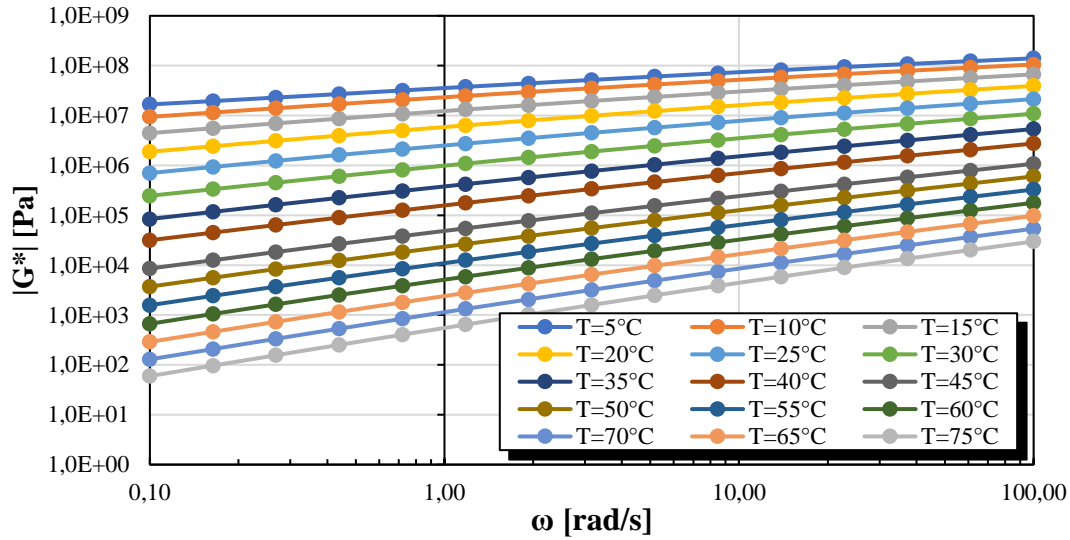


Figura 10.12. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra CA-PAV. (Elaboración propia)

10.2 Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor líquido

Se presentan las curvas de módulo dinámico y ángulo de fase en función de la frecuencia de carga para las diferentes temperaturas de estudio, de las muestras de cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con diferentes proporciones de líquido pirolítico.

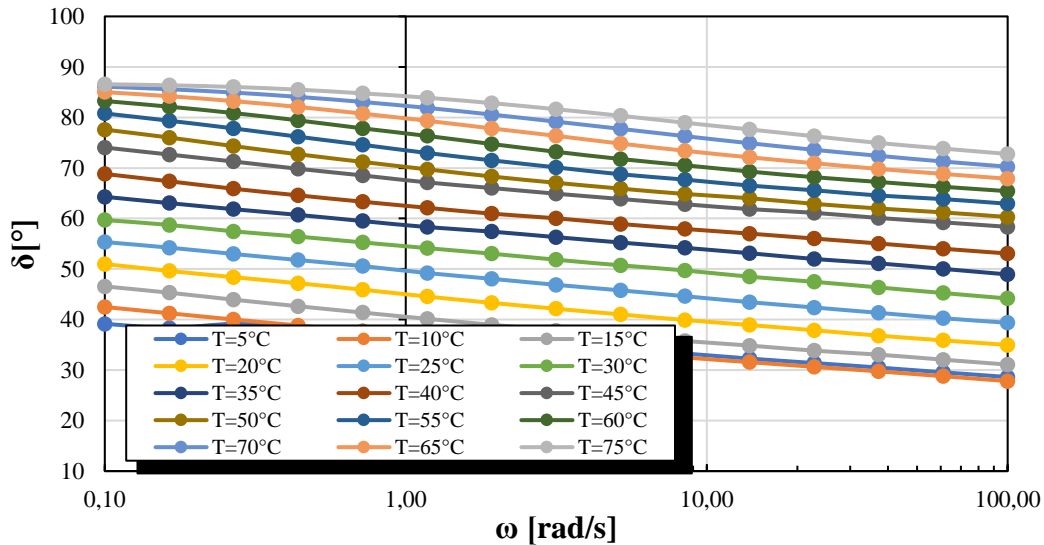


Figura 10.13. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO1. (Elaboración propia)

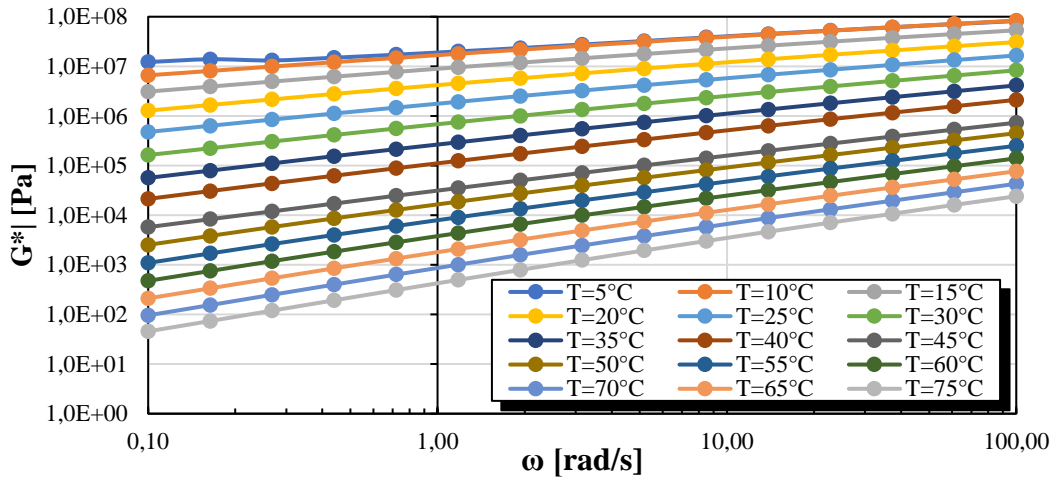


Figura 10.14. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO1. (Elaboración propia)

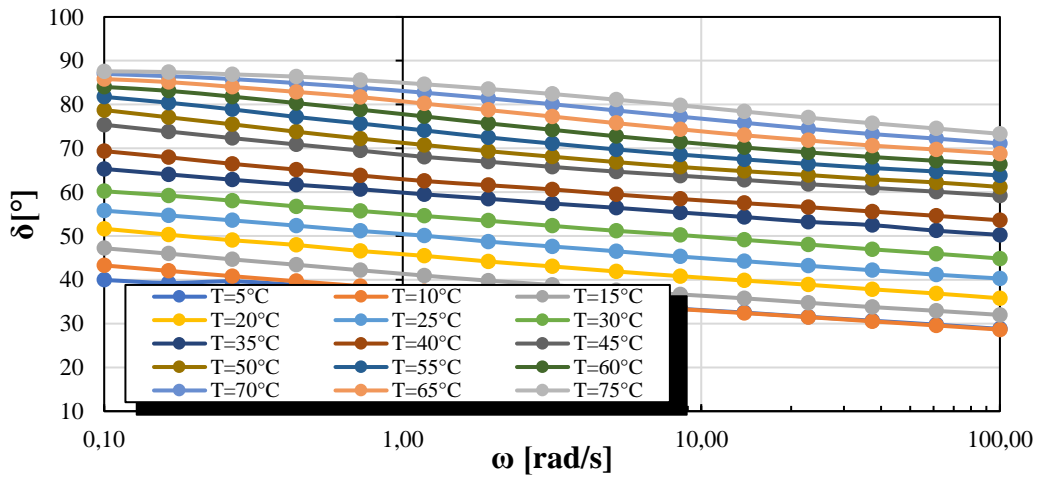


Figura 10.15 Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia)

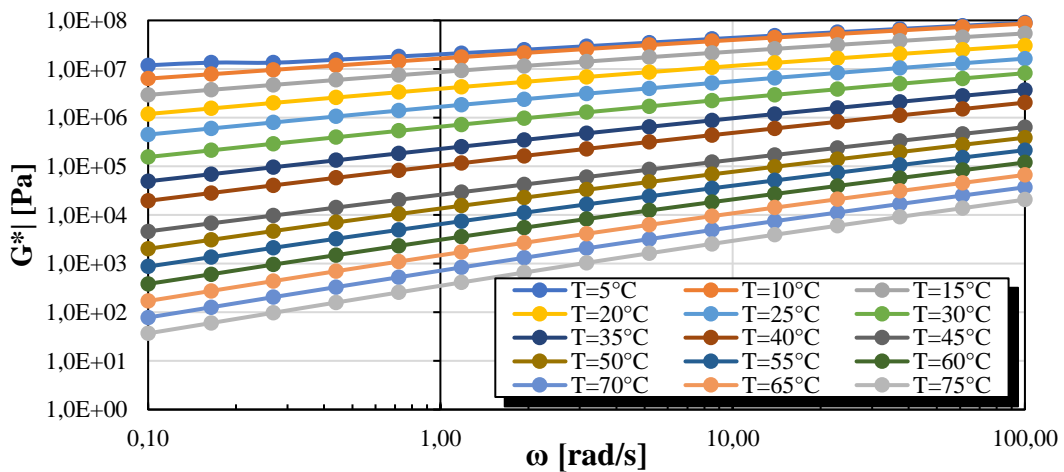


Figura 10.16. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia)

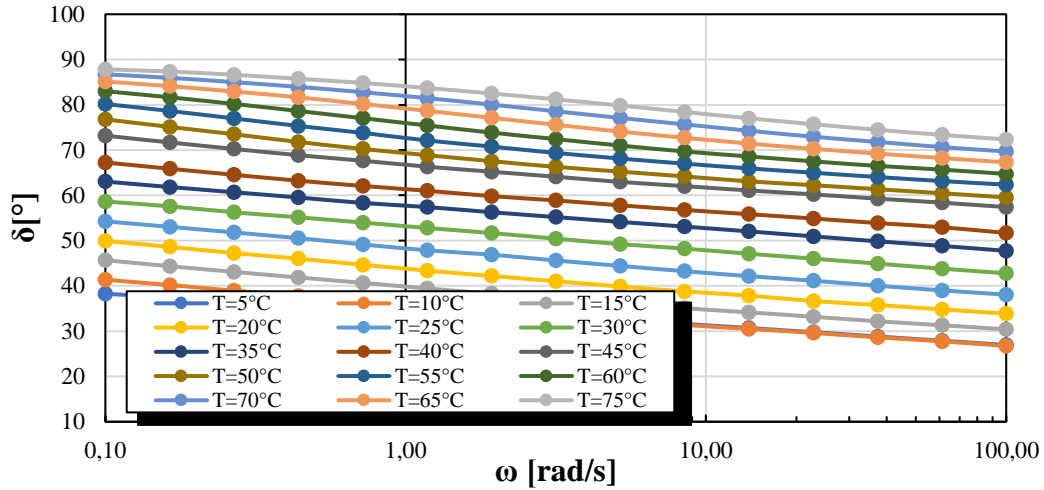


Figura 10.17. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_PO. (Elaboración propia)

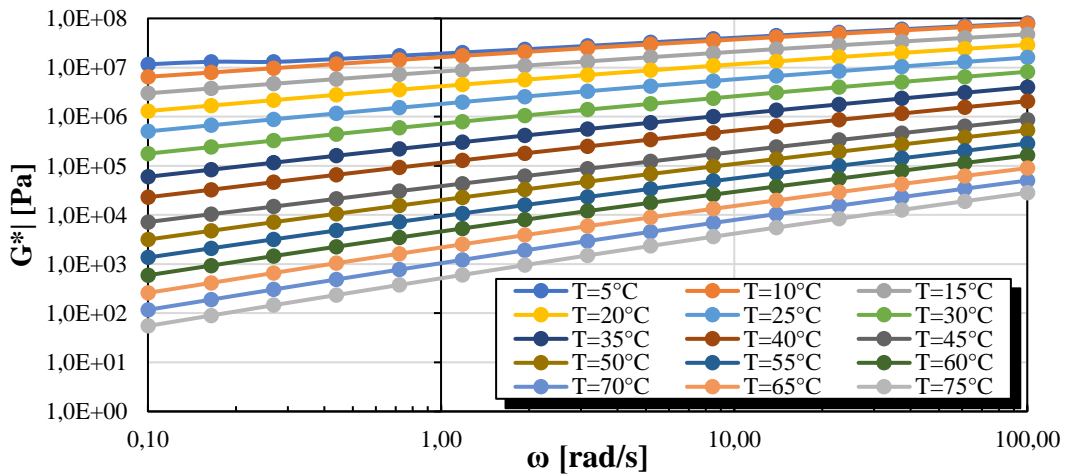


Figura 10.18. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_PO. (Elaboración propia)

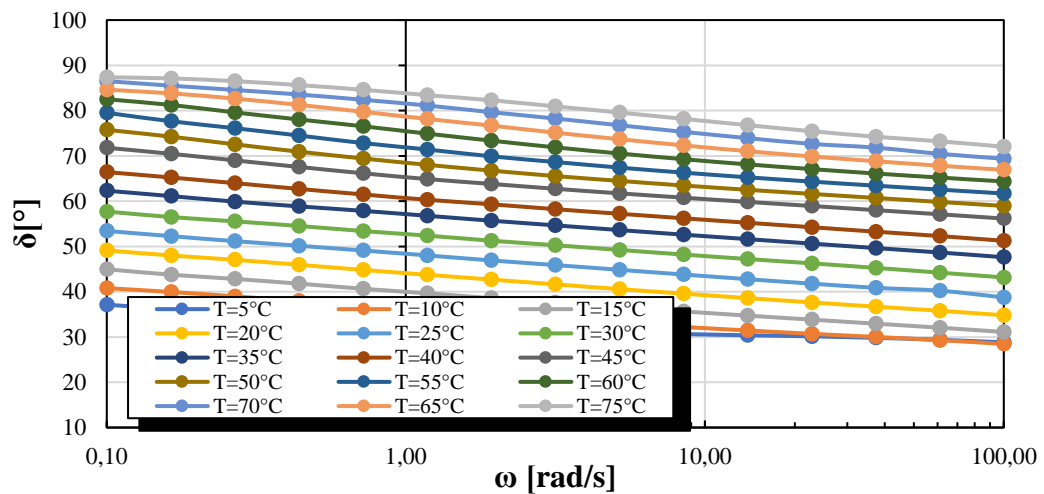


Figura 10.19. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_PI. (Elaboración propia)

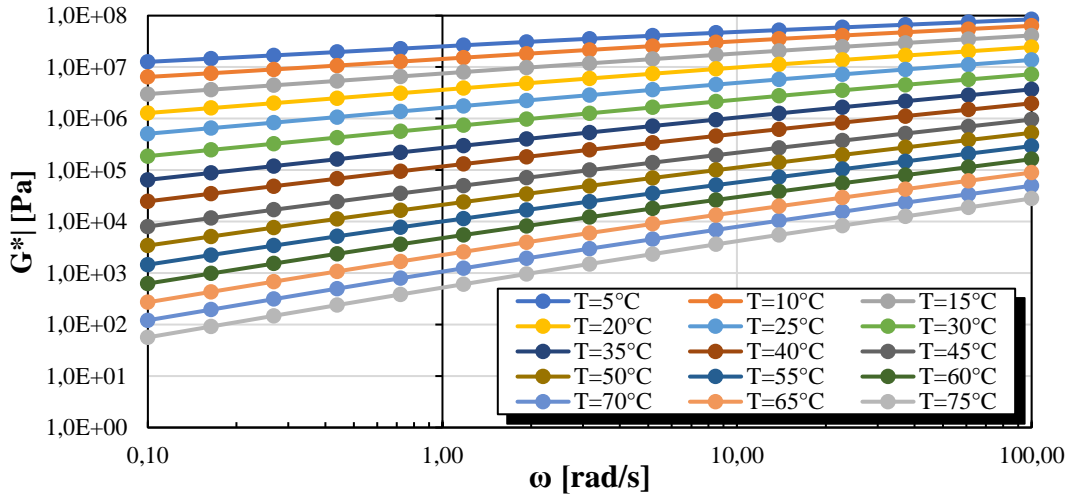


Figura 10.20. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_P1. (Elaboración propia)

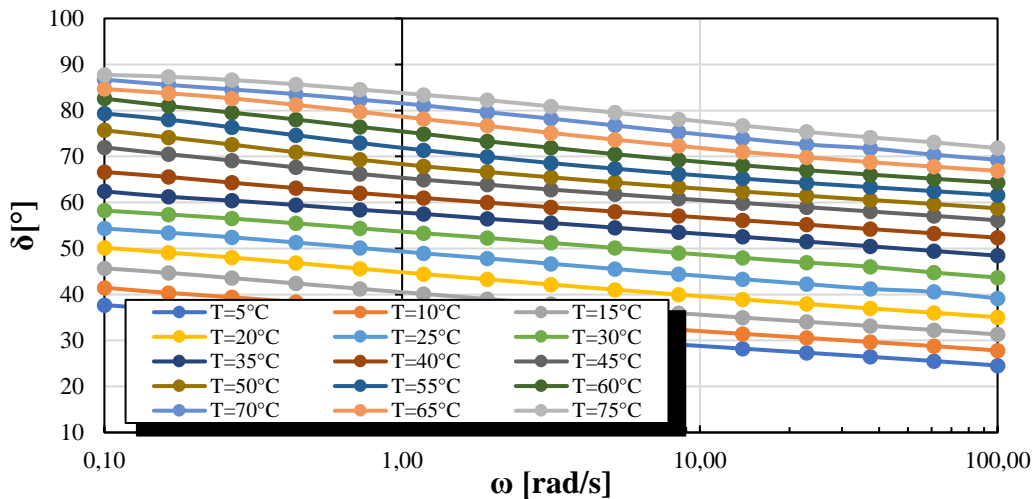


Figura 10.21. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_P2. (Elaboración propia)

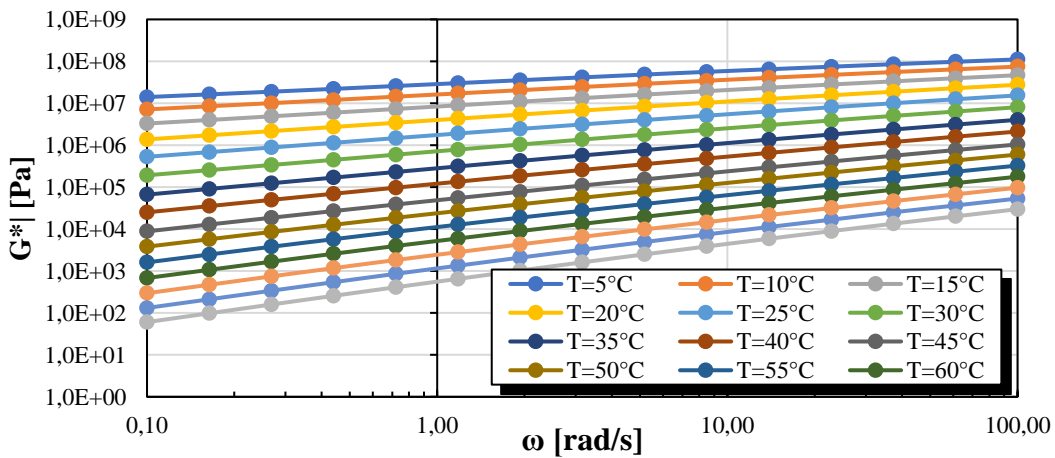


Figura 10.22. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO3_P2. (Elaboración propia)

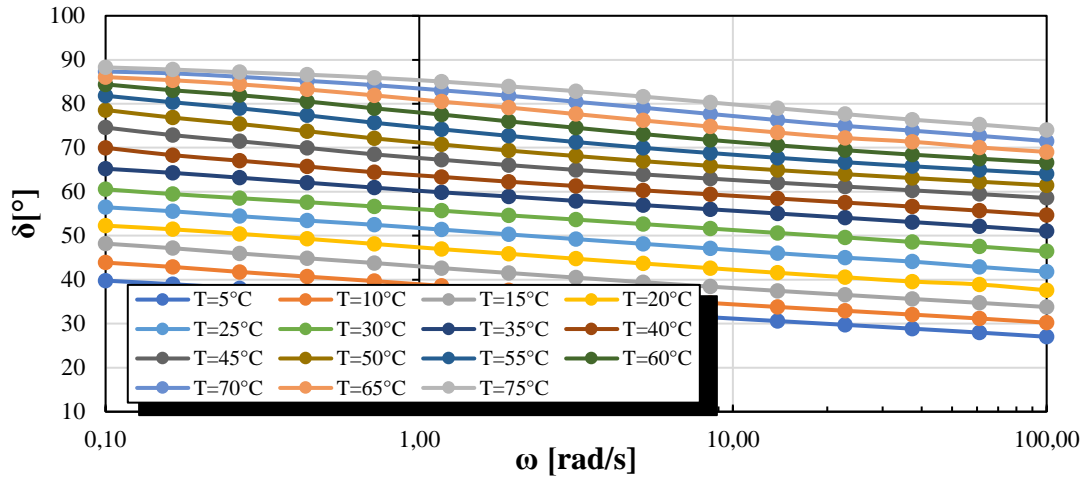


Figura 10.23. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO4_P1. (Elaboración propia)

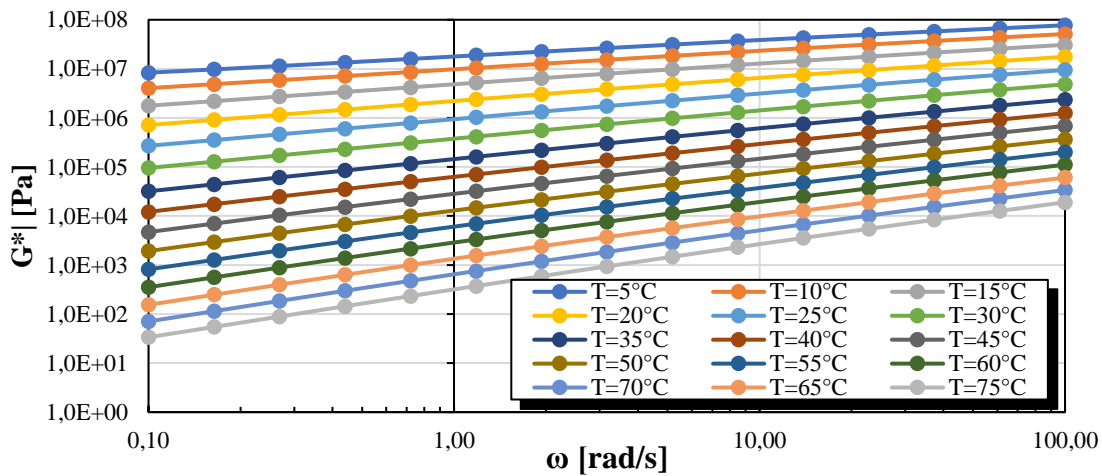


Figura 10.24. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO4_P1. (Elaboración propia)

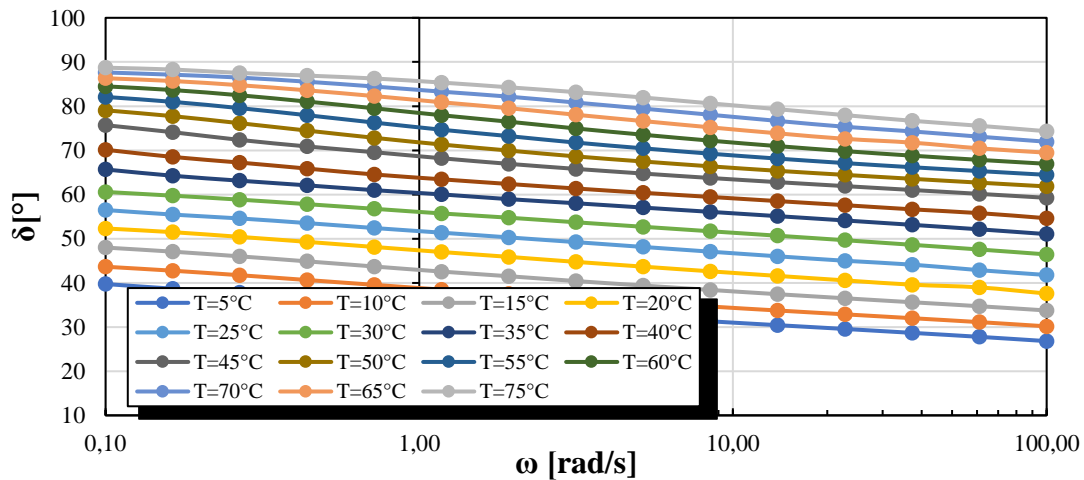


Figura 10.25. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO4_P2. (Elaboración propia)

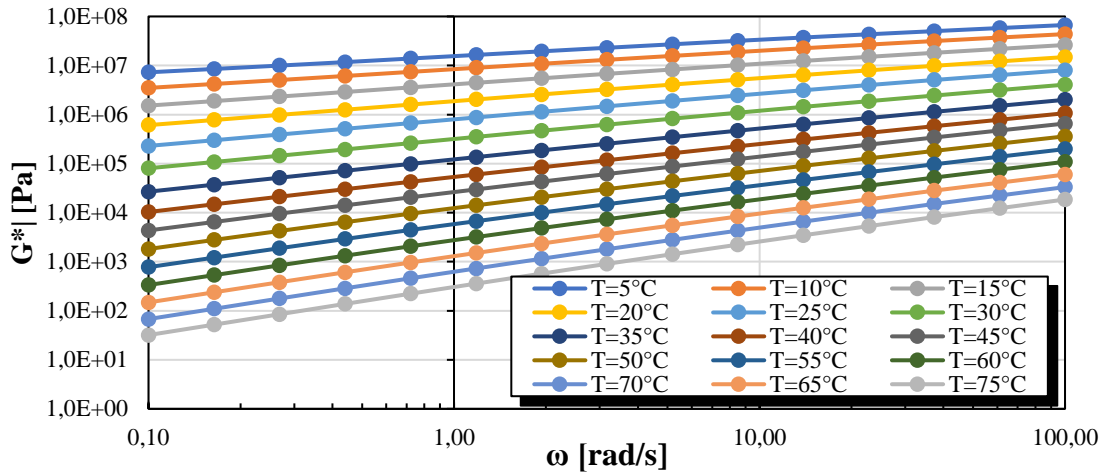


Figura 10.26. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO4_P2. (Elaboración propia)

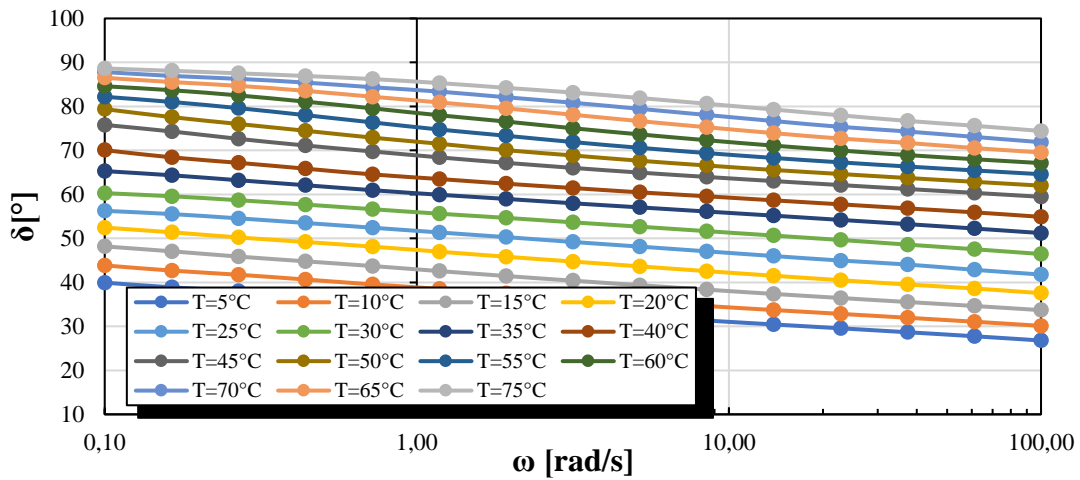


Figura 10.27. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO5_P1. (Elaboración propia)

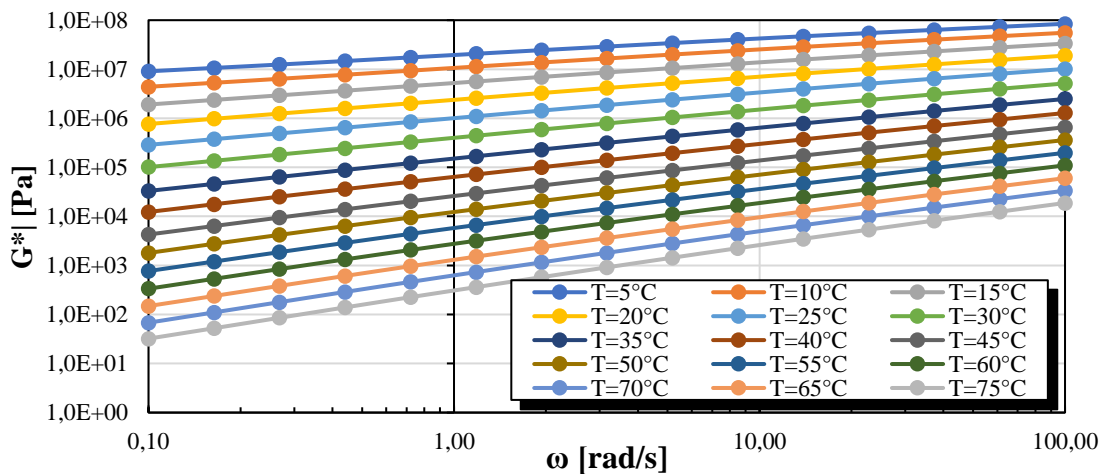


Figura 10.28. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO5_P1. (Elaboración propia)

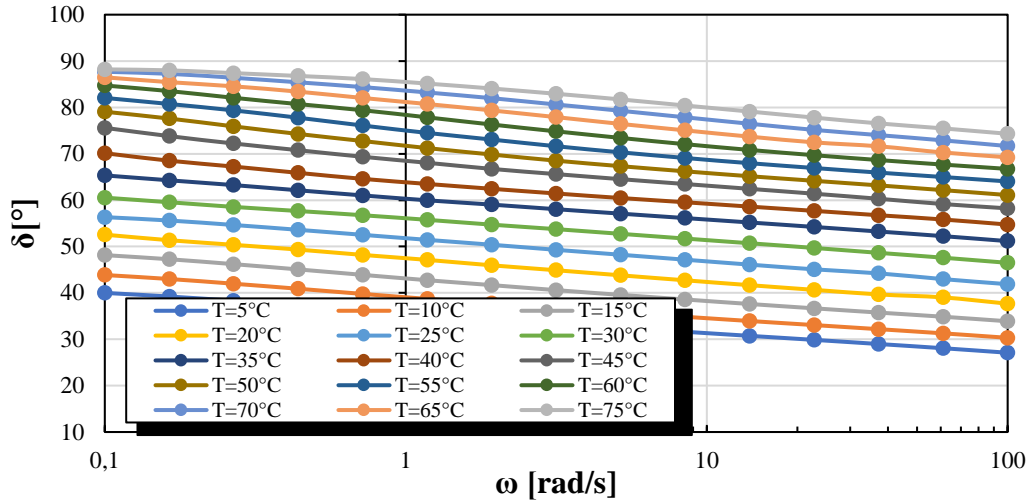


Figura 10.29. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO5_P2. (Elaboración propia)

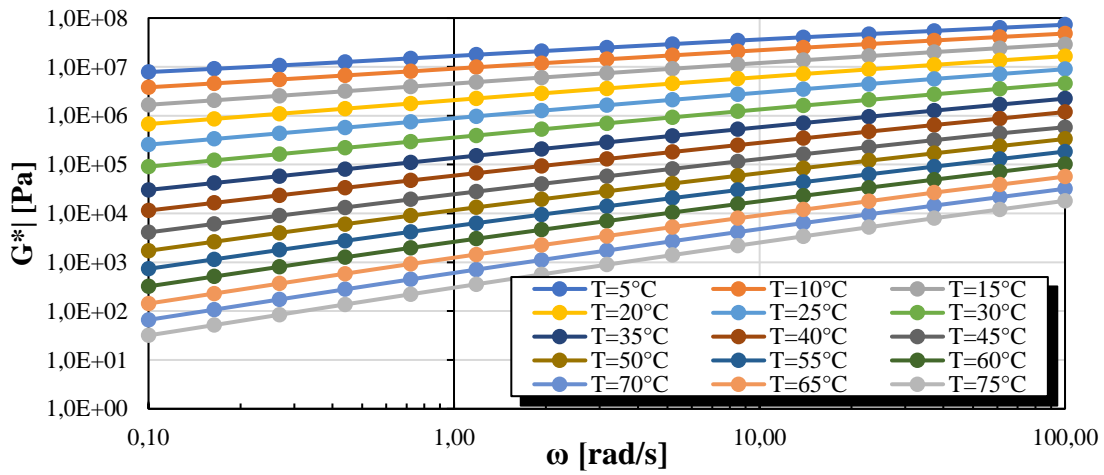


Figura 10.30. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO5_P2. (Elaboración propia)

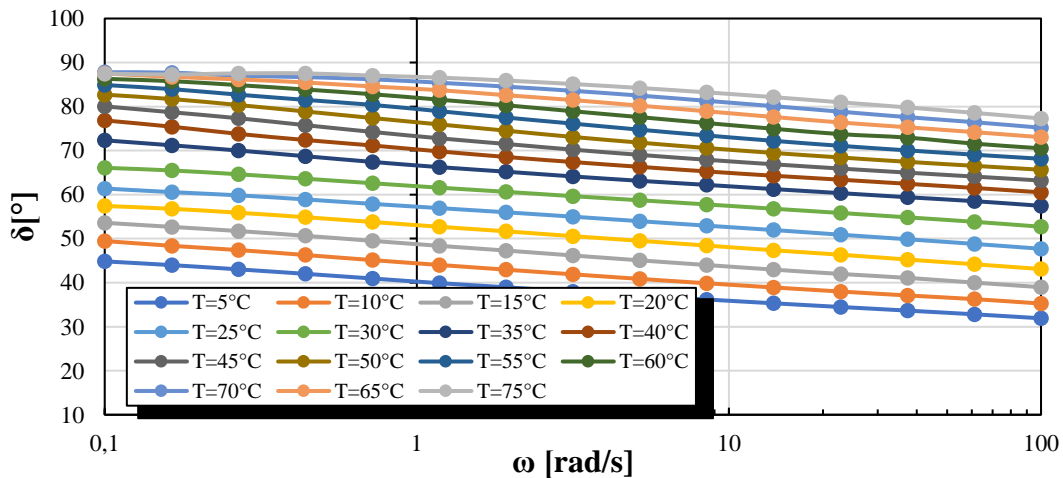


Figura 10.31. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO6_P1

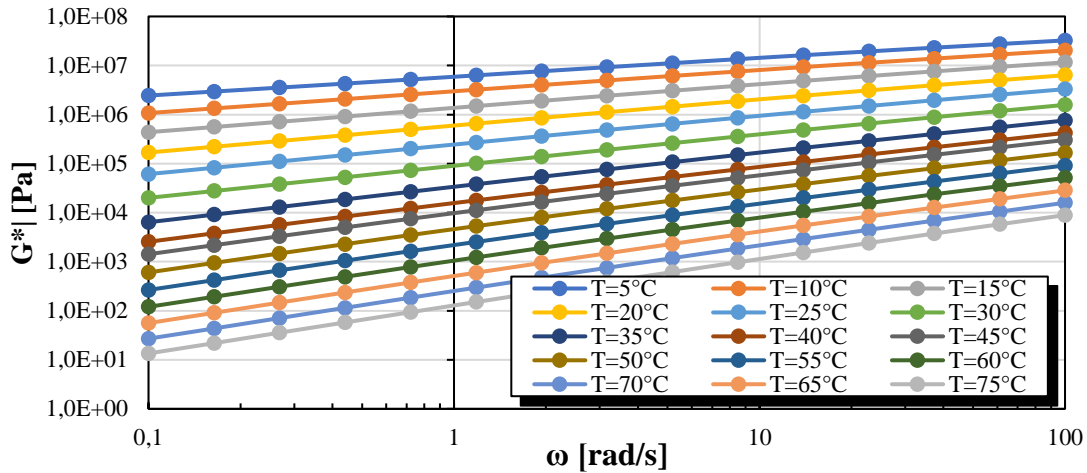


Figura 10.32. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO6_P1. (Elaboración propia)

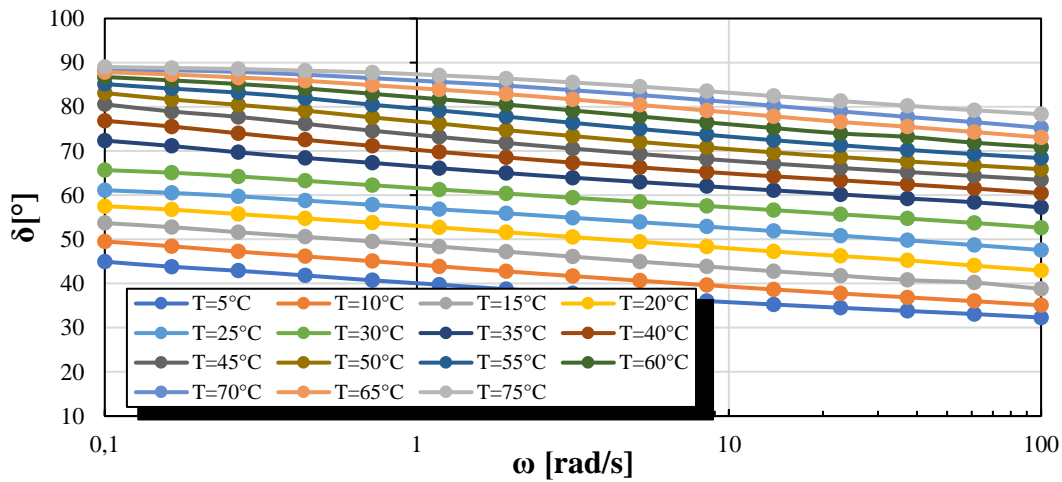


Figura 10.33. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO6_P2. (Elaboración propia)

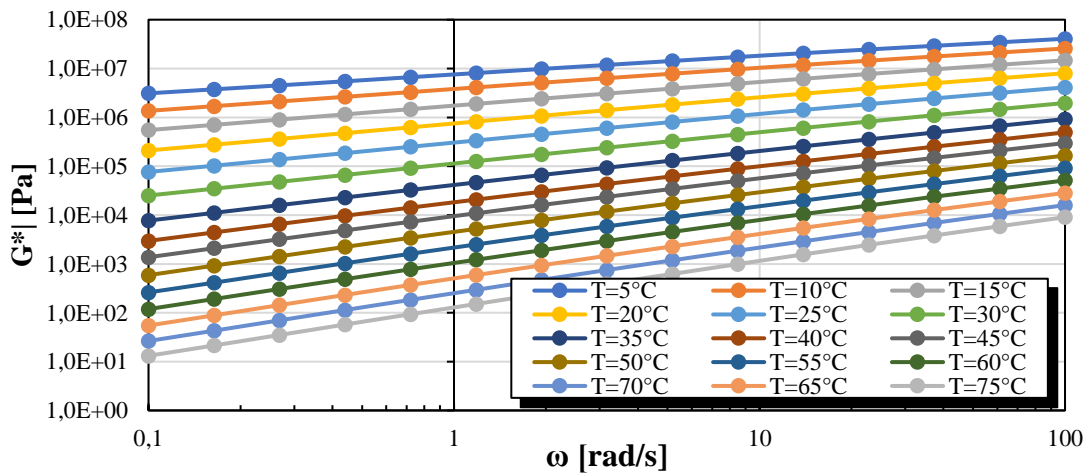


Figura 10.34. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO6_P2. (Elaboración propia)

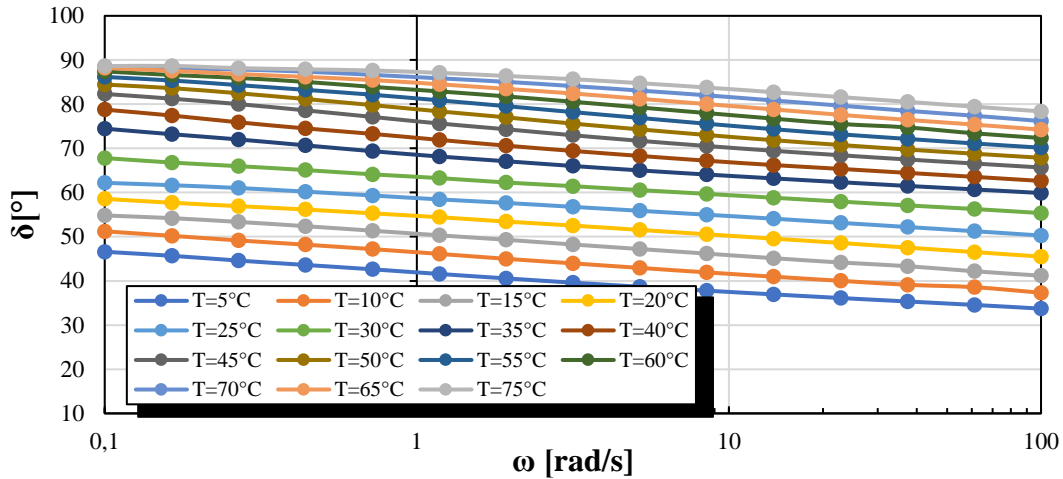


Figura 10.35. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO9_P1. (Elaboración propia)

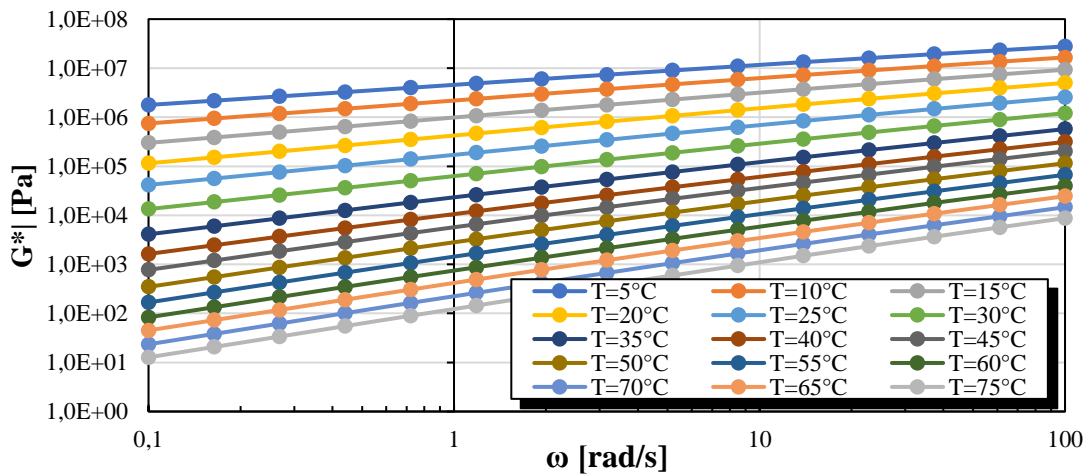


Figura 10.36. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO9_P1. (Elaboración propia)

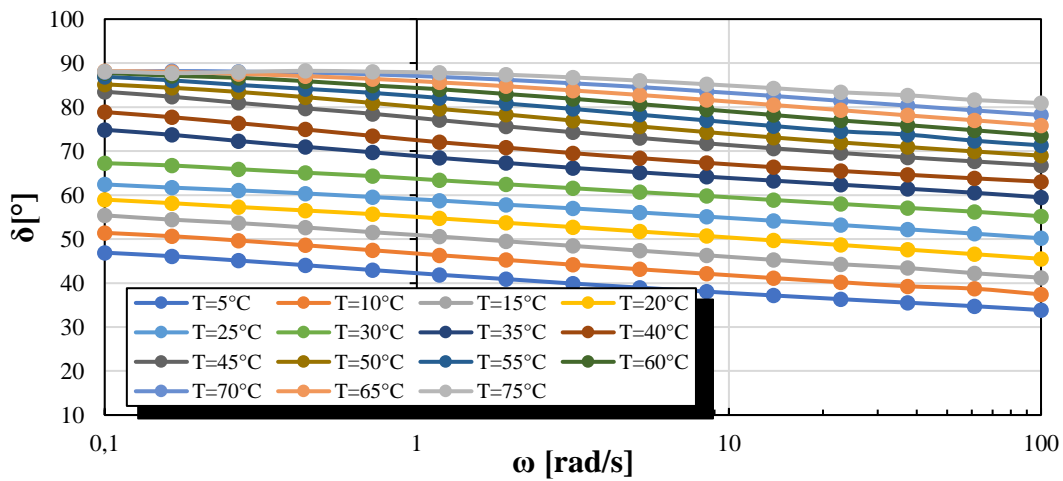


Figura 10.37. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO9_P2. (Elaboración propia)

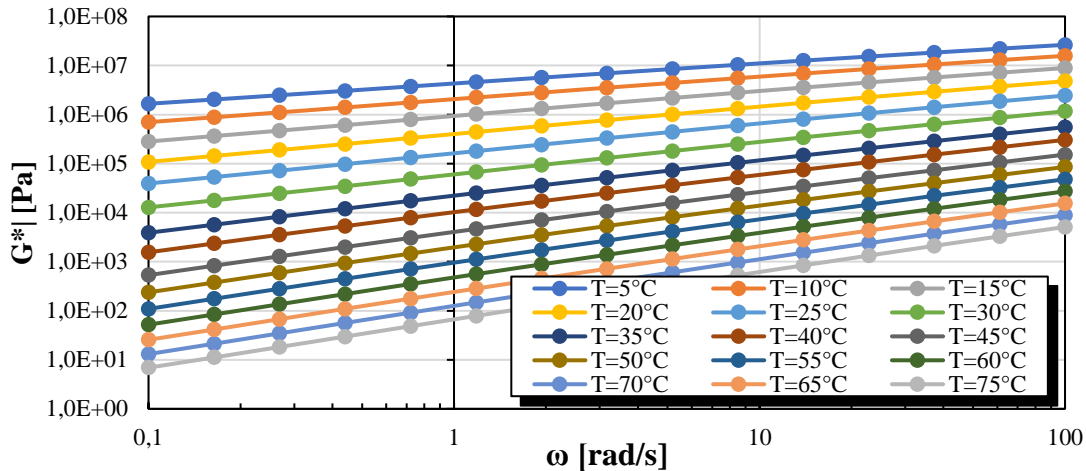


Figura 10.38. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-PO9_P2. (Elaboración propia)

10.3 Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor encapsulado

Se presentan las curvas de módulo dinámico y ángulo de fase en función de la frecuencia de carga para las diferentes temperaturas de estudio, de las muestras de cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con diferentes proporciones de cápsulas que contienen líquido pirolítico.

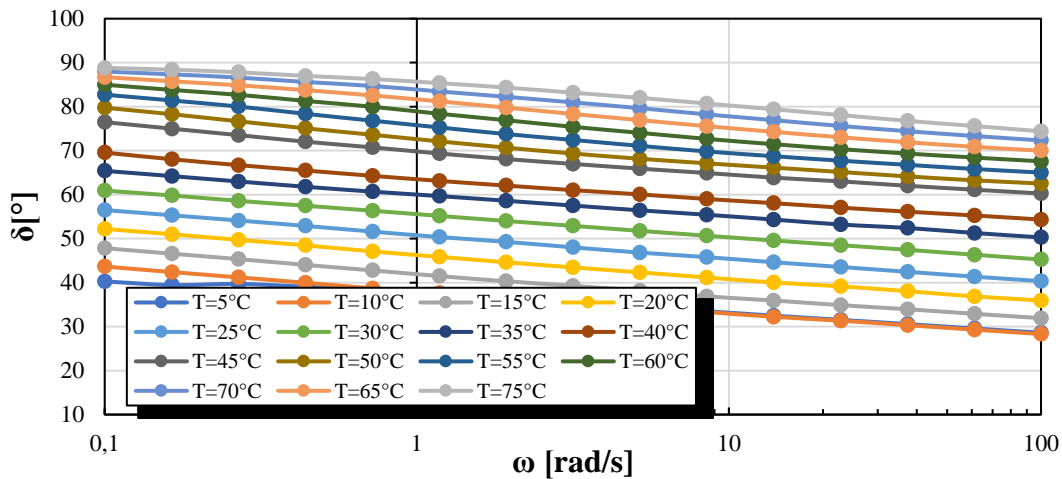


Figura 10.39. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia)

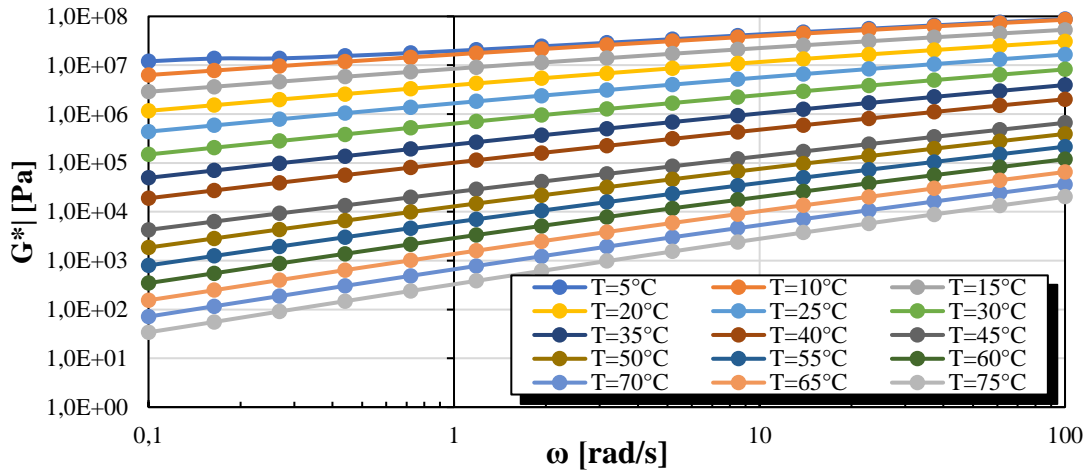


Figura 10.40. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia)

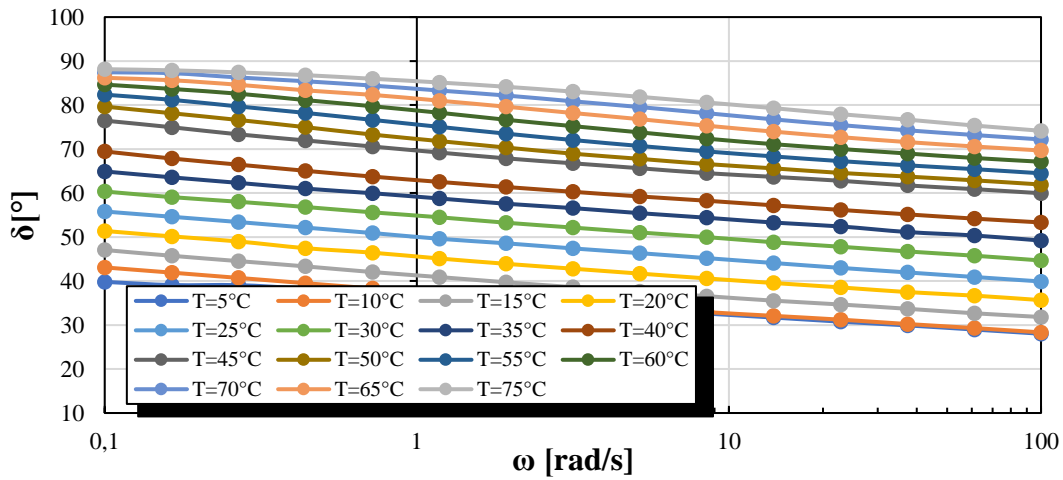


Figura 10.41. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia)

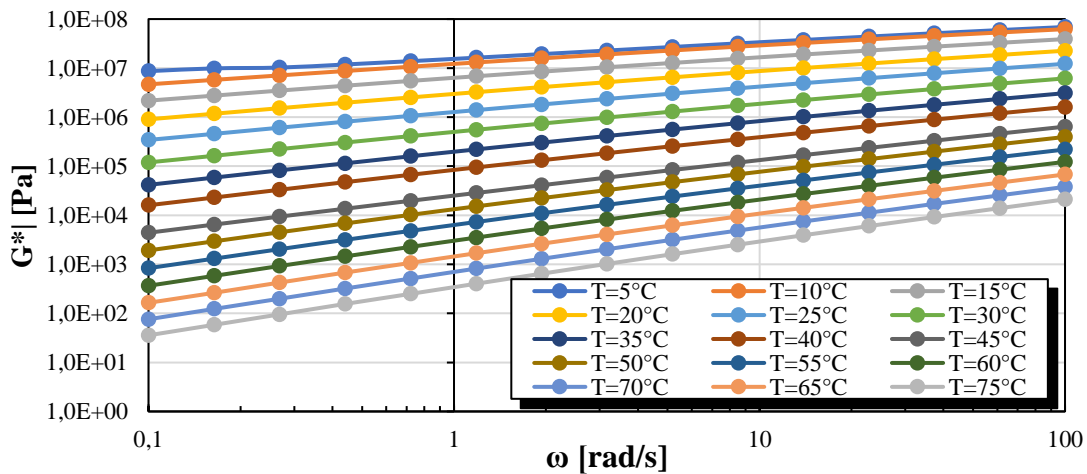


Figura 10.42. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia)

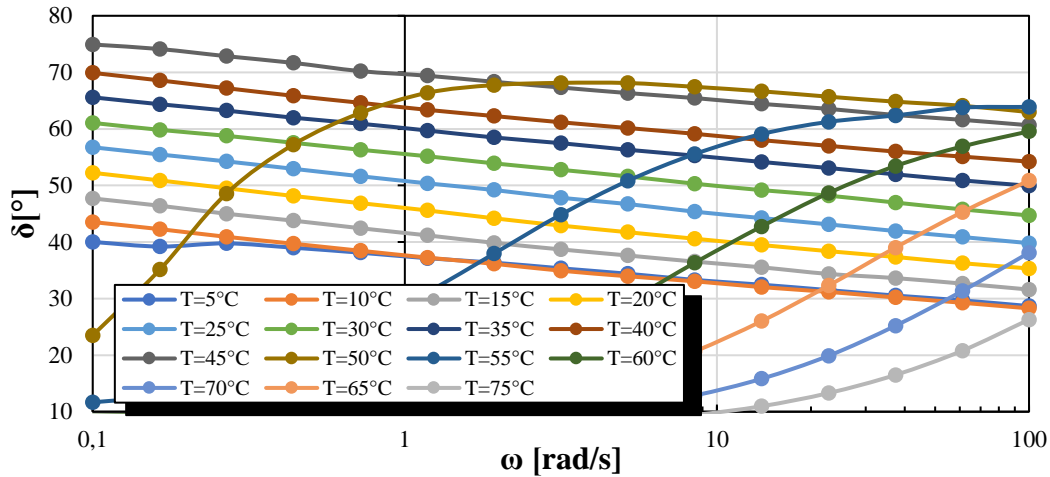


Figura 10.43. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P0. (Elaboración propia)

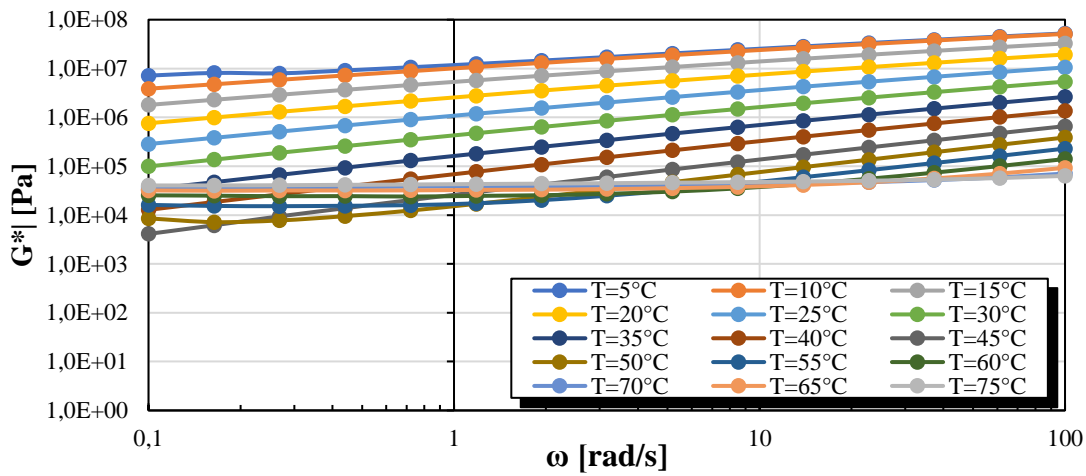


Figura 10.44. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P0. (Elaboración propia)

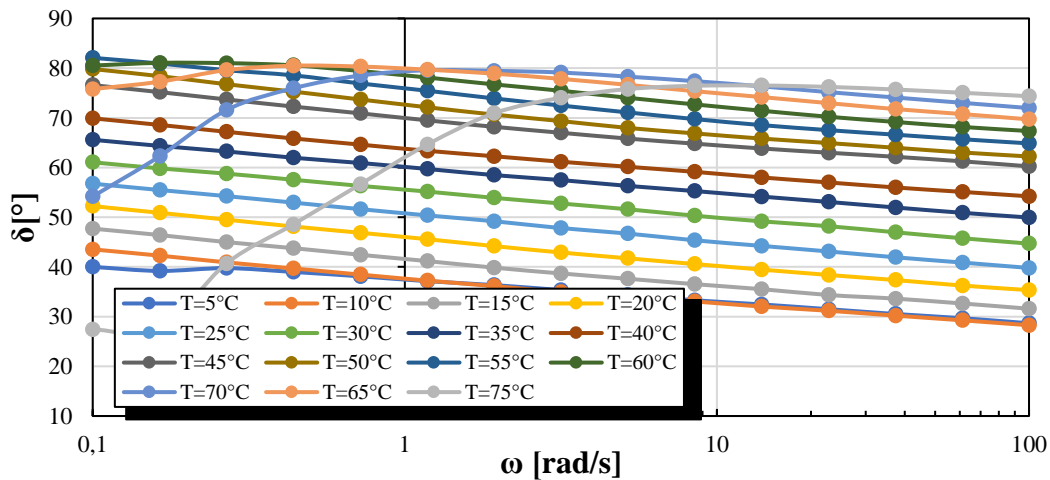


Figura 10.45. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P1. (Elaboración propia)

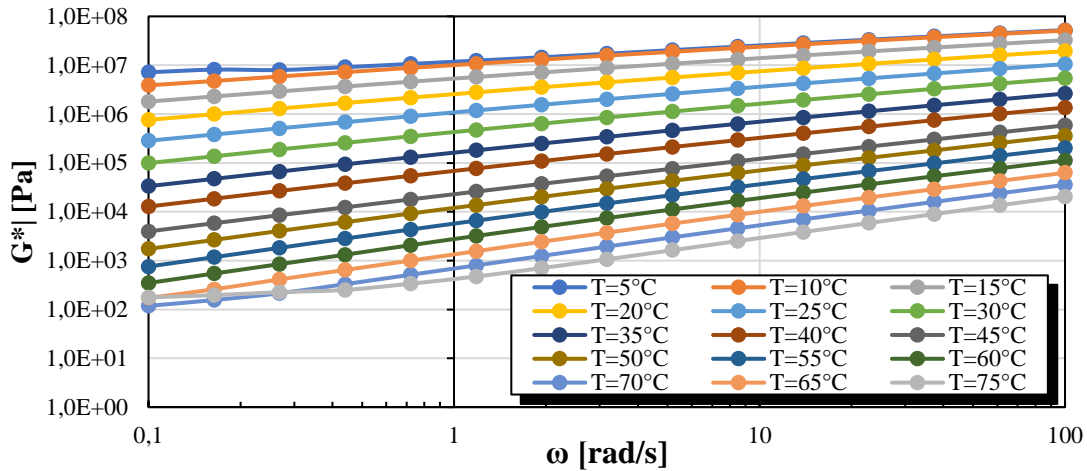


Figura 10.46. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P1. (Elaboración propia)

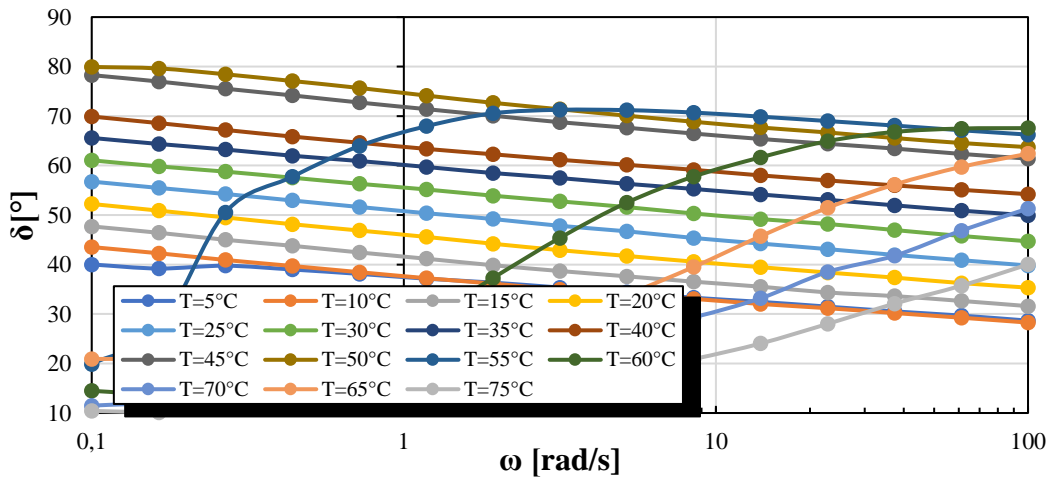


Figura 10.47. Gráfico de ángulo de fase en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia)

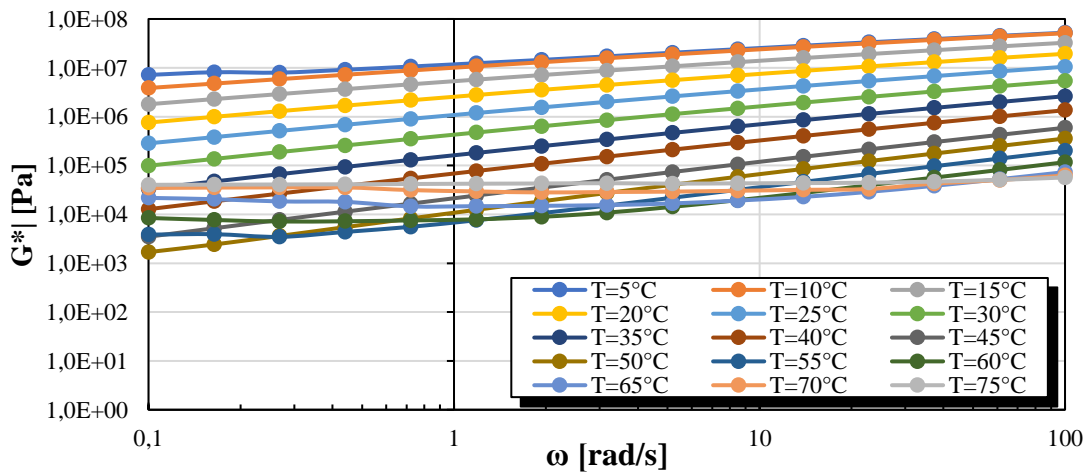


Figura 10.48. Gráfico de módulo dinámico en función de la frecuencia para la muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia)

11 Anexo: Diagrama De Black

11.1 Cemento asfáltico CA-24

Se presentan las curvas de diagrama de Black para las muestras de referencia de cemento asfáltico CA-24 sin envejecer (CA-SE), envejecimiento primario (CA-RTFO) y Envejecimiento secundario (CA-PAV).

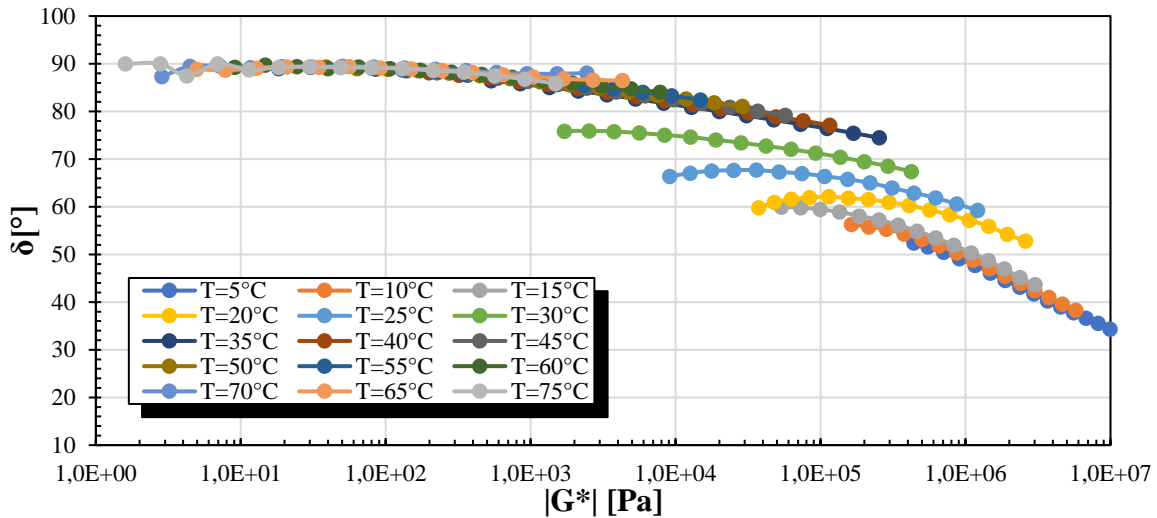


Figura 11.1 Diagrama de Black muestra CA-SE_P0. (Elaboración propia)

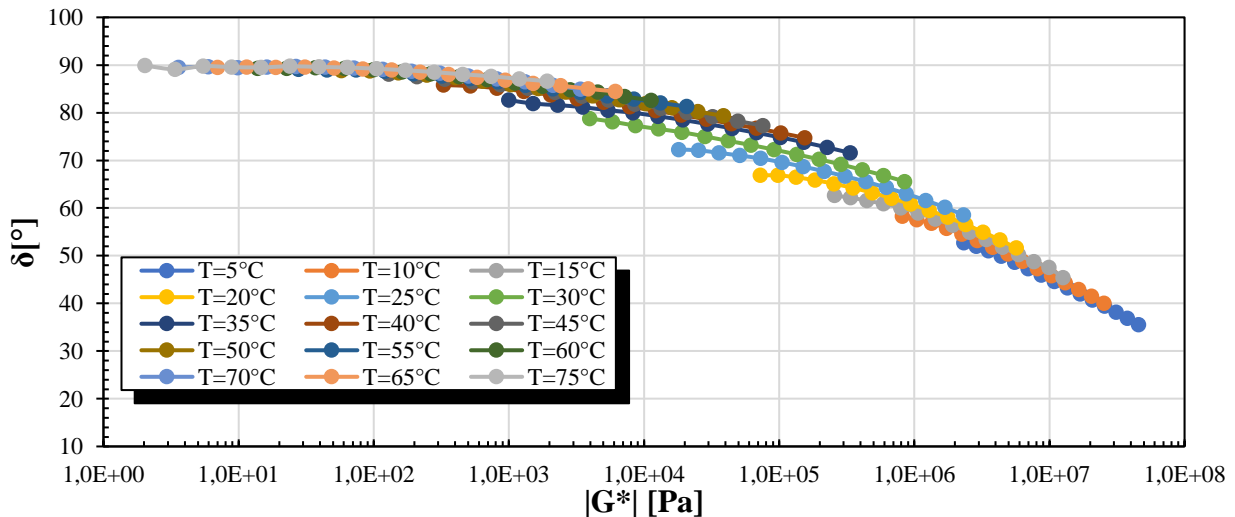


Figura 11.2 Diagrama de Black muestra CA-SE_P1. (Elaboración propia)

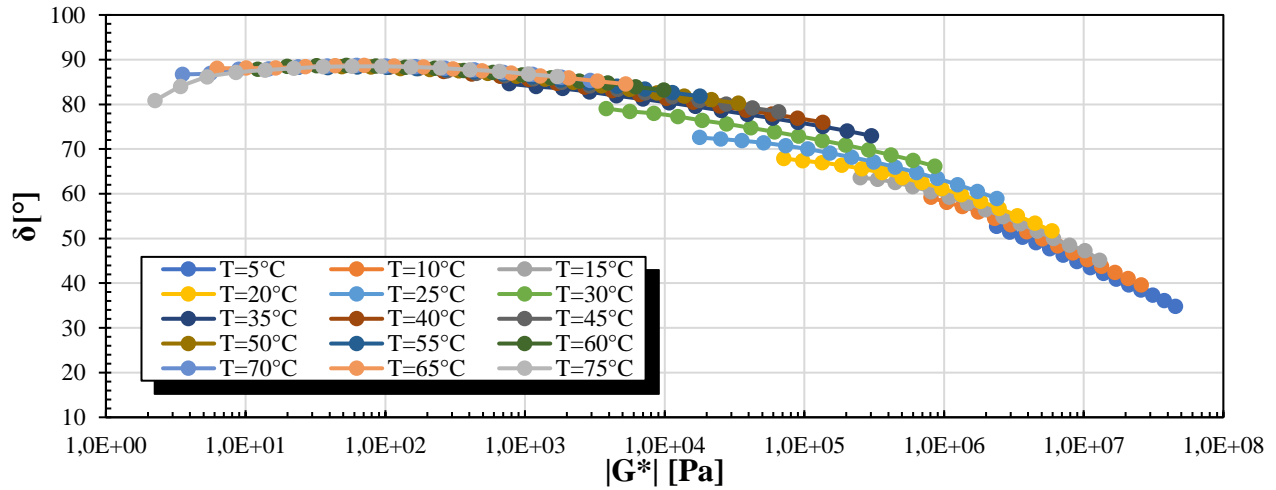


Figura 11.3 Diagrama de Black muestra CA-SE_P2. (Elaboración propia)

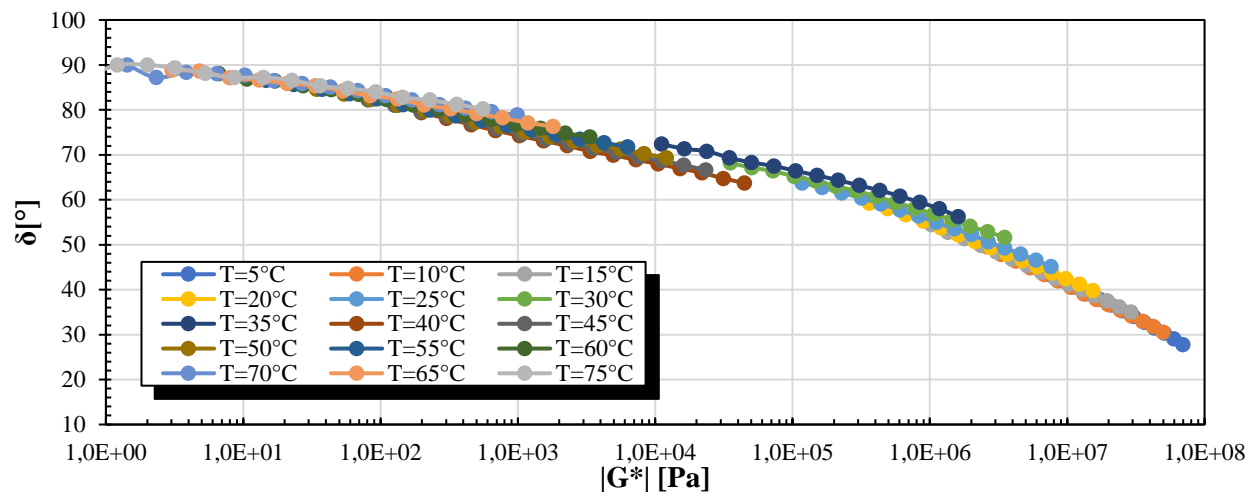


Figura 11.4 Diagrama de Black muestra CA-RTFO_P0. (Elaboración propia)

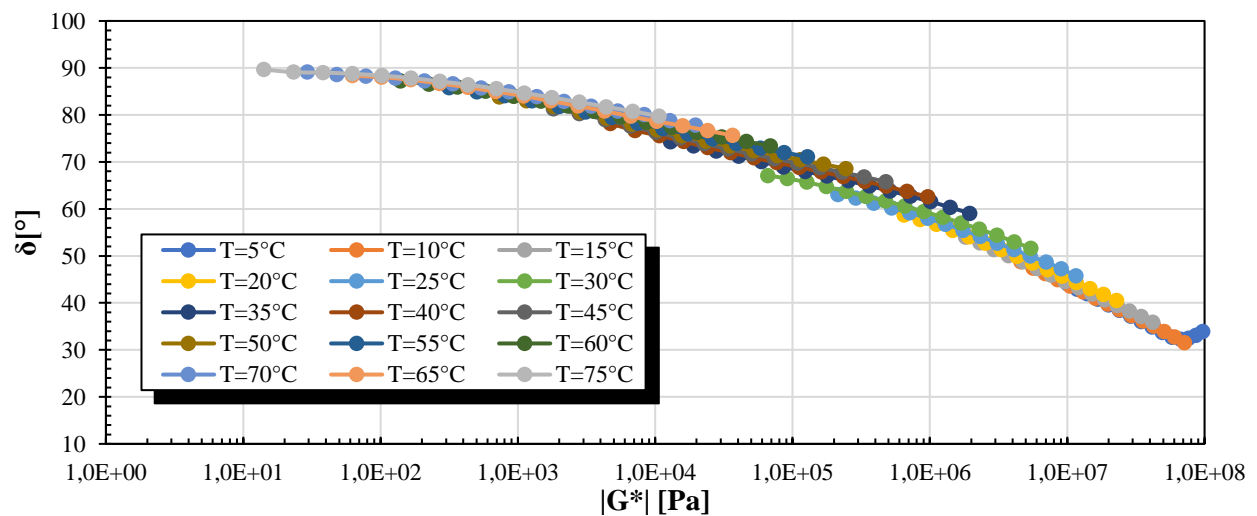


Figura 11.5 Diagrama de Black muestra CA-RTFO_P1. (Elaboración propia)

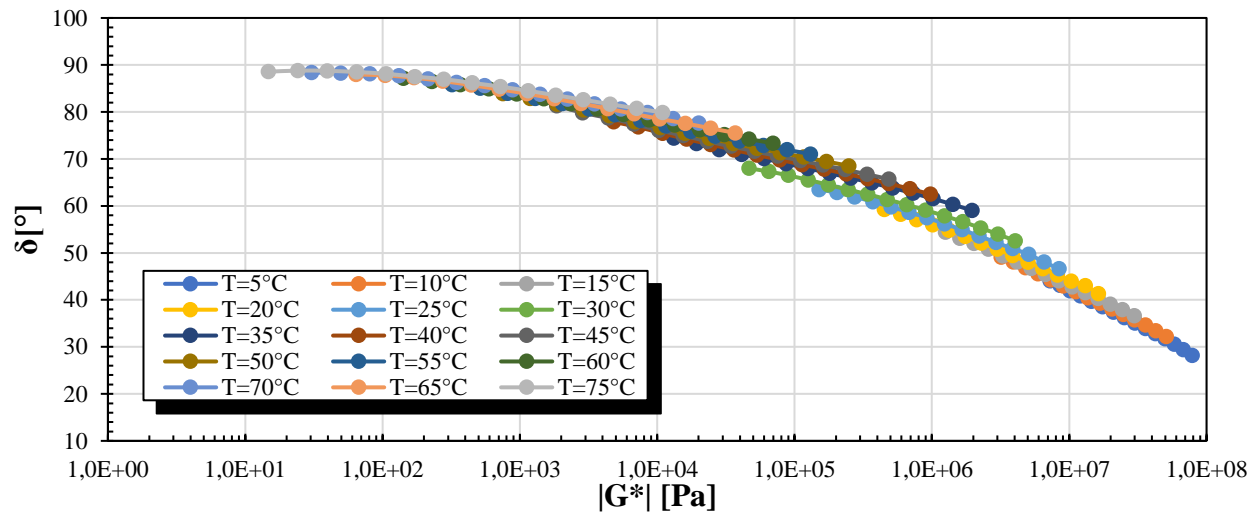


Figura 11.6 Diagrama de Black muestra CA-RTFO_P2. (Elaboración propia)

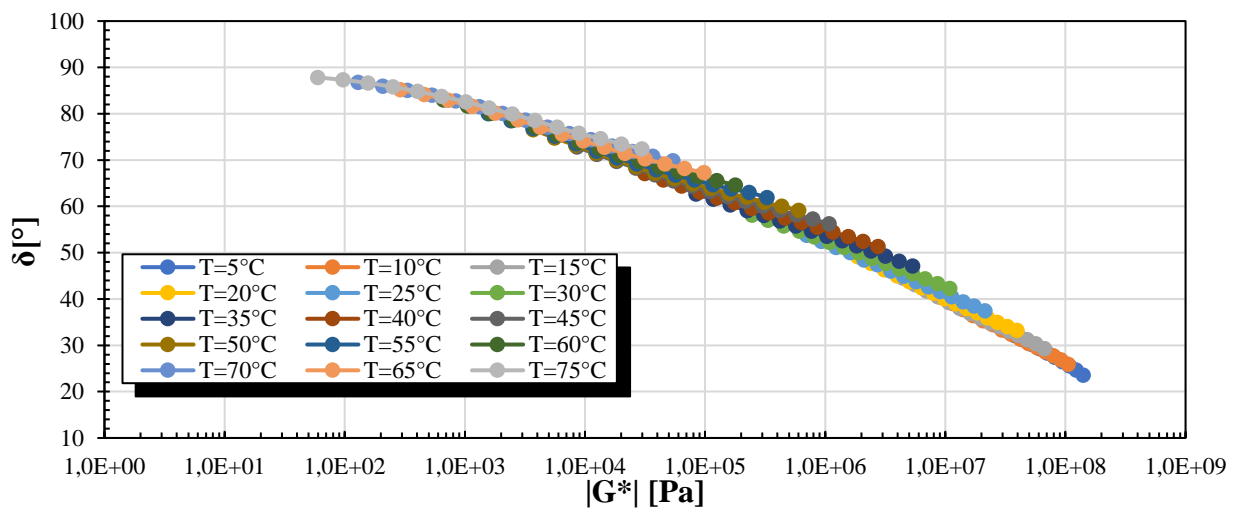


Figura 11.7 Diagrama de Black muestra CA-PAV. (Elaboración propia)

11.2 Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor líquido

Se presentan los diagramas de Black de las muestras de cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con diferentes proporciones de líquido pirolítico.

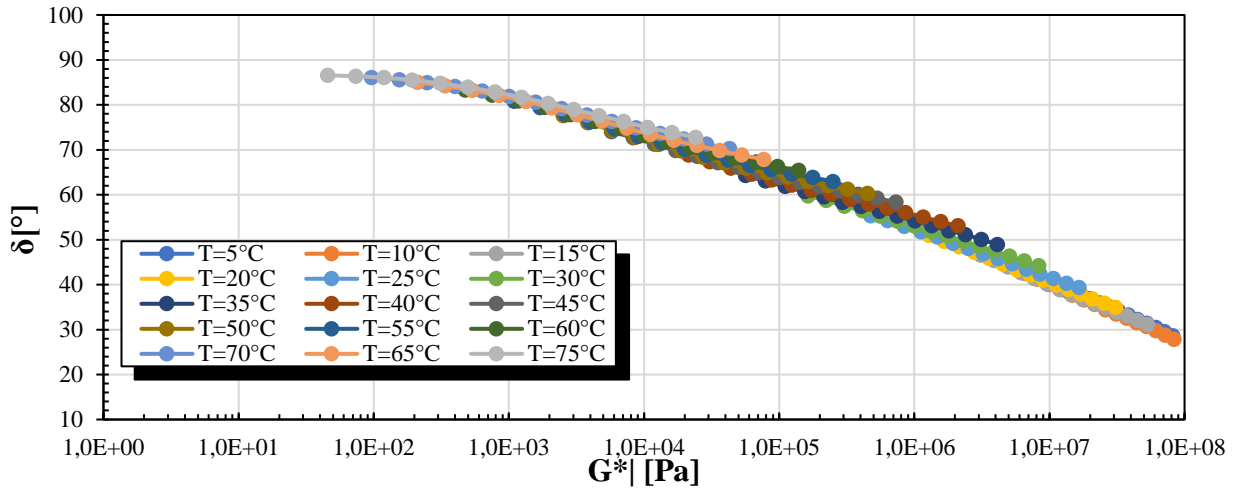


Figura 11.8 Diagrama de Black muestra PAV-PO1. (Elaboración propia)

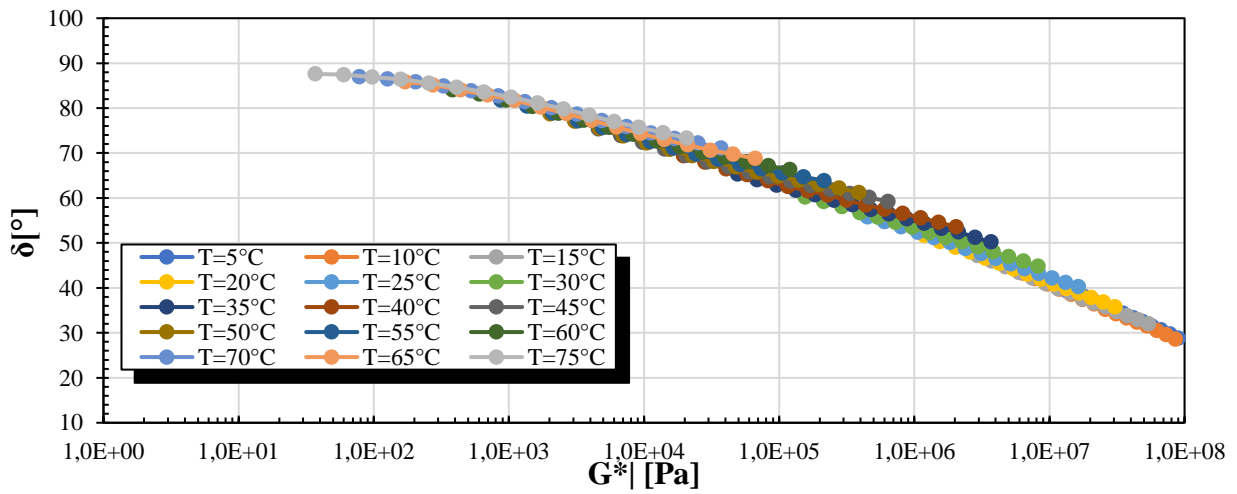


Figura 11.9 Diagrama de Black muestra PAV-PO2. (Elaboración propia)

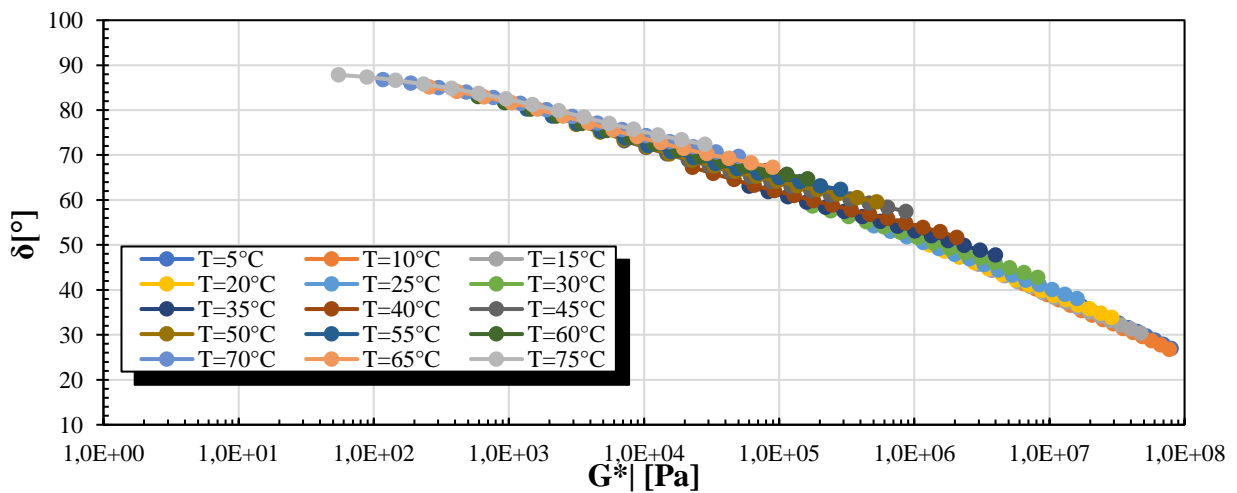


Figura 11.10 Diagrama de Black muestra PAV-PO3_PO. (Elaboración propia)

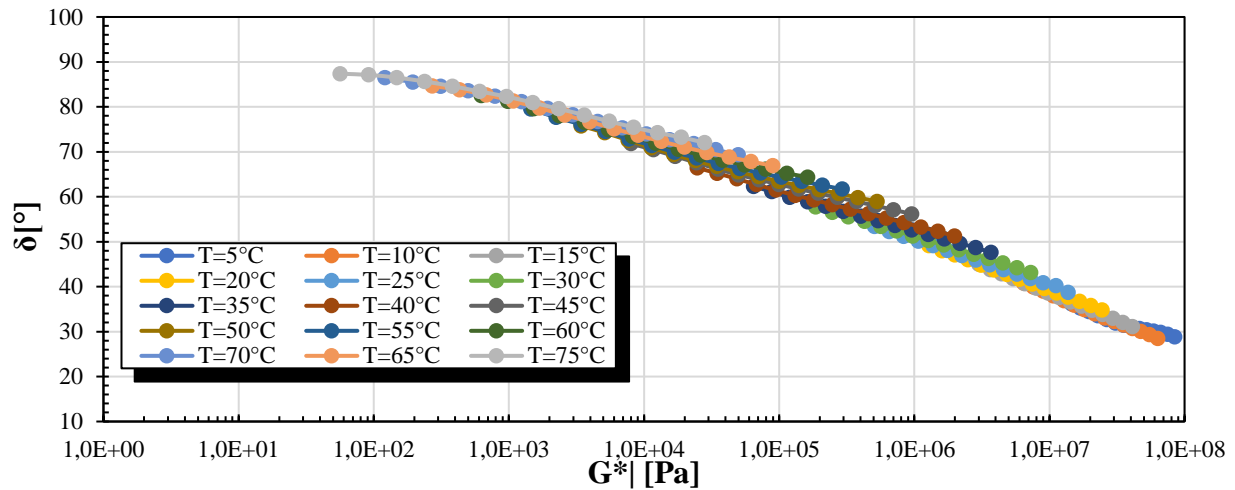


Figura 11.11 Diagrama de Black muestra PAV-PO3_P1. (Elaboración propia)

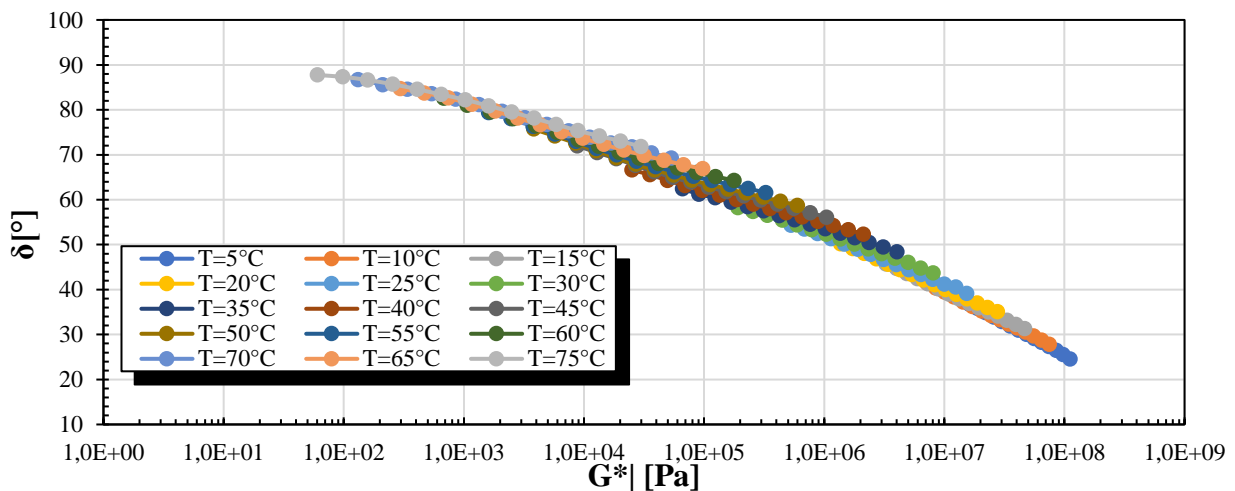


Figura 11.12 Diagrama de Black muestra PAV-PO3_P2. (Elaboración propia)

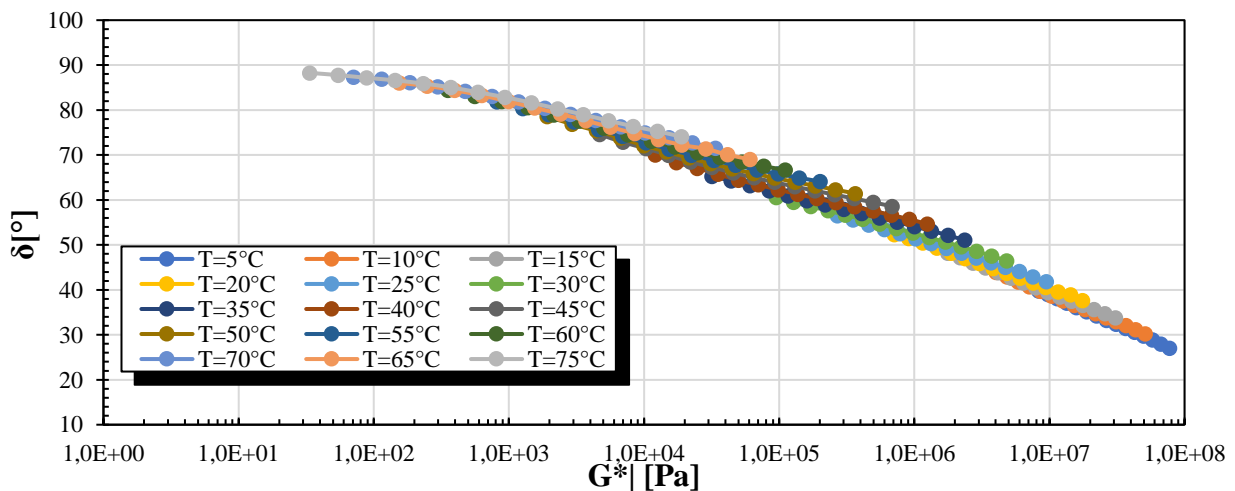


Figura 11.13 Diagrama de Black muestra PAV-PO4_P1. (Elaboración propia)

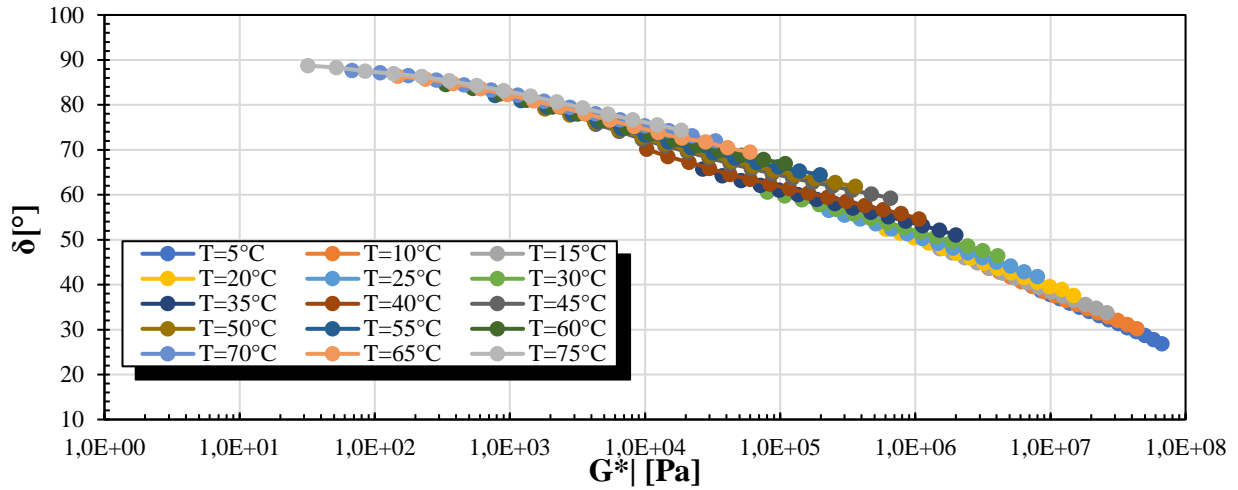


Figura 11.14 Diagrama de Black muestra PAV-PO4_P2. (Elaboración propia)

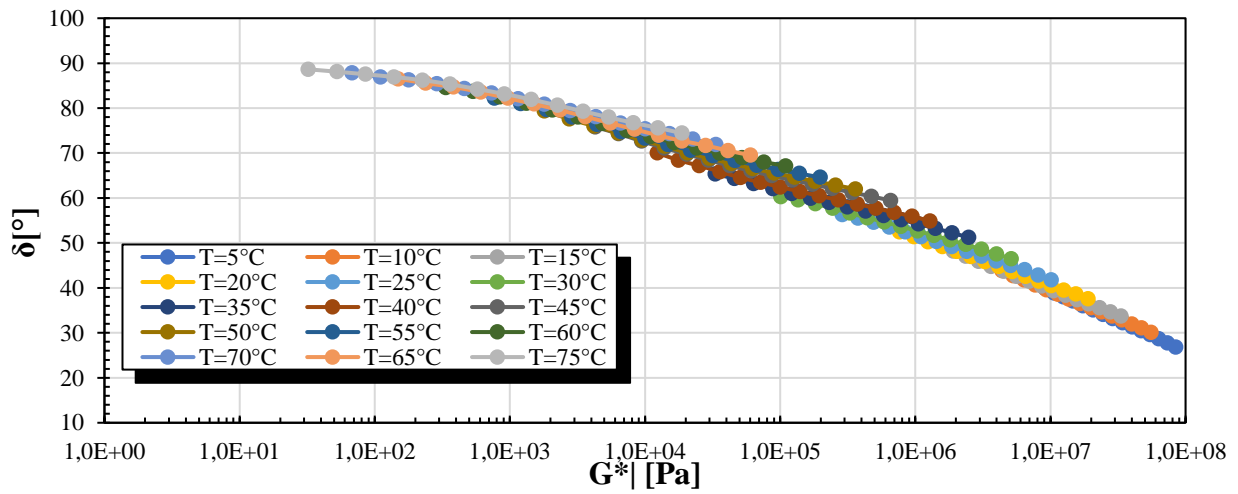


Figura 11.15 Diagrama de Black muestra PAV-PO5_P1. (Elaboración propia)

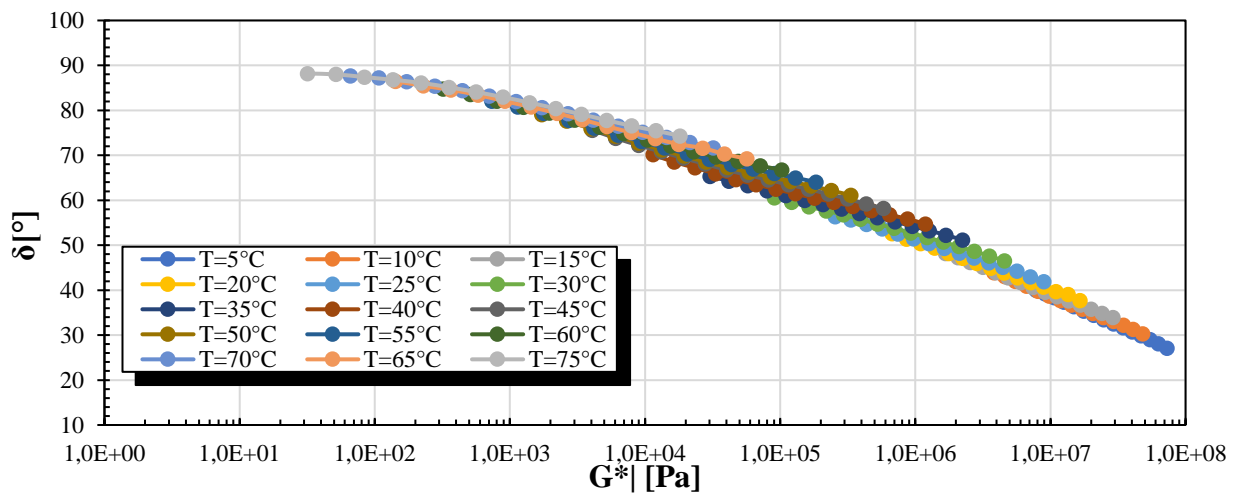


Figura 11.16 Diagrama de Black muestra PAV-PO5_P2. (Elaboración propia)

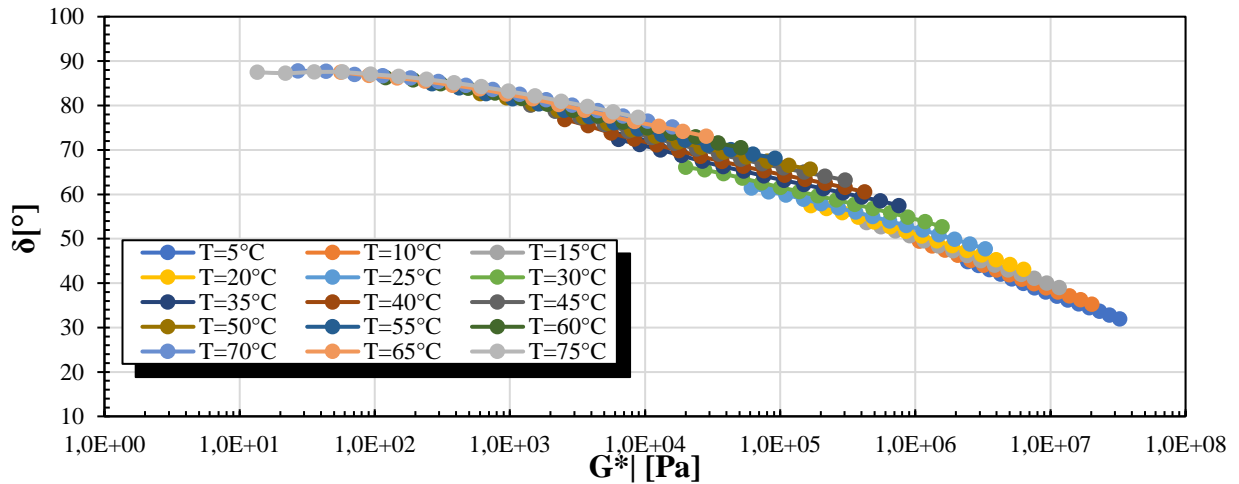


Figura 11.17 Diagrama de Black muestra PAV-PO6_P1. (Elaboración propia)

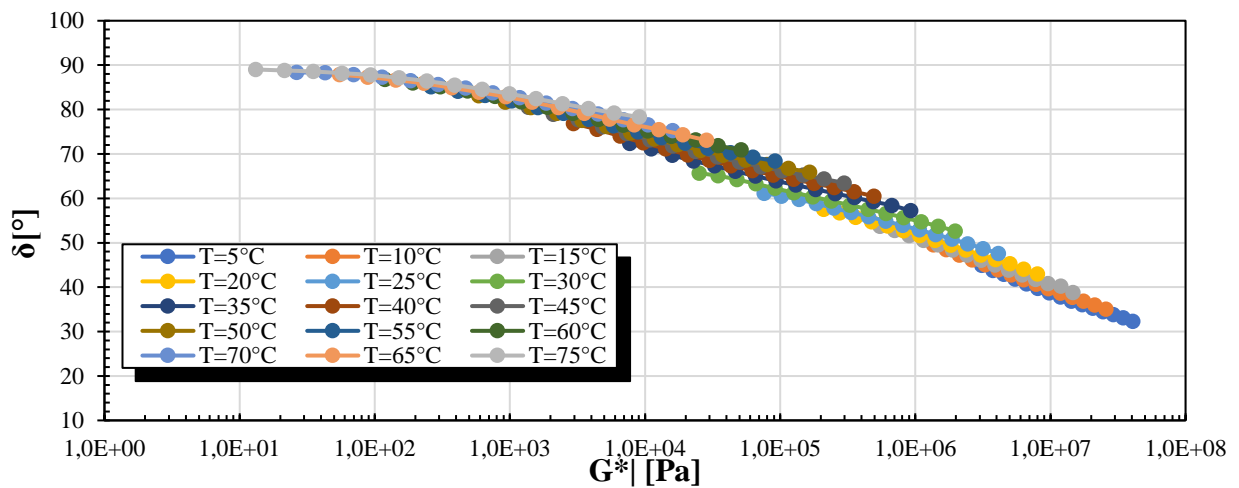


Figura 11.18 Diagrama de Black muestra PAV-PO6_P2. (Elaboración propia)

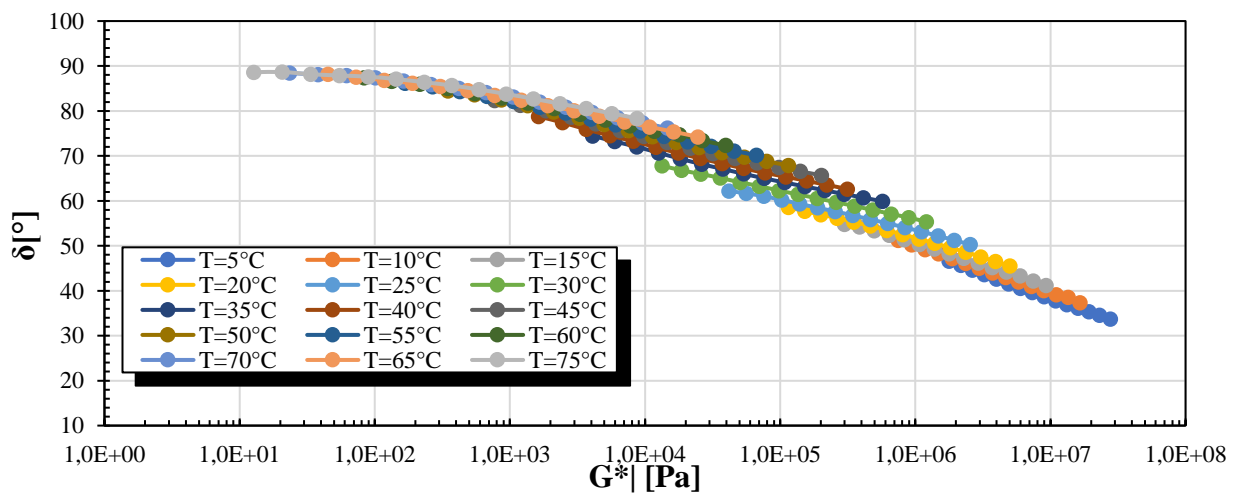


Figura 11.19 Diagrama de Black muestra PAV-PO9_P1. (Elaboración propia)

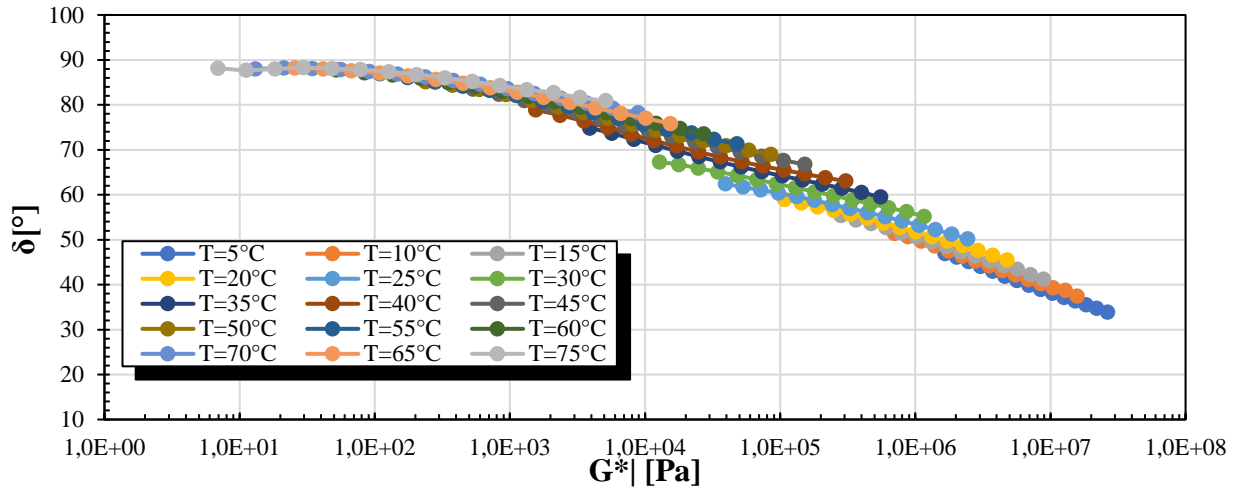


Figura 11.20 Diagrama de Black muestra PAV-PO9_P2. (Elaboración propia)

11.3 Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor encapsulado

Se presentan los diagramas de Black de las muestras de cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con diferentes proporciones cápsulas que contienen líquido pirolítico.

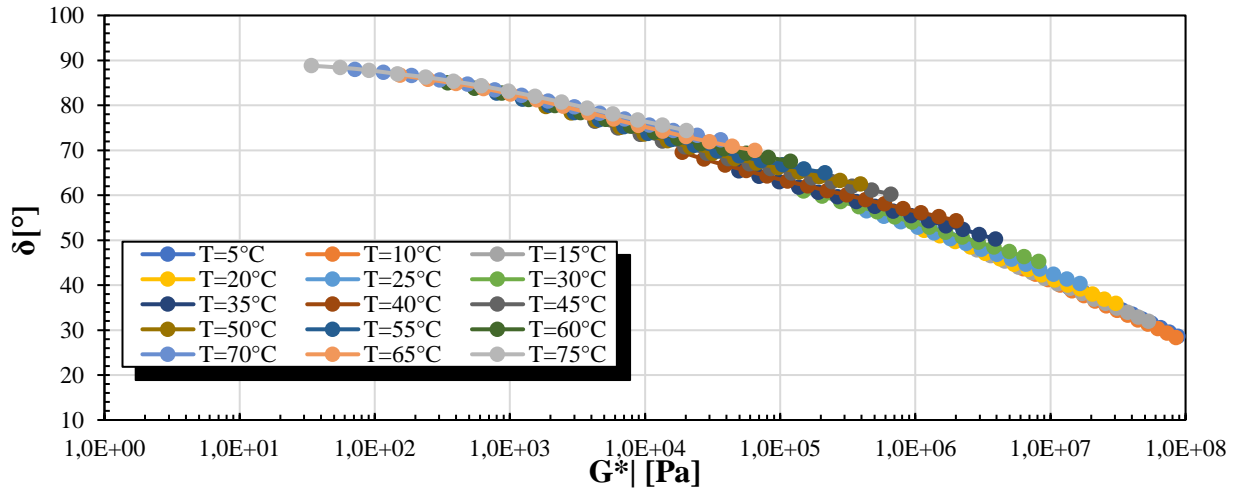


Figura 11.21 Diagrama de Black muestra PAV-POC6. (Elaboración propia). (Elaboración propia)

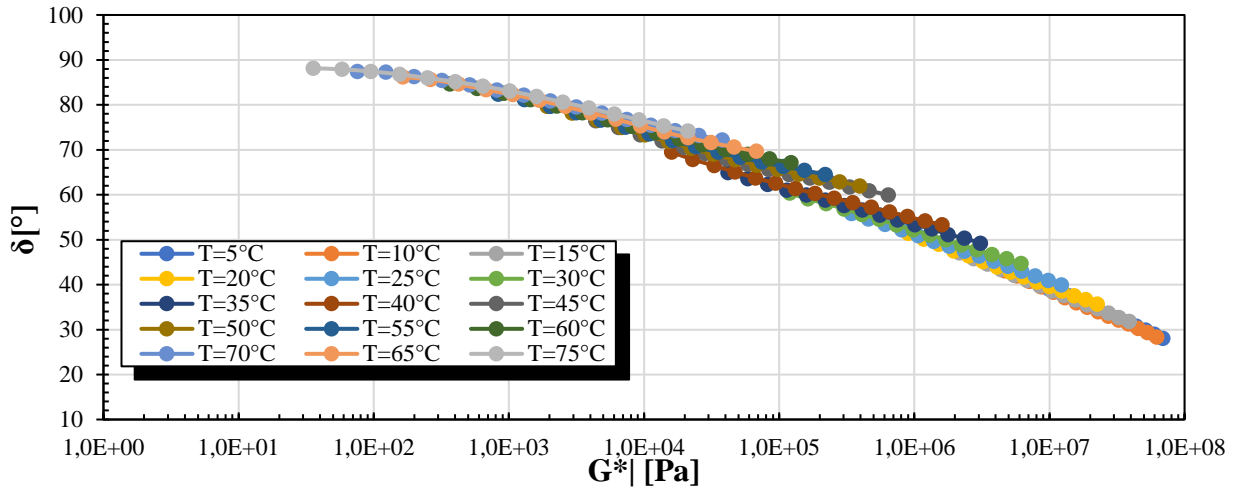


Figura 11.22 Diagrama de Black muestra PAV-POC9. (Elaboración propia)

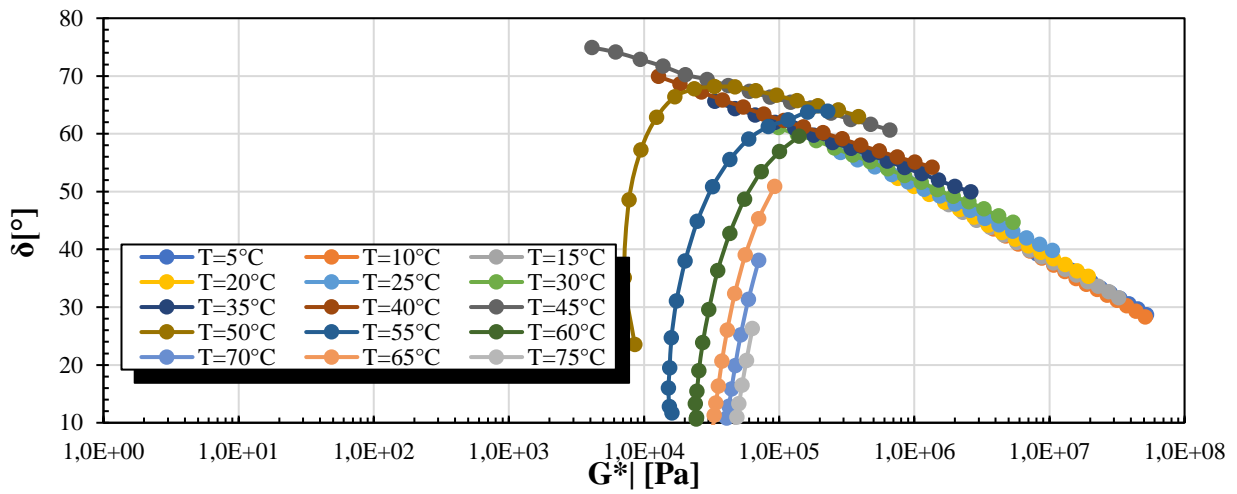


Figura 11.23 Diagrama de Black muestra PAV-POC12_P0. (Elaboración propia)

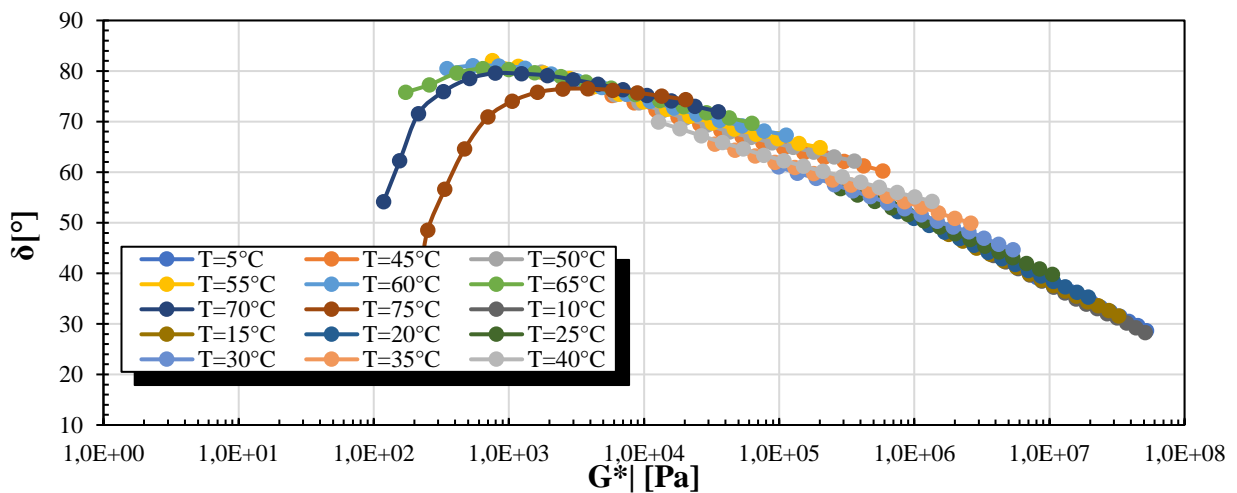


Figura 11.24 Diagrama de Black muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia)

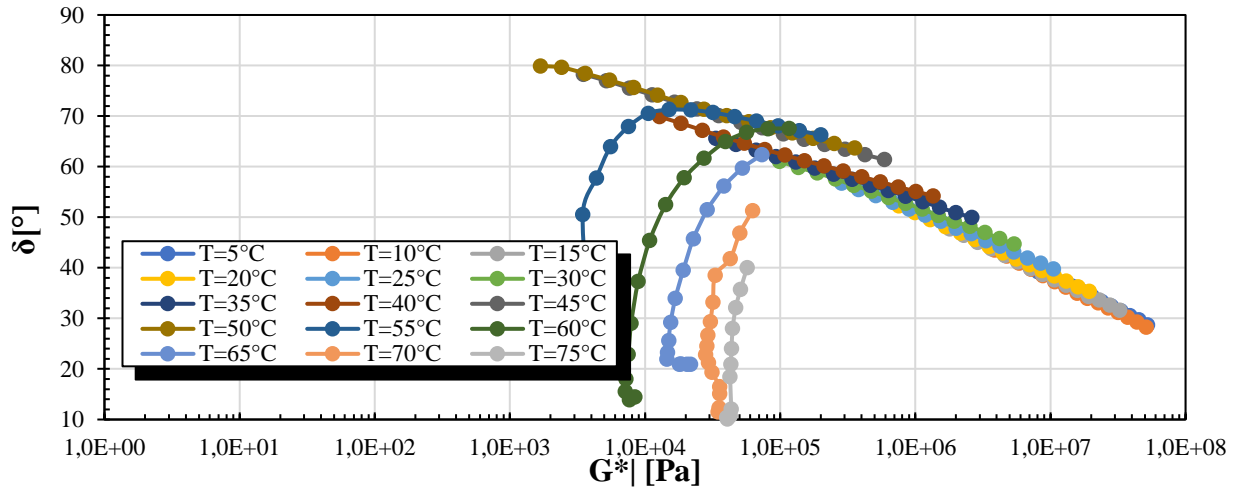


Figura 11.25 Diagrama de Black muestra PAV-POC12_P2. (Elaboración propia)

12 Anexo: Curvas Maestras

12.1 Cemento asfáltico CA-24

Se presentan las curvas Maestras de módulo dinámico y ángulo de fase, para las muestras de referencia de cemento asfáltico CA-24 sin envejecer (CA-SE), envejecimiento primario (CA-RTFO) y Envejecimiento secundario (CA-PAV).

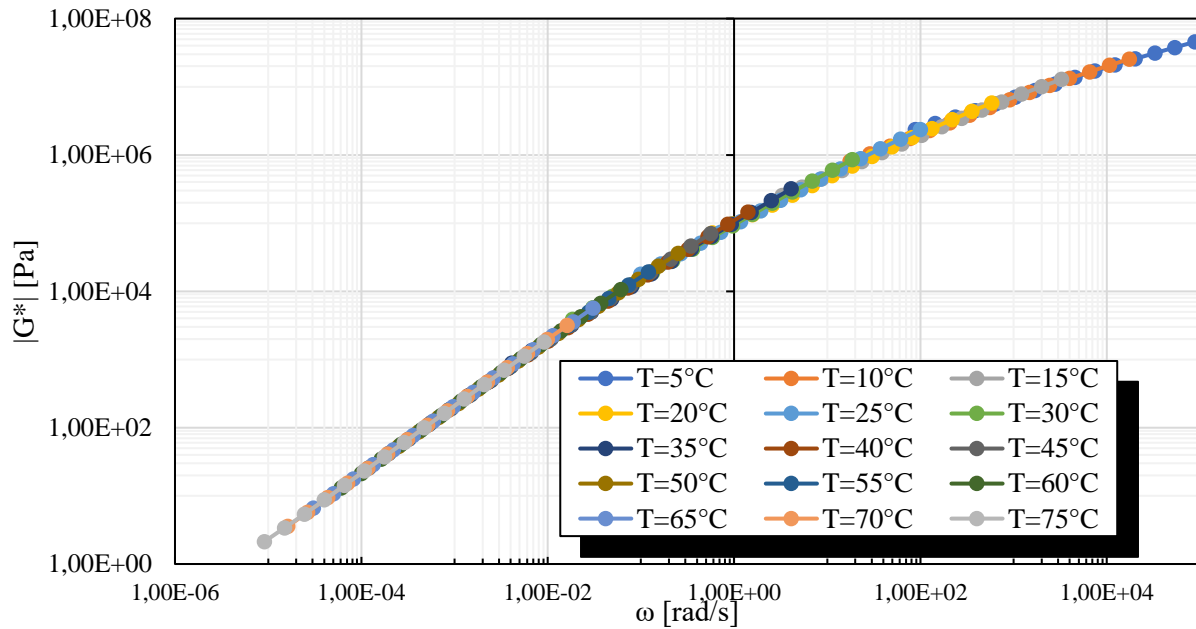


Figura 12.1 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra CA-SE. (Elaboración propia)

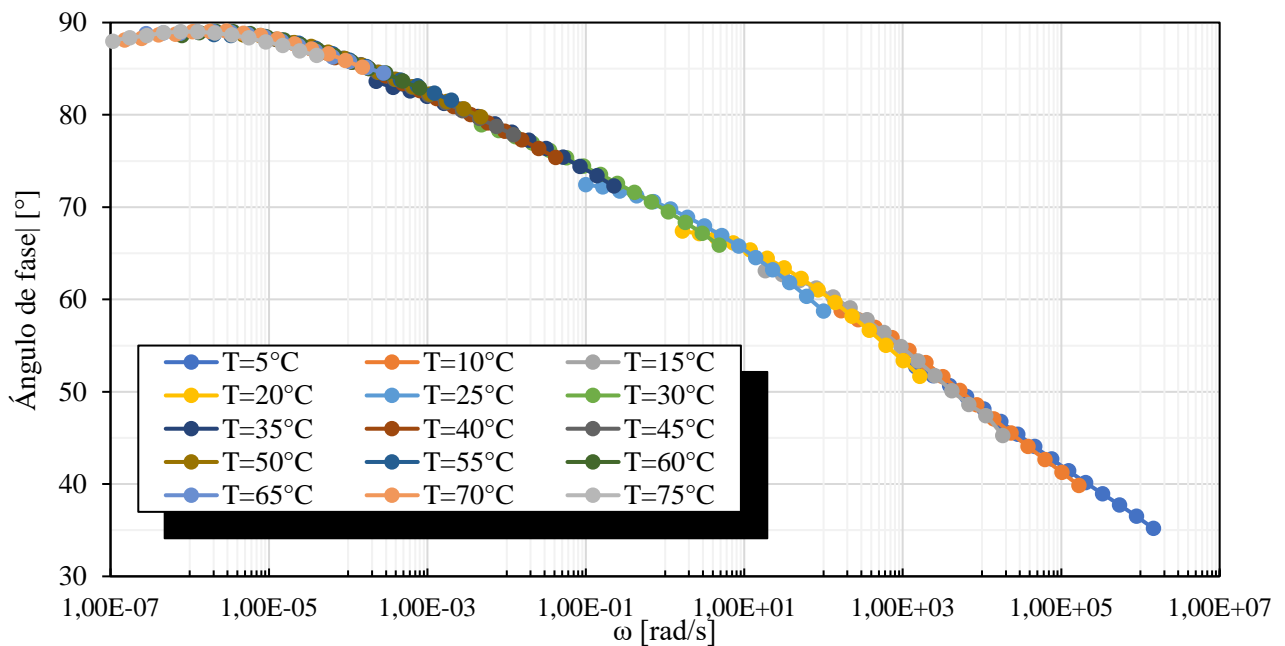


Figura 12.2 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra CA-SE. (Elaboración propia)

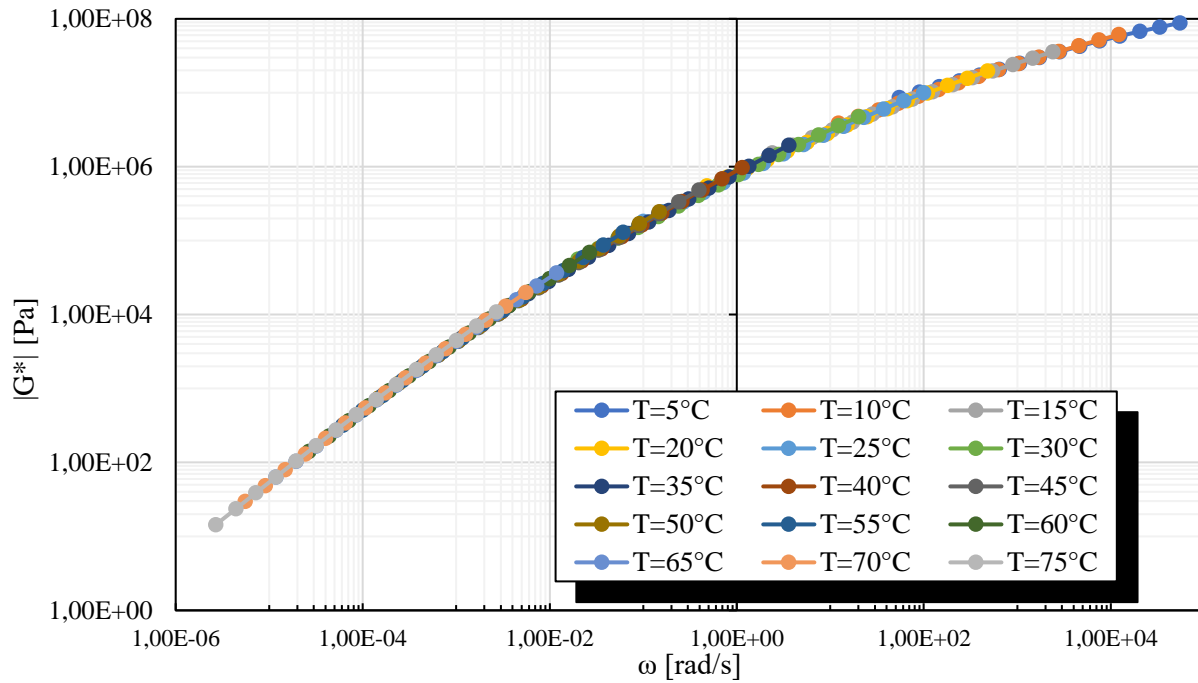


Figura 12.3 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra CA-RTFO. (Elaboración propia)

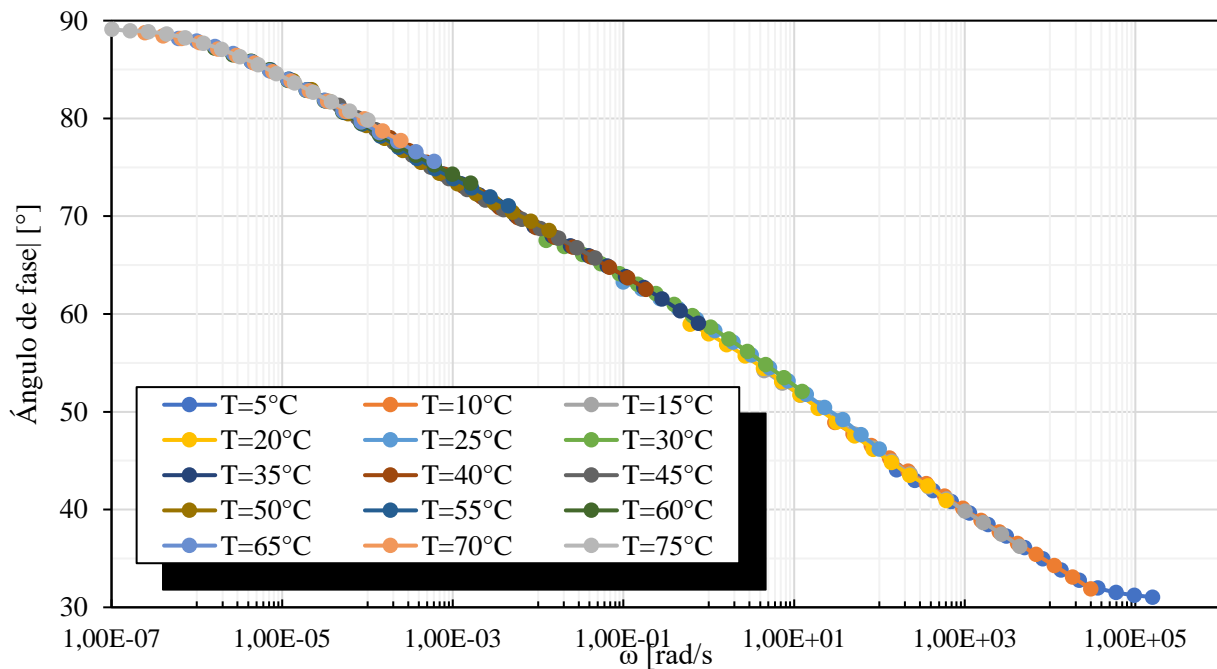


Figura 12.4 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra CA-RTFO. (Elaboración propia)

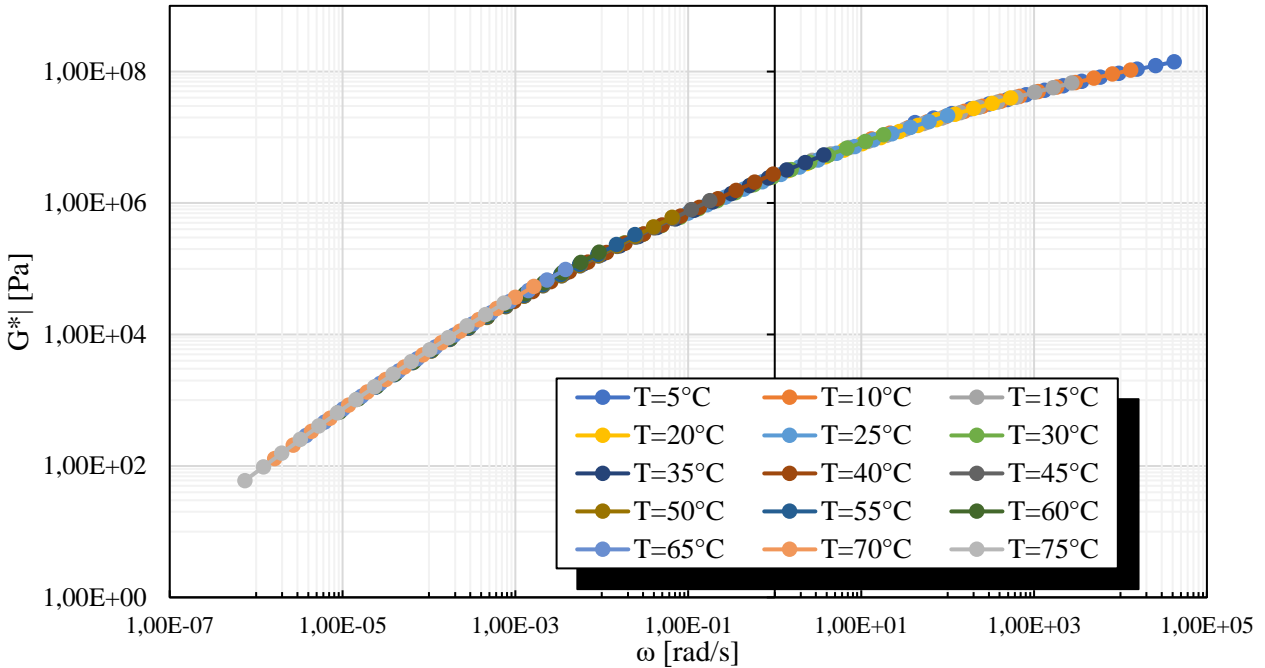


Figura 12.5 Curva maestra de módulo dinámico para la muestra CA-PAV. (Elaboración propia)

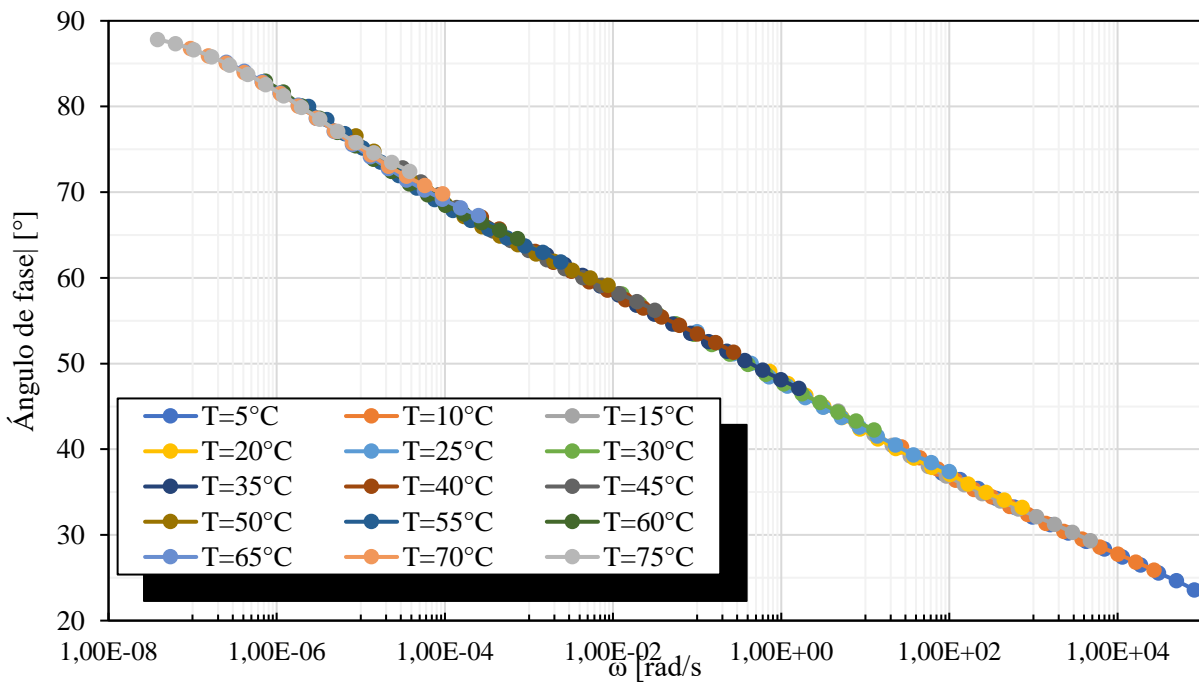


Figura 12.6 Curva maestra de ángulo de fase para la muestra CA-PAV. (Elaboración propia)

12.2 Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor líquido

Se presentan las curvas maestras del módulo dinámico y el ángulo de fase, para las muestras de cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con diferentes proporciones de líquido pirolítico.

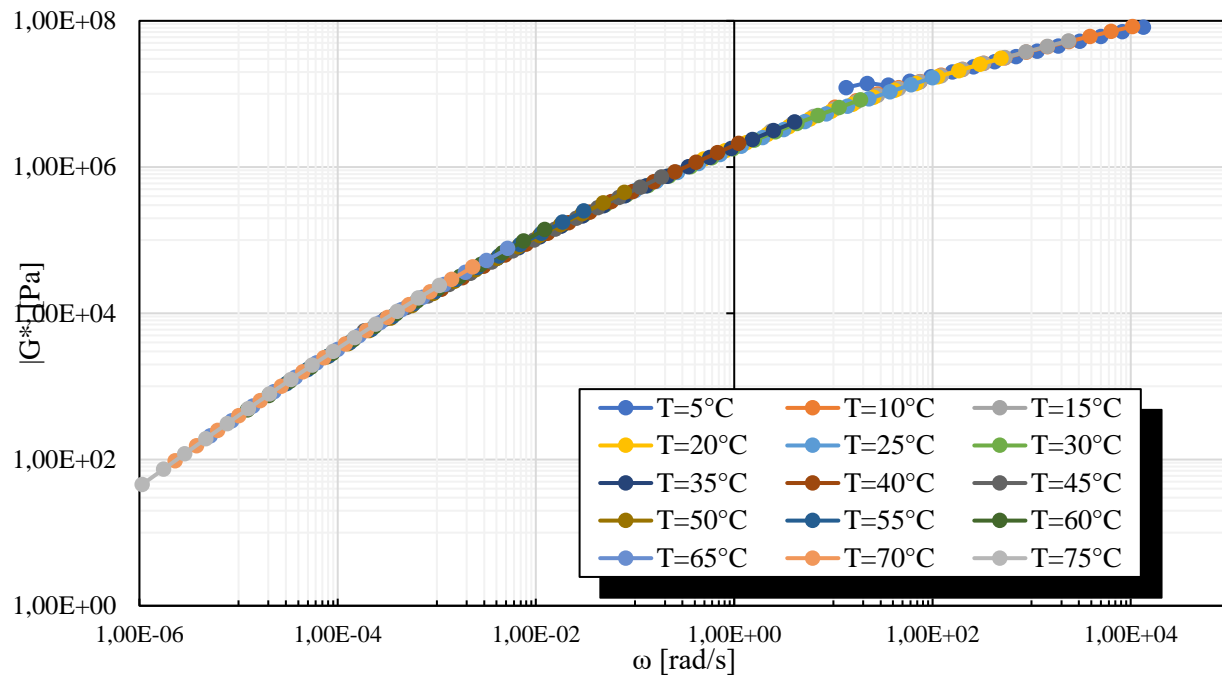


Figura 12.7 Curva maestra de módulo dinámico de la muestra PAV-PO1. (Elaboración propia)

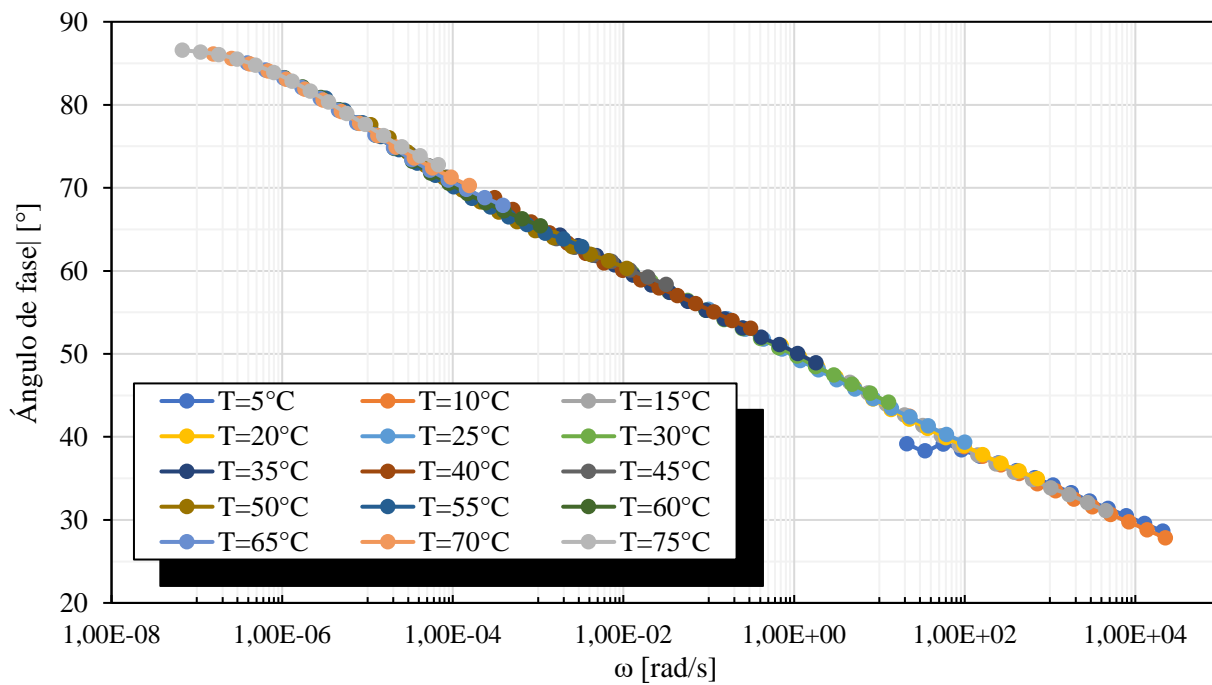


Figura 12.8 Curva maestra de ángulo de fase de la muestra PAV-PO1. (Elaboración propia)

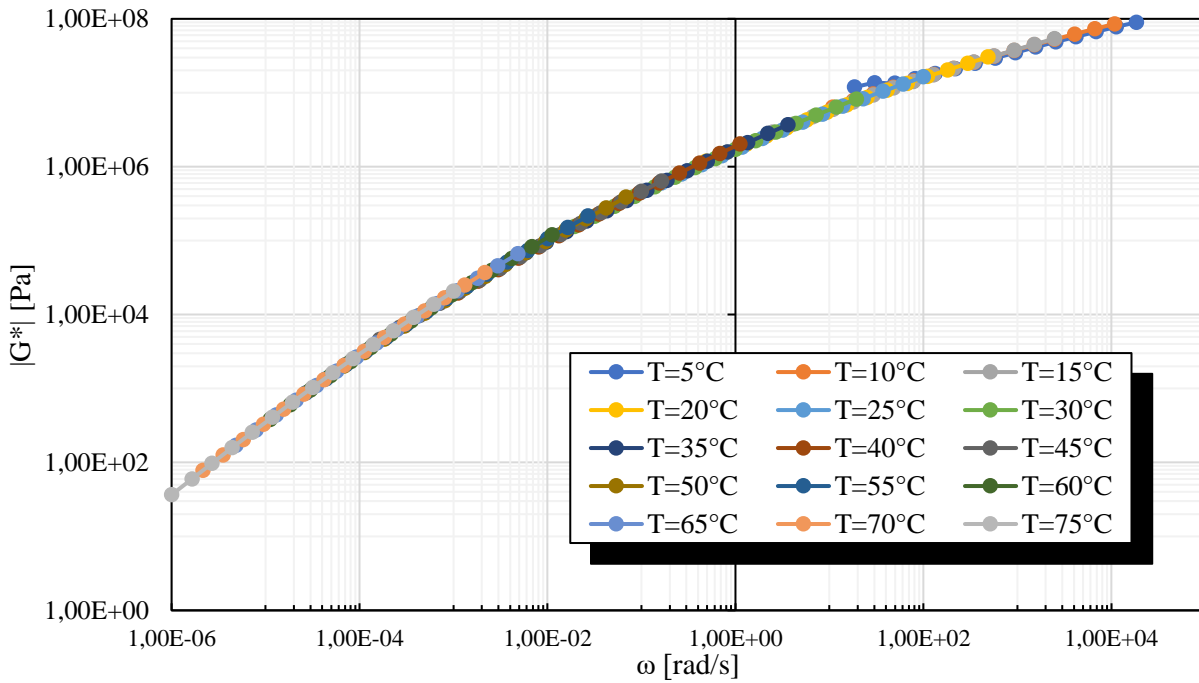


Figura 12.9 Curva maestra de módulo dinámico de la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia)

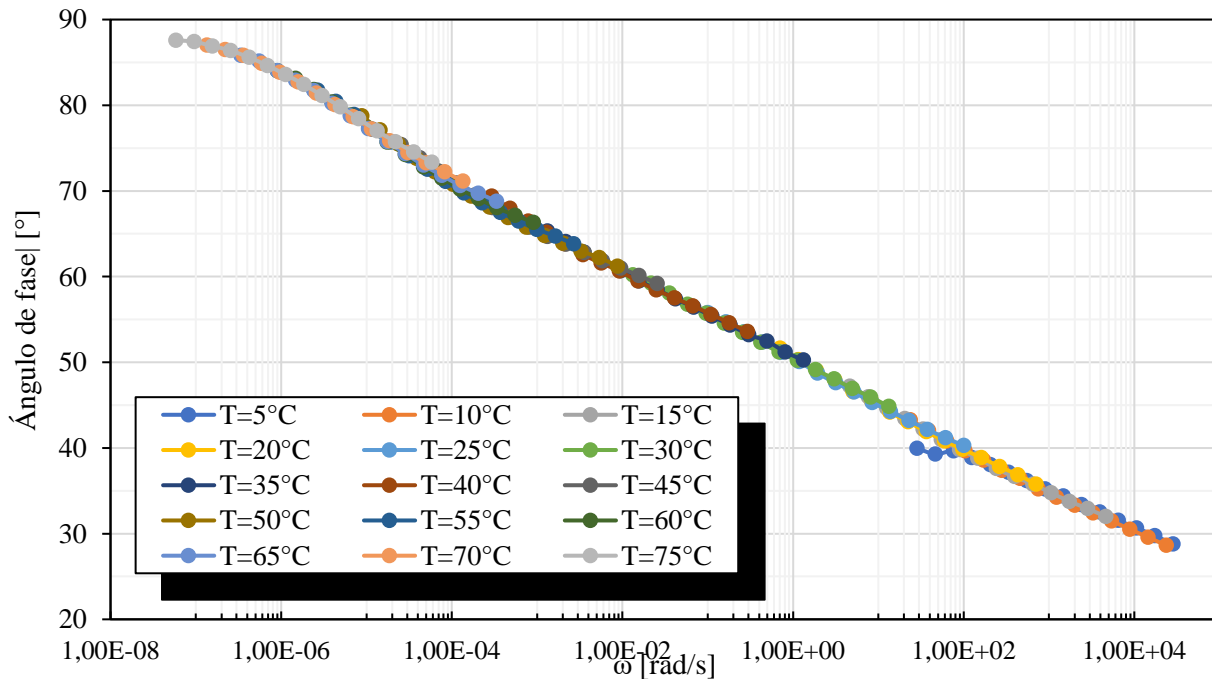


Figura 12.10 Curva maestra de ángulo de fase de la muestra PAV-PO2. (Elaboración propia)

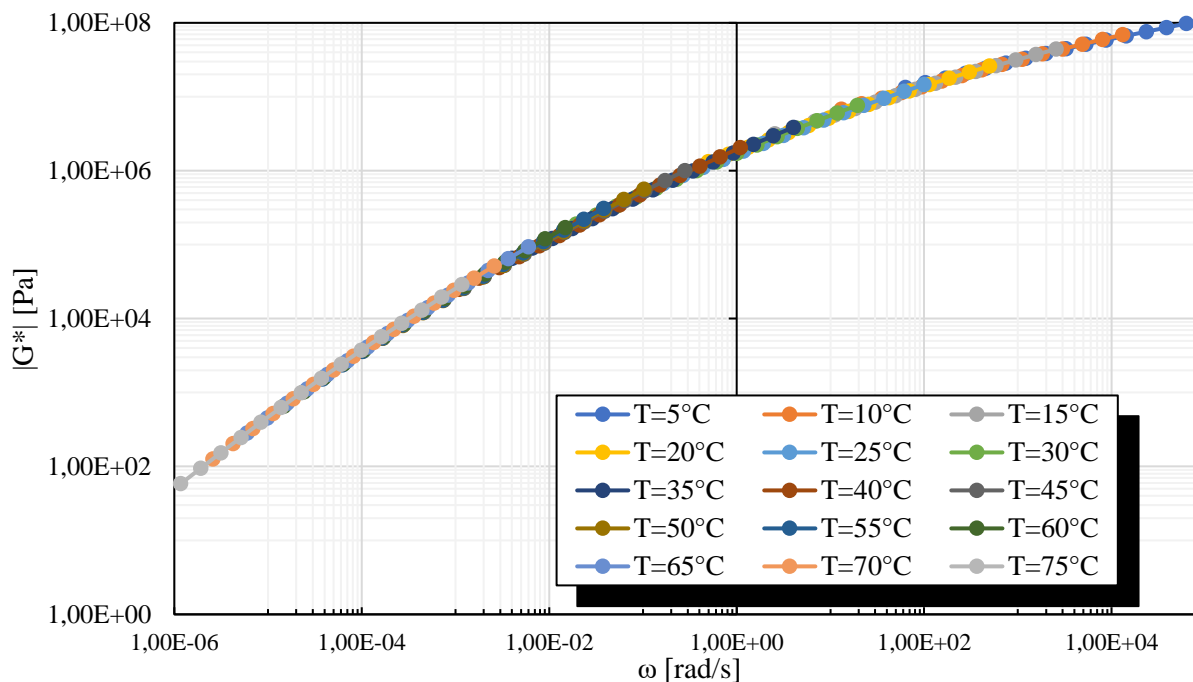


Figura 12.11 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO3. (Elaboración propia)

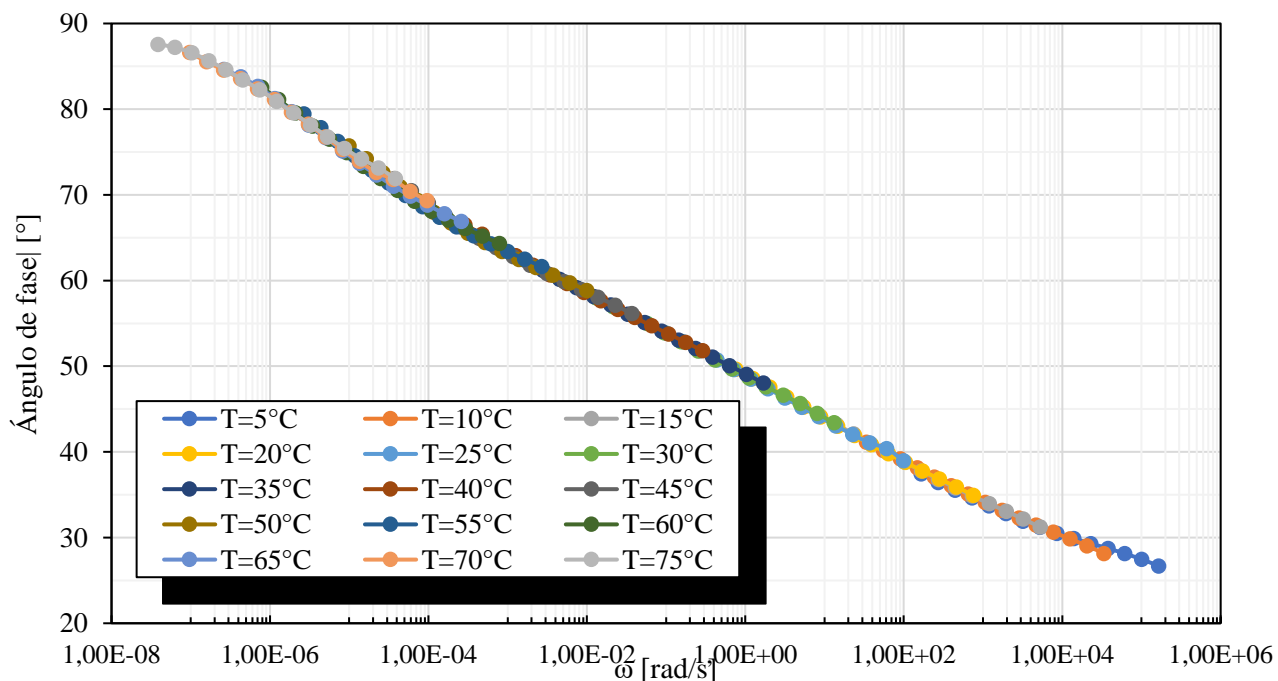


Figura 12.12 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO3. (Elaboración propia)

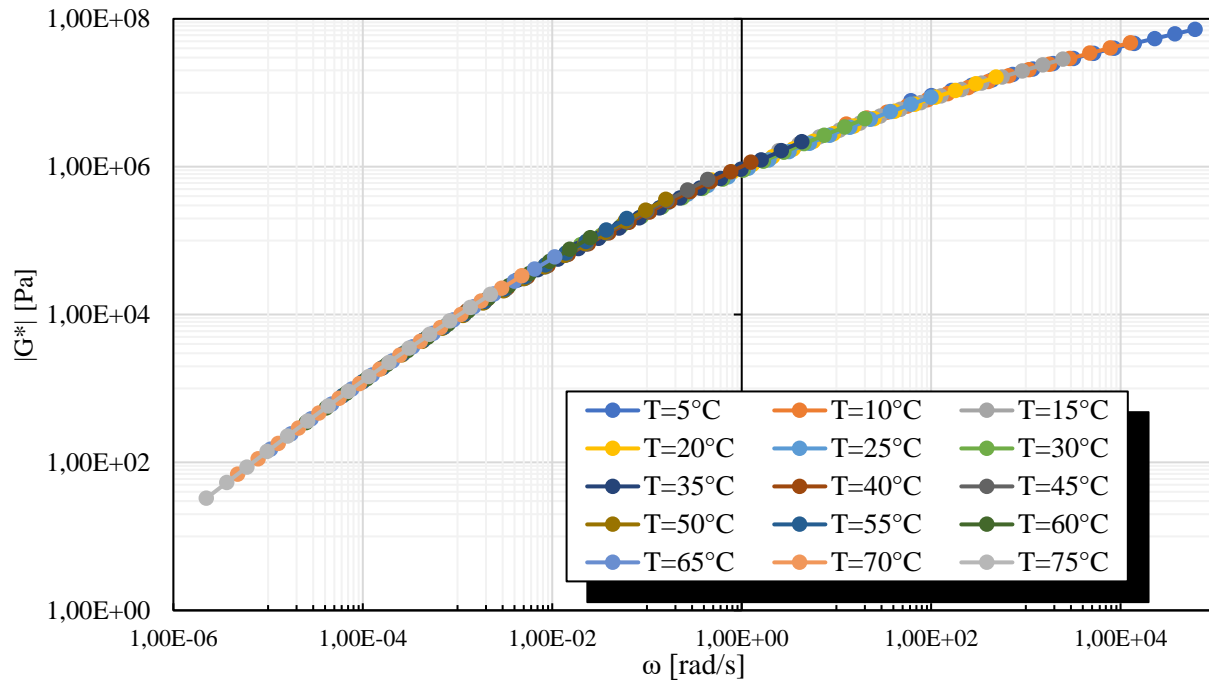


Figura 12.13 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO4. (Elaboración propia)

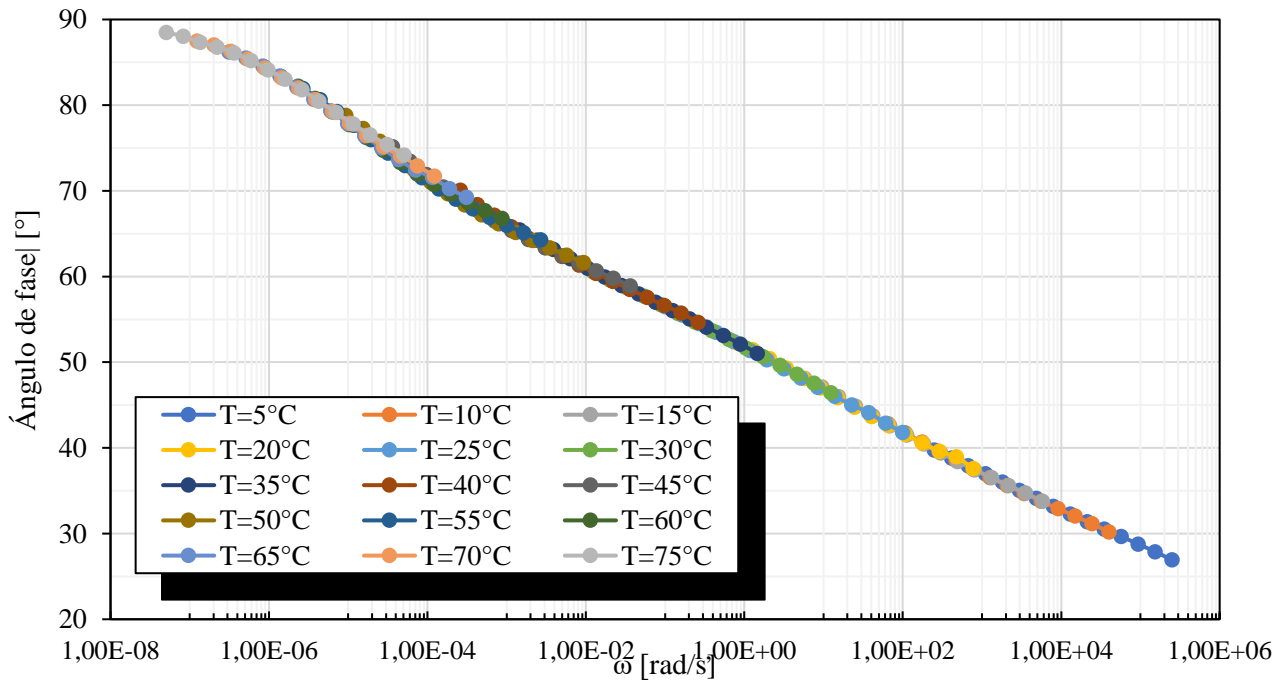


Figura 12.14 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO4. (Elaboración propia)

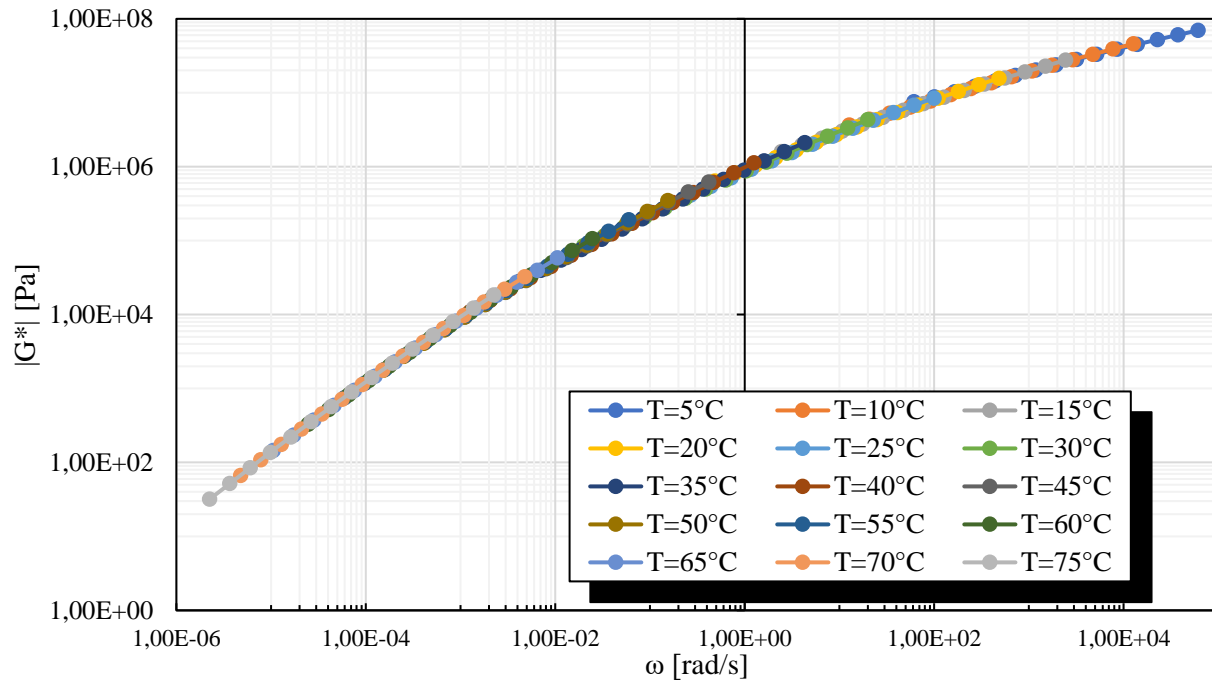


Figura 12.15 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO5. (Elaboración propia)

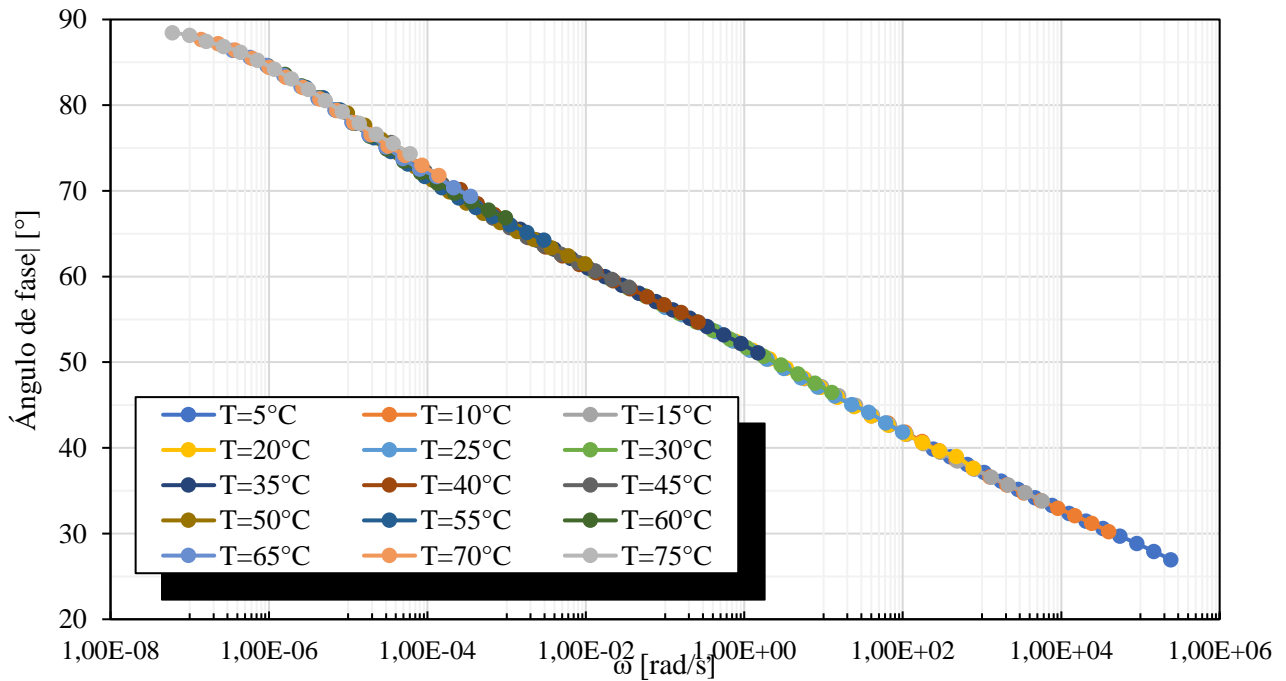


Figura 12.16 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO5. (Elaboración propia) . (Elaboración propia)

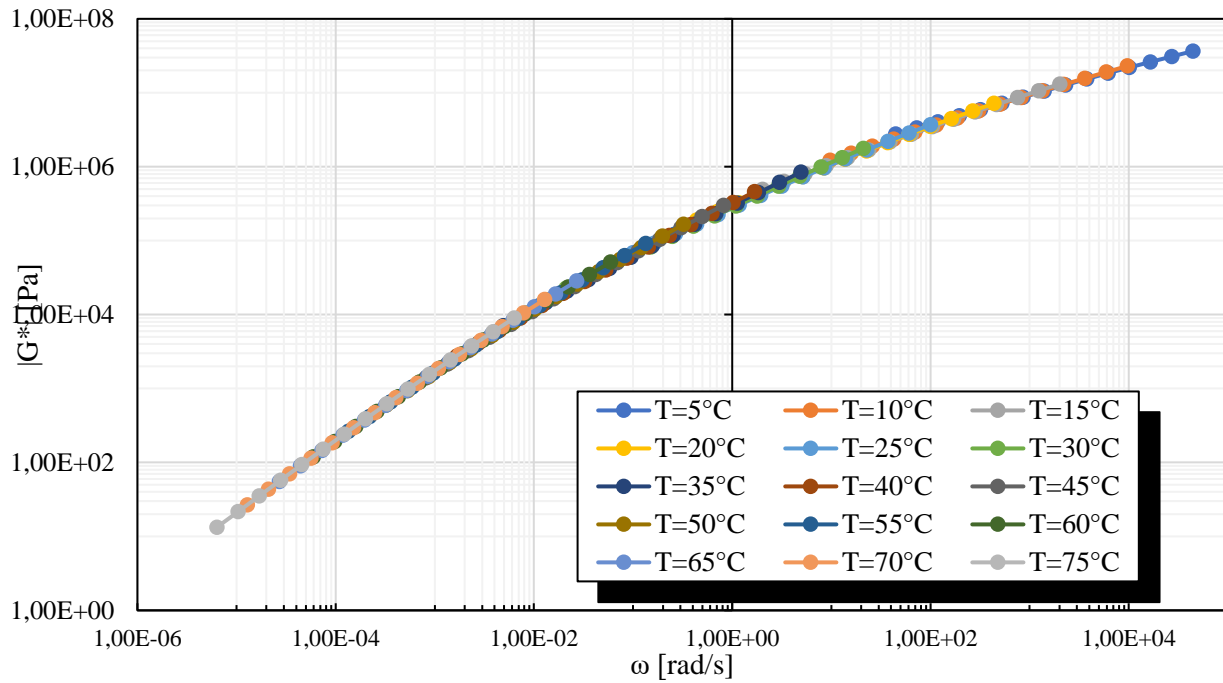


Figura 12.17 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO6. (Elaboración propia)

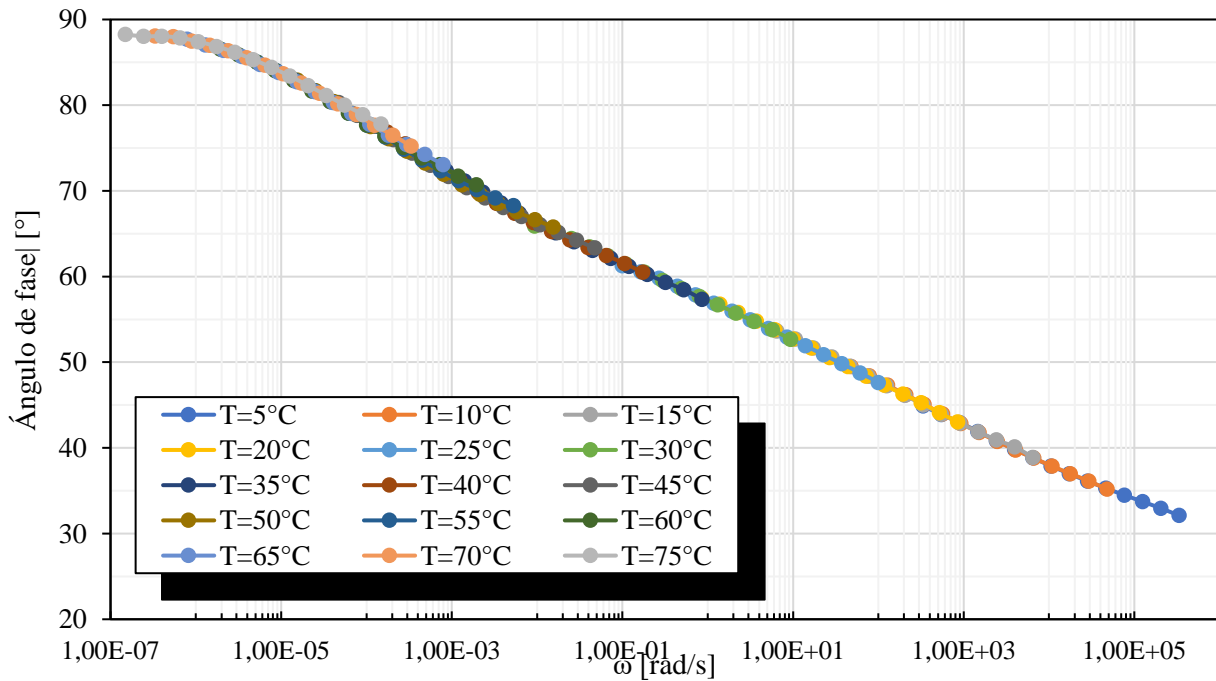


Figura 12.18 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO6. (Elaboración propia)

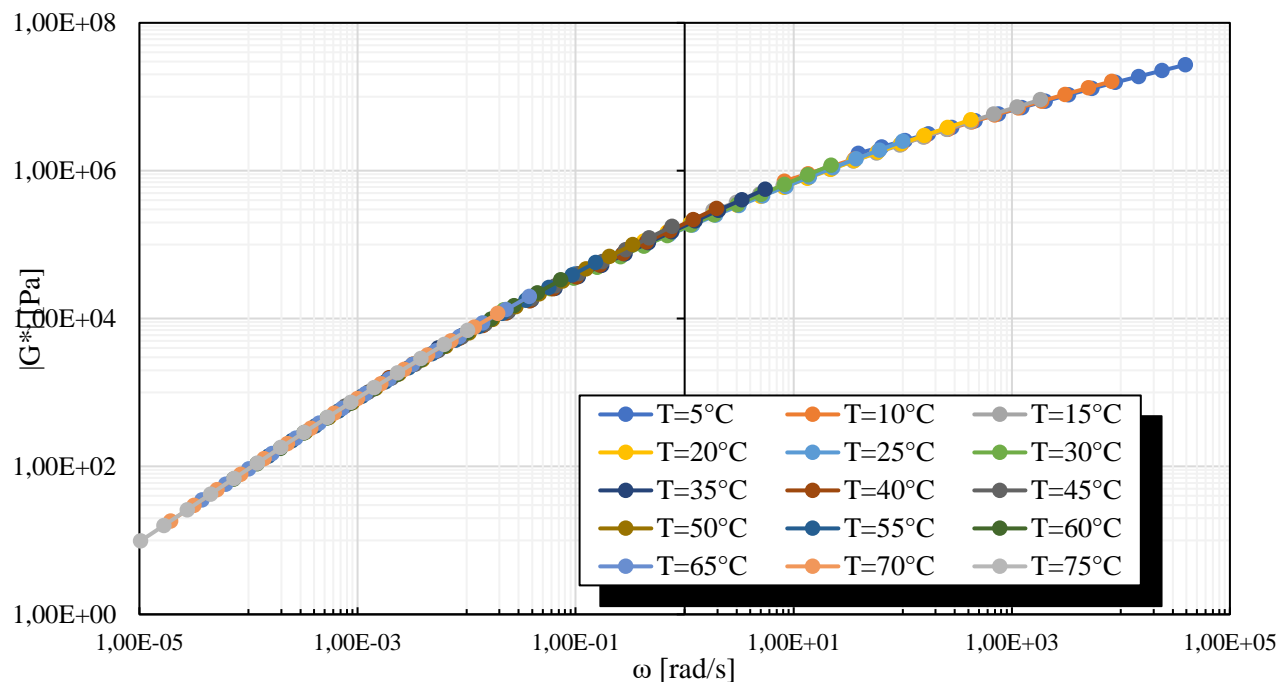


Figura 12.19 Curva maestra de módulo dinámico de los valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO9. (Elaboración propia)

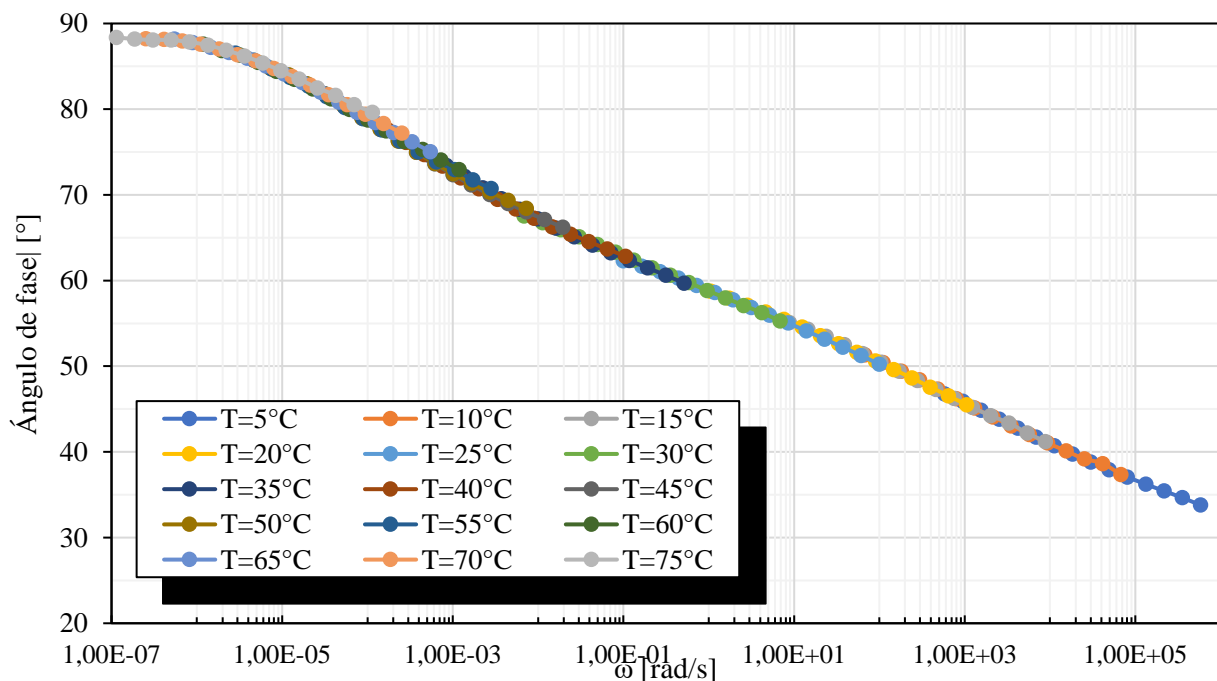


Figura 12.20 Curva maestra de ángulo de fase de valores promedio de las muestras P1 y P2 para la muestra PAV-PO9. (Elaboración propia)

12.3 Cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con rejuvenecedor encapsulado

Se presentan las curvas maestras del módulo dinámico y ángulo de fase, para las muestras de cemento asfáltico CA-24 con envejecimiento PAV mezclado con diferentes proporciones de líquido pirolítico encapsulado.

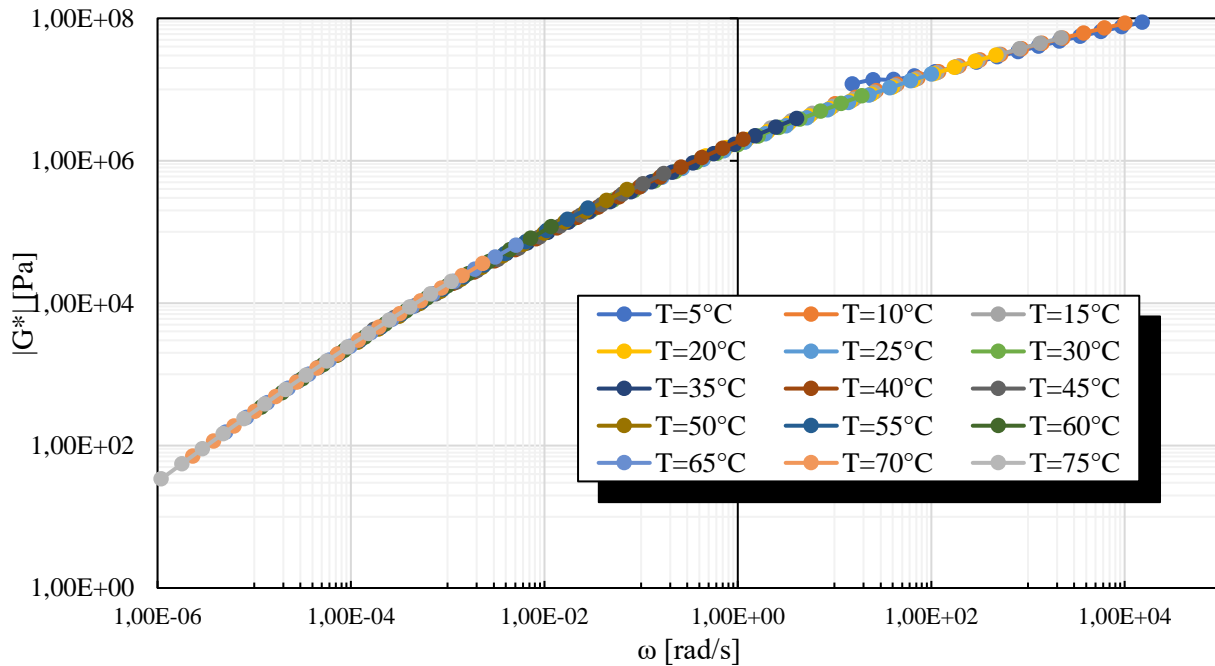


Figura 12.21 Curva maestra de módulo dinámico de la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia)

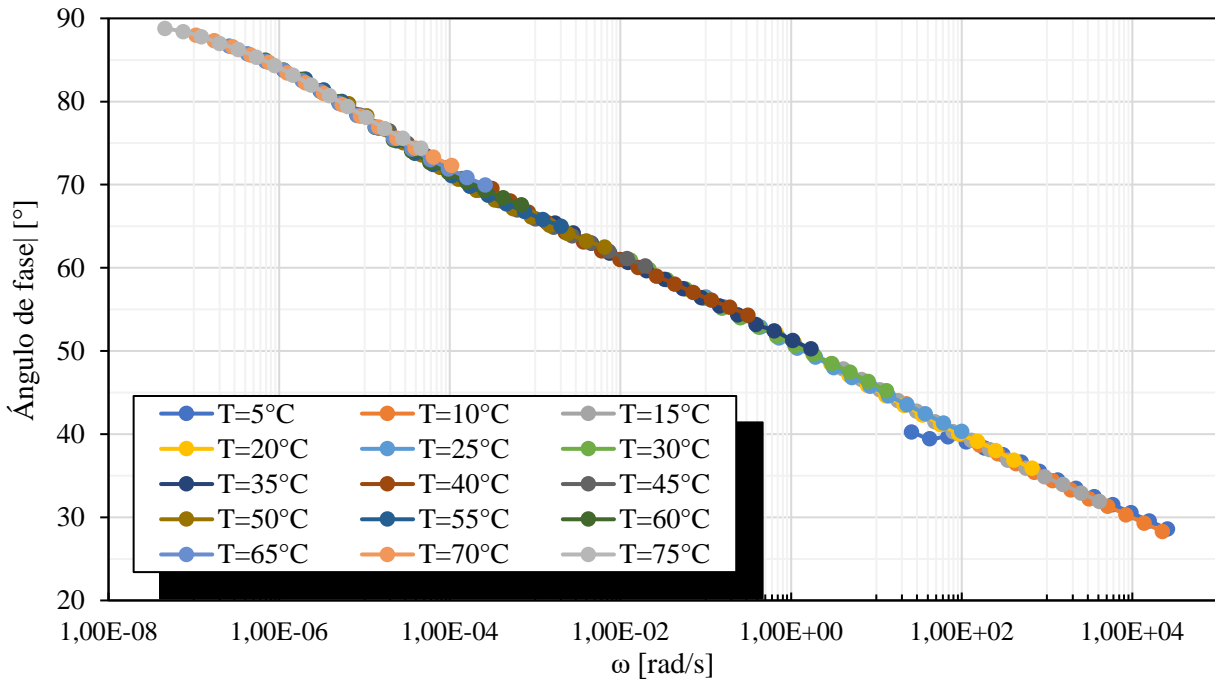


Figura 12.22 Curva maestra de ángulo de fase de la muestra PAV-POC6. (Elaboración propia)

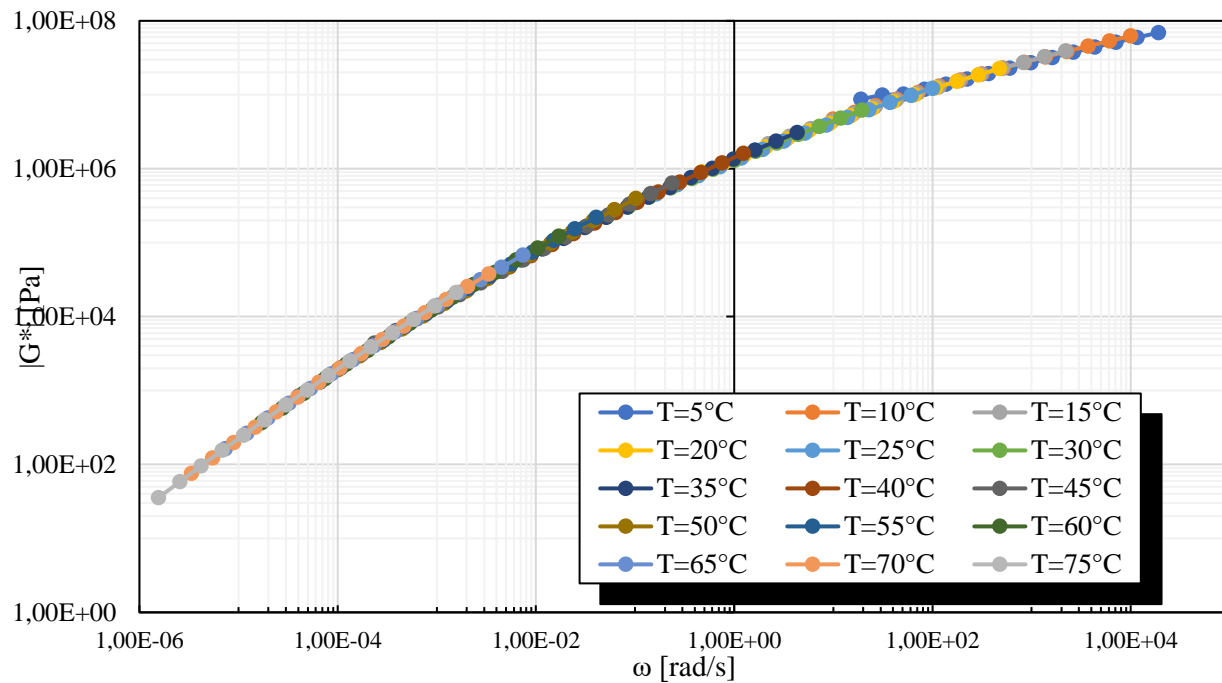


Figura 12.23 Curva maestra de módulo dinámico de la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia)

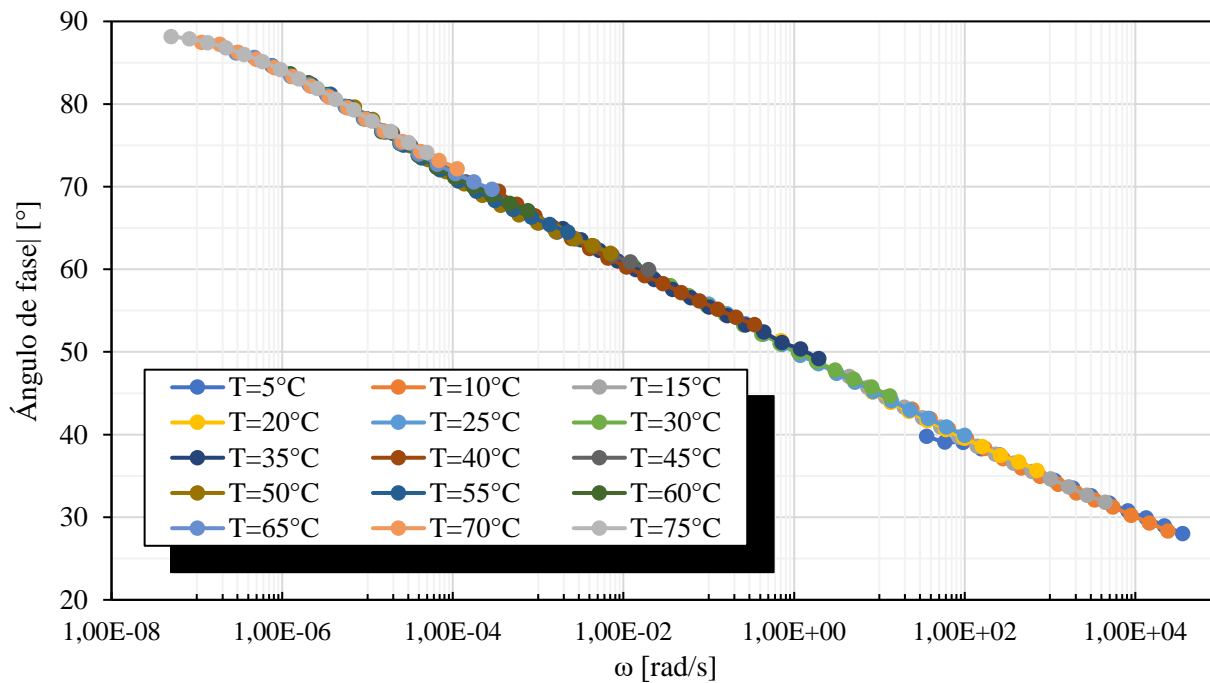


Figura 12.24 Curva maestra de ángulo de fase de la muestra PAV-POC9. (Elaboración propia)

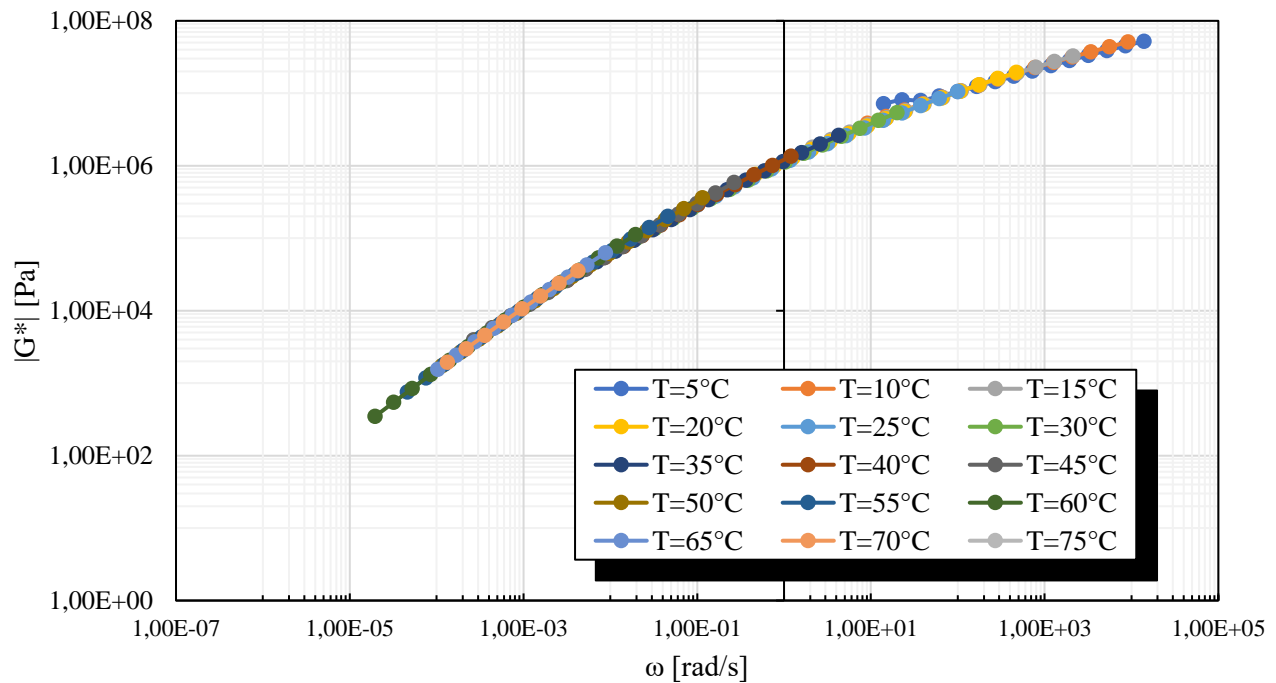


Figura 12.25 Curva maestra de módulo dinámico del ensayo P1 de la muestra PAV-POC12. (Elaboración propia)

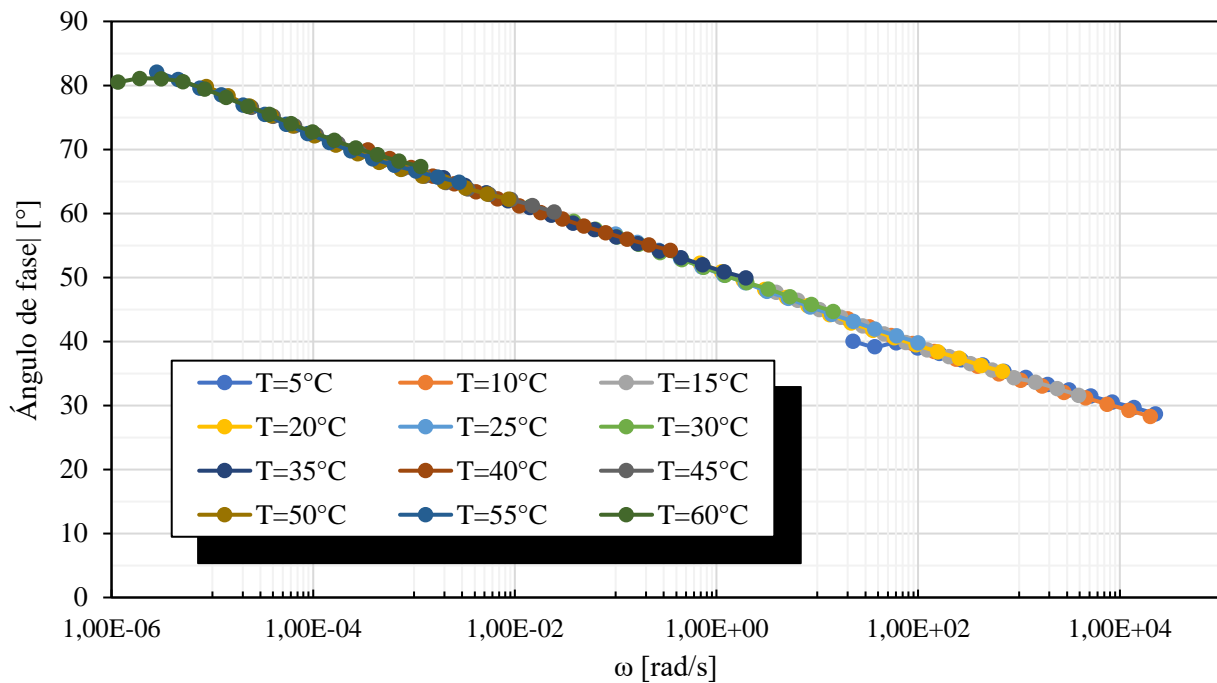


Figura 12.26 Curva maestra de ángulo de fase del ensayo P1 de la muestra PAV-POC12. (Elaboración propia)

12.4 Coeficientes de variación (α_T) y constantes de ecuación WLF

Se presentan los coeficientes de variación utilizados para la construcción de las curvas maestras y las constantes de la ecuación de William-Landel-Ferry (WLF; Ecuación 3-1). . (Elaboración propia)

Tabla 12-1 Coeficientes de variación (α_T) para curvas maestras del módulo dinámico de corte $|G^*|$

Temperatura [°C]	Muestra												
	CA-SE	CA-RTFO	CA-PAV	PAV-PO1	PAV-PO2	PAV-PO3	PAV-PO4	PAV-PO5	PAV-PO6	PAV-PO9	PAV-POC6	PAV-POC9	PAV-POC12
5	881,58	548,36	419,06	134,25	184,93	629,29	613,26	612,80	444,94	391,37	152,38	190,10	139,37
10	175,53	122,01	131,95	104,12	108,96	131,26	127,29	126,87	96,81	82,40	101,14	99,66	91,48
15	32,78	23,97	27,29	23,57	24,87	25,55	24,60	24,46	20,26	18,25	21,98	22,11	21,24
20	5,86	4,81	5,35	4,94	4,87	4,98	4,84	4,84	4,37	4,22	4,66	4,74	4,71
25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	0,19	0,20	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,19	0,19	0,20
35	0,041	0,036	0,037	0,041	0,036	0,040	0,043	0,043	0,049	0,055	0,040	0,043	0,043
40	0,014	0,011	0,010	0,011	0,011	0,011	0,012	0,013	0,017	0,020	0,011	0,012	0,012
45	5,64E-03	3,93E-03	1,77E-03	1,85E-03	1,63E-03	2,81E-03	4,38E-03	4,17E-03	8,15E-03	7,70E-03	1,72E-03	2,36E-03	2,67E-03
50	2,52E-03	1,49E-03	6,50E-04	7,82E-04	6,88E-04	1,03E-03	1,58E-03	1,54E-03	3,24E-03	3,34E-03	7,18E-04	1,02E-03	1,15E-03
55	1,21E-03	6,11E-04	2,42E-04	3,05E-04	2,70E-04	3,82E-04	6,10E-04	5,97E-04	1,34E-03	1,53E-03	2,83E-04	4,05E-04	4,60E-04
60	6,09E-04	2,66E-04	9,34E-05	1,23E-04	1,12E-04	1,48E-04	2,51E-04	2,47E-04	5,95E-04	7,33E-04	1,18E-04	1,70E-04	1,96E-04
65	3,07E-04	1,18E-04	3,79E-05	5,20E-05	4,84E-05	5,99E-05	1,07E-04	1,06E-04	2,70E-04	3,76E-04	5,09E-05	7,39E-05	8,77E-05
70	1,62E-04	5,55E-05	1,64E-05	2,30E-05	2,16E-05	2,58E-05	4,77E-05	4,77E-05	1,28E-04	1,93E-04	2,31E-05	3,34E-05	4,23E-05
75	9,15E-05	2,69E-05	7,39E-06	1,07E-05	1,01E-05	1,17E-05	2,23E-05	2,24E-05	6,33E-05	1,02E-04	1,09E-05	1,56E-05	4,23E-06

Tabla 12-2 Coeficientes de variación (α_r) para curvas maestras del ángulo de fase δ° . (Elaboración propia)

Temperatura [°C]	Muestra												
	CA-SE	CA-RTFO	CA-PAV	PAV-PO1	PAV-PO2	PAV-PO3	PAV-PO4	PAV-PO5	PAV-PO6	PAV-PO9	PAV-POC6	PAV-POC9	PAV-POC12
5	14635,98	1589,30	821,41	209,65	284,07	1657,50	2512,43	2421,62	3346,43	5810,51	257,84	358,00	226,03
10	1670,90	300,57	271,03	225,09	236,71	337,88	400,75	399,16	477,99	675,74	224,96	240,11	200,87
15	183,74	44,41	47,61	44,98	46,47	52,98	58,04	57,67	64,73	88,52	41,04	44,43	39,06
20	16,53	6,07	7,33	7,10	7,04	7,59	7,78	7,76	8,49	10,56	6,68	7,06	6,86
25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	0,05	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,09	0,07	0,13	0,13	0,14
35	0,002	0,008	0,016	0,018	0,013	0,017	0,015	0,015	0,009	0,005	0,017	0,019	0,020
40	4,16E-04	1,84E-03	2,71E-03	3,09E-03	2,93E-03	2,90E-03	2,61E-03	2,61E-03	1,74E-03	1,05E-03	3,12E-03	3,42E-03	3,50E-03
45	1,22E-04	4,66E-04	3,15E-04	3,17E-04	2,56E-04	3,72E-04	3,64E-04	3,50E-04	4,73E-04	1,95E-04	1,96E-04	1,97E-04	2,45E-04
50	4,75E-05	1,35E-04	8,75E-05	1,10E-04	8,79E-05	1,00E-04	9,37E-05	9,82E-05	1,55E-04	7,29E-05	6,51E-05	7,06E-05	8,73E-05
55	2,02E-05	4,47E-05	2,40E-05	3,25E-05	2,67E-05	2,68E-05	2,69E-05	2,95E-05	5,30E-05	2,82E-05	2,02E-05	2,24E-05	2,80E-05
60	8,02E-06	1,62E-05	7,34E-06	1,06E-05	9,02E-06	7,88E-06	8,74E-06	9,69E-06	1,94E-05	1,19E-05	6,91E-06	7,59E-06	1,16E-05
65	2,81E-06	6,07E-06	2,51E-06	3,89E-06	3,36E-06	2,62E-06	3,12E-06	3,52E-06	7,89E-06	5,44E-06	2,60E-06	2,89E-06	4,04E-06
70	1,51E-06	2,46E-06	9,42E-07	1,56E-06	1,35E-06	9,67E-07	1,23E-06	1,39E-06	3,33E-06	2,53E-06	1,06E-06	1,13E-06	1,54E-06
75	4,00E-07	1,01E-06	3,83E-07	6,77E-07	5,84E-07	3,85E-07	5,06E-07	6,06E-07	1,49E-06	1,14E-06	4,59E-07	4,98E-07	1,54E-06

Tabla 12-3 Constantes k_1 y k_2 para ajuste mediante ecuación WLF de la curva maestra de módulo dinámico $|G^*|$.
(Elaboración propia)

Muestra	k_1	k_2
CA-SE	12,34	98,39
CA-RTFO	18,46	146,13
CA-PAV	27,92	210,90
PAV-PO1	35,86	291,97
PAV-PO2	32,53	258,50
PAV-PO3	22,42	171,18
PAV-PO4	18,86	148,61
PAV-PO5	18,89	148,71
PAV-PO6	15,40	131,24
PAV-PO9	14,35	125,51
PAV-POC6	34,83	281,74
PAV-POC9	28,62	234,34
PAV-POC12	41,16	209,02

Tabla 12-4 Constantes k_1 y k_2 para ajuste mediante ecuación WLF de la curva maestra de ángulo de fase δ° .
(Elaboración propia)

Muestra	k_1	k_2
CA-SE	21,83	112,98
CA-RTFO	29,98	186,71
CA-PAV	46,95	294,28
PAV-PO1	61,05	409,60
PAV-PO2	55,67	364,20
PAV-PO3	38,45	234,92
PAV-PO4	32,19	192,60
PAV-PO5	31,21	187,53
PAV-PO6	23,45	140,85
PAV-PO9	22,67	127,81
PAV-POC6	65,69	428,05
PAV-POC9	56,17	362,76
PAV-POC12	51,83	346,65