



**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**EVALUACIÓN REOLÓGICA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS  
ENVEJECIDOS, MODIFICADOS CON UN LÍQUIDO PIROLÍTICO  
PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS MINEROS, COMPARADO CON  
UN REJUVENECEDOR COMERCIAL**

**CAMILA CONSTANZA ALBORNOZ PAYACÁN**

**Ingeniero Civil**

**Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil**

Agosto de 2024





**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**EVALUACIÓN REOLÓGICA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS  
ENVEJECIDOS, MODIFICADOS CON UN LÍQUIDO PIROLÍTICO  
PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS MINEROS, COMPARADO CON  
UN REJUVENECEDOR COMERCIAL**

Memoria de Título y Tesis de Grado presentada por  
**CAMILA CONSTANZA ALBORNOZ PAYACÁN**

Como requisito parcial para optar al título de  
**Ingeniero Civil**  
y al grado de  
**Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
**Rodrigo Andrés Delgadillo Sturla**

Agosto de 2024



TITULO DE LA TESIS:

**EVALUACIÓN REOLÓGICA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS ENVEJECIDOS, MODIFICADOS CON UN LÍQUIDO PIROLÍTICO PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS MINEROS, COMPARADO CON UN REJUVENECEDOR COMERCIAL.**

AUTOR:

**CAMILA CONSTANZA ALBORNOZ PAYACÁN**

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil y el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María

Rodrigo Delgadillo Sturla .....

Luis Arteaga Pérez .....

Cristian Diaz Montecino .....

Valparaíso, Chile, agosto de 2024



# Agradecimientos

Gracias a mi mamá, por sacarnos adelante a mi hermano y a mí dándonos la posibilidad de estudiar sin ninguna otra preocupación. Por siempre estar a mi lado, por la paciencia de todos estos años, por siempre apañarme a mis locuras, por hacerme la gran mujer que soy hoy en día, por confiar en mí y lanzarme a la vida, por darme la independencia que necesitaba y por nunca soltar mi mano.

Gracias a mi abuela mami, hermanos, familia y a mis perros Apolo, Nami y Tommy por ser mi motivación durante toda mi etapa universitaria y vida. Gracias a mi amiga Pilar, por siempre estar ahí hasta en mis momentos de mayor fragilidad, por las infinitas horas de estudio, por el apaño durante toda nuestra etapa universitaria, y la amistad que llevaré conmigo siempre.

Gracias a Cecilia, mi mamá postiza. Por darme el apoyo emocional durante todos estos años, que a pesar de la distancia siempre sentí un calorcito en el corazón para no desistir.

Quiero agradecer a la universidad y región de Valparaíso por ser mi hogar por unos largos 8 años de mi vida, por ser mi lugar seguro, donde pude estudiar tranquila y bien acompañada, con compañeras/os y profesores que siempre confiaron y trataron con respeto y cariño. En especial, quiero agradecer a mi profesor guía Rodrigo Delgadillo, por creer en mí y en mis capacidades incluso más que yo misma. Por la paciencia, enseñanza, compromiso y tiempo dedicado para la realización de este trabajo.

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 ID21110127, “Desarrollo de productos rejuvenecedores a partir de la pirólisis de neumáticos fuera de uso para el mejoramiento de las propiedades reológicas y de autorreparación en cementos asfálticos envejecidos”.

Finalmente, agradecer a la Dirección General de Investigación, Innovación y Postgrado de la Universidad Técnica Federico Santa María por el apoyo a través de la beca de arancel que hizo posible el desarrollo de esta tesis.



# Dedicatoria

*A mi mamá y mami, por criarme, cuidarme y siempre creer en mí.*



# Resumen

En los últimos años, múltiples investigaciones en la industria del asfalto han centrado los esfuerzos en nuevos productos para promover el desarrollo de pavimentos asfálticos más sustentables y resilientes. Un ejemplo de este avance es la valorización de residuos industriales críticos, como los neumáticos mineros fuera de uso (NFU), que pueden ser térmica y químicamente tratados para el desarrollo de nuevos productos de alto valor en la industria del asfalto.

Se ha demostrado que la fracción líquida obtenida del proceso de pirólisis de NFU puede difundirse en el cemento asfáltico envejecido, reduciendo su viscosidad y autorreparando sus microgrietas en un 100%. Estos resultados demostraron que el líquido pirolítico de neumáticos (LPN) puede ser potencialmente utilizado como un producto rejuvenecedor de asfaltos de alto valor.

En este contexto, en el presente trabajo de tesis se evalúa el efecto sobre las propiedades reológicas y mecánicas de cementos asfálticos envejecidos de un líquido pirolítico optimizado químicamente proveniente de neumáticos mineros fuera de uso (LPO-M), aplicado en tres tipos de cementos asfálticos disponibles en Chile: un primer asfalto tradicional CA-24, un segundo asfalto tradicional CA-14 y el tercer ligante recuperado a partir de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Además, se realiza una comparación entre el efecto del LPO-M con un rejuvenecedor comercial (RC), determinando las dosis óptimas de aplicación en base al desempeño de las muestras a altas temperaturas.

En primer lugar, los cementos asfálticos tradicionales CA-24 y CA-14 fueron sometidos a un envejecimiento secundario (PAV) en condiciones de laboratorio para ser mezclados con los rejuvenecedores. Mientras que, el ligante proveniente de RAP fue utilizado en su estado original sin envejecer. Este último ligante RAP proviene de un fresado de carpeta asfáltica tipo CA-24 de una ruta nacional (H-35) construida en el año 2002.

El líquido pirolítico fue mezclado con los cementos asfálticos CA-24 y CA-14 con envejecimiento PAV y el RAP en las siguientes dosis: CA-24 en 3, 6, 9 y 12%, CA-14 en 3, 6 y 9% y RAP en 3, 6, 9, 12, 15 y 18% p/p de ligante. Mientras que, el rejuvenecedor comercial fue mezclado en las siguientes dosis: CA-24 en 3, 6 y 9%, CA-14 en 3, 6 y 9% y RAP en 3, 6, 9 y 12% p/p de ligante. El efecto rejuvenecedor del LPO-M y RC en sus diferentes dosis se fue evaluando con la capacidad de restaurar las propiedades reológicas del cemento asfáltico, es decir, la capacidad de disminuir el módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) y aumentar el ángulo de fase ( $\delta$ ) de un determinado ligante a una cierta dosis de rejuvenecedor.

Se realiza una caracterización reológica de las muestras con rejuvenecedores (LPO-M o RC), mediante ensayos de barrido de frecuencia y temperatura con un Reómetro de Corte Dinámico (DSR). 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 40°C, con aumentos de 5°C por cada medición.

Luego, se determinan las dosis óptimas de LPO-M y RC en base a su desempeño a altas temperaturas y una verificación a temperaturas intermedias. Este contenido óptimo de rejuvenecedor se determina utilizando el parámetro de ahuellamiento Superpave ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ), para asegurarse que el ligante no será

rejuvenecido más allá de lo necesario y que no se generará potencial ahuellamiento del pavimento. Las dosis óptimas de aplicación se relacionan con el tipo de aplicación que tendrá el rejuvenecedor. En este trabajo se determinan las dosis para dos tipos de aplicaciones, en mezclas con RAP y tratamiento superficiales o encapsulamiento.

Las muestras rejuvenecidas con las dosis óptimas determinadas se caracterizan reológicamente (medición de  $|G^*|$  y  $\delta$ ) en un rango de temperatura de 5°C a 75°C, se determina el grado de desempeño PG, se miden sus propiedades físicas (penetración, punto de ablandamiento y viscosidad a 60°C y 135°C) y se realiza un análisis químico mediante ensayos FTIR. Adicionalmente, se determinan el punto de inflamación y cambio de masa. Finalmente, de manera complementaria se analiza la susceptibilidad al envejecimiento de las muestras rejuvenecidas con dosis óptimas, sometiéndolas a un ciclo adicional de envejecimiento primario (RTFO) y secundario (PAV), y evaluando los cambios generados tanto en el módulo dinámico como el ángulo de fase.

Los principales resultados mostraron que, el rejuvenecedor pirolítico LPO-M presentó un efecto rejuvenecedor sobre todos los ligantes evaluados, registrando propiedades reológicas similares a las de un cemento asfáltico sin envejecer. El LPO-M presenta efectos similares al rejuvenecedor comercial sobre el módulo dinámico ( $|G^*|$ ), a diferencia del ángulo de fase donde ninguna dosis de LPO-M alcanzó el nivel de un ligante sin envejecer. Las dosis óptimas de aplicación para mezclas con RAP del LPO-M son 8,6%, 5,3% y 13,4% para un CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Mientras que, para el RC son 5,9%, 7,6% y 10,3% para un CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Por otro lado, para aplicación superficial o encapsulado las dosis óptimas del LPO-M son 4,0%, 2,9% y 11,0% para un CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Mientras que, para el RC son 3,8%, 5,3% y 8,3% para un CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente.

Al aplicar el LPO-M en dosis óptimas para mezclas en RAP se logra rejuvenecer y alcanzar el grado PG a altas temperaturas de los tres ligantes evaluados, mientras que para bajas temperaturas no se alcanza el grado PG, esto puede atribuirse a su alta volatilidad que al ser sometido a un re-envejecimiento en PAV el líquido no permanece en las concentraciones iniciales.

En general, los resultados mostraron que el rejuvenecedor LPO-M presenta efectos similares al rejuvenecedor comercial. El producto LPO-M evaluado en sus dosis óptimas de aplicación para mezclas en RAP presenta un buen desempeño para el alcance de un PG objetivo, alguna de sus propiedades físicas y la restauración de propiedades reológicas respecto a un producto rejuvenecedor comercial utilizado en la industria, es decir, es un producto rejuvenecedor competitivo y con potencial uso a nivel nacional.



# Abstract

In recent years, multiple investigations in the asphalt industry have focused efforts on new products to promote the development of more sustainable and resilient asphalt pavements. An example of this advanced is the recovery of critical industrial waste, such as out-of-use mining tires (NFU), which can be thermally and chemically treated for the development of new high value products in the industry.

It has been shown that the liquid fraction obtained from the NFU pyrolysis process can diffuse into aged asphalt cement, reducing its viscosity and self-healing its microcracks by 100%. These results demonstrated that tire pyrolytic fluid (LPN) can potentially be use as a high value asphalt rejuvenation product.

In this context, in this thesis work the effect on the rheological and mechanical properties of aged asphalt cements of a chemically optimized pyrolytic liquid from mining tires out of use (LPO-M), applied in three types of asphalt cements, is evaluated available in Chile: a first traditional asphalt CA-24, a second traditional asphalt CA-14 and the third binder recovered from RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). In addition, a comparison is made between the effects of LPO-M with a commercial rejuvenator (RC), determining the optimal application doses based on the performance of the samples at high temperatures.

In first place, the traditional asphalt cements CA-24 and CA-14 were subjected to secondary aging (PAV) under laboratory conditions to be mixed with the rejuvenators. Meanwhile, the binder from RAP was used in its original state without aging. This last RAP binder comes from milling the CA-24 type asphalt layer of a national route (H-35) built in 2002.

The pyrolytic liquid was mixed with the asphalt cements CA-24 and CA-14 with PAV aging and the RAP in the following doses: CA-24 in 3, 6, 9 and 12%, CA-14 in 3, 6 and 9% and the RAP in 3, 6, 9, 12, 15 and 18% w/w of binder. Meanwhile, the commercial rejuvenator was mixed in the following doses: CA-24 in 3, 6 y 9%, CA-14 in 3, 6 y 9% and RAP in 3, 6, 9 and 12% w/w of binder. The rejuvenating effect of LPO-M and RC in their different doses was evaluated with the ability to restore the rheological properties of the asphalt cement, that is, the ability to decrease the dynamic shear modulus ( $|G^*|$ ) and increase the angle phase ( $\delta$ ) of a certain binder to a certain dose of rejuvenator.

A rheological characterization of the samples with the rejuvenators (LPO-M or RC) is carried out, using frequency and temperature sweep tests with a Dynamic Shear Rheometer (DSR). The test frequencies varied between 100 to 0,1 rad/s, obtaining a total of 15 measurements, while the test temperatures varied between 5°C to 40°C, with increases of 5° for each measurement.

Then, the optimal doses of LPO-M and RC are then determined based on their performance at high temperatures and a verification at intermediate temperatures. This optimal rejuvenator content is determined using the Superpave rutting parameter ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ), to ensure that the binder will not be rejuvenated beyond what is necessary and thar potential pavement rutting will not be generated. The optimal application doses are related to the type of application that the rejuvenator will have. In this work, the doses are determined for two types of applications, in mixtures with RAP and surface treatment or encapsulation.

The rejuvenated samples with the determined optimal doses are characterized rheologically (measurement of  $|G^*|$  and  $\delta$ ) in a temperature range of 5°C to 75°C, the degree of PG performance is determined, their physical properties are measured (penetration, softening point and viscosity at 60°C

and 135°C) and a chemical analysis is carried out using FTIR tests. Additionally, the flash point and mass change are determined. Finally, in a complementary manner the susceptibility to aging of the rejuvenated samples with optimal doses is analyzed, additional cycle of primary (RTFO) and secondary (PAV) aging, and evaluating the changes generated in both the dynamic modulus and the angle of phase.

The main results showed that, the pyrolytic rejuvenator LPO-M presented a rejuvenating effect on all the binders evaluated, registering rheological properties similar to those of an unaged asphalt cement. LPO-M presents similar effects to the commercial rejuvenator on the dynamic modulus ( $|G^*|$ ), unlike the phase angle where no dose of LPO-M reached the level of an unaged binder. The optimal application doses for mixtures with RAP of LPO-M are 8,6%, 5,3% and 13,4% for a CA-24, CA-14 and RAP asphalt, respectively. While, for RC they are 5,9%, 7,6% and 10,3% for a CA-24, CA-14 and RAP asphalt, respectively. On the other hand, for surface or encapsulated application, the optimal doses of LPO-M are 4,0%, 2,9% and 11% for a CA-24, CA-14 and RAP, respectively. While, for RC they are 3,8%, 5,3% and 8,3% for a CA-24, CA-14 and RAP, respectively.

By applying the LPO-M in optimal doses for RAP mixtures, it is possible to rejuvenate and reach the PG grade at high temperatures of the three evaluated binders, while at low temperatures the PG grade is not reached, this can be attributed to its high volatility that when subjected to re-aging in PAV the liquid does not remain at the same initial concentrations.

In general, the results showed that the LPO-M rejuvenator presents similar effects to the commercial rejuvenator. The LPO-M product evaluated in its optimal application doses for RAP mixtures presents good performance for reaching the target PG, some of its physical properties and restoration of rheological properties with respect to a commercial rejuvenating product used in the industry, that is, it is a competitive rejuvenating product with potential use at the national level.



# Contenido

Agradecimientos.....	2
Dedicatoria .....	0
Resumen .....	2
Abstract .....	5
Contenido .....	8
Índice de figuras .....	14
Índice de tablas.....	20
Índice de ecuaciones.....	27
Introducción .....	1
Hipótesis.....	4
Objetivos .....	5
Capítulo 1: Marco teórico.....	6
1.1. Características generales de los asfaltos .....	7
1.1.1. Composición química del ligante asfáltico .....	7
1.1.2. Propiedades físicas ligante asfáltico .....	9
1.2. Características reológicas de asfaltos.....	10
1.3. Viscoelasticidad en el dominio de las frecuencias.....	12
1.4. Susceptibilidad del asfalto .....	14
1.4.1. Susceptibilidad a la temperatura y frecuencia de carga .....	14
1.4.2. Susceptibilidad al envejecimiento.....	15
1.5. Superposición de tiempo y temperatura.....	17
1.5.1. Curvas maestras .....	18
1.5.2. Diagramas de black.....	19
1.6. Tipos de deterioros principales en el pavimento asfáltico .....	19
1.6.1. Ahuellamiento.....	19
1.6.2. Agrietamiento por fatiga .....	20
1.6.3. Agrietamiento térmico .....	20
1.7. Especificación por grado de desempeño Superpave (PG) .....	21
1.7.1. Prevención del ahuellamiento .....	22

1.7.2.	Prevención del agrietamiento por fatiga .....	23
1.7.3.	Prevención del agrietamiento térmico.....	23
1.8.	Especificación tradicional .....	25
1.8.1.	Viscosidad.....	25
1.8.2.	Penetración.....	26
1.8.3.	Punto de ablandamiento .....	27
1.8.4.	Punto de inflamación .....	27
1.9.	Rejuvenecedores .....	28
1.9.1.	Efecto del rejuvenecedor.....	29
1.9.2.	Tipos de rejuvenecedores.....	31
1.9.3.	Aplicaciones de rejuvenecedores .....	33
1.9.3.1.	Tratamiento superficial .....	33
1.9.3.2.	Mezclas con uso de RAP .....	34
1.9.3.3.	Encapsulamiento del rejuvenecedor.....	34
1.9.4.	Contenido óptimo de aplicación .....	35
1.10.	Neumáticos fuera de uso y proceso de pirólisis.....	35
Capítulo 2: Materiales y metodología .....		37
2.1.	Materiales y muestras de ensayo.....	38
2.1.1.	Materiales.....	38
2.1.2.	Síntesis y optimización química del líquido pirolítico.....	38
2.1.3.	Mezcla CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP con LPO-M y RC.....	39
2.2.	Metodología de ensayos.....	41
2.2.1.	Caracterización reológica mediante barridos de frecuencia-temperatura .....	41
2.2.1.1.	Condiciones de ensayo, rango de frecuencias y temperatura .....	41
2.2.1.2.	Curvas maestras.....	42
2.2.1.3.	Diagramas de black .....	43
2.2.1.4.	Análisis de repetibilidad .....	43
2.2.2.	Determinación dosis óptima .....	44
2.2.2.1.	Determinación parámetros de ahuellamiento y fatiga .....	44
2.2.2.2.	Estimación de dosis óptimas .....	45
2.2.2.3.	Evaluación de susceptibilidad al envejecimiento .....	47
2.2.3.	Especificación por grado de desempeño Superpave (PG) .....	47
2.2.3.1.	Rango de frecuencia y temperatura .....	48
2.2.3.2.	Metodología del ensayo.....	49
2.2.3.3.	Análisis de repetibilidad .....	49

2.2.4.	Especificaciones tradicionales .....	50
2.2.5.	Ensayos FTIR .....	50
2.3.	Esquema de metodología .....	51
Capítulo 3: Resultados y análisis de ensayos de laboratorio .....		52
3.1.	Resultados barridos de frecuencia-temperatura .....	53
3.1.1.	Propiedades reológicas de muestras originales CA-24, CA-14 y RAP .....	53
3.1.1.1.	Curvas maestras módulo dinámico.....	53
3.1.1.2.	Curvas maestras ángulo de fase.....	54
3.1.2.	Propiedades reológicas de muestras con líquido LPO-M .....	54
3.1.2.1.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-24 con LPO-M .....	55
3.1.2.2.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-14 con LPO-M .....	55
3.1.2.3.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de RAP con LPO-M .....	56
3.1.3.	Propiedades reológicas de muestras con rejuvenecedor comercial (RC).....	57
3.1.3.1.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-24 con RC .....	57
3.1.3.2.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-14 con RC .....	58
3.1.3.3.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de RAP con RC .....	59
3.2.	Resultados para determinación de dosis óptimas.....	59
3.2.1.	Parámetro de ahuellamiento muestras con LPO-M .....	60
3.2.2.	Parámetro de ahuellamiento muestras con RC .....	62
3.2.3.	Dosis óptima para aplicación en mezclas con RAP .....	63
3.2.4.	Dosis óptima para aplicación superficial y con encapsulamiento.....	64
3.2.5.	Verificación de dosis óptimas mediante estimación parámetro de fatiga .....	65
3.3.	Resultados ensayos de muestras con dosis óptimas determinadas.....	66
3.3.1.	Especificación por grado de desempeño (PG) .....	67
3.3.2.	Propiedades físicas mediante ensayos tradicionales .....	67
3.3.3.	Propiedades reológicas de muestras con dosis óptimas de LPO-M y RC.....	68
3.3.3.1.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-24 en dosis óptimas.....	68
3.3.3.2.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-14 en dosis óptimas.....	70
3.3.3.3.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de RAP en dosis óptimas.....	71
3.3.4.	Análisis químico mediante ensayo FTIR .....	72
3.4.	Susceptibilidad al envejecimiento de muestras rejuvenecidas con LPO-M y RC .....	73
3.4.1.	Curvas maestras de muestras re- envejecidas .....	74
3.4.1.1.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-24 en dosis óptimas.....	74
3.4.1.2.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-14 en dosis óptimas.....	76
3.4.1.3.	Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de RAP en dosis óptimas.....	78

3.4.2.	Evaluación susceptibilidad de envejecimiento mediante el parámetro de fatiga .....	80
Capítulo 4: Análisis comparativo de resultados .....		83
4.1.	Comparación de propiedades reológicas de LPO-M y RC .....	84
4.1.1.	Muestras rejuvenecidas con LPO-M en mismas dosis de aplicación .....	84
4.1.2.	Muestras rejuvenecidas con RC en mismas dosis de aplicación.....	85
4.1.3.	Muestras rejuvenecidas con LPO-M y RC aplicadas a un mismo tipo de ligante .....	87
4.2.	Comparación de dosis óptimas y máximas determinadas de LPO-M y RC .....	89
4.2.1.	Análisis resultados dosis óptimas .....	89
4.2.2.	Análisis resultados dosis máximas.....	90
4.3.	Análisis resultados muestras con dosis óptimas .....	91
4.3.1.	Comparación de propiedades reológicas módulo dinámico y ángulo de fase.....	91
4.3.2.	Comparación de especificación PG y ensayos tradicionales .....	92
4.3.3.	Comparación resultados de análisis químico mediante FTIR.....	94
4.4.	Análisis de susceptibilidad al envejecimiento .....	95
4.4.1.	Comparación resultados parámetro de fatiga de muestras re-envejecidas.....	95
4.4.2.	Comparación resultados FTIR de muestras re-envejecidas .....	97
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones.....		99
5.1.	Conclusiones generales.....	99
5.2.	Conclusiones específicas .....	101
5.3.	Futuras investigaciones.....	102
Referencias .....		103
ANEXOS.....		107
7.1.	Anexo 1: Barridos de frecuencia- temperatura .....	108
7.1.1.	CA-24 (SE, RTFO y PAV) .....	108
7.1.2.	CA-14 (SE, RTFO y PAV).....	112
7.1.3.	RAP (SE) .....	117
7.1.4.	CA-24 con LPO-M .....	119
7.1.4.1.	Muestras de CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12%.....	119
7.1.4.2.	Muestras de CA-24 con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV).....	125
7.1.5.	CA-14 con LPO-M .....	129
7.1.5.1.	Muestras de CA-14 con LPO-M en dosis 3, 6 y 9% .....	129
7.1.5.2.	Muestras de CA-14 con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV).....	134
7.1.6.	RAP con LPO-M .....	139
7.1.6.1.	Muestras de RAP con LPO-M en dosis 3, 6 y 9, 12, 15 y 18%.....	139
7.1.6.2.	Muestras de RAP con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV).....	148

7.1.7.	CA-24 con RC .....	152
7.1.7.1.	Muestras de CA-24 con RC en dosis 3, 6 y 9%.....	152
7.1.7.2.	Muestras de CA-24 con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV).....	157
7.1.8.	CA-14 con RC .....	162
7.1.8.1.	Muestras de CA-14 con RC en dosis 3, 6 y 9%.....	162
7.1.8.2.	Muestras de CA-14 con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV).....	166
7.1.9.	RAP con RC.....	171
7.1.9.1.	Muestras de RAP con RC en dosis 3, 6, 9 y 12% .....	171
7.1.9.2.	Muestras de RAP con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV) .....	177
7.2.	Anexo 2: Graficas de barrido frecuencia- temperatura .....	183
7.2.1.	CA-24 (SE, RTFO y PAV) .....	183
7.2.2.	CA-14 (SE, RTFO y PAV) .....	185
7.2.3.	RAP (SE) .....	188
7.2.4.	Ligantes asfálticos con LPO-M aplicado en dosis óptimas (SE) .....	189
7.2.5.	Ligantes asfálticos con RC aplicado en dosis óptimas (SE) .....	191
7.3.	Anexo 3: Diagramas de Black .....	194
7.3.1.	CA-24 (SE, RTFO y PAV) .....	194
7.3.2.	CA-14 (SE, RTFO y PAV) .....	195
7.3.3.	RAP (SE) .....	196
7.3.4.	Ligantes asfálticos con LPO-M aplicado en dosis óptimas (SE) .....	197
7.3.5.	Ligantes asfálticos con RC aplicado en dosis óptimas (SE) .....	198
7.4.	Anexo 4: Análisis de repetibilidad.....	199
7.4.1.	CA-24 (SE, RTFO y PAV) .....	199
7.4.2.	CA-14 (SE, RTFO y PAV) .....	200
7.4.3.	RAP (SE) .....	201
7.4.4.	CA-24 con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV) .....	202
7.4.5.	CA-14 con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV) .....	203
7.4.6.	RAP con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV) .....	204
7.4.7.	CA-24 con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV) .....	206
7.4.8.	CA-14 con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV) .....	207
7.4.9.	RAP con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV).....	208
7.5.	Anexo 5: Factores de corrimiento y coeficientes de ecuación WLF .....	211
7.5.1.	Factores de corrimiento a(T) para curvas maestras .....	211
7.5.2.	Coefficientes de ajuste k1 y k2 de ecuación WLF para curvas maestras .....	216
7.6.	Anexo 6: Coeficientes de ajuste polinómico curvas maestras .....	219

7.6.1.	Ligantes asfálticos sin y con LPO-M en diferentes dosis .....	219
7.6.2.	Ligantes asfálticos con RC en diferentes dosis .....	220
7.7.	Anexo 7: Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase .....	222
7.7.1.	CA-24, CA-14 y RAP (SE, RTFO y PAV).....	222
7.7.1.1.	Muestras medidas en un rango de medición de 5 a 40°C .....	222
7.7.1.2.	Muestras medidas en un rango de medición de 5 a 75°C .....	225
7.7.2.	CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12% .....	226
7.7.3.	CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% .....	227
7.7.4.	RAP con LPO-M en dosis de 3, 6, 9, 12, 15 y 18%.....	228
7.7.5.	CA-24 con RC en dosis de 3, 6 y 9%.....	229
7.7.6.	CA-14 con RC en dosis de 3, 6 y 9%.....	230
7.7.7.	RAP con RC en dosis de 3, 6, 9 y 12%.....	231
7.8.	Anexo 8: Curvas maestras análisis comparativo LPO-M y RC.....	233
7.8.1.	Misma dosis (%) de LPO-M aplicado al CA-24, CA-14 y RAP .....	233
7.8.2.	Misma dosis (%) de RC aplicado al CA-24, CA-14 y RAP .....	236
7.8.3.	Diferentes dosis de LPO-M y RC aplicado al CA-24.....	239
7.8.4.	Diferentes dosis de LPO-M y RC aplicado al CA-14.....	240
7.8.5.	Diferentes dosis de LPO-M y RC aplicado a RAP .....	241

# Índice de figuras

Figura 1.1.1. Composición química del ligante asfáltico, a) ejemplos de moléculas de asfalto y esquema de la estructura química del asfalto. (Papagiannakis, 2008).....	7
Figura 1.1.2. Representación esquemática del modelo coloidal del ligante asfáltico: a) ligante tipo sol, b) ligante tipo sol-gel y c) ligante tipo gel. (Prosperi, 2021).....	8
Figura 1.2.1. Respuesta de un material elástico en el tiempo. (Delgadillo, 2022) .....	10
Figura 1.2.2. Respuesta de un material viscoso en el tiempo. (Delgadillo, 2022) .....	11
Figura 1.2.3. Respuesta de un material viscoelástico en el tiempo a) Deformación en el tiempo frente a una carga constante y b) deformación en el tiempo frente a una descarga en el tiempo (relajación). (Papagiannakis et-al., 2008) .....	11
Figura 1.2.4. Comportamiento viscoelástico del ligante asfáltico, a) modelo análogo mecánico de Burger y b) deformación unitaria en el tiempo debido a esfuerzo constante. (Delgadillo, 2022).....	12
Figura 1.3.1. Desfase entre esfuerzo de corte y deformación de, a) material con respuesta elástica con ángulo de fase igual $0^\circ$ y b) material con respuesta viscosa con ángulo de fase igual a $90^\circ$ . (A. González 2023) .....	12
Figura 1.3.2. Desfase entre esfuerzo de corte y deformación para un material viscoelástico. (A. González 2023) .....	13
Figura 1.3.3. Comparación del comportamiento viscoelástico entre dos ligantes asfálticos. (Delgadillo, 2022).....	14
Figura 1.4.1. Comportamiento del ligante asfáltico frente a cambios de temperatura y frecuencia de carga de sus propiedades viscoelásticas, a) efecto de sobre el comportamiento viscoso y b) efecto sobre la rigidez, módulo dinámico. (Papagiannakis et-al., 2008).....	15
Figura 1.4.2. Cambios en la composición del ligante durante mezclado, compactación y servicio. (Read et al., 2003) .....	16
Figura 1.4.3. Espectros FTIR-ATR de las muestras de ligante asfáltico original (CA-24 en color negro), y del ligante oxidado extraído de RAP (en color rojo). (Informe resultados proyecto FONDEF ID21I10127, 2023) .....	17
Figura 1.5.1. Cambio de datos para construir una curva maestra, a) familia de curvas de un ligante a diferentes temperaturas y frecuencias y b) curvas ajustadas a una temperatura de referencia $T_2$ . (Papagiannakis, 2008) .....	18
Figura 1.5.2. Ejemplo de diagrama de black. (H. Delgado, 2017).....	19
Figura 1.6.1. Ahuellamiento de pavimentos asfálticos. (A. Osorio, 2020) .....	20
Figura 1.6.2. Agrietamiento por fatiga de pavimentos asfálticos. (FHWA, 2014).....	20
Figura 1.6.3. Agrietamiento térmico de pavimentos asfálticos. (Delgadillo,2022).....	21
Figura 1.7.1. Ejemplificación del equipo reómetro de corte dinámico. (Asphalt institute, 1996).....	22
Figura 1.7.2. Ejemplificación del equipo reómetro de viga en flexión (BBR). (Delgadillo, 2022) .....	24
Figura 1.7.3. Gráfica de relación entre la rigidez y el tiempo de carga en ensayo con reómetro de viga en flexión. (Delgadillo, 2022) .....	24
Figura 1.7.4. Resumen de ensayos para especificación por grado de desempeño. (Delgadillo, 2022) ..	25
Figura 1.8.1. Esquema del viscosímetro rotacional. (Papagiannakis et-al., 2008).....	26
Figura 1.8.2. Esquema de ensayo de penetración de ligantes asfálticos. (Delgadillo, 2022) .....	26
Figura 1.8.3. Esquema para ensayo de punto de inflamación en ligantes asfálticos. (Delgadillo, 2022) .....	28
Figura 1.8.4. Especificaciones para cementos asfálticos según grado de viscosidad. (Manual de carreteras V8, 2021) .....	28
Figura 1.9.1. Los efectos del envejecimiento y rejuvenecimiento sobre la estructura coloidal de los ligantes asfálticos. (Behnood, 2019) .....	29

Figura 1.9.2. Efecto de un rejuvenecedor sobre las fracciones SARA de un ligante envejecido usando a) un rejuvenecedor modificado a base de aceite vegetal y b) un rejuvenecedor a base de aceite aromático. (Hassan A. Tabatabaee et. al, 2017).....	30
Figura 1.9.3. Índices de envejecimiento de ligante PEN 70/100 en diferentes condiciones de envejecimiento, a) índice carbonilo y b) índice sulfóxido. (Jing R., 2019).....	30
Figura 1.9.4. Espectros ATR-FTIR del ligante original 50/70, el ligante RAP y las muestras de RAP con rejuvenecedores A, B y C. (Cavalli et. al, 2018).....	30
Figura 1.9.5. Esquema de aplicación de rejuvenecedores como, a) aplicación superficial, b) en mezclas con RAP y c) mediante encapsulamiento. (Informe postulación proyecto FONDEF ID21I10127, 2022).....	33
Figura 1.9.6. Esquema del concepto de auto-reparación extrínseca en materiales bituminosos por la acción de capsulas biopoliméricas que contienen aceite pirolítico como rejuvenecedor. (Norambuena, 2021).....	34
Figura 1.10.1. Proceso de pirólisis realizado en una planta a escala de gramos para producir aceite pirolítico. (Norambuena, 2021).....	36
Figura 2.2.1. Reómetro de corte dinámico Anton Par Rheocompass modelo MCR 301, con muestra a ensayar en platillo de 8 mm. (Elaboración propia).....	41
Figura 2.2.2. Ejemplo de ensayo de barrido de frecuencia - temperatura de una muestra de RAP original (SE) en un rango de medición de 5 a 75°C mediante el equipo DSR. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 2.2.3. Ejemplo de confección de curva maestra del módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) mediante superposición de tiempo-temperatura y uso de planilla de cálculo para una muestra de RAP en estado original (SE) con una temperatura de referencia de 25°C. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 2.2.4. Equipos de medición para ensayos de especificación por grado de desempeño Superpave a) Reómetro de Corte Dinámico (DSR), b) Reómetro de Viga en Flexión (BBR) y c) ejemplo de acondicionamiento de muestras para ensayos en BBR. (Elaboración propia).....	48
Figura 2.3.1. Esquema metodología de ensayos. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 3.1.1. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-24, CA-14 y RAP en estado SE, RTFO y PAV. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 3.1.2. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24, CA-14 Y RAP en estado SE, RTFO y PAV. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 3.1.3. Curvas maestras de CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12% y sin LPO-M en estado de envejecimiento SE, RTFO y PAV del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase.....	55
Figura 3.1.4. Curvas maestras de CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% y sin LPO-M en estado de envejecimiento SE, RTFO y PAV del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 3.1.5. Curvas maestras de RAP con LPO-M en dosis de 3, 6, 9, 12, 15 y 18% y sin LPO-M en estado de envejecimiento SE del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.....	57
Figura 3.1.6. Curvas maestras de CA-24 con RC en dosis de 3, 6 y 9% y sin RC en estado de envejecimiento SE, RTFO y PAV del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 3.1.7. Curvas maestras de CA-14 con RC en dosis de 3, 6 y 9% y sin RC en estado de envejecimiento SE, RTFO y PAV del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 3.1.8. Curvas maestras de RAP con RC en dosis de 3, 6 y 9% y sin RC en estado de envejecimiento SE del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 3.3.1. Curvas maestras del módulo dinámico de corte de CA-24 con LPO-M y RC en dosis de 8,6% y 5,9%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 3.3.2. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24 con LPO-M y RC en dosis de 8,6% y 5,9%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 3.3.3. Curvas maestras del módulo dinámico de corte de CA-14 con LPO-M y RC en dosis de 5,3% y 7,6%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.....	70

Figura 3.3.4. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-14 con LPO-M y RC en dosis de 5,3% y 7,6%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia. ....	70
Figura 3.3.5. Curvas maestras del módulo dinámico de corte de RAP con LPO-M y RC en dosis de 13,4% y 10,3%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia. ....	71
Figura 3.3.6. Curvas maestras del ángulo de fase de RAP con LPO-M y RC en dosis de 13,4% y 10,3%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia. ....	71
Figura 3.4.1. Curvas maestras de CA-24 con LPO-M en dosis de 8,6% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	74
Figura 3.4.2. Curvas maestras de CA-24 con LPO-M en dosis de 8,6% del ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	75
Figura 3.4.3. Curvas maestras de CA-24 con y RC en dosis de 5,9% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	75
Figura 3.4.4. Curvas maestras de CA-24 con RC en dosis de 5,9% ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	76
Figura 3.4.5. Curvas maestras de CA-14 con LPO-M en dosis de 5,3% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	76
Figura 3.4.6. Curvas maestras de CA-14 con LPO-M en dosis de 5,3% del ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	77
Figura 3.4.7. Curvas maestras de CA-14 con RC en dosis de 7,6% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	77
Figura 3.4.8. Curvas maestras de CA-14 con RC en dosis de 7,6% ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	78
Figura 3.4.9. Curvas maestras de RAP con LPO-M en dosis de 13,4% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	78
Figura 3.4.10. Curvas maestras de RAP con LPO-M en dosis de 13,4% ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	79
Figura 3.4.11. Curvas maestras de RAP con RC en dosis de 10,3% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	79
Figura 3.4.12. Curvas maestras de RAP con RC en dosis de 10,3% ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV. ....	80
Figura 4.1.1. Curvas maestras del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 3%. Fuente: Elaboración propia. ....	84
Figura 4.1.2. Curvas maestras del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 9%. Fuente: Elaboración propia. ....	85
Figura 4.1.3. Curvas maestras del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 3%. Fuente: Elaboración propia. ....	86
Figura 4.1.4. Curvas maestras del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 9%. Fuente: Elaboración propia. ....	87
Figura 4.1.5. Curvas maestras de CA-24 con RC y LPO-M en dosis de 6 y 9% del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia. ....	87
Figura 4.1.6. Curvas maestras de CA-14 con RC y LPO-M en dosis de 6 y 9% del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia. ....	88
Figura 4.1.7. Curvas maestras de RAP con RC y LPO-M en dosis de 9 y 12% del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia. ....	88
Figura 4.2.1. Comparación de resultados de $ G^* /\text{sen}(\delta)$ de muestras con LPO-M y RC en diferentes dosis con el ligante sin envejecer. Fuente: Elaboración propia. ....	89
Figura 4.2.2. Gráficas comparativas $ G^* /\text{sen}(\delta)$ v/s dosis de aplicación de LPO-M y RC. Fuente: Elaboración propia. ....	90
Figura 4.3.1. Comparación de resultados de modulo dinámico de corte ( $ G^* $ y $\delta$ ) de muestras con LPO-M y RC en dosis óptimas, a) curvas maestras del CA-24 de y b) valores de $ G^* $ medidos a frecuencias de 0,0001 rad/s, 0,01 rad/s y 100 rad/s. Fuente: Elaboración propia. ....	92
Figura 4.3.2. Comparación de resultados de ángulo de fase ( $\delta$ ) entre muestras con LPO-M y RC en dosis óptimas, a) curvas maestras del CA-24 de y b) valores de $\delta$ medidos a frecuencias de 0,0001 rad/s, 0,01 rad/s y 100 rad/s. Fuente: Elaboración propia. ....	92

Figura 4.3.3. Gráfica comparativa de índices carbonilo, sulfóxido y combinado para las muestras sin y con adición de LPO-M y RC en sus dosis óptimas. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 4.3.4. Gráfica comparativa de índices carbonilo, sulfóxido y combinado para las muestras sin y con adición de LPO-M y RC en diferentes dosis de aplicación. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 4.4.1. Gráfica comparativa de la variación porcentual de $ G^* Sen(\delta)$ de las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas respecto al ligante original a) variación de RTFO respecto al SE y b) variación del de PAV respecto al SE. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura 4.4.2. Gráfica comparativa de índices carbonilo, sulfóxido y combinado para las muestras sin y con adición de LPO-M y RC en sus dosis óptimas. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura 7.2.1. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 SE. (Elaboración propia).....	183
Figura 7.2.2. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 SE. (Elaboración propia).....	183
Figura 7.2.3. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 RTFO. (Elaboración propia).....	184
Figura 7.2.4. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 RTFO. (Elaboración propia).....	184
Figura 7.2.5. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 PAV. (Elaboración propia).....	184
Figura 7.2.6. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 PAV. (Elaboración propia).....	185
Figura 7.2.7. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 SE. (Elaboración propia).....	185
Figura 7.2.8. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 SE. (Elaboración propia).....	186
Figura 7.2.9. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 RTFO. (Elaboración propia).....	186
Figura 7.2.10. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 RTFO. (Elaboración propia).....	186
Figura 7.2.11. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 PAV. (Elaboración propia).....	187
Figura 7.2.12. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 PAV. (Elaboración propia).....	187
Figura 7.2.13. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP SE. (Elaboración propia).....	188
Figura 7.2.14. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP SE. (Elaboración propia).....	188
Figura 7.2.15. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 8,6% de LPO-M SE. (Elaboración propia).....	189
Figura 7.2.16. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 8,6% de LPO-M SE. (Elaboración propia).....	189
Figura 7.2.17. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 5,3% de LPO-M SE. (Elaboración propia).....	190
Figura 7.2.18. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 5,3% de LPO-M SE. (Elaboración propia).....	190
Figura 7.2.19. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP 13,4% de LPO-M SE. (Elaboración propia).....	190
Figura 7.2.20. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP 13,4% de LPO-M SE. (Elaboración propia).....	191
Figura 7.2.21. Gráfico de modulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 5,9% de RC SE. (Elaboración propia).....	191
Figura 7.2.22. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 5,9% de RC SE. (Elaboración propia).....	192

Figura 7.2.23. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 7,6% de RC SE. (Elaboración propia).....	192
Figura 7.2.24. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 7,6% de RC SE. (Elaboración propia).....	192
Figura 7.2.25. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP 10,3% de RC SE. (Elaboración propia).....	193
Figura 7.2.26. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP 10,3% de RC SE. (Elaboración propia).....	193
Figura 7.3.1. Diagrama de black del ligante CA-24 en estado SE. (Elaboración propia).....	194
Figura 7.3.2. Diagrama de black del ligante CA-24 en estado RTFO. (Elaboración propia).....	194
Figura 7.3.3. Diagrama de black del ligante CA-24 en estado PAV. (Elaboración propia).....	195
Figura 7.3.4. Diagrama de black del ligante CA-14 en estado SE. (Elaboración propia).....	195
Figura 7.3.5. Diagrama de black del ligante CA-14 en estado RTFO. (Elaboración propia).....	195
Figura 7.3.6. Diagrama de black del ligante CA-14 en estado PAV. (Elaboración propia).....	196
Figura 7.3.7. Diagrama de black del ligante RAP en estado SE. (Elaboración propia).....	196
Figura 7.3.8. Diagrama de black del ligante CA-24 8,6% de LPO-M SE. (Elaboración propia).....	197
Figura 7.3.9. Diagrama de black del ligante CA-14 5,3% de LPO-M SE. (Elaboración propia).....	197
Figura 7.3.10. Diagrama de black del ligante RAP 13,4% de LPO-M SE. (Elaboración propia).....	197
Figura 7.3.11. Diagrama de black del ligante CA-24 5,9% de RC SE. (Elaboración propia).....	198
Figura 7.3.12. Diagrama de black del ligante CA-14 7,6% de RC SE. (Elaboración propia).....	198
Figura 7.3.13. Diagrama de black del ligante RAP 10,3% de RC SE. (Elaboración propia).....	198
Figura 7.7.1. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-24 en estado SE, RTFO y PAV medido en un rango de 5°C a 40°C. (Elaboración propia).....	222
Figura 7.7.2. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia).....	223
Figura 7.7.3. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-14 en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia).....	223
Figura 7.7.4. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia).....	224
Figura 7.7.5. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante RAP en estado SE, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia).....	224
Figura 7.7.6. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante RAP en estado SE, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia).....	225
Figura 7.7.7. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-24, CA-14 y RAP en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 75°C. (Elaboración propia).....	225
Figura 7.7.8. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24, CA-14 y RAP en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 75°C. (Elaboración propia).....	226
Figura 7.7.9. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12%. (Elaboración propia).....	226
Figura 7.7.10. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12%. (Elaboración propia).....	227
Figura 7.7.11. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia).....	227
Figura 7.7.12. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia).....	228
Figura 7.7.13. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante RAP con LPO-M en dosis de 3, 6, 9, 12, 15 y 18%. (Elaboración propia).....	228
Figura 7.7.14. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante RAP con LPO-M en dosis de 3, 6, 9, 12, 15 y 18%. (Elaboración propia).....	229
Figura 7.7.15. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-24 con RC en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia).....	229
Figura 7.7.16. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia).....	230

Figura 7.7.17. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-14 con RC en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia).....	230
Figura 7.7.18. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia) .....	231
Figura 7.7.19. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante RAP con RC en dosis de 3, 6, 9 y 12%. (Elaboración propia).....	231
Figura 7.7.20. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante RAP con RC en dosis de 3, 6, 9 y 12%. (Elaboración propia) .....	232
Figura 7.8.1. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 3%. (Elaboración propia) .....	233
Figura 7.8.2. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 3%. (Elaboración propia) .....	234
Figura 7.8.3. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 6%. (Elaboración propia) .....	234
Figura 7.8.4. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 6%. (Elaboración propia) .....	235
Figura 7.8.5. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 9%. (Elaboración propia) .....	235
Figura 7.8.6. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 9%. (Elaboración propia) .....	236
Figura 7.8.7. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 3%. (Elaboración propia).....	236
Figura 7.8.8. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 3%. (Elaboración propia).....	237
Figura 7.8.9. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 6%. (Elaboración propia).....	237
Figura 7.8.10. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 6%. (Elaboración propia).....	238
Figura 7.8.11. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 9%. (Elaboración propia) .....	238
Figura 7.8.12. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 9%. (Elaboración propia).....	239
Figura 7.8.13. Curvas maestras de CA-24 con RC y LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% del módulo dinámico de corte. (Elaboración propia) .....	239
Figura 7.8.14. Curvas maestras de CA-24 con RC y LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% del ángulo de fase. (Elaboración propia).....	240
Figura 7.8.15. Curvas maestras de CA-14 con RC y LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% del módulo dinámico de corte. (Elaboración propia) .....	240
Figura 7.8.16. Curvas maestras de CA-14 con RC y LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% del ángulo de fase. (Elaboración propia).....	241
Figura 7.8.17. Curvas maestras de RAP con RC y LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12% del módulo dinámico de corte. (Elaboración propia) .....	241
Figura 7.8.18. Curvas maestras de RAP con RC y LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12% del ángulo de fase. (Elaboración propia) .....	242

# Índice de tablas

Tabla 1.9.1. Efecto de rejuvenecedores en las propiedades de ligantes asfálticos. (Behnood, 2019) ...	31
Tabla 2.1.1. Características físicas de los ligantes, líquido pirolítico y rejuvenecedor comercial. ....	38
Tabla 2.1.2. Detalle de muestras a ensayar de los ligantes en estado original y mezcladas con LPO-M y RC.....	40
Tabla 2.2.1. Rango de temperaturas para utilización de platos paralelos del DSR. (Á. González, 2012) .....	41
Tabla 2.2.2. Precisión estimada. Fuente: Tabla 3, ASTM D7175, 2015. ....	43
Tabla 2.2.3. Rango de temperatura de medición para especificación PG mediante el uso del Reómetro de Corte Dinámico (DSR). ....	48
Tabla 2.2.4. Rango de temperatura de medición para especificación PG mediante el uso del Reómetro de Viga en Flexión (BBR). ....	49
Tabla 2.2.5. Repetibilidad y reproducibilidad estimada. Fuente: Tabla 1, ASTM D6648-08, 2016. ....	50
Tabla 3.2.1. Propiedades reológicas y parámetro de ahuellamiento de cementos asfálticos a 64°C y 10 rad/s. ....	60
Tabla 3.2.2. Propiedades reológicas y parámetro de fatiga de cementos asfálticos a 25°C y 10 rad/s. ....	60
Tabla 3.2.3. Módulo dinámico y ángulo de fase de muestras con LPO-M a 64°C y 10 rad/s. ....	61
Tabla 3.2.4. Parámetros de ahuellamiento de muestras con dosis de LPO-M a 64°C y 10 rad/s y criterio PG. ....	61
Tabla 3.2.5. Módulo dinámico y ángulo de fase de muestras con RC a 64°C y 10 rad/s. ....	62
Tabla 3.2.6. Parámetros de ahuellamiento de muestras con dosis de RC a 64°C y 10 rad/s y criterio PG. ....	62
Tabla 3.2.7. Comparación parámetros de ahuellamiento con ligante SE y dosis óptima de LPO-M. ....	63
Tabla 3.2.8. Comparación parámetros de ahuellamiento con ligante SE y dosis óptima de RC. ....	63
Tabla 3.2.9. Comparación parámetros de ahuellamiento con ligante RTFO y dosis óptima de LPO-M. ....	64
Tabla 3.2.10. Comparación parámetros de ahuellamiento con ligante RTFO y dosis óptima de RC. ..	64
Tabla 3.2.11. Módulo dinámico y ángulo de fase de muestras con LPO-M a 25°C y 10 rad/s. ....	65
Tabla 3.2.12. Módulo dinámico y ángulo de fase de muestras con RC a 25°C y 10 rad/s. ....	66
Tabla 3.2.13. Parámetro de fatiga con dosis óptima de LPO-M y RC a 25°C y 10 rad/s, estimados mediante interpolación lineal. ....	66
Tabla 3.3.1. Resumen de dosis óptimas determinadas para el LPO-M y RC para un nivel SE. ....	67
Tabla 3.3.2. Resultados PG de cementos asfálticos originales y rejuvenecidos con LPO-M y RC en sus dosis óptimas. ....	67
Tabla 3.3.3. Resultados penetración, punto de ablandamiento y viscosidad a 60°C y 135°C a muestras sin y con LPO-M y RC en dosis óptimas. ....	68
Tabla 3.3.4. Resultados punto de inflamación y cambio de masa para CA-24 y CA-14 a muestras sin y con LPO-M y RC en dosis óptimas. ....	68
Tabla 3.3.5. Resultados análisis químico mediante ensayos FTIR, de muestras con dosis óptimas aplicadas de LPO-M y RC. ....	72
Tabla 3.3.6. Resultados análisis químico mediante ensayos FTIR de muestras con diferentes dosis de aplicación de LPO-M y RC. ....	73
Tabla 3.4.1. Parámetro de fatiga con dosis óptima de LPO-M y RC y susceptibilidad al agrietamiento por fatiga del ligante rejuvenecido respecto al ligante original sin envejecer. ....	80
Tabla 3.4.2. Parámetro de fatiga con dosis óptima de LPO-M a 25°C y 10 rad/s. ....	81
Tabla 3.4.3. Parámetro de fatiga con dosis óptima de RC a 25°C y 10 rad/s. ....	81

Tabla 3.4.4. Resultados de susceptibilidad al envejecimiento en estado RTFO y PAV de las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas. ....	81
Tabla 3.4.5. Resultados de parámetros de fatiga para ligantes re-envejecido en PAV comparados con su ligante base PAV y criterio PG. ....	82
Tabla 4.2.1. Resumen de dosis óptimas determinadas para el LPO-M y RC en sus dos tipos de aplicación. ....	90
Tabla 4.2.2. Resumen de dosis máximas para LPO-M y RC. ....	91
Tabla 4.3.1. Resumen de resultados de especificacion PG y ensayos tradicionales a muestras rejuvenecidas en dosis óptimas de LPO-M y RC. ....	93
Tabla 4.3.2. Resumen de resultados de $ G^* /\text{sen}(\delta)$ y $ G^*  \text{sen}(\delta)$ medidos versus los estimados. ....	94
Tabla 4.4.1. Comparación del parámetro de fatiga del ligante original respecto al rejuvenecido en dosis óptima de LPO-M y RC a 25°C y 10 rad/s. ....	95
Tabla 4.4.2. Resumen resultados de susceptibilidad al envejecimiento en estado RTFO y PAV de las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas. ....	96
Tabla 7.1.1. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 SE (M1). (Elaboración propia).....	108
Tabla 7.1.2. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 SE (M2). (Elaboración propia).....	109
Tabla 7.1.3. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 RTFO (M1). (Elaboración propia).....	109
Tabla 7.1.4. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 RTFO (M2). (Elaboración propia).....	110
Tabla 7.1.5. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 PAV (M1). (Elaboración propia).....	111
Tabla 7.1.6. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 PAV (M2). (Elaboración propia).....	112
Tabla 7.1.7. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 SE (M1). (Elaboración propia).....	112
Tabla 7.1.8. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 SE (M2). (Elaboración propia).....	113
Tabla 7.1.9. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 RTFO (M1). (Elaboración propia).....	114
Tabla 7.1.10. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 RTFO (M2). (Elaboración propia).....	115
Tabla 7.1.11. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 PAV (M1). (Elaboración propia).....	115
Tabla 7.1.12. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 PAV (M2). (Elaboración propia).....	116
Tabla 7.1.13. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP SE (M1). (Elaboración propia).....	117
Tabla 7.1.14. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP SE (M2). (Elaboración propia).....	118
Tabla 7.1.15. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 3% (M1). (Elaboración propia).....	119
Tabla 7.1.16. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 3% (M2). (Elaboración propia).....	120
Tabla 7.1.17. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 6% (M1). (Elaboración propia).....	120
Tabla 7.1.18. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 6% (M2). (Elaboración propia).....	121
Tabla 7.1.19. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 9% (M1). (Elaboración propia).....	122
Tabla 7.1.20. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 9% (M2). (Elaboración propia).....	122





Tabla 7.1.75. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 9% (M1). (Elaboración propia).....	165
Tabla 7.1.76. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 9% (M2). (Elaboración propia).....	166
Tabla 7.1.77. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% SE (M1). (Elaboración propia).....	166
Tabla 7.1.78. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% SE (M2). (Elaboración propia).....	167
Tabla 7.1.79. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% RTFO (M1). (Elaboración propia) .....	168
Tabla 7.1.80. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% RTFO (M2). (Elaboración propia) .....	169
Tabla 7.1.81. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% PAV (M1). (Elaboración propia).....	169
Tabla 7.1.82. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% PAV (M2). (Elaboración propia).....	170
Tabla 7.1.83. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 3% (M1). (Elaboración propia).....	171
Tabla 7.1.84. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 3% (M2). (Elaboración propia).....	172
Tabla 7.1.85. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 6% (M1). (Elaboración propia).....	173
Tabla 7.1.86. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 6% (M2). (Elaboración propia).....	173
Tabla 7.1.87. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 9% (M1). (Elaboración propia).....	174
Tabla 7.1.88. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 9% (M2). (Elaboración propia).....	175
Tabla 7.1.89. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 12% (M1). (Elaboración propia).....	175
Tabla 7.1.90. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 12% (M2). (Elaboración propia).....	176
Tabla 7.1.91. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% SE (M1). (Elaboración propia) .....	177
Tabla 7.1.92. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% SE (M2). (Elaboración propia) .....	178
Tabla 7.1.93. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% RTFO (M1). (Elaboración propia) .....	178
Tabla 7.1.94. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% RTFO (M2). (Elaboración propia) .....	179
Tabla 7.1.95. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% PAV (M1). (Elaboración propia).....	180
Tabla 7.1.96. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% PAV (M2). (Elaboración propia).....	181
Tabla 7.4.1. Precisión estimada para el ligante CA-24 SE. (Elaboración propia).....	199
Tabla 7.4.2. Precisión estimada para el ligante CA-24 RTFO. (Elaboración propia) .....	199
Tabla 7.4.3. Precisión estimada para el ligante CA-24 PAV. (Elaboración propia) .....	200
Tabla 7.4.4. Precisión estimada para el ligante CA-14 SE. (Elaboración propia).....	200
Tabla 7.4.5. Precisión estimada para el ligante CA-14 RTFO. (Elaboración propia) .....	200
Tabla 7.4.6. Precisión estimada para el ligante CA-14 PAV. (Elaboración propia) .....	201
Tabla 7.4.7. Precisión estimada para el ligante RAP SE. (Elaboración propia).....	201
Tabla 7.4.8. Precisión estimada para el ligante CA-24 con LPO-M 8,6% SE. (Elaboración propia) .	202
Tabla 7.4.9. Precisión estimada para el ligante CA-24 con LPO-M 8,6% RTFO. (Elaboración propia) .....	202

Tabla 7.4.10. Precisión estimada para el ligante CA-24 con LPO-M 8,6% PAV. (Elaboración propia)	203
Tabla 7.4.11. Precisión estimada para el ligante CA-14 con LPO-M 5,3% SE. (Elaboración propia)	203
Tabla 7.4.12. Precisión estimada para el ligante CA-14 con LPO-M 5,3% RTFO. (Elaboración propia)	204
Tabla 7.4.13. Precisión estimada para el ligante CA-14 con LPO-M 5,3% PAV. (Elaboración propia)	204
Tabla 7.4.14. Precisión estimada para el ligante RAP con LPO-M 13,4% SE. (Elaboración propia)	204
Tabla 7.4.15. Precisión estimada para el ligante RAP con LPO-M 13,4% RTFO. (Elaboración propia)	205
Tabla 7.4.16. Precisión estimada para el ligante RAP con LPO-M 13,4% PAV. (Elaboración propia)	205
Tabla 7.4.17. Precisión estimada para el ligante CA-24 con RC 5,9% SE. (Elaboración propia)	206
Tabla 7.4.18. Precisión estimada para el ligante CA-24 con RC 5,9% RTFO. (Elaboración propia)	206
Tabla 7.4.19. Precisión estimada para el ligante CA-24 con RC 5,9% PAV. (Elaboración propia)	207
Tabla 7.4.20. Precisión estimada para el ligante CA-14 con RC 7,6% SE. (Elaboración propia)	207
Tabla 7.4.21. Precisión estimada para el ligante CA-14 con RC 7,6% RTFO. (Elaboración propia)	208
Tabla 7.4.22. Precisión estimada para el ligante CA-14 con RC 7,6% PAV. (Elaboración propia)	208
Tabla 7.4.23. Precisión estimada para el ligante RAP con RC 10,3% SE. (Elaboración propia)	208
Tabla 7.4.24. Precisión estimada para el ligante RAP con RC 10,3% RTFO. (Elaboración propia)	209
Tabla 7.4.25. Precisión estimada para el ligante RAP con RC 10,3% PAV. (Elaboración propia)	209
Tabla 7.5.1. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) de los ligantes CA-24, CA-14 y RAP en rangos de medición 5 a 75°C. (Elaboración propia)	211
Tabla 7.5.2. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) de los ligantes CA-24, CA-14 y RAP en rangos de medición 5 a 75°C. (Elaboración propia)	212
Tabla 7.5.3. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-24 en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)	212
Tabla 7.5.4. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)	213
Tabla 7.5.5. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante CA-14 en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)	213
Tabla 7.5.6. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-14 en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)	214
Tabla 7.5.7. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) del ligante RAP en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)	214
Tabla 7.5.8. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante RAP en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)	214
Tabla 7.5.9. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF $k_1$ y $k_2$ para curva maestra del módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) para ligante CA-24. (Elaboración propia)	216
Tabla 7.5.10. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF $k_1$ y $k_2$ para curva maestra del módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) para ligante CA-14. (Elaboración propia)	216
Tabla 7.5.11. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF $k_1$ y $k_2$ para curva maestra del módulo dinámico de corte ( $ G^* $ ) para ligante RAP. (Elaboración propia)	217
Tabla 7.5.12. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF $k_1$ y $k_2$ para la curva maestra del ángulo de fase ( $\delta$ ) para el ligante CA-24. (Elaboración propia)	217
Tabla 7.5.13. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF $k_1$ y $k_2$ para la curva maestra del ángulo de fase ( $\delta$ ) para el ligante C-14. (Elaboración propia)	218
Tabla 7.5.14. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF $k_1$ y $k_2$ para la curva maestra del ángulo de fase ( $\delta$ ) para el ligante RAP. (Elaboración propia)	218
Tabla 7.6.1. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de módulo dinámico, para ligante CA-24 sin y con LPO-M. (Elaboración propia)	219
Tabla 7.6.2. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante CA-24 sin y con LPO-M. (Elaboración propia)	219

Tabla 7.6.3. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de módulo dinámico, para ligante CA-14 sin y con LPO-M. (Elaboración propia) .....	219
Tabla 7.6.4. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante CA-14 sin y con LPO-M. (Elaboración propia) .....	219
Tabla 7.6.5. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de módulo dinámico, para ligante RAP sin y con LPO-M. (Elaboración propia) .....	219
Tabla 7.6.6. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante RAP sin y con LPO-M. (Elaboración propia) .....	220
Tabla 7.6.7. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de módulo dinámico, para ligante CA-24 y CA-14 con RC. (Elaboración propia) .....	220
Tabla 7.6.8. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante CA-24 y CA-14 con RC. (Elaboración propia) .....	220
Tabla 7.6.9. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante RAP con RC. (Elaboración propia) .....	220
Tabla 7.6.10. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante RAP con RC. (Elaboración propia) .....	221

# Índice de ecuaciones

Ecuación 1.2.1 .....	10
Ecuación 1.2.2 .....	10
Ecuación 1.3.1 .....	13
Ecuación 1.3.2 .....	13
Ecuación 1.3.3 .....	13
Ecuación 1.3.4 .....	13
Ecuación 1.3.5 .....	13
Ecuación 1.3.6 .....	13
Ecuación 1.3.7 .....	14
Ecuación 1.3.8 .....	14
Ecuación 1.3.9 .....	14
Ecuación 1.4.1 .....	16
Ecuación 1.4.2 .....	17
Ecuación 1.4.3 .....	17
Ecuación 1.5.1 .....	17
Ecuación 1.5.2 .....	18
Ecuación 1.5.3 .....	18
Ecuación 1.7.1 .....	21
Ecuación 1.7.2 .....	22
Ecuación 1.7.3 .....	22
Ecuación 1.7.4 .....	23
Ecuación 1.7.5 .....	23
Ecuación 1.7.6 .....	23
Ecuación 1.7.7 .....	23
Ecuación 1.7.8 .....	24
Ecuación 1.7.9 .....	24
Ecuación 1.8.1 .....	25
Ecuación 1.8.2 .....	26
Ecuación 1.8.3 .....	26
Ecuación 1.8.4 .....	27
Ecuación 1.8.5 .....	27
Ecuación 2.2.1 .....	42
Ecuación 2.2.2 .....	42
Ecuación 2.2.3 .....	44
Ecuación 2.2.4 .....	45
Ecuación 2.2.5 .....	45
Ecuación 2.2.6 .....	45
Ecuación 2.2.7 .....	45
Ecuación 2.2.8 .....	46
Ecuación 2.2.9 .....	46
Ecuación 2.2.10 .....	46
Ecuación 2.2.11 .....	46
Ecuación 2.2.12 .....	47
Ecuación 2.2.13 .....	47
Ecuación 2.2.14 .....	47
Ecuación 2.2.15 .....	47



# Introducción

La infraestructura vial cumple un rol fundamental dentro de las obras civiles, estas entregan conectividad dentro y entre ciudades permitiendo aseverar que las comunidades crezcan en lo cultural, en lo social y en lo económico en la medida que existe la posibilidad de comunicarse y trasladarse (de Solminihač et al., 2018). Uno de los activos importantes en la infraestructura vial son los pavimentos, este le otorga la superficie de rodadura y requiere una gran cantidad de recursos para su construcción y mantenimiento.

En Chile, existe una red vial de aproximadamente 88.000 km, donde un 36% está construido de pavimento asfáltico o alguna capa protectora en base a algún material asfáltico (MOP, 2023). El pavimento mayormente utilizado en el mundo (Asphalt institute, 2014) y en Chile es el pavimentado asfáltico. De un total de la red vial nacional pavimentada, aproximadamente un 88% ha sido construida utilizando algún material asfáltico, equivalente a más de 19.000 kilómetros. (MOP, 2023).

Los desafíos de sostenibilidad y cuidado del medio ambiente han llevado a la industria del asfalto al diseño y construcción de pavimentos más durables y resistentes, y a la utilización de materiales reciclados. En este sentido, los neumáticos fuera de uso (NFU) son los residuos industriales de origen sintético más críticos y estratégicos para ser valorizados. Sólo en Chile se alcanzó un récord de 145.000 toneladas de NFU en el año 2019, incluyendo el sector minero (CINC, 2022). Donde, alrededor 46.000 son neumáticos provenientes del sector de la minería y construcción.

La baja tasa de reciclaje en el país (alrededor de un 17%) ha forzado a generar regulaciones, como la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor, “REP” (Ley N°20.920). El principio fundamental del concepto REP es que “el que contamina paga”, es decir, quien introduce un producto en el mercado, se hace cargo de la externalidad negativa que el mismo genera en su etapa de post-consumo, y cuyo objetivo principal es disminuir la generación de desechos y promover el reciclaje.

Dentro de las estrategias de manejo de los NFU (reutilización, reciclado, recuperación energética, disposición e híbridas), la pirólisis ha surgido como una alternativa de interés dentro de los procesos híbridos, debido a la composición química que los hace resistentes a la degradación natural (Wang et al., 2014; Ramírez-Canon et al., 2020). La pirólisis es un proceso de degradación térmica que ocurre en ausencia de oxígeno (atmósfera inerte), y en un rango de temperatura entre 400-750°C. De este proceso se obtienen tres fracciones: Carbón RCb (utilizado en mezclas de asfalto como carbón activado), GPN se emplea como propio combustible de la pirólisis, y LPN, líquido pirolítico de alto valor comercial (alto contenido de aromáticos) (Williams, P.T, 2013).

Norambuena-Contreras et al. (2021) demostró que la fracción líquida obtenida del proceso de pirólisis de NFU (aceite compuesto de hidrocarburos aromáticos y alifáticos con un contenido de maltenos de hasta un 98% p/p.) puede difundirse en el cemento asfáltico envejecido, reduciendo su viscosidad y autorreparando sus microgrietas en un 100%. Estos resultados demostraron que el líquido pirolítico de neumáticos (LPN) puede ser potencialmente utilizado como un producto rejuvenecedor de asfaltos de alto valor, tanto para aplicaciones superficiales, en mezclas asfálticas con RAP, y en el desarrollo de rejuvenecedores encapsulados para la autorreparación de microgrietas.

Debido a la susceptibilidad del ligante asfáltico a la temperatura y frecuencia de carga, al ser utilizado en mezclas para pavimentos este presenta susceptibilidad a ciertos tipos de deterioros. Los deterioros más comunes experimentados en el pavimento asfáltico son el agrietamiento térmico, agrietamiento por fatiga y el ahuellamiento. La presencia del asfalto envejecido ha sido identificado como uno de los factores influyentes en el agrietamiento. Durante el proceso de envejecimiento del ligante se producen cambios físicos y químicos, este efecto es debido a que el material está compuesto de moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del ambiente, proceso conocido como oxidación que resulta en un material más rígido.

Para tratar los efectos del envejecimiento de los pavimentos asfálticos, el uso de agentes rejuvenecedores es utilizado comúnmente para contrarrestar el envejecimiento del ligante asfáltico. La adición de rejuvenecedores a los ligantes asfálticos duros y envejecidos suaviza y reduce la viscosidad del asfalto (Behnood, 2019). El uso de estos agentes rejuvenecedores tiene el objetivo de restaurar las propiedades originales del ligante asfáltico y en consecuencia poder mejorar el desempeño del pavimento. Sin embargo, las aplicaciones que tienen los rejuvenecedores del mercado se ven limitados por su alto costo, donde aproximadamente alcanza el doble del valor del asfalto y que al ser aplicados sobre la superficie del pavimento puede ocasionar graves problemas ambientales de contaminación por lixiviado de productos químicos.

González et al. (2022) estudió el efecto rejuvenecedor de un LPN en las propiedades reológicas de un ligante asfáltico envejecido CA-24. Muestras con líquido pirolítico y líquido encapsulado en distintas dosis mostraron un efecto rejuvenecedor, reduciendo el módulo dinámico ( $G^*$ ) y aumentando el ángulo de fase ( $\delta$ ). Muestras con un 6% de líquido y 12% de cápsulas presentaron un comportamiento más cercano al ligante sin envejecer y al ligante con un envejecimiento primario (RTFO), respectivamente.

Por otro lado, la determinación de la dosis óptima de rejuvenecedor se relaciona tanto con la recuperación de las propiedades viscoelásticas de los ligantes, como con el desempeño del material en el pavimento. De este modo, un rejuvenecedor debe generar una disminución en el módulo dinámico, haciendo que el material sea menos frágil y reduciendo la probabilidad de agrietarse, pero sin producir una disminución en la resistencia a la deformación, ni recuperación elástica. Diferentes autores han planteado que a bajas temperaturas las diferentes propiedades del ligante deben mejorar, siendo similares a las del ligante sin envejecer a altas temperaturas (Behnood, 2019).

Otras investigaciones han demostrado que los ligantes asfálticos envejecidos que contienen un rejuvenecedor puede alcanzar los grados PG objetivo si la cantidad de rejuvenecedor se determina y añade adecuadamente (Shen, 2007). Zaumanis et al. (2015, 2014b) en la misma línea de investigación evaluó seis diferentes tipos de rejuvenecedores y determinó sus dosis máximas y mínimas en base a un PG objetivo.

Con base en estos antecedentes, se han propuesto diferentes formas de incluir en el diseño y/o mantención de pavimentos el uso de materiales reciclados para alargar la vida útil de los caminos, todo en la dirección de un desarrollo sustentable. El presente trabajo de investigación forma parte del proyecto FONDEF ID21I10127 “Desarrollo de productos rejuvenecedores a partir de la pirólisis de neumáticos fuera de uso para el mejoramiento de las propiedades reológicas y de autorreparación en cementos asfálticos envejecidos”, desarrollado durante el año 2022 y 2023 con el objetivo de desarrollar un producto rejuvenecedor a partir del uso de un residuo industrial de alto valor, es decir, mediante el uso de NFU.

En esta investigación se evalúa mediante ensayos reológicos el efecto rejuvenecedor de un líquido pirolítico optimizado químicamente proveniente de neumáticos mineros fuera de uso (LPO-M) aplicado en tres diferentes tipos de cementos asfálticos disponibles en Chile: un primer asfalto tradicional CA-24, un segundo asfalto tradicional CA-14 y el tercer ligante recuperado a partir de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Para luego, realizar una comparación entre el efecto del LPO-M con un rejuvenecedor comercial (RC), determinando las dosis óptimas de aplicación en base al desempeño de las muestras a altas temperaturas. El efecto rejuvenecedor del LPO-M en sus diferentes dosis se fue evaluando con la capacidad de restaurar las propiedades reológicas del cemento asfáltico, es decir, la

capacidad de disminuir el módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) y aumentar el ángulo de fase ( $\delta$ ). Las muestras se caracterizaron reológicamente con ensayos de barrido de frecuencia-temperatura, mediante la utilización de un Reómetro de Corte Dinámico (DSR). La dosis óptima de aplicación se determinó en base al parámetro de ahuellamiento Superpave, de manera de asegurarse que el ligante no será rejuvenecido más allá de lo necesario y que no se generará potencial ahuellamiento del pavimento. Adicionalmente, a las muestras rejuvenecidas con las dosis óptimas determinadas, se determina el grado de desempeño PG, sus propiedades físicas (penetración, punto de ablandamiento y viscosidad a 60°C y 135°C) y un análisis químico mediante ensayos FTIR. Finalmente, de manera complementaria se analiza la susceptibilidad al envejecimiento de las muestras rejuvenecidas con dosis óptimas, sometiénolas a un ciclo adicional de envejecimiento primario (RTFO) y secundario (PAV), y evaluando los cambios generados tanto en el módulo dinámico como el ángulo de fase.

Para realizar lo anteriormente mencionado, este trabajo de tesis se estructura en 5 capítulos. El capítulo 1 contiene el marco teórico de la investigación, se describen principalmente las características y el comportamiento viscoelástico del ligante asfáltico, la susceptibilidad a frecuencia de cargas y envejecimiento. Además, se presenta una revisión de literatura sobre los rejuvenecedores, su tipo de aplicación y el contenido óptimo según diferentes autores.

En el capítulo 2 se presentan los materiales y metodología para los ensayos realizados. Mientras que, en el capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, principalmente de las curvas maestras obtenidas tanto para el módulo dinámico de corte como el ángulo de fase. En el capítulo 4, se encuentra un análisis de resultados donde principalmente se comparan los resultados entre el LPO-M y RC. Finalmente, el capítulo 5 presenta las principales conclusiones y se establecen futuras líneas de investigación.

# Hipótesis

El producto obtenido a partir de la pirólisis de neumáticos mineros fuera de uso químicamente optimizado (LPO-M) posee efectos rejuvenecedores sobre las propiedades reológicas de los cementos asfálticos envejecidos, permitiendo recuperar las propiedades originales a altas temperaturas con las dosis óptimas determinadas, alcanzando la especificación por grado desempeño PG y propiedades físicas del ligante original sin envejecimiento, siendo un producto competitivo y con potencial uso en la industria.

# Objetivos

## Objetivo general:

- Evaluar el efecto rejuvenecedor de un líquido pirolítico optimizado químicamente proveniente de neumáticos mineros fuera de uso (LPO-M) sobre las propiedades reológicas módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) y ángulo de fase ( $\delta$ ) de un cemento asfáltico con envejecimiento secundario (PAV) tipo CA-24 y CA-14 y un ligante recuperado a partir de RAP.

## Objetivos específicos:

- Evaluar el efecto rejuvenecedor del LPO-M sobre las propiedades reológicas módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) y ángulo de fase ( $\delta$ ) de un asfalto tradicional CA-24, CA-14 y un tercer ligante proveniente de RAP con ensayos de barrido de frecuencia-temperatura, mediante la utilización de un Reómetro de Corte Dinámico (DSR).
- Comparar el efecto del LPO-M con un rejuvenecedor comercial (RC) sobre las propiedades reológicas ( $|G^*|$  y  $\delta$ ), determinando las dosis óptimas de aplicación en base al desempeño de las muestras a altas temperaturas.
- Determinar en muestras rejuvenecidas con dosis óptimas el grado de desempeño PG, propiedades físicas (penetración, punto de ablandamiento y viscosidad a 60°C y 135°C) y los índices carbonilo, sulfóxido y de envejecimiento combinado a través del análisis de espectros por FTIR.
- Evaluar la susceptibilidad al envejecimiento de las muestras rejuvenecidas con dosis óptimas de LPO-M y RC, sometiéndolas a un re-envejecimiento mediante envejecimiento primario (RTFO) y secundario (PAV).

# Capítulo 1: Marco teórico

El presente capítulo tiene por objetivo presentar el marco conceptual para esta investigación, donde principalmente consiste en la revisión de teorías, conceptos y estudios recientes sobre el ligante asfáltico y el uso de rejuvenecedores, todo con el objetivo de proporcionar un contexto conceptual sólido para el estudio en cuestión. Por lo tanto, el capítulo se estructura de la siguiente forma:

- En la sección 1.1, 1.2 y 1.3, se presentan las características principales del cemento asfáltico, enfatizando en su comportamiento como material viscoelástico, características reológicas y composición química.
- En las secciones 1.4, 1.5 y 1.6, se presenta la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura, frecuencia de carga y envejecimiento. Además, se explica el principio de superposición tiempo-temperatura utilizado para la construcción de curvas maestras, mencionando además los principales deterioros del pavimento flexible.
- En las secciones 1.7 y 1.8, se enfoca principalmente en las especificaciones por grado de desempeño PG y especificaciones tradicionales del ligante asfáltico.
- Y finalmente, en las secciones 1.9 y 1.10 se presenta una revisión de literatura sobre el uso, tipos y aplicaciones de los rejuvenecedores.

## 1.1. Características generales de los asfaltos

El ligante asfáltico es un material orgánico, compuesto principalmente de carbono e hidrogeno obtenido de fuentes naturales o del proceso de refinación de petróleo. Las principales fuentes de asfalto son provenientes del petróleo (derivados de la destilación de crudos), fuentes naturales (depósitos geológicos de lago, asfaltos en roca y arena) y alquitrán. Este material orgánico presenta un comportamiento viscoelástico, donde su composición y propiedades van a depender de la fuente y proceso de manufacturación.

### 1.1.1. Composición química del ligante asfáltico

La composición química del ligante es muy variable y compleja, puede variar según su origen, proceso de refinamiento sometido y grado de envejecimiento. Pero, generalmente está compuesto de carbono e hidrogeno en mayor porcentaje (80 a 90%) y otros compuestos como azufre, oxígeno y nitrógeno en menor porcentaje (0% a 10%).

El ligante está conformado por diferentes grupos de compuestos químicos, están resumidas en la llamada fracción SARA la cual consiste en saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos. Los saturados, aromáticos y resinas son generalmente descritas como maltenos, grupo que difiere de los asfaltenos debido a su solubilidad en n-heptano. Las fracciones de maltenos pueden ser separadas entre ellas debido a sus diferentes polaridades.

Principalmente, la característica de las 4 fracciones se diferencia según la polaridad, la aromaticidad y el peso molecular (Weigel & Stephan, 2018). Para describir la distribución de las cuatro fracciones del ligante, se utiliza el modelo de un sistema coloidal. Según este modelo, los componentes con mayor peso molecular (partículas coloidales) se dispersan en una fase líquida de constituyentes con menor peso molecular (dispersión agente). En la Figura 1.1.1 (a) se presentan ejemplos de las moléculas de asfalto tales como aromáticos, saturados y resinas. Mientras que, en la Figura 1.1.1 (b) se presenta un esquema de la estructura química del asfalto.

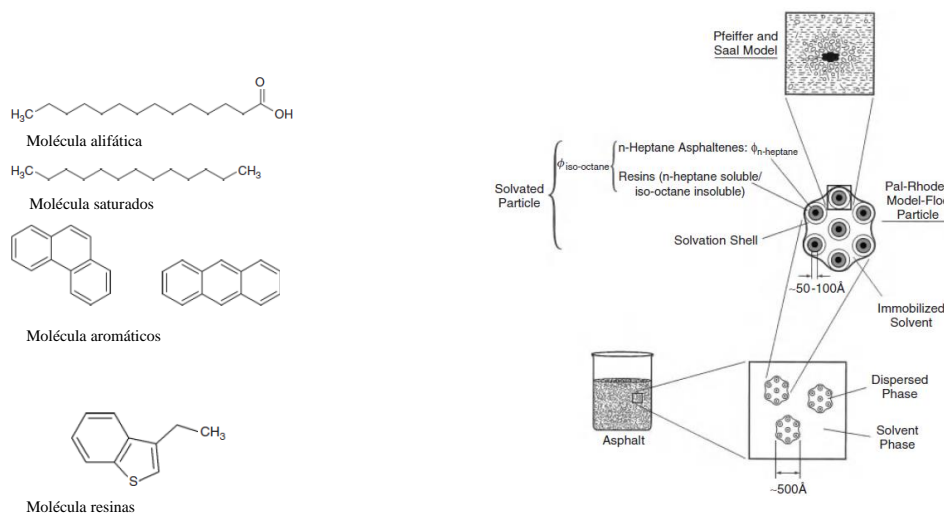


Figura 1.1.1. Composición química del ligante asfáltico, a) ejemplos de moléculas de asfalto y b) esquema de la estructura química del asfalto. (Papagiannakis, 2008)

En el esquema de la Figura 1.1.1 (b) se observa que, el ligante presenta una estructura coloidal que consiste en micelas de asfaltenos con alto peso molecular dispersas o disueltas en un medio aceitoso de bajo peso molecular (maltenos). Las micelas son consideradas como asfaltenos junto con una envoltura absorbida de resinas aromáticas con un alto peso molecular, que actúa como una capa estabilizadora. Lejos del centro de la micela, hay una transición gradual a resinas aromáticas con menor polaridad (Papagiannakis,2008).

Por otro lado, en este sistema coloidal los ligantes asfálticos con bajo contenido de asfaltenos (5-10%) se definen como asfaltos “tipo sol”, mientras que los que con alto contenido de asfaltenos (20-35%) se definen como asfaltos “tipo gel”. Los asfaltos tipo sol se asocian con alta ductilidad, poca tixotropía, alta susceptibilidad a la temperatura y baja tasa de endurecimiento por envejecimiento, mientras que los asfaltos tipo gel exhiben baja ductilidad, alta tixotropía, baja susceptibilidad a la temperatura y alta tasa de endurecimiento por la edad. Los ligantes típicos utilizados en pavimentos flexibles son del tipo sol-gel que presentan comportamiento elástico sólo en las etapas iniciales (Behnood, 2019). La coexistencia de las micelas tipo sol y la estructura del gel en función de la temperatura y el estado de agregación de las micelas (relación entre asfaltenos, resinas, aromáticos y saturados) se define como un modelo sol-gel (Figura 1.1.2) (Prosperi, 2021).

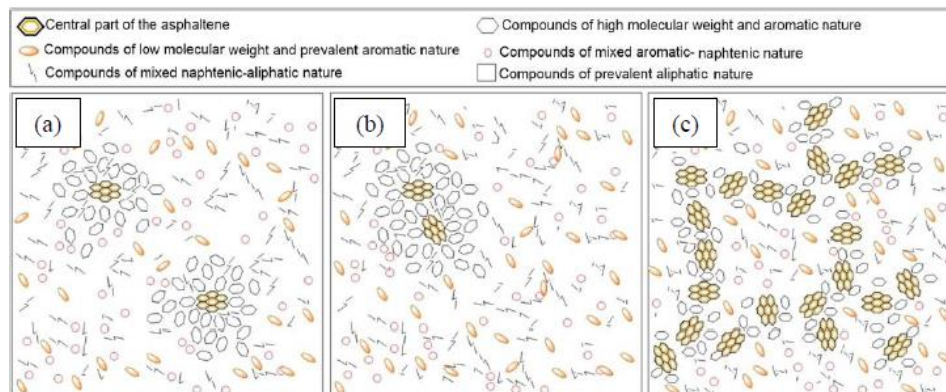


Figura 1.1.2. Representación esquemática del modelo coloidal del ligante asfáltico: a) ligante tipo sol, b) ligante tipo sol-gel y c) ligante tipo gel. (Prosperi, 2021)

Mencionado lo anterior, es posible separar los ligantes asfálticos en dos tipos de componentes: los asfaltenos y maltenos, donde estos son los principales compuestos de la fase no oleosa y de la fase oleosa, respectivamente.

- Asfaltenos: Sólidos amorfos de color café o negro, que constituyen entre el 5% al 25% del ligante. Su estructura molecular varía dependiendo de la fuente del crudo y están compuestos mayoritariamente por carbono e hidrógeno, algo de nitrógeno, azufre y oxígeno. Poseen un alto peso molecular y alta polaridad (alta adhesividad).
- Maltenos: son una fracción del asfalto, específicamente, se refieren a los componentes de menor peso molecular en el asfalto. Estos son los hidrocarburos más ligeros y volátiles, los cuales se dividen en 3 tipos.
  - Saturados: Aceites viscosos de color blanquizco, constituyen entre el 5% al 20% del total del ligante y son la parte principal. Compuestos por moléculas de carbono e hidrógeno (no polares) enlazadas entre sí de manera saturada, es decir, sin enlaces dobles o triples.
  - Aromáticos: Son líquidos viscosos de color café oscuro, constituyen entre el 40% al 60% del ligante y la mayor parte del medio de dispersión para asfaltenos. Son moléculas de hidrocarburos (no polares) que contienen anillos aromáticos, como el benceno. Estos compuestos suelen conferir al asfalto sus propiedades viscosas y pegajosas.
  - Resinas: Sólidos o semisólidos de color café oscuro, con una estructura química más compleja que los hidrocarburos simples. Poseen bajo peso molecular y una alta polaridad (alta adhesividad) que pueden ayudar a mejorar las propiedades adhesivas y de cohesión del asfalto. Actúan como medio dispersor para los asfaltenos y la proporción de resinas y asfaltenos determinan las características de solución (sol) o gelatina (gel) del ligante.

Cabe recalcar que, el contenido de asfaltenos afecta de manera considerable las propiedades físicas y reológicas del ligante, donde con un alto contenido de este mayor será la dureza, haciendo al ligante asfáltico más viscoso con una baja penetración y un mayor punto de ablandamiento.

Finalmente, es importante tener en cuenta que la composición exacta del asfalto puede variar significativamente dependiendo de su origen geográfico, método de extracción y procesamiento, así como de cualquier aditivo o modificador que se le haya agregado durante su producción. Además, la variación en la composición de asfaltenos-maltenos es de interés para obtener alguna información sobre las propiedades físicas del ligante y como esta posee relación con el desempeño del ligante como pavimento asfáltico.

### 1.1.2. Propiedades físicas ligante asfáltico

El ligante asfáltico es un material fundamental en la construcción y mantenimiento de carreteras y otras estructuras de pavimentación. Para comprender su comportamiento y capacidad para cumplir con las exigencias de su desempeño en el pavimento las propiedades físicas y mecánicas son fundamentales. A continuación, se describen algunas de las propiedades físicas más importantes del ligante asfáltico:

- **Viscosidad:** es la capacidad del asfalto para fluir a diferentes temperaturas, se mide como la razón entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de deformación de corte. Una viscosidad más alta indica un ligante más espeso, mientras que una viscosidad más baja indica un ligante más fluido.
- **Penetración:** es la profundidad de una aguja que penetra en el ligante asfáltico durante un periodo de tiempo, temperatura y magnitud específica. Esta es una medida de la suavidad del ligante, un ligante con una penetración más alta es más suave y se puede trabajar más fácilmente.
- **Punto de ablandamiento:** es la menor temperatura a la que una muestra se ablanda lo suficiente como para ser penetrado 25 mm por el peso de una bola de acero en condiciones específicas, se mide utilizando métodos estándar de anillo y bola. El punto de ablandamiento proporciona información sobre la susceptibilidad del ligante a deformarse bajo cargas y temperaturas elevadas, también conocido como el paso del comportamiento viscoelástico al comportamiento viscoso puro.
- **Punto de inflamación:** es la temperatura a la cual el ligante asfáltico se inflama, que ocurre en presencia de una chispa o llama azul al momento de pasar un encendedor por sobre la muestra. Esta es una medida para la seguridad de trabajar con mezclas en caliente.
- **Ductilidad:** es la capacidad del ligante asfáltico de estirarse sin romperse y se mide determinando la longitud en la que se puede estirar una muestra antes de que se rompa. Esta propiedad es relevante para evaluar la capacidad del ligante para resistir agrietamiento.
- **Módulo de elasticidad:** es la capacidad del ligante asfáltico de recuperar su forma original luego de haber sido solicitado, es una medida de la rigidez del asfalto.
- **Resistencia a la fatiga:** es la capacidad del ligante para resistir el agrietamiento bajo cargas repetidas en reducidos periodos de tiempo, provocados principalmente por sollicitaciones de tránsito.
- **Susceptibilidad térmica:** es la variación del comportamiento del ligante en respuesta a variaciones de temperaturas. Estas variaciones de temperatura modifican su rigidez, composición química, entre otras propiedades.
- **Envejecimiento:** es el cambio en la estructura y/o composición del ligante debido a la influencia de la temperatura y oxígeno, provocando incrementos en la rigidez y la viscosidad del asfalto. Este proceso también es conocido como oxidación, puede provocar un endurecimiento y una pérdida de flexibilidad en el ligante, lo que reduce su vida útil y su rendimiento en el pavimento.

Estas son solo algunas de las propiedades físicas más importantes del ligante asfáltico. La comprensión y el control de estas propiedades son esenciales para garantizar la calidad y la durabilidad de las mezclas asfálticas y los pavimentos.

## 1.2. Características reológicas de asfaltos

La reología es el estudio de las propiedades de flujo de los materiales, en otras palabras, describe el comportamiento de un material sometido a esfuerzos por cargas externas. El objetivo de esta ciencia es poder determinar la capacidad de un material de deformarse o fluir bajo esfuerzos generados por cargas externas.

Dentro de esta caracterización reológica, existen diferentes tipos de respuestas al ser sometidos a esfuerzos por cargas externas. Algunos materiales presentan una deformación que se recupera completamente luego de finalizada la carga, presentando un comportamiento sólido elástico y cumpliendo con la ley de Hook (Ecuación 1.2.1).

$$\tau = G \gamma \quad \text{Ecuación 1.2.1}$$

Donde,  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $G$  el módulo de corte y  $\gamma$  es la deformación por corte.

Esta respuesta elástica en el tiempo se presenta en la Figura 1.2.1, donde se observa que ante una variación de esfuerzo se obtiene una variación en la deformación, que se recupera en su totalidad al ser retirada la carga.

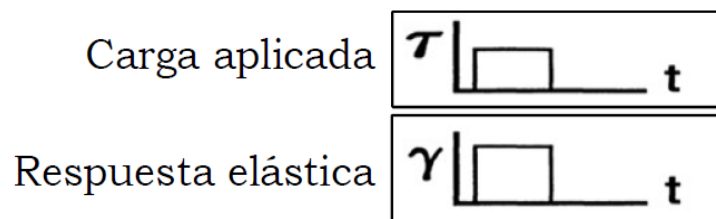


Figura 1.2.1. Respuesta de un material elástico en el tiempo. (Delgadillo, 2022)

Por otro lado, hay materiales que se comportan como fluido ideal que al ser sometidos a esfuerzos estos sufren deformaciones irreversibles, presentando un comportamiento viscoso. En términos simples, un líquido que presenta una relación lineal entre esfuerzo cortante y la tasa de deformación de corte, se describe como un fluido newtoniano donde la pendiente de la curva representa la viscosidad absoluta ( $\eta$ ) tal como se muestra en Ecuación 1.2.2. Cuando esta relación no es lineal, el termino empleado es no newtoniano ya que, la viscosidad está en función de la tasa de deformación por corte.

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{Ecuación 1.2.2}$$

Donde,  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $\eta$  la viscosidad y  $\frac{d\gamma}{dt}$  es la tasa de deformación por corte.

Esta respuesta viscosa en el tiempo se presenta en la Figura 1.2.2, donde se observa que ante una variación de esfuerzo se obtiene una variación en la deformación que no se logra recuperar, es decir, se genera una deformación permanente después de retirada la carga.

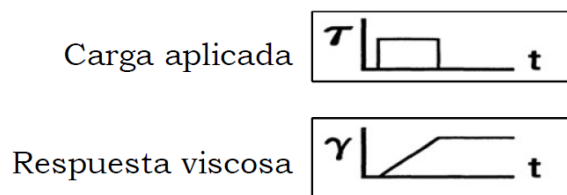


Figura 1.2.2. Respuesta de un material viscoso en el tiempo. (Delgadillo, 2022)

Para el caso del ligante asfáltico, este material posee propiedades reológicas que influyen en el desempeño de los pavimentos. Este material se caracteriza por presentar un comportamiento viscoelástico (no newtoniano). En pruebas y especificaciones de asfalto, el comportamiento no newtoniano se estudia utilizando la teoría de la viscoelasticidad lineal. El comportamiento de un viscoelástico lineal indica que las propiedades del material cambian en función de la velocidad de corte y temperatura. Un material viscoelástico combina el comportamiento de un sólido elástico y un líquido viscoso (Papagiannakis, 2008). En la Figura 1.2.3 se presenta la respuesta viscoelástica en el tiempo de un material asfáltico.

Se observa en la Figura 1.2.3 (a) la respuesta de un material viscoelástico lineal bajo una carga de fluencia, donde se presenta un aumento de deformación a una tasa decreciente en el tiempo y al ser detenida la carga externa el material viscoelástico puede recuperar parte de la deformación, pero sin llegar a su estado inicial. Mientras que, en la Figura 1.2.3 (b) se observa el comportamiento de relajación de este tipo de materiales, donde ante la aplicación de una deformación constante ocurre una disminución de la tensión sin llegar a cero después del transcurso de cierto tiempo.

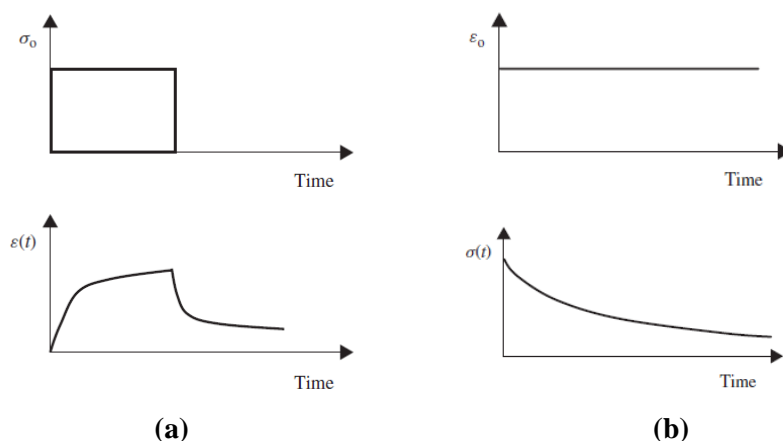


Figura 1.2.3. Respuesta de un material viscoelástico en el tiempo a) Deformación en el tiempo frente a una carga constante y b) deformación en el tiempo frente a una descarga en el tiempo (relajación). (Papagiannakis et-al., 2008)

Este comportamiento del ligante se puede representar mediante modelos análogos mecánicos, que estudian la viscoelasticidad en el dominio temporal (respuesta transiente ante la aplicación de esfuerzo o deformación contante). Un ejemplo es el modelo de Burger que corresponde a una combinación del comportamiento elástico, viscoso newtoniano y elástico retardado, representado mediante elementos elásticos (resorte) y viscosos (amortiguador) conectados en serie y en paralelo como se presenta en la Figura 1.2.4 (a). Por otro lado, al aplicar cargas sobre el asfalto, este se deforma según la Figura 1.2.4 (b), donde se observa que aplicada la carga existe una deformación instantánea, a medida que avanza el tiempo hay un aumento en la deformación con una tasa decreciente y retirar la carga existe una recuperación de la deformación que no es total. Lo recuperado corresponde a la deformación elástica, en cambio la deformación irre recuperable corresponde a la deformación viscosa del material.

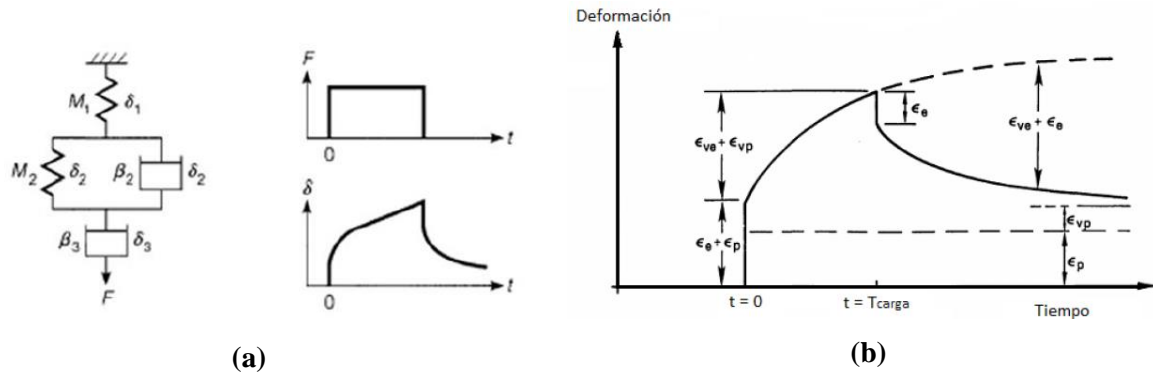


Figura 1.2.4. Comportamiento viscoelástico del ligante asfáltico, a) modelo análogo mecánico de Burger y b) deformación unitaria en el tiempo debido a esfuerzo constante. (Delgadillo, 2022)

### 1.3. Viscoelasticidad en el dominio de las frecuencias

Para estudiar las propiedades de los materiales viscoelásticos estos se pueden estudiar mediante dos maneras distintas, una es en el dominio temporal mencionada en la sección anterior y otra es en el dominio de frecuencias. En este último, se estudia la respuesta dinámica aplicando cargas cíclicas a frecuencias altas para obtener respuestas en tiempos cortos de carga. En general, los materiales viscoelásticos son caracterizados mediante ensayos dinámicos, donde es aplicada una carga sinusoidal de esfuerzo (o deformación) y se obtiene una respuesta de deformación (o esfuerzo) también sinusoidal.

Al aplicar cargas sinusoidales, entre el esfuerzo cortante aplicado y la deformación de corte resultante se va a generar un desfase temporal. A este desfase temporal se le conoce como ángulo de fase ( $\delta$ ), donde un aumento o disminución de este indica un comportamiento más viscoso o elástico, respectivamente. En la Figura 1.3.1 (a) y (b) se observa un material con comportamiento perfectamente elástico ( $\delta=0^\circ$ ) y viscoso ( $\delta=90^\circ$ ), respectivamente.

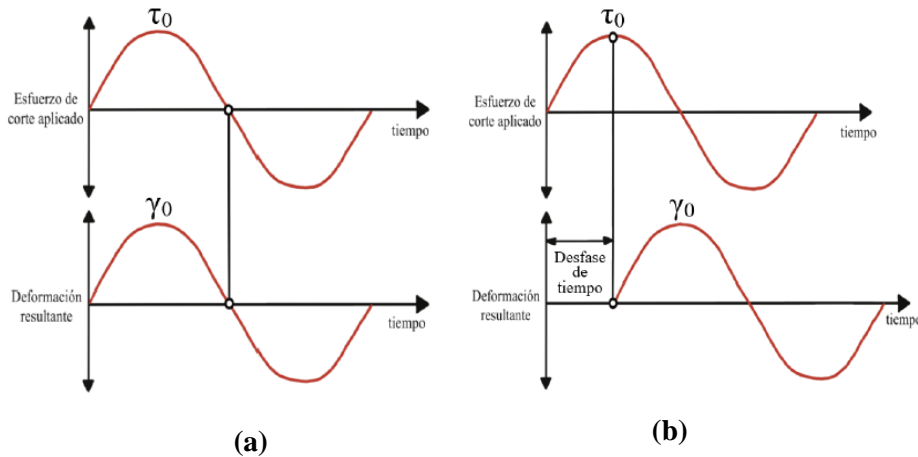


Figura 1.3.1. Desfase entre esfuerzo de corte y deformación de, a) material con respuesta elástica con ángulo de fase igual  $0^\circ$  y b) material con respuesta viscosa con ángulo de fase igual a  $90^\circ$ . (A. González 2023)

Los ligantes asfálticos poseen un ángulo de fase entre estos dos extremos, es decir, su valor se encuentra entre  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Tal como se muestra en la Figura 1.3.2, al ser aplicada una carga sinusoidal existe un desfase entre la curva de esfuerzo y la deformación. Un valor de ángulo de fase más cercano a  $0^\circ$  presenta un comportamiento más elástico y, al contrario, si presenta un valor cercano a  $90^\circ$  este material tendría un comportamiento más viscoso.

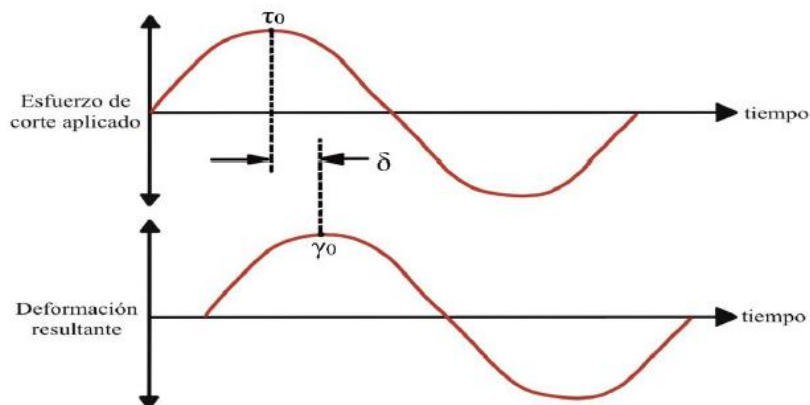


Figura 1.3.2. Desfase entre esfuerzo de corte y deformación para un material viscoelástico. (A. González 2023)

La relación entre la amplitud del esfuerzo y la amplitud de la deformación se conoce como módulo dinámico, que se denota como módulo dinámico axial ( $|E^*|$ ) para carga axial o módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) para carga de corte, sus expresiones se presentan en la Ecuación 1.3.1 y Ecuación 1.3.2, respectivamente. También, ambos parámetros se relacionan entre si según la Ecuación 1.3.3, donde es una relación dependiente del módulo de Poisson ( $\mu$ ).

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Ecuación 1.3.1}$$

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad \text{Ecuación 1.3.2}$$

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1 + \mu(t))} \quad \text{Ecuación 1.3.3}$$

El módulo dinámico y el ángulo de fase son las dos propiedades fundamentales necesarias para describir el comportamiento viscoelástico de los ligantes asfálticos. Estas dos propiedades son funciones de la frecuencia de carga, que se puede describir por frecuencia ( $f$ ) medida en Hertz (Hz) o frecuencia angular en rad/s. Estas propiedades al tener respuestas dinámicas, sus relaciones pueden expresarse matemáticamente al descomponer las ondas de esfuerzo y deformación del ligante según la Ecuación 1.3.4 y Ecuación 1.3.5, respectivamente. La onda de esfuerzo puede ser descompuesta en dos ondas según la Ecuación 1.3.6, una en fase con la deformación ( $\sin wt$ ) correspondiente a la fase elástica y otra con un desfase de  $\pi/2$  ( $\cos wt$ ) correspondiente a la fase viscosa.

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(wt) \quad \text{Ecuación 1.3.4}$$

$$\tau(t) = \tau_0 \sin(wt + \delta) \quad \text{Ecuación 1.3.5}$$

$$\tau(t) = \tau_0 \sin(\delta) \cos(wt) + \tau_0 \cos(\delta) \sin(wt) \quad \text{Ecuación 1.3.6}$$

Estas propiedades dinámicas pueden ser descritas por el módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y el módulo de pérdida ( $G''$ ) que se describen en la Ecuación 1.3.7 y Ecuación 1.3.8, respectivamente. Por simplicidad matemática se representa lo anterior utilizando una notación compleja, definido por la Ecuación 1.3.9. En esta ecuación el  $G^*$  se llama módulo complejo de corte y representa la rigidez del material para una frecuencia de carga específica. La magnitud de este módulo complejo de corte ( $|G^*|$ )

es lo que conocemos como módulo dinámico de corte (Ecuación 1.3.2) y es la rigidez medida por el equipo reómetro de corte dinámico.

$$G' = |G^*| \cos \delta \quad \text{Ecuación 1.3.7}$$

$$G'' = |G^*| \sin \delta \quad \text{Ecuación 1.3.8}$$

$$G^* = \frac{\tau(t)}{\gamma_0} = \frac{\tau_0 \cos \delta}{\gamma_0} + i \frac{\tau_0 \sin \delta}{\gamma_0} = G' + iG'' \quad \text{Ecuación 1.3.9}$$

Dicho lo anterior, el módulo complejo puede representarse gráficamente como un número complejo, donde posee dos componentes: módulo elástico y módulo viscoso. En la Figura 1.3.3 se observa que, mientras mayor es el ángulo de fase mayor es el valor de  $G''$  y es más viscoso el material. Mientras que, a un menor valor de ángulo de fase mayor es  $G'$  y tiene un comportamiento más elástico. Cabe recalcar que, debido a la no proporcionalidad en la relación entre el módulo dinámico de corte y ángulo de fase, puede haber dos ligantes con igual módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ), pero con diferentes ángulos de fase. Esto se traduciría en materiales con la misma rigidez, pero un asfalto con un comportamiento más viscoso que el otro y, por lo tanto, más susceptible a deformaciones.

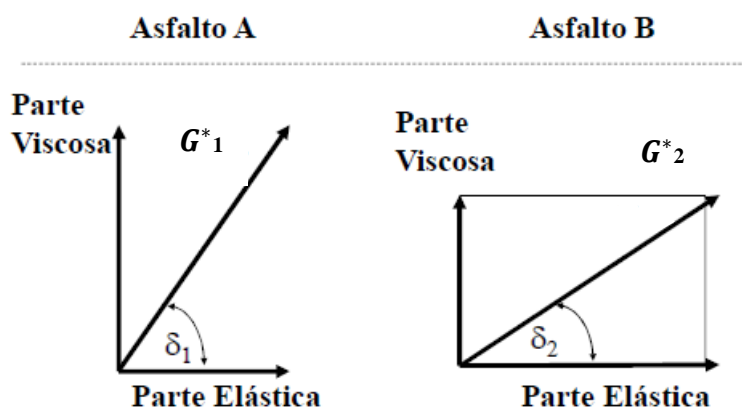


Figura 1.3.3. Comparación del comportamiento viscoelástico entre dos ligantes asfálticos. (Delgadillo, 2022)

## 1.4. Susceptibilidad del asfalto

Como se menciona anteriormente, tanto la composición química como sus propiedades físicas son susceptibles a una serie de factores externos como su origen, temperatura, envejecimiento y frecuencia de carga. Sus propiedades dinámicas, como el módulo dinámico y el ángulo de fase no son la excepción y también son variables dependientes de los factores antes mencionados.

### 1.4.1. Susceptibilidad a la temperatura y frecuencia de carga

El ligante asfáltico es susceptible a los cambios de temperatura y frecuencias de carga, sus propiedades viscoelásticas son en función del tiempo y temperatura. La mayoría de los ligantes asfálticos son considerados termoreológicamente simples, es decir, el efecto del tiempo sobre las propiedades del material puede ser reemplazado por el efecto de la temperatura y viceversa. En la Figura 1.4.1 se observa el efecto de la temperatura y la frecuencia de carga sobre las propiedades viscoelásticas.

Respecto al efecto de la temperatura, es claro que al aumentar la temperatura el ligante presenta una fluidez mayor, es decir, aumenta su comportamiento viscoso y disminuye su comportamiento elástico obteniendo un material más blanco y con menor viscosidad, lo que se traduce en un mayor ángulo de

fase. Por otro lado, al aumentar la temperatura el material disminuye su rigidez, es decir, se vuelve un material más blanco disminuyendo su módulo dinámico.

Respecto al tiempo, al disminuir la frecuencia de carga esto implica que aumenta el tiempo en el que el material se encuentra bajo esta carga, por ejemplo, un vehículo circulando a una menor velocidad. Se observa en la Figura 1.4.1 (b) que, si se aumenta la frecuencia de carga (menor tiempo) el ligante presenta una rigidez mayor, es decir, un módulo dinámico mayor y un ángulo de fase menor.

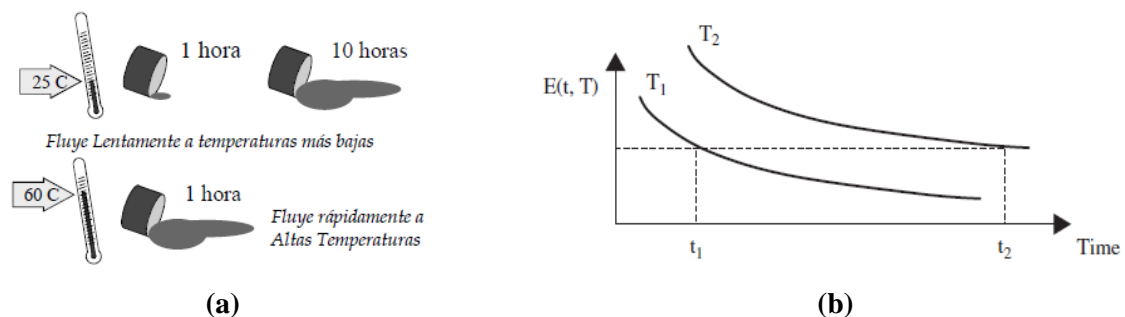


Figura 1.4.1. Comportamiento del ligante asfáltico frente a cambios de temperatura y frecuencia de carga de sus propiedades viscoelásticas, a) efecto de sobre el comportamiento viscoso y b) efecto sobre la rigidez, módulo dinámico. (Papagiannakis et-al., 2008)

### 1.4.2. Susceptibilidad al envejecimiento

El ligante asfáltico al ser utilizado en mezclas asfálticas para pavimentos, queda expuesto al tránsito y condiciones ambientales como, por ejemplo, la oxidación por el aire, radiación UV y humedad, causando el deterioro de los pavimentos. Un factor importante en estos deterioros es la presencia del ligante envejecido.

El envejecimiento del asfalto se refiere a los cambios en su composición química o propiedades debido a su exposición al aire y altas temperaturas, donde el material se oxida y evaporan sus componentes volátiles, este efecto es debido a que el material está compuesto de moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del ambiente, proceso conocido como oxidación.

El envejecimiento oxidativo del asfalto ocurre a lo largo de la vida útil del ligante asfáltico debido a que se encuentra permanentemente en contacto con el aire y el agua, estos son el envejecimiento primario y envejecimiento secundario descritos a continuación:

1. Envejecimiento primario o a corto plazo: se da principalmente en el proceso de mezclado en planta, almacenamiento y colocación de la mezcla asfáltica. Este envejecimiento es simulado en laboratorio mediante ensaye de película delgada rotatoria (Rolling Thin-Film Oven/RTFO) según la norma ASTM D 2872,2019 o MC 8.302.33.
2. Envejecimiento secundario o a largo plazo: este se da durante la vida de servicio del pavimento y ocurre a un ritmo lento, es decir, a una tasa de envejecimiento más lenta que depende de las condiciones ambientales que está expuesto el pavimento. Es simulado en laboratorio mediante cámara de envejecimiento a presión (Pressure Aging Vessel/PAV) que es descrito en la norma ASTM D6521, 2019 o según método descrito en MC 8.302.23.

Otras formas en que el asfalto se envejece son la volatilización y el endurecimiento físico. La primera ocurre durante el proceso de mezclado y construcción, cuando los componentes volátiles tienden a evaporarse del betún asfáltico. La segunda ocurre cuando el betún se expone a temperaturas muy bajas por períodos prolongados de tiempo, siendo más considerable a temperaturas por debajo de los 0°C (Á. González, 2012).

En cuanto al cambio en la composición química, a medida que el ligante envejece los componentes volátiles se convierten en asfaltenos, provocando un aumento gradual de estos. En la Figura 1.4.2 se presenta el comportamiento de los componentes de un ligante en términos del índice de envejecimiento (relación entre la viscosidad del betún recuperado y la viscosidad del betún original) y

también los componentes químicos durante las diferentes etapas del envejecimiento. En específico en la gráfica se observa que, el contenido de asfaltenos aumenta y muestra un aumento gradual con el tiempo lo que se traduce en un ligante más rígido. Mientras que, el contenido de resina, aromáticos y saturados (maltenos) disminuyen con el tiempo. Finalmente, la mayor tasa de cambio de estos componentes químicos se presenta durante el mezclado y al ser compactado.

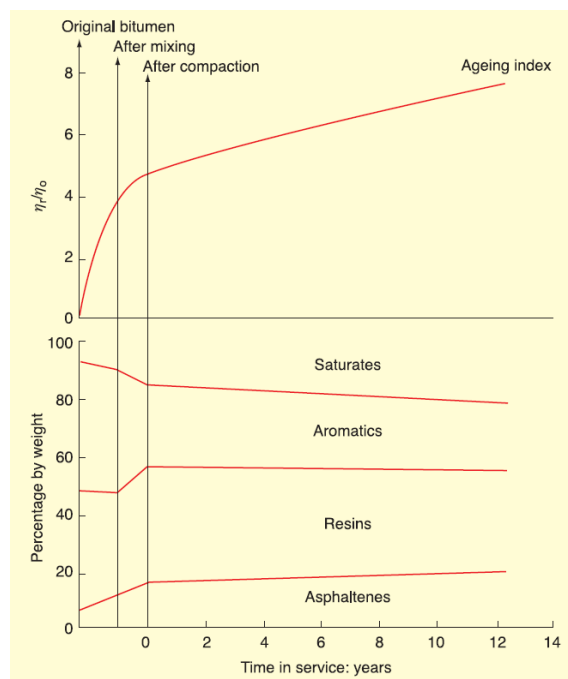


Figura 1.4.2. Cambios en la composición del ligante durante mezclado, compactación y servicio. (Read et al., 2003)

Dicho lo anterior, se ha comprobado que las propiedades reológicas del asfalto están fuertemente influenciadas por el contenido de asfaltenos y que manteniendo una proporción de este componente constante y aumentar los saturados y resinas generan un reblandecimiento y endurecimiento del betún, respectivamente. Cabe recalcar que, aun cuando la composición química puede relacionarse con propiedades físicas dada una composición específica, debe notarse que betunes de composición química muy diferente pueden tener propiedades físicas muy similares, cuando provienen de crudos distintos (Delgadillo, 2022).

Otra manera analizar el cambio en la composición química del ligante asfáltico debido al envejecimiento es mediante una técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR). La espectrometría FTIR permite identificar los grupos funcionales presentes en una muestra y entrega información valiosa de los cambios en la composición química de los ligantes con el tiempo.

En los espectros se observan peaks de absorción en diferentes longitudes de onda, lo que corresponde a los diferentes grupos funcionales presentes en una muestra. Los cambios químicos producidos en el ligante pueden ser caracterizados mediante la determinación de índices de envejecimiento, basados en parámetros medidos como la intensidad de ciertos peaks o la relación entre ellos. Por ejemplo, se puede determinar los índices de oxidación carbonilo ( $I_{C=O}$ ) y sulfóxido ( $I_{S=O}$ ) calculados como la relación entre las áreas de los peaks asociados a los grupos funcionales carbonilo y sulfóxido (1700  $\text{cm}^{-1}$  and 1030  $\text{cm}^{-1}$ , respectivamente) y un área de referencia ( $\Sigma RA$ ), según las siguientes ecuaciones (Ecuación 1.4.1, Ecuación 1.4.2 y Ecuación 1.4.3):

$$I_{C=O} = \frac{A_{1700}}{\Sigma RA} \quad \text{Ecuación 1.4.1}$$

$$I_{S=0} = \frac{A_{1030}}{\sum RA} \quad \text{Ecuación 1.4.2}$$

$$\sum RA = A_{(2953,2862)} + A_{(1700)} + A_{(1600)} + A_{(1460)} + A_{(1376)} + A_{(1030)} + A_{(864)} + A_{(814)} + A_{(743)} + A_{(724)} \quad \text{Ecuación 1.4.3}$$

En investigaciones se ha demostrado que ambos índices aumentan su valor al aumentar el tiempo de envejecimiento (R. Jing, 2021). En la Figura 1.4.3, se presenta un espectro FTIR de una muestra de ligante extraída de RAP comparada con un ligante CA-24 en estado original.

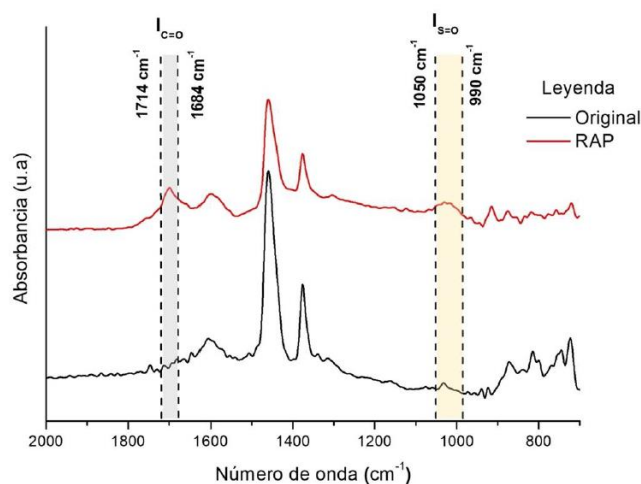


Figura 1.4.3. Espectros FTIR-ATR de las muestras de ligante asfáltico original (CA-24 en color negro), y del ligante oxidado extraído de RAP (en color rojo). (Informe resultados proyecto FONDEF ID21110127, 2023)

Adicionalmente, se puede calcular un índice combinado ( $I_{comb} = I_{C=O} + I_{S=O}$ ) que considera los cambios químicos generales producidos por el fenómeno de oxidación en una muestra de ligante asfáltico.

## 1.5. Superposición de tiempo y temperatura

Como se menciona en la sección anterior, las propiedades viscoelásticas están en función del tiempo y la temperatura. Diversos estudios han demostrado que para ligantes asfálticos convencionales, el efecto del tiempo y la temperatura puede ser combinado en un parámetro único a través del principio de “Superposición de tiempo y temperatura”, el cual implica que existe la relación presentada en la Ecuación 1.5.1.

$$E(t_1, T_1) = E(t_2, T_2) \quad \text{Ecuación 1.5.1}$$

La expresión anterior nos indica que, si se necesita un módulo de relajación a una temperatura menor ( $T_2$ ) y un tiempo de carga muy largo ( $t_2$ ), se puede aumentar la temperatura ( $T_1$ ) y disminuir el tiempo de carga ( $t_1$ ) para obtener el mismo módulo, es decir, el principio establece que al aumentar (disminuir) la temperatura, tiene un efecto en la respuesta equivalente a alargar (o acortar) el tiempo real de carga.

La superposición tiempo-temperatura es utilizada para ensayos que miden diferentes propiedades viscoelásticas (módulo de relajación, fluencia, módulo dinámico, ángulo de fase) en una amplia gama

de temperaturas y tiempos de carga (o frecuencias). En específico, se utiliza para construir curvas maestras, que describen la propiedad viscoelástica de referencia en un rango de tiempo o frecuencia.

### 1.5.1. Curvas maestras

A partir de ensayos de barrido de frecuencia-temperatura y el principio de superposición de tiempo-temperatura se pueden construir las curvas maestras tanto para el módulo complejo de corte ( $G^*$ ) como para el ángulo de fase ( $\delta$ ). La siguiente ecuación de William-Landel-Ferry describe de manera bastante satisfactoria el efecto de la temperatura en la relajación de los materiales como los polímeros y asfaltos (Delgadillo, 2022):

$$\log(a_t(w)) = \log\left(\frac{w}{w_r}\right) = \frac{-k_1(T - T_r)}{k_2 + (T - T_r)} \quad \text{Ecuación 1.5.2}$$

Donde,

$k_1$  y  $k_2$  son constantes que dependen del material.

$T$  es la temperatura de la curva en °C.

$T_r$  es la temperatura de referencia en °C.

$w$  es la frecuencia de la curva en rad/s.

$w_r$  es la frecuencia reducida en rad/s.

$a_t(w)$  es el factor de corrimiento.

El tiempo reducido (o frecuencia reducida) corresponde al tiempo (o frecuencia) de carga en la cual, a la temperatura de referencia, se obtiene el mismo valor de rigidez que a la temperatura real a un tiempo de carga (o frecuencia) real. Mientras que, el factor de corrimiento  $a(T)$  define el desplazamiento horizontal necesario que deben tener los valores a una temperatura determinada para alinearse con la curva maestra a la temperatura de referencia (A. González, 2012), es una función de cambio que relaciona los tiempos de carga de la curva original y la curva de referencia tal como se muestra en la Ecuación 1.5.3 y es único para cada temperatura.

$$a(T) = \frac{t}{tr} \quad \text{Ecuación 1.5.3}$$

Por lo tanto, la propiedad reológica (módulo dinámico o ángulo de fase) medidos a diferentes temperaturas y frecuencias se pueden representar cualitativamente como en la Figura 1.5.1 (a). La familia de curvas obtenidas en este barrido se puede desplazar de manera horizontal hasta una temperatura de referencia ( $T_2$ ), hasta coincidir en una sola curva como se muestra en la Figura 1.5.1 (b).

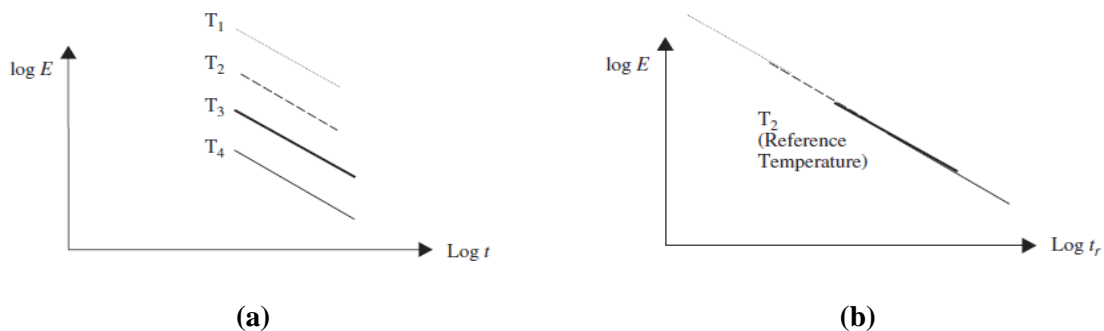


Figura 1.5.1. Cambio de datos para construir una curva maestra, a) familia de curvas de un ligante a diferentes temperaturas y frecuencias y b) curvas ajustadas a una temperatura de referencia  $T_2$ . (Papagiannakis, 2008)

## 1.5.2. Diagramas de black

El diagrama de Black se construye graficando el valor del módulo dinámico, en escala logarítmica en el eje de las abscisas, y el valor del ángulo de fase en escala aritmética en el eje de las ordenadas. Esta gráfica es una herramienta que permite identificar potenciales errores de medición durante ensayos de frecuencia y temperaturas. muy útil para representar los valores de módulo dinámico y de ángulo de fase obtenidos a temperaturas altas. 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). En la Figura 1.5.2 se presenta un ejemplo de diagrama de black de una muestra de ligante asfáltico.

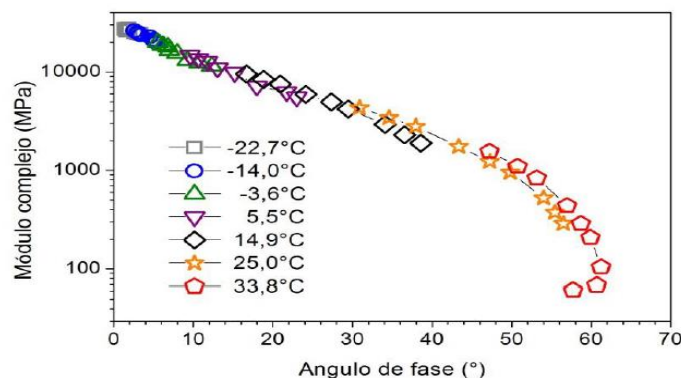


Figura 1.5 Gráfica de espacio de Black.

Figura 1.5.2. Ejemplo de diagrama de black. (H. Delgado, 2017).

## 1.6. Tipos de deterioros principales en el pavimento asfáltico

Debido a la susceptibilidad del ligante asfáltico a la temperatura y frecuencia de carga, al ser utilizado es mezclas para pavimentos este presenta susceptibilidad a ciertos tipos de deterioros. Los deterioros más comunes experimentados en el pavimento asfáltico son el agrietamiento térmico y agrietamiento por fatiga, debido a bajas temperaturas y repetición de cargas, respectivamente. También, se presenta el ahuellamiento a altas temperaturas debido a la acumulación de deformaciones.

Cabe recalcar que, este tipo de deterioros son evaluados mediante la especificación por grado de desempeño Superpave (PG). Esta especificación se enfoca en la prevención de los deterioros antes mencionados: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico.

### 1.6.1. Ahuellamiento

El ahuellamiento es una acumulación de muy pequeñas deformaciones permanentes y ocurre más frecuente en época de verano cuando el pavimento se encuentra a altas temperaturas. Este tipo de deterioro es más crítico durante los primeros años de vida del pavimento, cuando el ligante es más blando. Esta falla se puede generar debido a la falta de soporte adecuado de la subrasante, un exceso de ligante en la mezcla o uso de agregados redondeados.

Se relaciona con una baja resistencia al corte de las mezclas asfálticas, donde para asegurar un buen desempeño lo ideal sería escoger un ligante no solo duro sino lo más próximo posible a un sólido elástico a altas temperaturas. Por otro lado, para incrementar esta resistencia al corte se puede elegir un agregado pétreo de buena angularidad y rugosidad.

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 tal como se muestra en la Figura 1.6.1. Los pavimentos con ahuellamiento tienen una seguridad deficiente porque los surcos que se forman retienen suficiente agua para provocar hidroplaneo o acumulación de hielo.



*Figura 1.6.1. Ahuellamiento de pavimentos asfálticos. (A. Osorio, 2020)*

### 1.6.2. Agrietamiento por fatiga

Este tipo de deterioro también es conocido como agrietamiento de piel de cocodrilo, de mapa o por cargas de tránsito repetidas. Ocurre en áreas sometidas a cargas de tráfico repetidas donde al igual que en el ahuellamiento, es un tipo de deterioro que con mucha frecuencia se produce en la huella de las ruedas. Es un agrietamiento que es más crítico en etapas avanzadas de la vida del pavimento, cuando el betún se envejece y se vuelve más frágil.

Además de cargas repetidas durante la vida útil del pavimento, esta falla podría deberse a una capacidad de soporte inadecuada, drenaje pobre o un betún asfáltico muy rígido en la capa superficial. Se presenta como una serie de grietas interconectadas en las primeras etapas de desarrollo, donde con el tiempo pueden ser fallas de mayor severidad y generar baches. En la Figura 1.6.2 se presenta un ejemplo de este deterioro con una severidad media.



*Figura 1.6.2. Agrietamiento por fatiga de pavimentos asfálticos. (FHWA, 2014)*

### 1.6.3. Agrietamiento térmico

El agrietamiento por baja temperatura es un deterioro provocado por las condiciones climáticas expuestas, este se produce cuando el pavimento se enfría rápidamente en invierno y se contrae generando fisuras. Principalmente es debido a la alta susceptibilidad térmica del ligante y es más crítico en etapas avanzadas de la vida del pavimento debido a la rigidez del material.

Se caracteriza por ser grietas trasversales (es decir, perpendicular a la dirección del tránsito) que ocurren a intervalos regulares tal como se muestra en la Figura 1.6.3.



Figura 1.6.3. Agrietamiento térmico de pavimentos asfálticos. (Delgadillo,2022)

## 1.7. Especificación por grado de desempeño Superpave (PG)

Como se menciona en la sección anterior (1.6), la especificación por grado de desempeño previene tres tipos de deterioro fundamentales de los pavimentos asfálticos: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico. La primera versión fue originada por el SHRP (Strategic Highway Research Program), donde el producto final fue un nuevo sistema conocido como Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) que representa un sistema más avanzado de especificación de los ligantes asfálticos, diseño de mezclas asfálticas y su análisis.

Una parte de este sistema Superpave, es la especificación del ligante asfáltico basada en el desempeño (performance) indicado por la normativa ASTM D6373, 2021. Esta especificación es en base al clima y a la temperatura prevista en terreno, donde las temperaturas relevantes son la temperatura promedio más alta (ahuellamiento) registrada en el pavimento a lo largo de 7 días y la temperatura mínima (agrietamiento térmico) registrada en el pavimento. Además, se determina la temperatura media (fatiga) según la Ecuación 1.7.1.

$$\text{Temperatura media} = \frac{(T_{\text{Alta}} + T_{\text{Baja}})}{2} + 4 \quad \text{Ecuación 1.7.1}$$

La clasificación del ligante tiene una discretización cada 6°C y consiste básicamente en representar las condiciones del pavimento mediante una doble numeración (PG XX-YY). Por ejemplo, para un ligante PG 64-22 el primer número es llamado el “grado alto de temperatura”, en otras palabras, el ligante poseería propiedades físicas adecuadas al menos hasta los 64°C. Así mismo, el segundo número es llamado “grado de baja temperatura” y significa que el ligante tendría propiedades físicas adecuadas hasta al menos los -22°C.

Esta caracterización utiliza instrumentos que miden propiedades fundamentales del betún y considera el envejecimiento a corto y largo plazo, envejecido en un horno de película delgada rotatoria (RTFO) y con una cámara de envejecimiento a presión (PAV), respectivamente. Los equipos utilizados para realizar los ensayos necesarios son los siguientes (A. González, 2012):

1. Viscosímetro rotacional (RV): usado para caracterizar la viscosidad de los betunes asfálticos a temperaturas esperadas en la etapa de producción y construcción del pavimento.
2. Reómetro de corte dinámico (DSR): usado para caracterizar las propiedades viscoelásticas de betunes asfálticos para temperaturas de servicio altas y medias.
3. Reómetro de viga en flexión (BBR): usado en conjunto con el equipo de tracción directa para caracterizar las propiedades de resistencia y relajación de betunes asfálticos a bajas temperaturas de servicio.
4. Equipo de tracción directa (DTT): usado en conjunto con el reómetro de viga en flexión para caracterizar las propiedades de resistencia y relajación de betunes asfálticos a bajas temperaturas de servicio.

### 1.7.1. Prevención del ahuellamiento

Uno de los ensayos Superpave para los ligantes asfálticos es mediante el reómetro de corte dinámico (DSR), este se utiliza para caracterizar propiedades viscoelásticas del ligante. En específico, mide el módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ). El ensayo opera como se muestra en la Figura 1.7.1, donde la muestra de asfalto se coloca entre una placa fija y otra rotaria para ser sometido a esfuerzos de corte a una frecuencia de 10 rad/s.

Se especificaban requisitos mínimos de rigidez y elasticidad a la temperatura máxima esperada en el pavimento, es decir, se utiliza un parámetro que considera tanto el  $G^*$  como el  $\delta$  para prevenir el ahuellamiento a altas temperaturas del pavimento. Para prevenir el ahuellamiento se debe asegurar que el ligante asfáltico sea lo suficientemente rígido como para evitar deformaciones excesivas y lo suficientemente elástico para lograr recuperar su forma original. Para esto, se utiliza la parte elástica del módulo complejo de corte ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ).

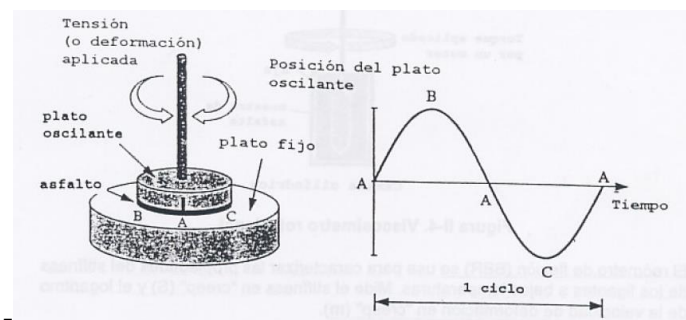


Figura 1.7.1. Ejemplificación del equipo reómetro de corte dinámico. (Asphalt institute, 1996)

El ahuellamiento es un deterioro provocado por la acumulación de deformación producido por estar sometido a cargas repetidas, donde se utiliza cierta cantidad de energía. Parte de esta energía es disipada a través de una deformación permanente del pavimento. Para poder minimizar el efecto del ahuellamiento se debe minimizar la energía disipada por cada ciclo de carga, donde el trabajo disipado se expresa como sigue a continuación:

$$W_i = \pi \sigma_0^2 \left( \frac{1}{G^* / \text{sen}(\delta)} \right) \quad \text{Ecuación 1.7.2}$$

Donde,

- $W_i$  es el trabajo disipado por ciclo de carga
- $\sigma$  es el esfuerzo de corte aplicado por cada ciclo de carga
- $G^*$  es el modulo complejo de corte
- $\delta$  es el ángulo de fase

Dicho lo anterior, para controlar el ahuellamiento es intuitivo pensar en querer aumentar el módulo dinámico y tener un material más rígido, y disminuir el ángulo de fase para tener un material con comportamiento más elástico. Controlando estas dos propiedades la especificación garantiza que el asfalto provea su mayor aporte a la resistencia al ahuellamiento a altas temperaturas.

El ensayo se realiza según la metodología presentada en la norma ASTM D7175-15 y los límites para el parámetro  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  son los presentados en la Ecuación 1.7.3 y Ecuación 1.7.4 para la muestra medida en estado original y con envejecimiento primario (RTFO), respectivamente.

$$\left( \frac{|G^*|}{\text{sen}(\delta)} \right)_{\text{Original}} \geq 1,00 \text{ kPa} \quad \text{Ecuación 1.7.3}$$

$$\left( \frac{|G^*|}{\text{sen}(\delta)} \right)_{RTFO} \geq 2,2 \text{ kPa} \quad \text{Ecuación 1.7.4}$$

### 1.7.2. Prevención del agrietamiento por fatiga

Para el caso del deterioro por fatiga, se realizan ensayos mediante el equipo DSR sometido a esfuerzos de corte a una frecuencia de 10 rad/s. Se mide el módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) a temperaturas intermedias y a muestras con envejecimiento secundario (PAV), debido a que este deterioro se presenta en etapas avanzadas de la vida útil del pavimento.

Este tipo de deterioro como se detalla en la sección 1.6.2, se debe principalmente a cargas de tráfico repetidas y es más crítico cuando el asfalto se encuentra rigidizado por el envejecimiento. Por lo que, para prevenirlo es deseado un ligante con comportamiento más elástico pero que no presente una gran rigidez. El parámetro que se utiliza para controlar este deterioro es  $|G^*|\text{sen}(\delta)$ , este es la parte que describe la porción viscosa o disipativa del módulo complejo de corte.

Al igual que para el caso del ahuellamiento, con cada ciclo de carga se utiliza cierta cantidad de energía. Parte de esta energía es disipada a través de una deformación o agrietamiento permanente del pavimento. Se debe minimizar la energía disipada por cada ciclo de carga para prevenir las fisuras por fatiga, donde el trabajo disipado se expresa como sigue a continuación:

$$W_i = \pi \varepsilon_0^2 G^* \text{sen}(\delta) \quad \text{Ecuación 1.7.5}$$

Donde,

- $W_i$  es el trabajo disipado por ciclo de carga
- $\varepsilon$  deformación ocurrida en cada ciclo de carga
- $G^*$  es el modulo complejo de corte
- $\delta$  es el ángulo de fase

El límite para el parámetro  $|G^*|\text{sen}(\delta)$  es el presentado en la Ecuación 1.7.6 para la muestra medida con envejecimiento primario (RTFO) + envejecimiento secundario (PAV). Además, el valor mínimo para el ángulo de fase es de  $42^\circ$  según lo indicado en la normativa AASHTO M320-21.

$$|G^*|\text{sen}(\delta) \leq 6000 \text{ kPa} \quad \text{Ecuación 1.7.6}$$

### 1.7.3. Prevención del agrietamiento térmico

El reómetro de viga en flexión (BBR) se utiliza para caracterizar las propiedades de los ligantes a bajas temperaturas, midiendo la rigidez ( $S(t)$ ) y la pendiente de la rigidez en fluencia en función del tiempo de carga ( $m$ ). El equipo mide las propiedades a partir de la respuesta de una probeta de ligante en forma de pequeña viga simplemente apoyada sometido a una carga constante, tal como se presenta en la Figura 1.7.2.

La rigidez  $S(t)$  es una medida de la dureza y fragilidad a bajas temperaturas, este valor se determina según la expresión de la Ecuación 1.7.8. Mientras que, la pendiente de la rigidez  $m$  es un indicador de la capacidad de relajar esfuerzos a bajas temperaturas, como es representada en la Figura 1.7.3.

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3d(t)} \quad \text{Ecuación 1.7.7}$$

Donde,

- $S(t)$  es la rigidez al tiempo  $t$  en MPa.
- $P$  la carga aplicada en Newton.

L es la distancia entre apoyos de vigas (102 mm).  
 b es el ancho de la viga (12,5 mm).  
 h es la altura de la viga (6,25 mm).  
 d(t) es la deflexión al tiempo t en mm.

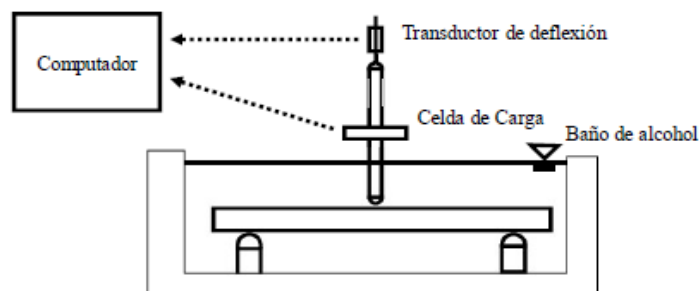


Figura 1.7.2. Ejemplificación del equipo reómetro de viga en flexión (BBR). (Delgadillo, 2022)

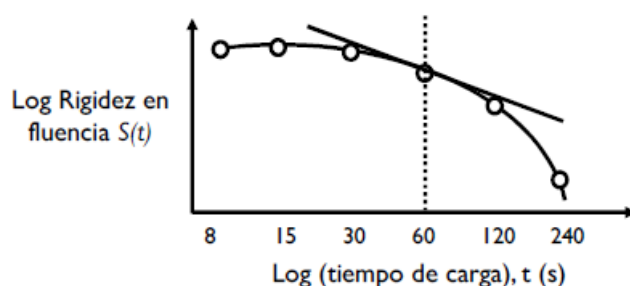


Figura 1.7.3. Gráfica de relación entre la rigidez y el tiempo de carga en ensayo con reómetro de viga en flexión. (Delgadillo, 2022)

Los ligantes con una baja rigidez S no se fisurarán en tiempos fríos y ligantes con altos valores de m son más efectivos en la relajación de tensiones que se desarrollan en la estructura de pavimentos asfálticos cuando la temperatura desciende, asegurando un mínimo fisuramiento por baja temperatura. Por otro lado, el ligante a medida que se envejece y disminuye la temperatura aumenta su rigidez, por lo que para este ensayo se evalúan las muestras con envejecimiento secundario (PAV).

El ensayo se realiza según la metodología presentada en la norma ASTM D6648-08 y los límites para la rigidez S es presentado en la Ecuación 1.7.8, donde el criterio de falla es una rigidez máxima a los 60 segundos de 300 [Mpa]. Mientras que, para la pendiente tiene su valor mínimo es de 0,300 presentada en la Ecuación 1.7.9.

$$S \leq 300 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 1.7.8}$$

$$m \geq 0,300 \quad \text{Ecuación 1.7.9}$$

Finalmente, en la Figura 1.7.4 se presenta un resumen de los equipos utilizados para la especificación por grado de desempeño Superpave. En este se observa el objetivo principal que tiene cada equipo y los grados de envejecimiento de las muestras a ensayar.

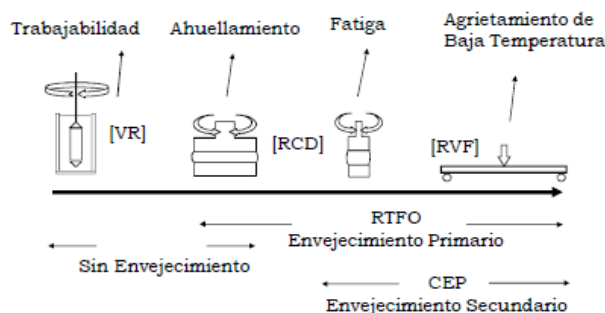


Figura 1.7.4. Resumen de ensayos para especificación por grado de desempeño. (Delgadillo, 2022)

## 1.8. Especificación tradicional

Para especificar los ligantes asfálticos existen métodos corrientes, donde se realizan algunos ensayos “tradicionales” para asfaltos modificados y no modificados que se encuentran descritos en el Volumen 8 del Manual de Carreteras. Típicamente para caracterizar la consistencia de los cementos asfálticos es realizado el ensayo de penetración o el ensayo de viscosidad, sin embargo, hay otros ensayos como el punto de ablandamiento o punto de inflamación que se utiliza para evaluar la seguridad durante el mezclado y compactación.

### 1.8.1. Viscosidad

Como se describen en el inciso 1.1.2, la viscosidad es una propiedad importante para medir la consistencia del asfalto y se mide como la razón entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de deformación de corte (Ecuación 1.8.1), es una medida de la resistencia del líquido a fluir. En general, la viscosidad del asfalto es dependiente de la velocidad de deformación de corte y solo a altas temperaturas (de mezcla) se comporta como un líquido newtoniano, donde la viscosidad es independiente de la tasa de corte.

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}$$

Ecuación 1.8.1

Hay diferentes métodos para medir esta propiedad, la viscosidad absoluta se puede medir a una temperatura determinada y mediante un tubo (en forma de U), graduado y lleno con asfalto. Se mide a 60°C, y como a esta temperatura el asfalto no logra fluir, se usa un vacío para lograr flujo de asfalto por el tubo, registrando el tiempo para fluir entre marcas del tubo. La viscosidad también se mide a 135°C, que es una temperatura suficientemente alta para que el asfalto fluya bajo fuerzas gravitacionales sin la necesidad de aplicar una presión de vacío. En el sistema internacional, la unidad de viscosidad es el pascal segundo (1 Pa·s = 10 poise).

Otro método para medir la viscosidad es mediante un viscosímetro rotacional, equipo capaz de medir el torque necesario para hacer girar un vástago sumergido en asfalto a temperatura de ensaye fija y a una velocidad constante. El esfuerzo cortante en la superficie del vástago y la expresión para calcular la viscosidad se presenta en la Ecuación 1.8.2 y Ecuación 1.8.3, respectivamente. Un esquema de este equipo se presenta en la Figura 1.8.1.

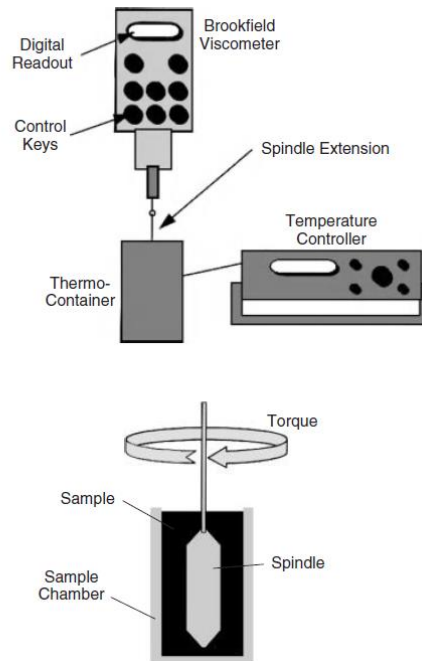


Figura 1.8.1. Esquema del viscosímetro rotacional. (Papagiannakis et-al., 2008)

$$\tau_b = \frac{T}{2\pi R_i^2 L} \quad \text{Ecuación 1.8.2}$$

$$\eta = \frac{T \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right)}{4\pi\omega} \quad \text{Ecuación 1.8.3}$$

## 1.8.2. Penetración

Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración de materiales bituminosos. El ensaye mide la consistencia del asfalto, donde valores altos de penetración indican consistencias más blandas. La penetración se realiza con una aguja de máquina de coser y se expresa como la distancia, en decimas de milímetros, que penetra verticalmente la muestra de asfalto, bajo condiciones fijas de carga, tiempo y temperatura (generalmente a 25°C). En la Figura 1.8.2 se presenta un esquema del ensayo.

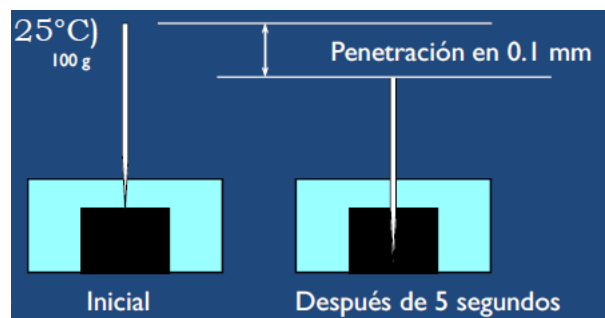


Figura 1.8.2. Esquema de ensayo de penetración de ligantes asfálticos. (Delgadillo, 2022)

Ensayos como la penetración, no miden una propiedad fundamental del asfalto y no controla la tasa de carga aplicada. Mientras que, la viscosidad es realizada a una temperatura específica, no considerando la susceptibilidad a la frecuencia de carga y a la temperatura que posee el ligante asfáltico.

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado algunos índices para determinar el cambio en las propiedades del ligante en función del tiempo. Un índice que se ha utilizado para medir la susceptibilidad a la temperatura basado en la penetración es el índice de penetración (PI) (Papagiannakis, 2008), expresado en la Ecuación 1.8.4 y Ecuación 1.8.5 donde,  $T_1$  y  $T_2$  son la temperatura en grados Celsius y A es susceptibilidad térmica de la penetración.

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad \text{Ecuación 1.8.4}$$

$$A = \frac{\log Pen(T_1) - \log Pen(T_2)}{T_1 - T_2} \quad \text{Ecuación 1.8.5}$$

### 1.8.3. Punto de ablandamiento

Un método para determinar el punto de ablandamiento de materiales asfálticos, cuyo valor se encuentra en el rango de 30 a 200°C es mediante el aparato de anillo y bola. El punto de ablandamiento es la menor temperatura que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra es calentada mediante incrementos a una velocidad prescrita, en un baño de agua o de glicerina.

El procedimiento consta de, colocar el ligante asfáltico en un anillo de bronce, luego colocar la bola de acero (3,5 kg) sobre la muestra de ligante, para finalmente aplicar calor de tal manera que la temperatura del líquido aumente a una velocidad uniforme de 5°C por minuto.

El ablandamiento en los ligantes asfálticos no ocurre a una temperatura definida y va a depender de diferentes factores, por lo que, se debe realizar mediante un método arbitrario, pero bien definido, a modo de comparar resultados. El punto de ablandamiento es conocido como el paso del comportamiento viscoelástico al comportamiento viscoso puro y nos proporciona información sobre la susceptibilidad del ligante a deformarse bajo cargas y temperaturas elevadas.

### 1.8.4. Punto de inflamación

Al aumentar la temperatura del ligante asfáltico, este libera gases inflamables que se encienden en presencia de una chispa o llama. Para la seguridad durante el mezclado y compactación que son realizados a altas temperaturas, se debe determinar el punto de inflamación del ligante. Un método para determinar el punto de inflamación y combustión es mediante ensayo de copa abierta de Cleveland.

El procedimiento consiste en, depositar una pequeña muestra de asfalto en un recipiente metálico; la temperatura de la muestra va aumentando rápidamente primero y luego más lento. A intervalos especificados, se acerca un pequeño encendedor a la muestra. El punto de inflamación corresponde a la menor temperatura a la cual la aplicación de la llama causa la inflamación de vapores por encima de la superficie del asfalto. Para determinar el punto de combustión, el ensayo continúa hasta que la llama causa la inflamación del asfalto o aceite y lo quema por lo menos 5 segundos. En la Figura 1.8.3 se muestra un esquema del ensayo de punto de inflamación.

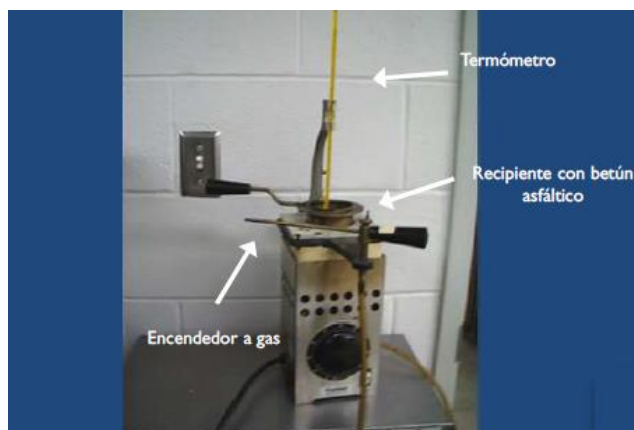


Figura 1.8.3. Esquema para ensayo de punto de inflamación en ligantes asfálticos. (Delgadillo, 2022)

Finalmente, existen diferentes métodos para clasificar a los ligantes asfálticos, donde el objetivo principal de estos sistemas de especificación son clasificar a los ligantes en función de sus propiedades reológicas y mecánicas asumiendo que se relacionan con el desempeño en terreno (Papagiannakis, 2008).

En el caso de las especificaciones tradicionales, se pueden clasificar según su grado de viscosidad (MC 8.301.1). Este sistema de clasificación se basa en la viscosidad absoluta medida a 60°C, donde además de la viscosidad, el ligante debe cumplir con otras exigencias para poder ser clasificado de uno y otro tipo de ligante. Los límites de esta especificación se presentan en la Figura 1.8.4.

TABLA 8.301.1.A  
ESPECIFICACIONES PARA LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS  
SEGÚN GRADO DE VISCOSIDAD

ENSAYES	GRADO DE VISCOSIDAD	
	CA 24	CA 14
Viscosidad original a 60°C, poises	Mín. 2400	Mín. 1400
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	Mín. 40	Mín. 40
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 100	Mín. 100
Ensaye de la Mancha (% xilol)	Máx. 30%	Máx. 30%
Solubilidad en tricloroetileno, %	Mín. 99	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	Mín. 232	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	Informar	Informar
Índice de Penetración	-2,0 a +1,0	-2,0 a +1,0
Película Delgada Rotatoria:		
- Pérdida por calentamiento (%)	Máx. 0,8	Máx. 0,8
- Viscosidad PDR a 60°C, poises	Informar	Informar
- Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 100	Mín. 100
Índice de Durabilidad	Máx. 4	Máx. 4

Figura 1.8.4. Especificaciones para cementos asfálticos según grado de viscosidad. (Manual de carreteras V8, 2021)

## 1.9. Rejuvenecedores

Debido a la susceptibilidad al envejecimiento que presenta el ligante, y los deterioros en el pavimento por la presencia de este ligante asfáltico envejecido, existen diferentes estrategias de preservación, mantenimiento y rehabilitación para mantener los caminos en buen estado. Para restaurar sus propiedades reológicas, un ligante asfáltico envejecido puede mezclarse con agentes suavizantes o un rejuvenecedor.

Los rejuvenecedores suelen ser suavizantes con una alta proporción de componentes ligeros, y su aplicación mejora las propiedades reológicas de los cementos asfálticos (Behnood, 2019). Suelen

consistir en aceites lubricantes, extractos y aceites diluyentes, que contienen una alta proporción de constituyentes de maltenos, que ayudan a reequilibrar la composición del ligante envejecido que perdió sus maltenos durante la construcción y servicio (Nam H. Tran et. al, 2012).

La adición de rejuvenecedores a los ligantes asfálticos duros y envejecidos suaviza y reduce la viscosidad del asfalto. Sin embargo, el mecanismo exacto de este proceso no está bien investigado. El mecanismo de rejuvenecimiento y sus efectos sobre el ligante envejecido va a depender del tipo de rejuvenecedor y su composición química, otros factores relevantes para su difusión son el tiempo y temperatura de mezclado, equipo de producción y método de incorporación (Behnood, 2019).

### 1.9.1. Efecto del rejuvenecedor

El ligante envejecido como se menciona en la sección anterior (inciso 1.4.2) cambia su composición química, y a medida que va envejeciendo el ligante los componentes volátiles se convierten en asfaltenos, provocando un aumento gradual de estos lo que se traduce en un ligante más rígido. Este cambio en la composición química se presenta en la Figura 1.9.1, donde se observa un cambio en la relación entre maltenos y asfaltenos. Este cambio estructural químico proporciona una base útil para definir el objetivo del rejuvenecimiento.

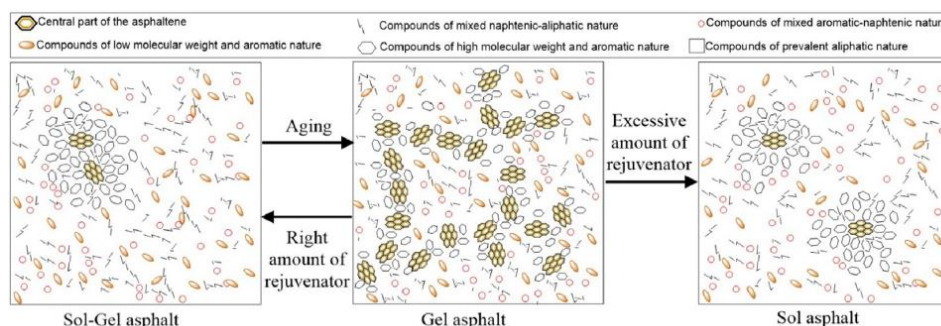


Figura 1.9.1. Los efectos del envejecimiento y rejuvenecimiento sobre la estructura coloidal de los ligantes asfálticos. (Behnood, 2019)

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 un estudio reciente realizado por Tabatabaee y Kurth (2017) se analiza el impacto de agentes rejuvenecedores sobre la estabilidad coloidal del betún envejecido, realizando una serie de pruebas analíticas en muestras envejecidas y rejuvenecidas para evaluar el efecto en la composición química del ligante. Según se observan en la Figura 1.9.2, se realizó un fraccionamiento sobre el betún envejecido y rejuvenecido para evaluar el efecto que tiene sobre la fracción SARA, mostrando que los rejuvenecedores aumentaron la fase maltena del betún envejecido, y como resultado se redujo la proporción de asfaltenos y maltenos.

Otros autores, han evaluado el rejuvenecimiento mediante la medición de índices de envejecimiento. Como se observa en la Figura 1.9.3, tanto el índice carbonilo como el sulfóxido aumentaron al aumentar el tiempo de envejecimiento, la temperatura y presión (Jing R., 2019). Al aplicar agentes rejuvenecedores, se ha demostrado que el índice de sulfóxido y el índice aromático disminuyen con el aumento del contenido de biorrejuvenecedores; sin embargo, no hay una tendencia estable para los cambios en el índice de carbonilo (Behnood, 2019). En la Figura 1.9.4 se observa los espectros ATR-FTIR de ambos índices de muestras rejuvenecidas, donde no hay mayor diferencia en la absorbancia en los espectros del número de onda correspondiente al índice sulfóxido, mientras que, para el índice carbonilo son aún mayores que para un ligante RAP.

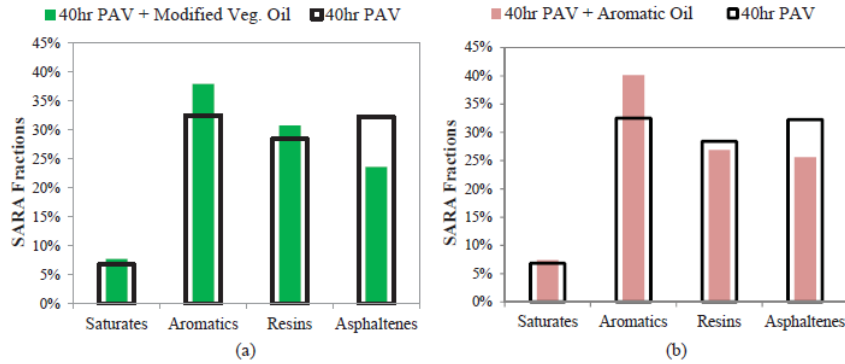


Figura 1.9.2. Efecto de un rejuvenecedor sobre las fracciones SARA de un ligante envejecido usando a) un rejuvenecedor modificado a base de aceite vegetal y b) un rejuvenecedor a base de aceite aromático. (Hassan A. Tabatabaee et. al, 2017)

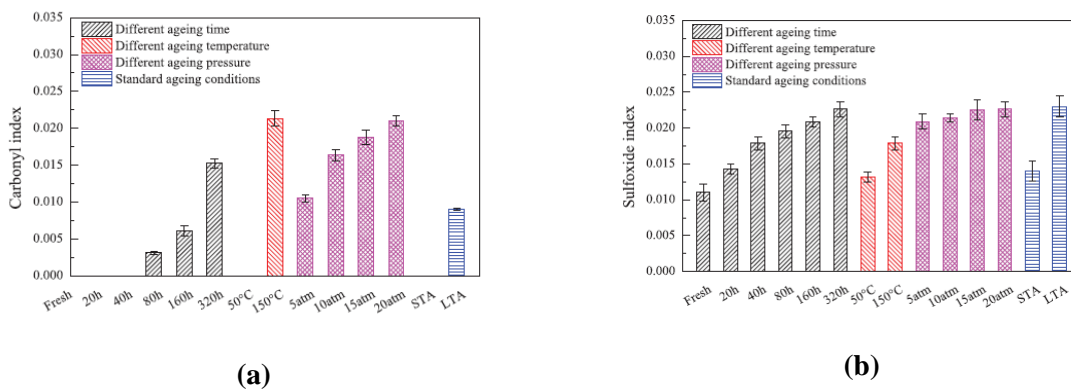


Figura 1.9.3. Índices de envejecimiento de ligante PEN 70/100 en diferentes condiciones de envejecimiento, a) índice carbonilo y b) índice sulfóxido. (Jing R., 2019)

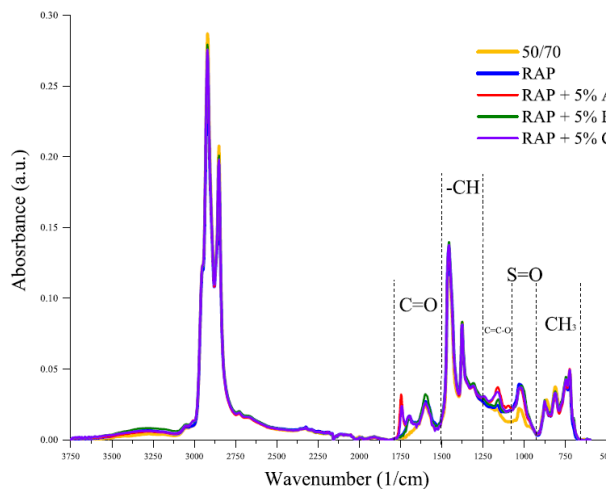


Figura 1.9.4. Espectros ATR-FTIR del ligante original 50/70, el ligante RAP y las muestras de RAP con rejuvenecedores A, B y C. (Cavalli et. al, 2018)

Así, distintos autores evalúan el efecto del rejuvenecimiento en base a que la aplicación de estos agentes puede modificar la estructura coloidal o la morfología química del ligante. Sin embargo, las investigaciones sobre el efecto rejuvenecedor sobre los ligantes asfálticos envejecidos se suelen

centrar sobre las propiedades reológicas generales del betún asfáltico (por ejemplo: penetración, viscosidad, módulos de corte complejos, etc.) (Zhao, 2018).

En general, los rejuvenecedores aumentan el grado de penetración, la ductilidad, ángulo de fase y contenido de componentes viscosos; disminuye el punto de ablandamiento, la viscosidad, el módulo complejo de corte, rigidez, energía de activación y mejora la elasticidad, susceptibilidad a la temperatura, estabilidad coloidal y vida a la fatiga (Behnood, 2019). En la Tabla 1.9.1, se presenta un resumen de los efectos de los rejuvenecedores sobre las propiedades de los ligantes asfálticos envejecidos.

Como se menciona en la tabla, los efectos sobre el ligante rejuvenecido van a depender de diferentes factores. Dentro de estos factores se encuentran:

- Tipo, fuente y propiedades del ligante asfáltico
- Características del ligante envejecido
- Tipo y cantidad de agente rejuvenecedor
- Condiciones de mezcla y preparación
- Características y cantidad de materiales reciclados
- Tiempo de carga y temperatura

Tabla 1.9.1. Efecto de rejuvenecedores en las propiedades de ligantes asfálticos. (Behnood, 2019)

Propiedad	Método de ensayos	Efectos
Propiedades a altas temperaturas	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 ( $G^*$ )
	Punto de ablandamiento de anillo y bola	Aumento del ángulo de fase ( $\delta$ ) Disminución del punto de ablandamiento Mayor grado de penetración Mayor ductilidad
Propiedades 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 en flexión (BBR)	Reducción de rigidez
	Punto de ruptura de frass	Incremento del valor-m
Composición química	SARA <sup>TM</sup>	La composición química depende del tipo, cantidad de rejuvenecedor y composición química del ligante envejecido
	SAR-AD <sup>TM</sup>	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 sulfóxido (S=O)

### 1.9.2. Tipos de rejuvenecedores

De acuerdo con la literatura, el termino de rejuvenecedor es utilizado a menudo para cualquier aditivo, sin especificar cuáles son los mecanismos de acción efectivos en el ligante. Sin embargo, estos pueden ser clasificados según su fuente, efecto sobre el ligante, entre otros. Según los últimos estudios (Prosperi, 2021), los rejuvenecedores se pueden clasificar, en función del efecto sobre el ligante envejecido, como:

- Agentes suavizantes, también llamados agentes fluidificantes o rejuvenecedores reológicos que incluyen:
  - Suavizantes incompatibles: que tienen principalmente un efecto reductor de la viscosidad.
  - Suavizantes solubles: que restablecen el equilibrio en la composición de SARA reenriqueciendo la fracción maltena.
- Reales rejuvenecedores o compatibilizadores, que ayudan a renovar las características físicas y químicas del ligante a través de la ruptura de las asociaciones intermoleculares entre los asfaltenos.

Los rejuvenecedores de tipo “agentes suavizantes” suelen estar basados en extractos de aceites lubricantes, donde incluyen un contenido adecuado de maltenos, componentes nafténicos o aromáticos con el objetivo de reequilibrar las fracciones SARA del ligante envejecido, caracterizado por una menor concentración de maltenos. Mientras que, los rejuvenecedores de tipo “compatibilizadores” son aditivos que permiten restaurar tanto el aspecto físico y propiedades químicas del ligante. En particular, son capaces de restaurar la condición de aglomeración de los asfaltenos a su estado original promoviendo su re-dispersión y generalmente, poseen un alto contenido en aromáticos que permita mantener la dispersión de los asfaltenos.

Tabatabaee y Kurth (2017) propusieron un método para categorizar rejuvenecedores en tres grupos: “Suavizantes solubles”, “Compatibilizadores” y “Suavizadores” en función de la fracción química del asfalto con mayor afinidad con el agente rejuvenecedor (Behnood, 2019). Según los resultados de este estudio se prevén y proponen categorías de agentes rejuvenecedores (Tabatabaee y Kurth, 2017) como se describen a continuación:

- Suavizantes solubles: complementa la fase “disolvente” de la estructura coloidal del ligante asfáltico, compatibles con los componentes de baja polaridad. Estos aditivos reducen la viscosidad y el módulo del ligante en general.
- Compatibilizadores: poseen afinidad por múltiples fracciones del ligante, además de reducir la viscosidad, se supone que estos aditivos dan como resultado una reducción de aglomeraciones de micelas de alto peso molecular.
- Suavizantes insolubles: a menudo presentan baja compatibilidad con los componentes de baja polaridad nafténicas, aromáticas y polares, especialmente a temperaturas más bajas. Pueden mostrar inicialmente efectos deseables sobre las propiedades reológicas del cemento asfáltico envejecido, pero a largo plazo pueden mostrar inestabilidad de fase y problemas de durabilidad.

Por otro lado, los rejuvenecedores también pueden ser clasificados dependiendo del tipo de aplicación en el que se utiliza. Por ejemplo, rejuvenecedores para mezclas asfálticas recicladas en caliente son clasificados por la norma ASTM D4552. Esta norma cubre un método estandarizado para aditivos derivados del petróleo que serán utilizados en reciclaje en caliente y los clasifica 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.

En este sentido, en las últimas décadas la investigación ha avanzado hacia la búsqueda de materiales con efecto rejuvenecedor para el cemento asfáltico envejecido que tengan costos más bajos y sean ambientalmente sostenible. Estos productos se llaman bio-rejuvenecedores, donde ejemplos de estos son el aceite de colza, aceite de soja, aceite de girasol, aceite de maíz, aceite de cocina usado, residuos de aceite de ricino, aceites orgánicos, entre otros (Prosperi, 2021).

De estos productos estudiados, se puede destacar el aditivo proveniente de la pirólisis del caucho de neumáticos fuera de uso. Norambuena-Contreras et al. (2021) demostró que la fracción líquida obtenida del proceso de pirólisis de NFU (aceite compuesto de hidrocarburos aromáticos y alifáticos

con un contenido de maltenos de hasta un 98% p/p.) puede difundirse en el cemento asfáltico envejecido, reduciendo su viscosidad y autorreparando sus microgrietas en un 100%.

### 1.9.3. Aplicaciones de rejuvenecedores

Se utilizan comúnmente tres tipos métodos para aplicar rejuvenecedores: aplicación como producto líquido a temperatura ambiente sobre cualquier superficie de pavimento asfáltico, líquido en mezclas asfálticas con altos contenidos de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) o mediante encapsulamiento del rejuvenecedor incorporadas a temperatura ambiente a nuevas mezclas asfálticas. Estos tres tipos de aplicación se observan en la Figura 1.9.5.

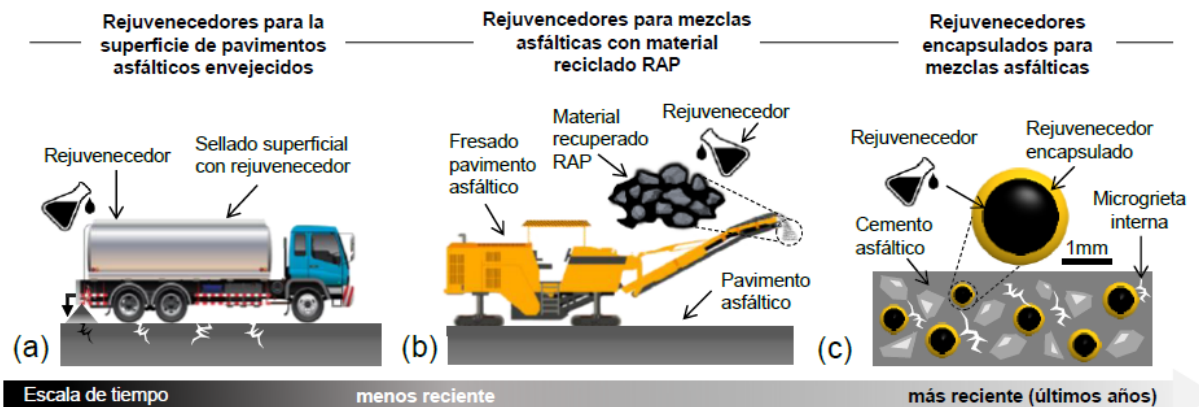


Figura 1.9.5. Esquema de aplicación de rejuvenecedores como, a) aplicación superficial, b) en mezclas con RAP y c) mediante encapsulamiento. (Informe postulación proyecto FONDEF ID21110127, 2022)

#### 1.9.3.1. Tratamiento superficial

Como primera estrategia para la mantención de los pavimentos asfálticos se encuentran los tratamientos superficiales, que en su mayoría buscan rejuvenecer el ligante asfáltico con alguna aplicación superficial. Ejemplos de estos tratamientos son el riego de neblina, que consiste en una aplicación muy ligera de emulsión diluida de quiebre lento, es empleado para renovar pavimentos asfálticos envejecidos y cerrar pequeñas grietas y huecos superficiales. Otro ejemplo de tratamiento es la aplicación superficial de la lechada asfáltica, esta es una mezcla de agregado fino bien graduado, material relleno (filler) y en el caso de ser necesario una emulsión asfáltica y agua distribuida sobre el pavimento. Las lechadas asfálticas son efectivas cuando se aplican a superficies de pavimentos envejecidos, sellan las fisuras superficiales, detienen desprendimiento de agregados, impermeabilizan al agua, y al aire las superficies de textura abierta y mejoran la resistencia al deslizamiento.

En la Figura 1.9.5 (a) se observa un esquema para aplicación del rejuvenecedor como producto líquido a temperatura ambiente sobre cualquier superficie asfáltica. Este método se puede utilizar en edades tempranas (3-4 años) de un pavimento de nueva construcción como método de mantenimiento preventivo y podría ser útil para retrasar el inicio o para mitigar el crecimiento del agrietamiento superficial (Behnood, 2019).

A pesar de que está comprobado que la aplicación de agentes rejuvenecedores puede restaurar parcialmente las propiedades originales del ligante asfáltico y en consecuencia del pavimento, este al ser aplicado de manera superficial no tiene gran efectividad. Para que un rejuvenecedor tenga éxito este debe penetrar la superficie del pavimento. Sin embargo, la aplicación de un rejuvenecedor puede reducir la resistencia al deslizamiento del pavimento (García, 2010). En un estudio realizado (Chiu & Lee, 2006) se aplicaron tres rejuvenecedores, un asfalto diluido y dos emulsiones (una a base de alquitrán y otra a base de asfalto), en el pavimento de un estacionamiento de 12 años de antigüedad para evaluar su efectividad. Se encontró que ninguno de ellos penetraba más de 2 cm en el pavimento, y que esta aplicación provoca una alta reducción en la fricción superficial de pavimentos con alta

profundidad de macrotextura. Por otro lado, al aplicar estos productos rejuvenecedores debe cerrarse la carretera y puede ser peligroso para el medio ambiente.

### 1.9.3.2. Mezclas con uso de RAP

En la Figura 1.9.5 (b) se presenta un esquema para la aplicación de rejuvenecedores como producto líquido en fabricación de nuevas mezclas asfálticas con altos contenidos de material reciclado RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Este método se realiza a altas temperaturas (es decir, 140°C a 160°C), es el enfoque más común adoptado por muchas agencias. Se espera que, al ser mezclados el ligante del RAP recupere parte de sus propiedades originales y se puedan realizar diseños de mezclas con hasta 100% uso de RAP sin perjudicar el desempeño de la mezcla.

### 1.9.3.3. Encapsulamiento del rejuvenecedor

En la última década, los investigadores han desarrollado diferentes técnicas para promover la auto-reparación extrínseca de los materiales bituminosos, convirtiéndose en un tema candente dentro de los materiales viales (Norambuena, 2021). La microencapsulación de los rejuvenecedores para el propósito de autocuración puede proporcionar una solución para aumentar efectivamente la vida útil de los pavimentos asfálticos (Behnood, 2019).

Los rejuvenecedores encapsulados corresponden a partículas, cápsulas o fibras huecas (1-1000 µm) que contienen en su interior un rejuvenecedor líquido, y que son adicionadas a la mezcla asfáltica durante su proceso de fabricación inicial, para restaurar las propiedades viscoelásticas del cemento asfáltico envejecido en mezcla (Norambuena, 2019). En la Figura 1.9.6 se presenta un esquema del concepto de auto-reparación extrínseca en materiales bituminosos mediante capsulas que contienen aceite pirolítico como rejuvenecedor.

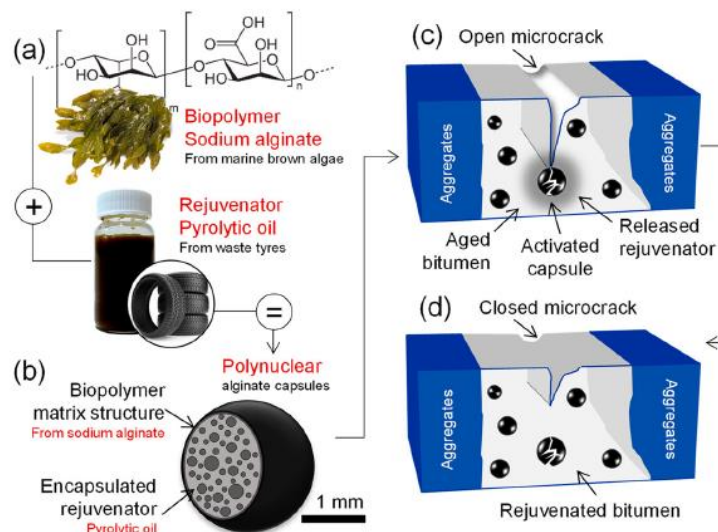


Figura 1.9.6. Esquema del concepto de auto-reparación extrínseca en materiales bituminosos por la acción de capsulas biopoliméricas que contienen aceite pirolítico como rejuvenecedor. (Norambuena, 2021)

Las cápsulas térmicamente estables serían agregadas a la mezcla asfáltica en caliente antes de la compactación y una vez que la tensión en las cápsulas alcanza un cierto umbral, se romperían y se liberaría el rejuvenecedor (Behnood, 2019). Cabe señalar que el rendimiento de las microcápsulas depende en gran medida del momento en el que se aplicaría el rejuvenecedor. Una liberación temprana del rejuvenecedor podría provocar un ligante asfáltico blando y deterioros asociados en el pavimento asfáltico como el ahuellamiento. Al contrario, no se desea una liberación tardía del rejuvenecedor ya que no lograrían los efectos beneficiosos esperados de su incorporación.

Este tipo de tecnología de aplicación de rejuvenecedores vendría a dar solución a las desventajas de la aplicación en superficie y promoviendo la auto reparación de microgrietas alargando la vida útil de los pavimentos.

#### 1.9.4. Contenido óptimo de aplicación

Los métodos tradicionales para seleccionar la cantidad adecuada de rejuvenecedor se basan en cartillas de mezcla basados en una propiedad básica del ligante como la penetración o la viscosidad (Behnood, 2019). Este tipo de análisis no considera las propiedades basadas en el desempeño del ligante. Por lo tanto, las últimas investigaciones se han basado en determinar el contenido óptimo que se debe aplicar a un cemento asfáltico envejecido que asegure la efectividad de este, es decir, que la aplicación del agente rejuvenecedor restaure o mejore las propiedades originales del ligante.

El contenido óptimo va a depender de varios factores, como el tipo de rejuvenecedor y tipo de ligante asfáltico a rejuvenecer. Distintos estudios intentan determinar esta dosis óptima basado en diferentes propiedades y parámetros a mejorar del cemento asfáltico envejecido.

Autores como Tran et al. (2012) y Chen et al. (2014b) se enfocan en las propiedades a temperaturas bajas y altas del ligante asfáltico envejecido, respectivamente. Donde para optimizar la dosis de rejuvenecedores se basa en lograr propiedades similares a alta temperatura del ligante original. Chen et al. (2014a) se basa en propiedades físicas del betún envejecido como la penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y ductilidad.

Cabe señalar que el tipo y la cantidad de rejuvenecedor deben seleccionarse de tal manera que las propiedades a baja temperatura de los ligantes asfálticos envejecidos sean mejoradas mientras que, las propiedades a alta temperatura sean cercanas a las de un ligante asfáltico original (Behnood, 2019).

En relación con el último punto, investigaciones han demostrado que los ligantes asfálticos envejecidos que contienen un rejuvenecedor puede alcanzar los grados PG objetivo si la cantidad de rejuvenecedor se determina y añade adecuadamente (Shen, 2007).

Shen et al. (2007a, 2007b) y Zaumanis et al. (2014b) propusieron el uso de gráficos de combinación para lograr un PG objetivo, donde permiten obtener la dosis máxima de rejuvenecedor evaluando el parámetro de ahuellamiento PG a altas temperaturas del ligante original. Del mismo modo, para dosis mínimas de rejuvenecedor evalúan el parámetro de fatiga a temperaturas intermedias del ligante original.

Zaumanis et al. (2015, 2014b) en la misma línea de investigación evaluó seis diferentes tipos de rejuvenecedores y determinó sus dosis máximas y mínimas (con un PG objetivo). Luego, la dosis rejuvenecedora deseable fue determinado de tal manera que se recupere el grado de penetración del ligante original.

### 1.10. Neumáticos fuera de uso y proceso de pirólisis

Los neumáticos fuera de uso (NFU) se han convertido en un residuo industrial estratégico para ser valorizado. Algunas de las estrategias para el manejo de este residuo son la reutilización, reciclado, recuperación energética, disposición e híbridas. En el caso particular de los procesos híbridos, la pirólisis surge como alternativa para tratar NFU.

La pirólisis es un proceso termoquímico en el que la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno en un rango de temperatura entre 400-750°C. Durante la pirólisis, los materiales se someten a calor intenso, lo que descompone las moléculas orgánicas en compuestos más simples como gases, líquidos y sólidos carbonosos.

Durante este proceso, los neumáticos sufren varias reacciones de descomposición, ciclación y craqueo que ocurren entre 350°C y 600°C y dando lugar a tres productos importantes: (1) un gas que contiene gases combustibles ligeros como el hidrógeno, metano, etileno, etano, óxidos de carbono, etc; (2) un producto líquido (es decir, aceite pirolítico), que consiste en una variedad de sustancias orgánicas

(aromáticos, resinas, hidrocarburos, etc.) y (3) una fracción sólida (es decir, negro de carbón recuperado), compuesto por carbón residual y cenizas, áridos, metales, etc. Estas tres fracciones tienen aplicaciones como combustibles, plataformas químicas y aditivos para asfaltos (Norambuena, 2021).

La fracción líquida obtenida del proceso de pirólisis de NFU llamado líquido pirolítico, puede ser utilizado para ser mezclado con el cemento asfáltico, pero necesita ser optimizado químicamente para aumentar su capacidad de restaurar las propiedades originales de los cementos asfálticos envejecidos. En la Figura 1.10.1 se presenta un esquema del proceso de pirólisis de NFU a escala. Además, en la Figura 1.10.2, se presentan una lista de los componentes más importantes detectadas mediante análisis GC/MS de un líquido pirolítico. Estos resultados de GC/MS confirmaron que el aceite pirolítico de neumáticos fuera de uso tiene un alto contenido de compuestos con efecto antioxidante (por ejemplo, d,l-limoneno, o-cimeno, naftalenos y n-heptano).

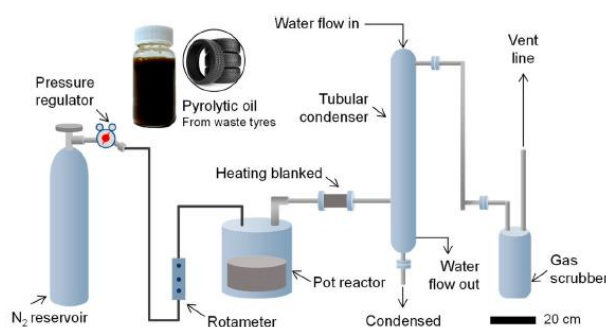


Figure 2. Pyrolysis process performed in a grams-scale plant at fixed bed conditions on waste tyres to produce pyrolytic oil for the self-healing of bituminous materials.

Figura 1.10.1. Proceso de pirólisis realizado en una planta a escala de gramos para producir aceite pirolítico. (Norambuena, 2021)

Table 1. Identity of compounds identified in pyrolytic oil analysed by GC/MS.

Compound name	Chemical formula	Ret. time (min)	Peak relative area (%)
n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	2.38	11.88
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	2.54	2.86
Quinoline, 2-phenyl-, 1-oxide	C <sub>15</sub> H <sub>11</sub> NO	2.71	0.76
3,5-Dimethylcyclopentene	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>	3.19	1.21
Pentane, 2,2,4,4-tetramethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	3.23	0.74
1,4-Cyclohexadiene, 1-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>	3.74	0.91
Cyclohexene, 3,5-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>	4.14	11.04
Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	7.07	6.80
p-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	7.43	11.36
Benzene, 1,3-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	8.7	3.55
1,3,5,7-Cyclooctatetraene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	9.15	2.82
Benzene, (1-methylethyl)-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	9.9	1.45
D-Limonene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	10.11	2.07
Benzene, propyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	11.56	3.41
Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	12.09	6.71
Cyclohexene, 1-methyl-5-(1-methylethenyl)-, (R)-	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	14.51	11.81
o-Cymene	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	15.7	6.99
Benzonitrile	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N	19.53	4.56
1H-Indene, 1-ethylidene-	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	37.31	2.87
Naphthalene, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	38.12	2.90
Naphthalene, 2-ethenyl-	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	40.45	1.57
Naphthalene, 1,7-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	41.45	1.72

Figura 1.10.2. Características de un líquido pirolítico mediante análisis GC/MS. (Norambuena, 2021)

## Capítulo 2: Materiales y metodología

El presente capítulo tiene por objetivo presentar los materiales y metodología utilizados en esta investigación. Por lo tanto, el capítulo se estructura de la siguiente forma:

- En la sección 2.1, se presentan los materiales utilizados y un resumen de las muestras a ensayar. En específico, se presentan los cementos asfálticos y los rejuvenecedores utilizados.
- En la sección 2.2, se presenta la metodología de ensayos como la caracterización reológica, determinación de dosis óptima, especificación por grado de desempeño PG y tradicionales y el análisis químico mediante ensayos FTIR.
- Y finalmente, en la sección 2.3, se presenta un esquema de la metodología.

## 2.1. Materiales y muestras de ensayo

### 2.1.1. Materiales

Se utilizaron tres diferentes tipos de cementos asfálticos disponibles en Chile, un primer asfalto tradicional CA-24, un segundo asfalto tradicional CA-14 y un tercer ligante recuperado a partir de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) provistos por OIL MALAL S.A, CLASA S.A. y BITUBUX S.A, respectivamente. El CA-24 es de grado PG 64-22, con penetración 54 dmm a 25°C, punto de ablandamiento 50°C y viscosidad de 3363 P a 60°C. El CA-14 es de grado PG 64-22, con penetración 50 dmm a 25°C, punto de ablandamiento 50°C y viscosidad de 2267 P a 60°C. Los cementos asfálticos tradicionales fueron sometidos a envejecimiento de largo plazo (PAV) en condiciones de laboratorio, de acuerdo con las normas ASTM D 2872-19 (2019a) y ASTM D 6521-19 (2019b).

El tercer ligante RAP proviene de un fresado de carpeta asfáltica tipo CA-24 de una ruta nacional (H-35) construida en el año 2002. Este material fue obtenido mediante rotavapor (MOP, 2022b, 2022c) y analizado por la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR). Los espectros se obtuvieron usando un espectrómetro Nicolet is20. Los cambios químicos fueron caracterizados mediante la determinación de los índices de oxidación carbonilo ( $I_{c=0}$ ) y sulfóxido ( $I_{s=0}$ ), asociados a los grupos funcionales  $1700\text{ cm}^{-1}$  y  $1030\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente. Los resultados mostraron que ambos índices de oxidación experimentaron un incremento en su valor, lo que sugiere un cambio en su composición química a nivel molecular con respecto al ligante original CA-24 (promedio 3 veces mayor). El daño químico por oxidación se atribuye a la exposición prolongada del ligante asfáltico al interior del pavimento asfáltico dispuesto en la ruta. Sin embargo, de acuerdo con estos índices la muestra presentó un daño oxidativo menor al de un ligante PAV, lo que llama la atención para un ligante con vida de uso de 20 años.

Adicionalmente, en este estudio se utilizaron dos productos rejuvenecedores donde el primero es un líquido proveniente de la pirólisis de neumáticos mineros fuera de uso (NFU-M) químicamente optimizado (LPO-M) y un segundo producto rejuvenecedor comercial utilizado en la industria y en Chile. El líquido pirolítico presenta una densidad de 0,86 g/ml, viscosidad 2,49 cP y pH 8,96. Mientras que, el rejuvenecedor comercial es una pasta suave a 25°C de fácil adición al asfalto y de rápida integración al mismo que posee una densidad de 0,87 g/ml.

En la Tabla 2.1.1 se presenta un resumen de las características físicas de los ligantes y rejuvenecedores utilizados en este estudio.

*Tabla 2.1.1. Características físicas de los ligantes, líquido pirolítico y rejuvenecedor comercial.*

Ligante o rejuvenecedor	Penetración (25°C, dmm)	Punto de ablandamiento (°C)	Viscosidad @ 60°C [P]	Densidad [g/ml]
CA-24	54	50	3363	-
CA-14	50	50	2267	-
Líquido pirolítico optimizado (LPO-M)	-	-	0,025	0,86
Rejuvenecedor comercial (RC)	-	-	-	0,87

### 2.1.2. Síntesis y optimización química del líquido pirolítico

El líquido pirolítico fue obtenido a partir de un proceso de pirólisis, utilizando neumáticos fuera de uso de tipo minero. La pirólisis es un proceso de degradación térmica que ocurre en ausencia de oxígeno (atmósfera inerte), y en un rango de temperatura entre 400-750°C. De este proceso se obtienen tres fracciones: Carbón RCb (utilizado en mezclas de asfalto como carbón activado), GPN se emplea como

propio combustible de la pirólisis, y LPN, líquido pirolítico de alto valor comercial (alto contenido de aromáticos) (Williams, P.T, 2013).

Para este estudio fueron utilizados muestras trituradas de neumático fuera de uso (NFU) del tipo minero (M), las que fueron recibidas en contenedores sellados provenientes de la empresa KAL TIRE S.A. Las muestras de NFU-M fueron caracterizadas química y físicamente para posteriormente someterlos a estudios de pirólisis analítica (Py-GC/MS) y tomando en cuenta parámetros de operación utilizados a nivel industrial se determinó el rango de temperatura de pirólisis entre 400-500 °C. Se realizó un escalado a sistema BENCH para producir los LPN, donde los parámetros técnicos del proceso de pirólisis se establecieron con una carga de 400 g de NFU, velocidad de calentamiento de 12°C/minuto, agitación de 150 rpm y tiempo de reacción de 2 h. El LPN se obtuvo por condensación de los gases generados de la reacción utilizando dos condensadores consecutivos enfriados a contracorriente con agua a 20°C y temperatura ambiente, respectivamente.

El LPN fue sometido a un fraccionamiento de sus compuestos químicos mediante destilación, donde se evaluó solo las fracciones de destilado obtenidas en los rangos de temperatura de 160-200, 200-250 y 250-280°C. Luego, para la selección de las condiciones óptimas de producción se realizó un diseño experimental de tipo factorial aplicando la metodología de superficie respuesta (MSR). De este diseño de optimización se obtuvo que, la temperatura óptima de pirólisis fue de 470°C y el corte óptimo de destilación es en el rango de 160-200°C.

Finalmente, el diseño de optimización mencionado anteriormente tiene el fin de mejorar las propiedades y obtener un producto rejuvenecedor químicamente optimizado proveniente de la producción del LPN. De este proceso es obtenido el rejuvenecedor líquido pirolítico químicamente optimizado utilizado en esta investigación: LPO-M, líquido pirolizado a 470°C, sin destilación y proveniente de neumáticos fuera de uso mineros. Sus características químicas se encuentran en el anexo 9.

### 2.1.3. Mezcla CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP con LPO-M y RC

El mezclado del ligante PAV con el rejuvenecedor líquido (LPO-M) y rejuvenecedor comercial (RC) 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 min. Durante este proceso, se incorporó el LPO-M gota a gota en 4 diferentes contenidos, según fuera el caso. Para el caso del LPO-M, el CA-24 se mezcló en 3%, 6%, 9% y 12%. Para el CA-14 se mezcló en 3%, 6% y 9%. Mientras que, para el RAP se mezcló en 3%, 6%, 9, 12%, 15% y 18% p/p de ligante. El mismo proceso de mezcla fue utilizado con el RC, donde el CA-24 y CA-14 se mezclaron en 3%, 6% y 9% y el RAP en 3%, 6%, 9 y 12% p/p de ligante. El detalle de estas muestras a ensayar en estado original y mezclas con LPO-M y RC se presentan en la Tabla 2.1.2.

Los tres ligantes fueron ensayados en sus estados original (SE), con envejecimiento mediante el horno de película delgada rotaria (RTFO) y con envejecimiento acelerado en cámara de presión (PAV). Luego, se realizó la mezcla de los ligantes CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP SE en las dosis óptimas determinadas en este estudio tanto para el rejuvenecedor LPO-M y RC.

Tabla 2.1.2. Detalle de muestras a ensayar de los ligantes en estado original y mezcladas con LPO-M y RC.

Tipo de ligante	Nomenclatura	Detalle
CA-24	CA-24 SE	Ligante asfáltico CA-24 estado original.
	CA-24 RTFO	Ligante asfáltico CA-24 estado RTFO.
	CA-24 PAV	Ligante asfáltico CA-24 estado PAV.
CA-14	CA-14 SE	Ligante asfáltico CA-14 estado original.
	CA-14 RTFO	Ligante asfáltico CA-14 estado RTFO.
	CA-14 PAV	Ligante asfáltico CA-14 estado PAV.
RAP	RAP SE	Ligante asfáltico recuperado del RAP mediante rotavapor, sin envejecimiento en laboratorio.
CA-24 + LPO-M	CA-24 3% LPO-M	CA-24 PAV con 3% de líquido pirolítico optimizado minero.
	CA-24 6% LPO-M	CA-24 PAV con 6% de líquido pirolítico optimizado minero.
	CA-24 9% LPO-M	CA-24 PAV con 9% de líquido pirolítico optimizado minero.
	CA-24 12% LPO-M	CA-24 PAV con 12% de líquido pirolítico optimizado minero.
CA-14 + LPO-M	CA-14 3% LPO-M	CA-14 PAV con 3% de líquido pirolítico optimizado minero.
	CA-14 6% LPO-M	CA-14 PAV con 6% de líquido pirolítico optimizado minero.
	CA-14 9% LPO-M	CA-14 PAV con 9% de líquido pirolítico optimizado minero.
RAP + LPO-M	RAP 3% LPO-M	RAP SE con 3% de líquido pirolítico optimizado minero.
	RAP 6% LPO-M	RAP SE con 6% de líquido pirolítico optimizado minero.
	RAP 9% LPO-M	RAP SE con 9% de líquido pirolítico optimizado minero.
	RAP 12% LPO-M	RAP SE con 12% de líquido pirolítico optimizado minero.
	RAP 15% LPO-M	RAP SE con 15% de líquido pirolítico optimizado minero.
	RAP 18% LPO-M	RAP SE con 18% de líquido pirolítico optimizado minero.
CA-24 + RC	CA-24 3% RC	CA-24 PAV con 3% de rejuvenecedor comercial.
	CA-24 6% RC	CA-24 PAV con 6% de rejuvenecedor comercial.
	CA-24 9% RC	CA-24 PAV con 9% de rejuvenecedor comercial.
CA-14 + RC	CA-14 3% RC	CA-14 PAV con 3% de rejuvenecedor comercial.
	CA-14 6% RC	CA-14 PAV con 6% de rejuvenecedor comercial.
	CA-14 9% RC	CA-14 PAV con 9% de rejuvenecedor comercial.
RAP + RC	RAP 3% RC	RAP SE con 3% de rejuvenecedor comercial.
	RAP 6% RC	RAP SE con 6% de rejuvenecedor comercial.
	RAP 9% RC	RAP SE con 9% de rejuvenecedor comercial.
	RAP 12% RC	RAP SE con 12% de rejuvenecedor comercial.

## 2.2. Metodología de ensayos

### 2.2.1. Caracterización reológica mediante barridos de frecuencia-temperatura

#### 2.2.1.1. Condiciones de ensayo, rango de frecuencias y temperatura

Se realizó una caracterización reológica de las muestras mediante ensayos de barrido de frecuencia y temperatura con un Reómetro de Corte Dinámico (DSR, modelo MCR 301) provisto del software Anton Par Rheocompass. El objetivo es medir las propiedades reológicas de las muestras sin y con rejuvenecedores aplicados en las diferentes dosis estipuladas en la sección anterior (2.1.3), estas propiedades de los ligantes por medir fueron el módulo complejo de corte ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ). Las pruebas se realizaron según la metodología presentada en “Reómetro de Corte Dinámico (DSR) Physica MCR-301, Manual de Usuario” (Á. González, 2012) y la especificación ASTM D7175, 2015. El equipo se presenta en la Figura 2.2.1.

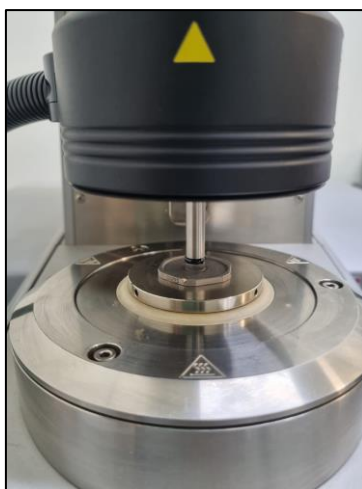


Figura 2.2.1. Reómetro de corte dinámico Anton Par Rheocompass modelo MCR 301, con muestra a ensayar en platillo de 8 mm. (Elaboración propia)

Las mediciones se realizaron en platillos de 8 mm y 25 mm, donde su uso depende de la temperatura y nivel de envejecimiento de la muestra. Los rangos de temperatura de medición para la utilización de los platos paralelos del DSR se presentan en la Tabla 2.2.1.

Tabla 2.2.1. 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

Las frecuencias de ensayo variaron entre 100 a 0,1 [rad/s], obteniéndose un total de 15 mediciones para todas las muestras, para las muestras en estado original (SE, RTFO y PAV) y con las dosis óptimas de rejuvenecedor, 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. Mientras que, para las muestras con rejuvenecedores en diferentes dosis presentadas en la Tabla 2.1.2, las temperaturas variaron entre los 5°C a 40°C. Esto principalmente para tener un mayor rango de temperatura medido y poder comparar las muestras con el ligante envejecido PAV. Los ensayos se realizaron según las normas ASTM D7175-15 y MC 8.302.22.

2.2.1.2. Curvas maestras

Las curvas maestras se realizaron a partir de la superposición de tiempo-temperatura tanto para el módulo complejo de corte ( $G^*$ ) como para el ángulo de fase ( $\delta$ ). La temperatura de referencia para los tres cementos asfálticos fue de  $T_r$ : 25°C. Con los valores de  $G^*$  y  $\delta$  medidos mediante el DSR, se procede a estimar los parámetros de la Ecuación 2.2.1 de William-Landel-Ferry.

$$\log(a_t(w)) = \log\left(\frac{w}{w_r}\right) = \frac{-k_1(T - T_r)}{k_2 + (T - T_r)} \tag{Ecuación 2.2.1}$$

Donde  $a_t(w)$  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. Estos parámetros se determinan con una plantilla de cálculo que funciona según la metodología descrita por A. González (2023).

En este procedimiento, el primer paso es asumir un factor de corrimiento auxiliar ( $aG(T)$ ), luego se realiza un ajuste potencial con la línea de tendencia de Excel de los valores medidos de  $G^*$  y  $\delta$  para cada temperatura (5 a 75°C), con este ajuste potencial se estima el valor de la propiedad reológica (módulo dinámico o ángulo de fase) corrida para la temperatura siguiente más cercana a la temperatura de referencia ( $T_r$ ). Luego, se minimiza la suma de los errores cuadrados entre los valores medidos y los ajustados, donde se fuerza a 0 variando el valor de  $aG(T)$ .

Con los valores de  $aG(T)$  estimados para cada temperatura, se estiman los factores de corrimiento reales, luego con estos valores y utilizando la Ecuación 2.2.2 se obtienen las frecuencias reducidas.

$$w_r = w * a(T) \tag{Ecuación 2.2.2}$$

Donde  $w_r$  es la frecuencia reducida en rad/s,  $T$  es la temperatura de la curva en °C y  $w$  es la frecuencia original en rad/s. Con los valores de frecuencia reducida se obtiene la curva maestra, donde se realiza un desplazamiento horizontal de la curva obtenida en el barrido de frecuencias a una curva con temperatura de referencia de 25°C. En la Figura 2.2.2 y Figura 2.2.3 se presenta un ejemplo de familia de curvas de barrido frecuencia-temperatura y la curva maestra ya confeccionada, respectivamente.

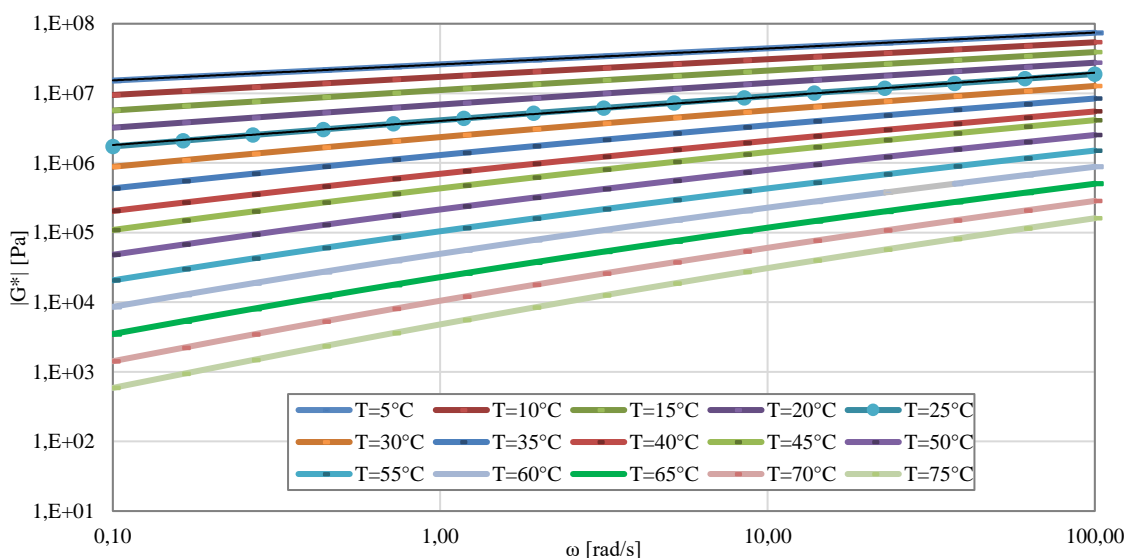


Figura 2.2.2. Ejemplo de ensayo de barrido de frecuencia - temperatura de una muestra de RAP original (SE) en un rango de medición de 5 a 75°C mediante el equipo DSR. Fuente: Elaboración propia

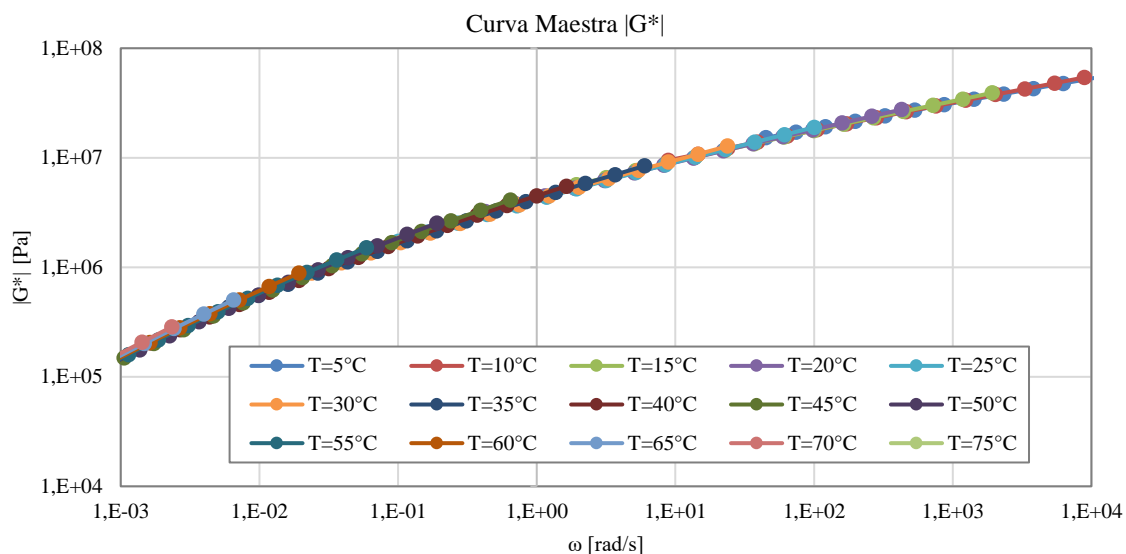


Figura 2.2.3. Ejemplo de confección de curva maestra del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) mediante superposición de tiempo-temperatura y uso de planilla de cálculo para una muestra de RAP en estado original (SE) con una temperatura de referencia de 25°C. Fuente: Elaboración propia

El último paso es determinar los coeficientes de ajuste de la ecuación WLF  $k_1$  y  $k_2$ , minimizando la suma de los errores cuadrados entre los  $a(T)$  determinados con el procedimiento anteriormente mencionado y los  $a(T)$  calculados mediante la Ecuación 2.2.1 de WLF. Los resultados para el factor de corrimiento  $a(T)$  y los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  se encuentran en Anexo 5: Factores de corrimiento y coeficientes de ecuación WLF, inciso 7.5.1 y 7.5.2, respectivamente.

### 2.2.1.3. Diagramas de black

Los diagramas de black se realizaron para corroborar las mediciones realizadas y observar los errores que se pudieran presentar. Las frecuencias de ensayo variaron entre 100 a 0,1 [rad/s], obteniéndose un total de 15 mediciones para todas las muestras, y un rango de temperatura de 5 a 75°C o 5 a 40°C según sea el caso indicado en la sección anterior (2.2.1.2). Para esto, con las mediciones del barrido de frecuencia-temperatura del módulo complejo de corte ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ), se grafica el ángulo de fase en función del módulo dinámico para todas las muestras ensayadas. Estas graficas se presentan en Anexo 3: Diagramas de Black .

### 2.2.1.4. Análisis de repetibilidad

Para todas las muestras ensayadas en el barrido de frecuencia-temperatura se realizaron dos mediciones para analizar la repetibilidad de estas, donde fueron realizadas por un mismo operador, mismo equipo y en un corto periodo de tiempo entre una medición y otra. Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados son los indicados en la norma ASTM D7175-15, donde se presentan el coeficiente de variación aceptable entre las mediciones los coeficientes de variación entro lo medido por una muestra y otra, estos se presentan en Tabla 2.2.2.

Tabla 2.2.2. Precisión estimada. Fuente: Tabla 3, ASTM D7175, 2015.

Condición	Coefficiente de variación (1s%)	Rango aceptable de dos resultados (d2S%)
Precisión para un mismo operador:		
Ligante original $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)	2,3	6,4
Residuo RTFO $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)	3,2	9,0
Residuo PAV $G^*/\text{sen } \delta$ (kPa)	4,9	13,8

Como se especifica en la normativa, se calculan los parámetros Superpave de ahuellamiento ( $|G^*|/\text{sen } \delta$ ) y fatiga ( $|G^*|/\text{sen } \delta$ ), para luego estimar los coeficientes de variación entre los resultados de las dos muestras ensayadas. Cabe mencionar que este análisis se realiza a modo de referencia ya que los parámetros medidos son bajo otras condiciones de temperatura, frecuencia y carga de ensayo a los utilizados en los barridos de frecuencia-temperatura de esta investigación donde, además las muestras evaluadas se encuentran en estado PAV con adición de algún tipo de rejuvenecedor por lo que su comportamiento es diferente a lo indicado en la normativa. Como se tienen dos mediciones para un tipo de muestra, se calculó el promedio de los resultados para el módulo complejo de corte y ángulo de fase, y así tener un valor representativo con el cual trabajar en este estudio.

Dicho lo anterior, los resultados obtenidos de los coeficientes de variación se presentan en el Anexo 4: Análisis de repetibilidad.

### 2.2.2. Determinación dosis óptima

La normativa Superpave para ligantes asfálticos (ASTM, 2021) especifica parámetros medidos a temperaturas altas, intermedias y bajas. Estas especificaciones por grado de desempeño PG (Performance Grades Specification) se enfocan en la prevención de tres tipos de deterioros fundamentales de los pavimentos asfálticos: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y térmico.

El efecto rejuvenecedor del líquido pirolítico y rejuvenecedor comercial aplicado en esta investigación se evalúa como la capacidad de restaurar las propiedades reológicas del cemento asfáltico, es decir, que disminuya el módulo dinámico y aumente el ángulo de fase. Es conocido que, al disminuir el módulo dinámico de un ligante, se vuelve menos rígido, es decir, menos quebradizo. Sin embargo, si se reblandece demasiado, el ligante puede producir ahuellamiento a altas temperaturas. Por lo que para estimar las dosis óptimas de aplicación se deben tener en consideración estas variables.

Dicho lo anterior, el método para determinar la dosis óptima de aplicación se basa en el parámetro de ahuellamiento ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ) provenientes de la normativa Superpave, donde se considera el efecto en las dos propiedades del material ( $G^*$  y  $\delta$ ) y se relacionan entre sí. De esta manera, al aplicar esta dosis al cemento asfáltico envejecido, se controlan los deterioros en el desempeño futuro de un pavimento asfáltico.

De manera adicional, para verificar las dosis óptimas determinadas de los productos se estima el parámetro de fatiga ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ) de la normativa Superpave, con el fin de evaluar la susceptibilidad a la fatiga que presentan los ligantes con las dosis aplicadas.

#### 2.2.2.1. Determinación parámetros de ahuellamiento y fatiga

Para determinar el parámetro de ahuellamiento ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ), se estiman las propiedades reológicas  $G^*$  y  $\delta$  a 64°C y 10 rad/s mediante superposición de tiempo-temperatura utilizando la ecuación de WLF. Posteriormente, se estiman las propiedades  $G^*$  y  $\delta$  a 25°C y 10 rad/s para determinar el parámetro de fatiga ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ) mediante interpolación de los datos medidos en el equipo DSR. Los cálculos se realizan a todas las muestras utilizadas en esta investigación con y sin rejuvenecedores aplicados (LPO-M o RC), presentados en la Tabla 2.1.2. Cabe recalcar que, las temperaturas altas (64°C) e intermedias (25°C) utilizadas son en base al ligante asfáltico base sin envejecer que tiene un PG 64-22, tanto el CA-24, CA-14 y RAP utilizados en este estudio.

El procedimiento para determinar el parámetro de ahuellamiento Superpave en las condiciones de 64°C y 10 rad/s es el siguiente:

1. Determinar la línea de tendencia de las curvas maestras mediante un ajuste polinómico de grado 3, cuyas ecuaciones tienen la siguiente forma:

$$\log(|G^*|) = A \log(w_r)^3 + B \log(w_r)^2 + C \log w_r + D$$

*Ecuación 2.2.3*

Ecuación 2.2.4

$$\log(|\delta|) = A \log(w_r)^3 + B \log(w_r)^2 + C \log(w_r) + D$$

2. Determinar los coeficientes (A, B, C y D) del ajuste polinómico tanto para las curvas maestras del módulo dinámico como el ángulo de fase. Los resultados se pueden observar en el Anexo 6: Coeficientes de ajuste polinómico curvas maestras.
3. Seleccionar los coeficientes de ajuste  $k_1$  y  $k_2$  de la ecuación WLF, según la metodología descrita en la sección anterior (inciso 2.2.1.2) para cada tipo de muestra y propiedad reológica.
4. Utilizar la ecuación WLF (Ecuación 2.2.5) para estimar las frecuencias reducidas de las curvas maestras de  $|G^*|$  y  $\delta$  a una frecuencia de 10 rad/s ( $w$ ), temperatura a desplazar (T) igual a 64°C y una temperatura de referencia ( $T_r$ ) igual a 25°C.

Ecuación 2.2.5

$$\log(a_t(w)) = \log\left(\frac{10}{w_r}\right) = \log(10) - \log(w_r) = \frac{-k_1(64 - T_r)}{k_2 + (64 - T_r)}$$

5. Reemplazar el valor de frecuencia reducida ( $w_r$ ) y los coeficientes de ajuste polinómico (A, B, C y D) en la Ecuación 2.2.3 y Ecuación 2.2.4, para obtener el valor de la propiedad  $G^*$  o  $\delta$ , respectivamente.
6. Con los valores del módulo dinámico ( $|G^*|$ ) y ángulo de fase ( $\delta$ ) estimados a 64°C y 10 rad/s, calcular el parámetro de ahuellamiento con la Ecuación 2.2.6.

Ecuación 2.2.6

$$\text{Parametro de ahuellamiento Superpave} = \frac{|G^*|}{\text{sen}(\delta)}$$

7. Realizar este procedimiento para todas las muestras y cada propiedad reológica ( $G^*$  y  $\delta$ ).

Por otro lado, el procedimiento para determinar el parámetro de fatiga consta en estimar las propiedades reológicas  $G^*$  y  $\delta$  a una temperatura de 25°C y frecuencia de 10 rad/s mediante interpolación de los datos ya medidos por el equipo DSR en el barrido frecuencia-temperatura.

Dicho lo anterior, el procedimiento para determinar el parámetro de fatiga Superpave es el descrito a continuación:

1. Con las mediciones a 25°C en un rango de frecuencia de 0,1 a 100 rad/s, realizar una interpolación lineal para obtener el módulo dinámico y ángulo de fase a 10 rad/s para todas las muestras requeridas.
2. Con los valores del módulo dinámico ( $|G^*|$ ) y ángulo de fase ( $\delta$ ) estimados a 25°C y 10 rad/s, calcular el parámetro de fatiga con la siguiente expresión:

Ecuación 2.2.7

$$\text{Parametro de fatiga Superpave} = |G^*| \text{sen}(\delta)$$

Con estos procedimientos se obtienen los parámetros de ahuellamiento y fatiga Superpave para todas las muestras ensayadas mediante barridos de frecuencia-temperatura. Cabe recalcar que, las mediciones para todas las muestras fueron en un rango de 5 a 40°C aumentando cada 5° C, por lo que, la medición del módulo dinámico y ángulo de fase a 64°C es una estimación aproximada, debido a que se extrapolan los resultados para la curva maestra y que para la temperatura de 25°C esta ya se encuentra medida y solo se realiza una interpolación para obtener la propiedad reológica a una frecuencia de 10 rad/s.

#### 2.2.2.2. Estimación de dosis óptimas

Como se menciona anteriormente, las dosis óptimas de aplicación para los ligantes CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP aplicando LPO-M y RC se determinan en base al parámetro de ahuellamiento

Superpave. Para esto, se consideran dos tipos de aplicaciones de los rejuvenecedores: aplicación en mezclas con RAP y aplicación superficial o mediante encapsulamiento. La primera aplicación, el objetivo es poder restaurar las propiedades reológicas a un nivel sin envejecer (SE) del ligante original. Mientras que, la segunda aplicación el objetivo es restaurar las propiedades reológicas a un nivel con envejecimiento primario (RTFO) del ligante original.

El procedimiento para determinar las dosis óptimas de aplicación del producto LPO-M y RC se presenta a continuación:

1. Comparar los resultados obtenidos del parámetro de ahuellamiento ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ) en la sección anterior (inciso 2.2.2.1) de las distintas muestras con rejuvenecedores aplicados (diferentes dosis) con el valor del parámetro del ligante sin envejecer o RTFO, según sea el caso de estudio.
2. Realizar una interpolación lineal del parámetro entre las dosis que se acerquen al valor del parámetro del ligante original ya sea en estado sin envejecer o RTFO, dependiendo del tipo de aplicación. En la Ecuación 2.2.8 se presenta la interpolación para una aplicación con mezclas en RAP y en la Ecuación 2.2.9 la interpolación para una aplicación superficial o encapsulado.

$$\frac{\left(\frac{|G^*|}{\text{Sen}(\delta)}\right)_{CA_{SE}} - \left(\frac{|G^*|}{\text{Sen}(\delta)}\right)_{\%inf}}{\%óptimo - \%inf} = \frac{\left(\frac{|G^*|}{\text{Sen}(\delta)}\right)_{\%sup} - \left(\frac{|G^*|}{\text{Sen}(\delta)}\right)_{\%inf}}{\%sup - \%inf} \quad \text{Ecuación 2.2.8}$$

$$\frac{\left(\frac{|G^*|}{\text{Sen}(\delta)}\right)_{CA_{RTFO}} - \left(\frac{|G^*|}{\text{Sen}(\delta)}\right)_{\%inf}}{\%óptimo - \%inf} = \frac{\left(\frac{|G^*|}{\text{Sen}(\delta)}\right)_{\%sup} - \left(\frac{|G^*|}{\text{Sen}(\delta)}\right)_{\%inf}}{\%sup - \%inf} \quad \text{Ecuación 2.2.9}$$

Donde  $G^*/\text{sen}(\delta)$  corresponde al parámetro de ahuellamiento que se calcula para el ligante sin envejecer (CA-24 SE, CA-14 SE y RAP) o RTFO y para dosis superior e inferior a interpolar. La dosis óptima (%óptimo) se despeja de la ecuación.

De manera adicional, se verifican las dosis óptimas determinadas mediante el análisis de la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga que tendrían los ligantes rejuvenecidos con las dosis óptimas de LPO-M y RC. Para esto, se determina el parámetro de fatiga Superpave, donde el procedimiento es el siguiente:

1. Con los resultados obtenidos del parámetro de fatiga ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ) en la sección anterior (inciso 2.2.2.1) de las distintas muestras con rejuvenecedores aplicados (diferentes dosis), comparar con el valor del parámetro del ligante sin envejecer o RTFO, según sea el caso de estudio.
2. Realizar una interpolación lineal entre las dosis medidas que se acerquen a la dosis óptima, para así obtener el módulo dinámico y ángulo de fase de las muestras con dosis óptimas a una temperatura de 25°C y frecuencia de 10 rad/s, como se muestran en la Ecuación 2.2.10 y Ecuación 2.2.11.

$$\frac{|G^*|_{\%sup} - |G^*|_{\%inf}}{\%sup - \%inf} = \frac{|G^*|_{\%DO} - |G^*|_{\%inf}}{\%DO - \%inf} \quad \text{Ecuación 2.2.10}$$

$$\frac{\delta_{\%sup} - \delta_{\%inf}}{\%sup - \%inf} = \frac{\delta_{\%DO} - \delta_{\%inf}}{\%DO - \%inf} \quad \text{Ecuación 2.2.11}$$

3. Obtenidas las propiedades reológicas a 25°C y 10 rad/s con las dosis óptimas, se procede a calcular el parámetro de fatiga ( $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ ). Cabe recalcar, que para esta verificación los

valores del parámetro son estimados ya que no se tienen las muestras ensayadas con las dosis óptimas y solo se realizan las interpolaciones.

4. Determinar la susceptibilidad a la fatiga de las muestras con la Ecuación 2.2.12 y Ecuación 2.2.13 para aplicación en mezclas con RAP y aplicación superficial o encapsulamiento, respectivamente.

$$\frac{(|G^*|sen(\delta))_{DO} - (|G^*|sen(\delta))_{CA\_SE}}{(|G^*|sen(\delta))_{CA\_SE}} \quad \text{Ecuación 2.2.12}$$

$$\frac{(|G^*|sen(\delta))_{DO} - (|G^*|sen(\delta))_{CA\_RTFO}}{(|G^*|sen(\delta))_{CA\_RTFO}} \quad \text{Ecuación 2.2.13}$$

Con los procedimientos descritos se obtienen las dosis óptimas para el LPO-M y RC y la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga de estos productos.

### 2.2.2.3. Evaluación de susceptibilidad al envejecimiento

Posterior a la determinación de las dosis óptimas, se evalúa la susceptibilidad al envejecimiento de las muestras rejuvenecidas con LPO-M y RC. Esto mediante el parámetro de fatiga medido a 25°C y 10 rad/s, según la siguiente metodología:

1. A las muestras con dosis óptimas aplicadas en estado sin envejecer y re-envejecido en RTFO y PAV se deben seleccionar las mediciones del módulo dinámico y ángulo de fase a 25°C en un rango de frecuencia de 0,1 a 100 rad/s.
2. Realizar una interpolación lineal para obtener el módulo dinámico y ángulo de fase a 10 rad/s para todas las muestras requeridas.
3. Con los valores del módulo dinámico ( $|G^*|$ ) y ángulo de fase ( $\delta$ ) estimados a 25°C y 10 rad/s, calcular el parámetro de fatiga utilizando la Ecuación 2.2.7.
4. Determinar la susceptibilidad del parámetro de fatiga Superpave del ligante rejuvenecido en dosis óptimas versus el ligante original sin envejecer según la Ecuación 2.2.14.

$$\left( \frac{(|G^*|Sen(\delta))_{DO\_SE} - (|G^*|Sen(\delta))_{CA\_SE}}{(|G^*|Sen(\delta))_{CA\_SE}} \right) \quad \text{Ecuación 2.2.14}$$

5. Determinar la susceptibilidad al envejecimiento de las muestras rejuvenecidas en estado sin envejecer respecto a su re-envejecido en RTFO y PAV con la Ecuación 2.2.15 y Ecuación 2.2.16, respectivamente.

$$\left( \frac{(|G^*|Sen(\delta))_{DO\_RTFO} - (|G^*|Sen(\delta))_{DO\_SE}}{(|G^*|Sen(\delta))_{DO\_SE}} \right) \quad \text{Ecuación 2.2.15}$$

$$\left( \frac{(|G^*|Sen(\delta))_{DO\_PAV} - (|G^*|Sen(\delta))_{DO\_SE}}{(|G^*|Sen(\delta))_{DO\_SE}} \right) \quad \text{Ecuación 2.2.16}$$

### 2.2.3. Especificación por grado de desempeño Superpave (PG)

Las muestras de ligante asfáltico con y sin productos rejuvenecedores fueron sometidos a ensayos de laboratorio mediante el DSR a temperaturas altas e intermedias, y mediante BBR a bajas temperaturas

para determinar su especificación por grado de desempeño (PG), ensayos según lo descrito en la norma AASHTO 2017.

El equipo BBR utilizado y un ejemplo de las vigas para el ensayo a bajas temperaturas se presentan en la Figura 2.2.4.

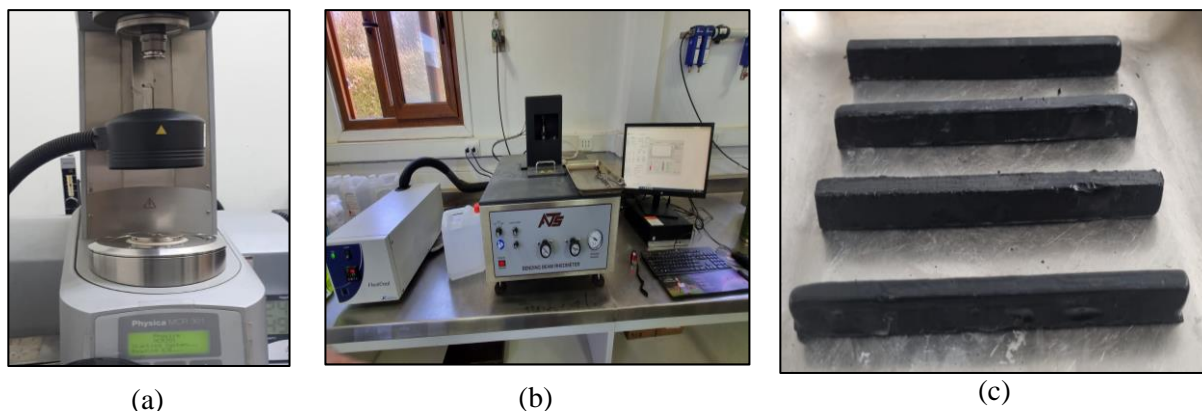


Figura 2.2.4. Equipos de medición para ensayos de especificación por grado de desempeño Superpave a) Reómetro de Corte Dinámico (DSR), b) Reómetro de Viga en Flexión (BBR) y c) ejemplo de acondicionamiento de muestras para ensayos en BBR. (Elaboración propia)

### 2.2.3.1. Rango de frecuencia y temperatura

Las temperaturas de ensayo para el uso del reómetro de corte dinámico (DSR) y reómetro de viga en flexión (BBR) varían según el tipo de ligante asfáltico a ensayar y su nivel de envejecimiento, realizando mediciones cada 6°C según lo indicado en la normativa superpave (ASTMD 6373). Cabe recalcar que, las muestras fueron sometidas a un envejecimiento a corto y largo plazo mediante el horno de película delgada rotatoria (RTFO) y en cámara a presión (PAV), respectivamente.

La normativa establece que para los ensayos mediante reómetro de corte dinámico la frecuencia de medición es de 10 rad/s. El rango de temperatura de medición varía según el tipo de ligante a evaluar, para el caso del ligante CA-24 y CA-14 en estado original las temperaturas de ensayo van desde los 64°C a 70°C. Mientras que, para el RAP van desde los 64°C a 106°C. Con envejecimiento RTFO el rango de temperatura van desde los 64°C a 70°C, 64°C a 76°C y 82°C a 100°C para el CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Por otro lado, las muestras en estado PAV se miden a temperaturas intermedias y cada 3°C, para el caso del CA-24 PAV y CA-14 PAV van desde 25°C a 28°C. Mientras que, para el RAP van desde 28°C a 40°C. Para los ligantes rejuvenecidos en sus dosis óptimas con LPO-M y RC el rango de medición se presenta en la Tabla 2.2.3.

Tabla 2.2.3. Rango de temperatura de medición para especificación PG mediante el uso del Reómetro de Corte Dinámico (DSR).

Ligante asfáltico	Rejuvenecedor en dosis óptimas	Rango de temperatura de medición (°C)		
		Original	Envejecido en HPDR	Envejecido en PAV
CA-24	LPO-M	64°C a 70°C	64°C a 88°C	25°C a 28°C
	RC	64°C a 76°C	64°C a 70°C	16°C a 28°C
CA-14	LPO-M	64°C a 76°C	64°C a 88°C	25°C a 28°C
	RC	64°C a 70°C	58°C a 64°C	16°C a 28°C
RAP	LPO-M	64°C a 70°C	82°C a 94°C	25°C a 31°C
	RC	64°C a 70°C	64°C a 76°C	16°C a 28°C

Por otro lado, el rango de temperatura de medición para el Reómetro de Viga en Flexión también varía según el tipo de ligante a ensayar, donde para el caso del CA-24 y CA-14 en estado PAV van desde -

12°C a -18°C y desde -6 a -18°C, respectivamente. Mientras que, para el RAP van desde 6°C a -6°C debido a la alta rigidez del material. Para los ligantes rejuvenecidos en sus dosis óptimas con LPO-M y RC el rango de medición se presenta en la Tabla 2.2.4. Cabe recalcar que, el ligante extraído de RAP se midió a una temperatura fuera del rango indicado en la normativa (0°C a -36°C) debido a su alta rigidez a bajas temperaturas.

Tabla 2.2.4. Rango de temperatura de medición para especificación PG mediante el uso del Reómetro de Viga en Flexión (BBR).

Ligante asfáltico	Rango de temperatura de medición (°C)	
	Rejuvenecedor	Envejecido en PAV
CA-24	LPO-M	-6°C a -12°C
	RC	-12°C a -18°C
CA-14	LPO-M	-6°C a -12°C
	RC	-6°C a -18°C
RAP	LPO-M	0°C a -6°C
	RC	-6°C a -18°C

### 2.2.3.2. Metodología del ensayo

Las muestras de ligante asfáltico ensayadas para determinar el grado de desempeño PG fueron el CA-24, CA-14 y RAP en estado original, es decir, sin aditivos. Adicionalmente, se sometieron a este ensayo las muestras de ligante con dosis óptimas de LPO-M y RC. Todas las muestras fueron ensayadas en estado original (sin envejecer), con envejecimiento primario (RTFO) y envejecimiento secundario (PAV). Los envejecimientos primarios y secundarios fueron realizados en condiciones de laboratorio, de acuerdo con lo especificado en las secciones 8.302.33 y 8.302.23 del Volumen 8 del Manual de Carreteras.

Los ensayos para la clasificación de los ligante asfálticos según el grado de desempeño (PG) a temperaturas altas e intermedias se realizaron mediante el reómetro de corte dinámico Anton Par Rheocompass modelo MCR 301, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D7175-15.

La clasificación a temperaturas bajas se obtuvo mediante la utilización del reómetro de viga en flexión ubicado en el laboratorio de OIL MALAL S.A, San Antonio, Valparaíso, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D6648-08.

Los límites para clasificar los ligantes a altas temperaturas utilizados fueron en base a los criterios de falla del parámetro  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  en muestras sin envejecimiento y en RTFO. Mientras que, para temperaturas intermedias se utilizó el parámetro  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  en muestras con envejecimiento PAV. Estos criterios son los siguientes:

- Ligantes asfálticos en estado original:  $|G^*|/\text{sen}(\delta) \geq 1,00 \text{ kPa}$
- Ligantes asfálticos con envejecimiento primario RTFO:  $|G^*|/\text{sen}(\delta) \geq 2,2 \text{ kPa}$
- Ligantes asfálticos con envejecimiento en PAV:  $|G^*|/\text{sen}(\delta) \leq 6000 \text{ kPa}$

Los límites utilizados para clasificar los ligantes a temperaturas bajas fueron en base a los criterios de falla de la pendiente “m-value” y la rigidez “S” en muestras con envejecimiento PAV. Estos criterios son los siguientes:

- Ligante asfáltico con envejecimiento PAV:  $S \leq 300 \text{ MPa}$  y  $m\text{-value} \geq 0,300$

### 2.2.3.3. Análisis de repetibilidad

Para todas las muestras ensayadas se realizaron como mínimo dos mediciones para analizar la repetibilidad de estas, donde los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados son los indicados en la norma ASTM D7175-15 y ASTM D6648-08. Los coeficientes de variación aceptable

entre las mediciones para un mismo operador se presentan en la Tabla 2.2.2 y Tabla 2.2.5 para mediciones con DSR y BBR, respectivamente. Cabe recalcar que, para una mayor representatividad se utilizó el promedio de estas mediciones para cada ligante asfáltico.

Tabla 2.2.5. Repetibilidad y reproducibilidad estimada. Fuente: Tabla 1, ASTM D6648-08, 2016.

Condición	Coefficiente de variación (1s%)	Rango aceptable de dos resultados (d2S%)
Precisión para un mismo operador:		
Creep Stiffness (MPa)	3,2	9,1
Slope	1,4	4,0

## 2.2.4. Especificaciones tradicionales

Se determinan las propiedades físicas de los ligantes asfálticos sin y con rejuvenecedor aplicado (LPO-M y RC) mediante algunos ensayos como: penetración, punto de ablandamiento y viscosidad a 60°C y 135°C, de acuerdo con lo especificado en las secciones 8.302.3, 8.302.16 y 8.302.24 del Volumen 8 del Manual de Carreteras, respectivamente.

De manera adicional se realizaron ensayos de cambio de masa y punto de inflamación de los ligantes CA-24 y CA-14 PAV rejuvenecidos con ambos productos en dosis óptimas, según lo especificado en las secciones 8.302.33 y 8.302.9 del V8 MC, respectivamente.

## 2.2.5. Ensayos FTIR

Con el objetivo de determinar los índices de recuperación química en el cemento asfáltico rejuvenecido, se miden el índice carbonilo, sulfoxyl y de envejecimiento combinado a través del análisis de espectros por espectrometría infrarroja con transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR). La espectrometría FTIR permite identificar los grupos funcionales presentes en una muestra de asfalto. Estos ensayos fueron realizados en un equipo Nicolet is20 (Thermoscientific, USA) provisto de un accesorio de reflectancia total atenuada (Specac, Quest, ATR) operando en el rango medio 400 - 4000 cm<sup>-1</sup>. Los espectros se obtuvieron de 32 escaneos a una resolución de 4 cm<sup>-1</sup> y un número de repetición por muestra de 3. Finalmente, los espectros se normalizaron, se corrigieron por línea base y se estimaron los índices de envejecimiento de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$I_{C=O} = \frac{A_{1700}}{\sum RA} \quad \text{Ecuación 2.2.17}$$

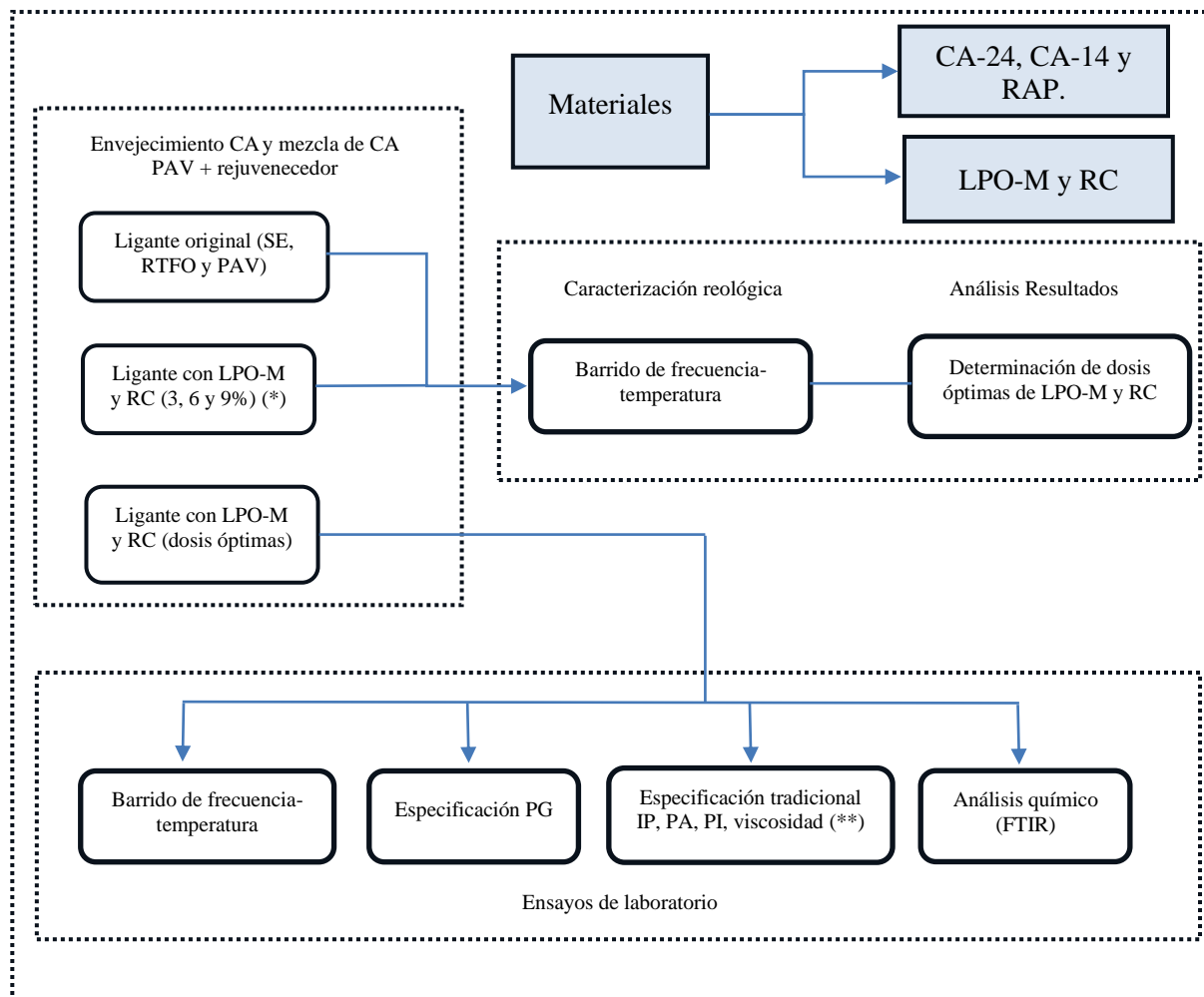
$$I_{S=O} = \frac{A_{1030}}{\sum RA} \quad \text{Ecuación 2.2.18}$$

$$\sum RA = A_{(2953,2862)} + A_{(1700)} + A_{(1600)} + A_{(1460)} + A_{(1376)} + A_{(1030)} + A_{(864)} + A_{(814)} + A_{(743)} + A_{(724)} \quad \text{Ecuación 2.2.19}$$

Adicionalmente, se calcula un índice combinado ( $I_{comb} = I_{C=O} + I_{S=O}$ ) que consideró los cambios químicos generales producidos por el fenómeno de oxidación en la muestra de ligante asfáltico.

## 2.3. Esquema de proceso experimental

A modo de resumen, se presenta un esquema del proceso experimental en la Figura 2.3.1, donde se muestra principalmente que, el estudio utiliza tres ligantes asfálticos (CA-14, CA-14 y RAP) más dos rejuvenecedores (LPO-M y RC), con el objetivo de evaluar el efecto rejuvenecedor sobre las propiedades reológicas ( $|G^*|$  y  $\delta$ ) mediante diferentes ensayos de laboratorio. Dichos ensayos de laboratorio son principalmente barridos de frecuencia-temperatura, determinación de grado de desempeño PG y ensayos tradicionales.



(\*) Las dosis mencionadas son de genéricas, las dosis mezcladas en detalle para cada ligante son mencionadas en secciones anteriores.

(\*\*) La especificación tradicional realizados a los ligantes originales son solo al CA-24 y CA-14.

Figura 2.3.1. Esquema proceso experimental. Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 3: Resultados y análisis de ensayos de laboratorio

El presente capítulo tiene por objetivo presentar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, donde se encuentran las curvas maestras de las muestras rejuvenecidas, dosis óptimas determinadas, entre otros. Por lo tanto, el capítulo se estructura de la siguiente forma:

- En la sección 3.1, se presentan los resultados de barrido de frecuencia-temperatura de todas las muestras, donde se encuentran en sus subcapítulos las curvas maestras del módulo dinámico y ángulo de fase.
- En la sección 3.2 se muestran los resultados para la determinación de dosis óptimas de los productos rejuvenecedores evaluados (LPO-M y RC) y una verificación a temperaturas intermedias.
- En la sección 3.3 se presentan los resultados de ensayos realizados a los tres cementos asfálticos con dosis óptimas determinadas anteriormente, dichos ensayos son: determinación del grado de desempeño PG, propiedades físicas (penetración, punto de ablandamiento, viscosidad, entre otros), barridos de frecuencia-temperatura (curvas maestras del módulo dinámico y ángulo de fase) y un análisis químico mediante ensayos FTIR.
- Y finalmente, en la sección 3.4 se presentan los resultados para el análisis de susceptibilidad al envejecimiento de los rejuvenecedores aplicados a los cementos asfálticos envejecidos.

### 3.1. Resultados barridos de frecuencia-temperatura

Las muestras se caracterizaron reológicamente mediante ensayos de barridos de frecuencia-temperatura, en un rango de temperatura de 5°C a 40°C y las frecuencias de ensayo variaron entre 100 a 0,1 [rad/s]. Luego, se construyeron curvas maestras de todas las muestras ensayadas tanto para el módulo complejo de corte ( $G^*$ ) como para el ángulo de fase ( $\delta$ ).

Según lo mencionado, el principal resultado a evaluar son las curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) para los asfaltos CA-24, CA-14 y RAP con y sin adición del LPO-M o RC. Los resultados y el análisis correspondiente se presentan a continuación.

#### 3.1.1. Propiedades reológicas de muestras originales CA-24, CA-14 y RAP

En las siguientes gráficas se muestran las curvas maestras del cemento asfáltico CA-14, CA-24 y RAP, donde los dos primeros se analizan en estado original sin envejecer (SE) con un envejecimiento primario (RTFO) y envejecimiento secundario (PAV). Mientras que, el RAP solo en estado original (SE).

##### 3.1.1.1. Curvas maestras módulo dinámico

En la Figura 3.1.1 se presentan las curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) donde se puede observar que, la variación de rigidez en todo su rango de frecuencias medido es coherente con los estados de envejecimiento del ligante, es decir, para el cemento asfáltico tipo CA-24 y CA-14 PAV tiene mayor rigidez, seguido de la curva RTFO, y luego el sin envejecer. Además, la curva de módulo dinámico del ligante tipo RAP está por sobre la curva de su ligante base CA-24 PAV y del CA-14 PAV, es decir, el RAP presenta una mayor rigidez que un asfalto con envejecimiento secundario.

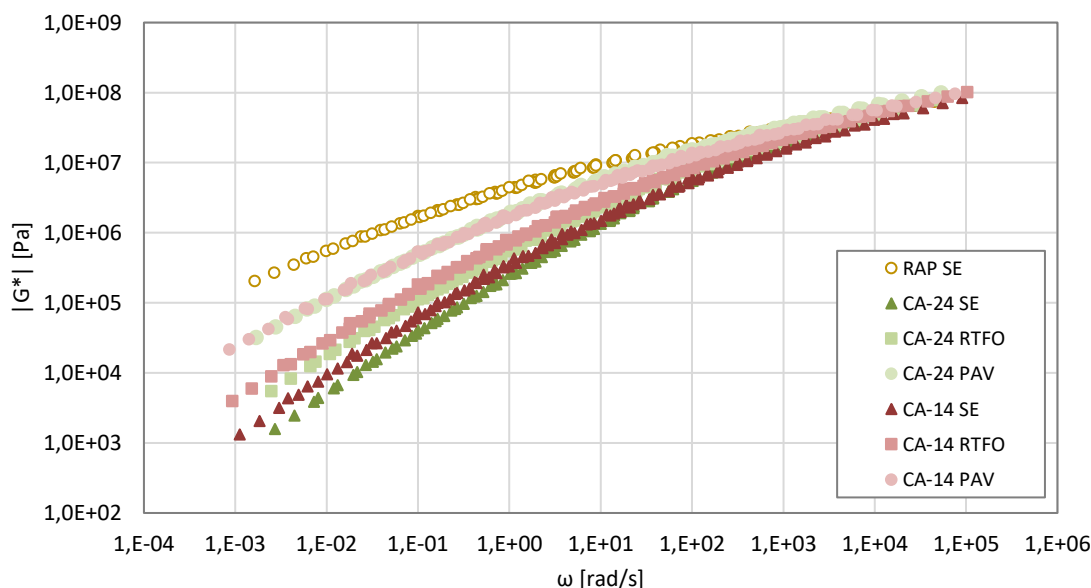


Figura 3.1.1. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-24, CA-14 y RAP en estado SE, RTFO y PAV. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el comportamiento de las curvas de los tres cementos asfálticos es similar, a bajas frecuencias la variación de rigidez es significativa y a altas frecuencias esta variación es menor donde la pendiente de la curva disminuye. Además, se observa que a altas frecuencias las curvas se agrupan y cruzan entre sí, donde el RAP en cierto rango de frecuencia ( $\geq 1000$  rad/s) presenta una rigidez menor que los asfaltos CA-14 y CA-24 con envejecimiento PAV. Al comparar los asfaltos CA-24 y CA-14, se observa en las curvas una diferencia en el comportamiento según el nivel de envejecimiento de las muestras, a bajas frecuencias ( $\leq 0,1$  rad/s) el CA-14 presenta un comportamiento más rígido que el

CA-24 en estado sin envejecer y RTFO, mientras que en estado PAV no presentan mayor diferencia en todo el rango de frecuencia de medición.

### 3.1.1.2. Curvas maestras ángulo de fase

Las curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) obtenidas para los distintos tipos de asfalto se presentan en la Figura 3.1.2. Se observa que, a medida que aumenta el nivel de envejecimiento del cemento asfáltico el ángulo de fase disminuye su valor y en general, el ligante CA-24 en estado sin envejecer presenta mayores ángulos de fase que el resto de las muestras, mostrando un comportamiento más viscoso. El ligante tipo RAP presenta la curva maestra más inferior, presentando un comportamiento más elástico y siendo concordante con su nivel de envejecimiento.

Por otro lado, al comparar los asfaltos CA-14 y CA-24, este último presenta mayores valores de ángulo de fase en todos sus estados de envejecimiento en casi todo el rango de frecuencias medida. Para frecuencias altas (temperaturas bajas) el ligante asfáltico CA-14 se comporta de manera más viscosa que el CA-24, es decir, presenta valores de ángulo de fase mayores. Cabe destacar que, la curva de CA-24 RTFO a bajas frecuencias ( $\leq 0,1$  rad/s) se cruza con la curva del CA-14 sin envejecer presentando la misma tendencia.

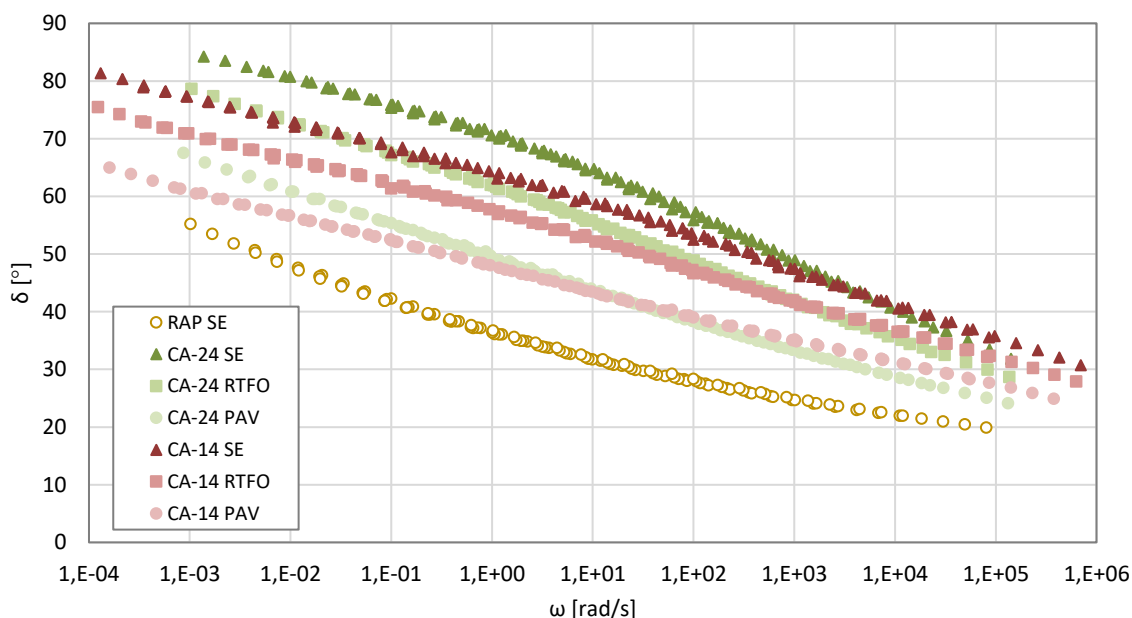


Figura 3.1.2. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24, CA-14 Y RAP en estado SE, RTFO y PAV. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, según estos resultados el asfalto va aumentando su módulo dinámico y disminuyendo su ángulo de fase a medida que envejece. Además, como es esperado el ligante tipo RAP presenta un mayor nivel de envejecimiento según las propiedades reológicas medidas.

### 3.1.2. Propiedades reológicas de muestras con líquido LPO-M

Los ligantes envejecidos de tipo CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP son mezclados con el LPO-M en distintas dosis. El comportamiento reológico de las distintas muestras se puede observar en las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase, donde el rango de temperatura de medición es de 5°C a 40°C.

### 3.1.2.1. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-24 con LPO-M

El líquido pirolítico LPO-M es mezclado con el CA-24 PAV en dosis de 3, 6, 9 y 12%. Todas las muestras son comparadas con el ligante en estado sin envejecer (CA-24 SE), con envejecimiento primario (CA-24 RTFO) y envejecimiento secundario (CA-24 PAV).

Las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidas para las muestras con LPO-M aplicado a un CA-24 PAV se observan en la Figura 3.1.3 (a) y (b), respectivamente. A partir de los resultados se observa que, el módulo dinámico de las muestras con líquido en dosis de 3, 6, 9 y 12% se encuentran por debajo del ligante envejecido en PAV, demostrando que el líquido pirolítico tiene efectos rejuvenecedores al restaurar sus propiedades reológicas (disminuir su rigidez). La curva con dosis de 3% muestra un acercamiento a la curva del ligante con nivel de envejecimiento RTFO y la curva de 6% a bajas frecuencias ( $\leq 0,1$  rad/s) se asemeja a la curva sin envejecer. Mientras que, para dosis de LPO-M mayores o iguales a 9% disminuye de manera significativa la rigidez del material respecto al ligante sin envejecer.

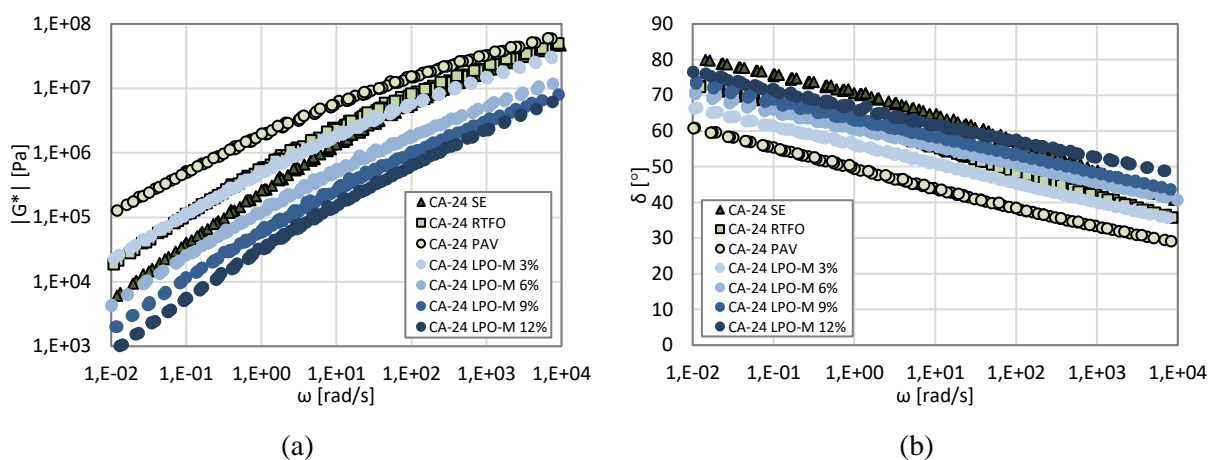


Figura 3.1.3. Curvas maestras de CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12% y sin LPO-M en estado de envejecimiento SE, RTFO y PAV del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase.

Por otra parte, las muestras con LPO-M aumentan el ángulo de fase respecto al ligante envejecido PAV, demostrando el efecto rejuvenecedor sobre esta propiedad, al aumentar su valor. Se observa que, a mayor dosis aplicada aumentan los valores de ángulo de fase, sin embargo, ninguna dosis alcanza el nivel de ligante sin envejecer en todo su rango de frecuencias. El efecto del líquido sobre esta propiedad no tiene un comportamiento claro, en especial en muestras con dosis altas. Las curvas de las muestras con 6, 9 y 12% varían en el rango de frecuencias, por ejemplo: la curva de 6 y 9% se asemejan al RTFO a bajas frecuencias, pero a altas frecuencias al sin envejecer. Por lo que, el efecto del LPO-M sobre el ángulo de fase es menos evidente y con una tendencia no tan clara como en el módulo dinámico.

### 3.1.2.2. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-14 con LPO-M

En base a los resultados obtenidos con la aplicación de LPO-M al ligante CA-24, se observó que, la muestra con una dosis de 12% resultó en un efecto suavizante excesivo del ligante envejecido. Con este antecedente, sólo se aplicaron dosis de 3, 6, y 9% de LPO-M al CA-14 PAV. Al igual que en la sección anterior, las muestras se compararon con el ligante en sus distintos niveles de envejecimiento.

En la Figura 3.1.4 (a) y (b) se presentan las curvas maestras para el módulo dinámico de corte y ángulo de fase, respectivamente. Las curvas muestran a medida que se aumenta la dosis de líquido, disminuye el valor del módulo y aumenta el ángulo de fase. Esto demuestra el efecto rejuvenecedor del LPO-M sobre este tipo de ligante, al ir restaurando las propiedades reológicas del CA-14 PAV.

En la Figura 3.1.4 (a) se visualiza que la curva con dosis de 3% se acerca a un ligante RTFO y con 6% está por debajo del ligante sin envejecer. Mientras que, con dosis de 9% el módulo dinámico de corte disminuye de manera significativa. Al comparar estos resultados con los obtenidos en el CA-24, se observa que una dosis de líquido pirolítico de 9% sobre el CA-14 PAV disminuye en mayor medida el módulo dinámico, donde a priori se puede inferir que el efecto del LPO-M sobre el CA-14 tiene una mayor influencia en el módulo dinámico que en el CA-24, esta comparación y análisis se profundiza en secciones posteriores.

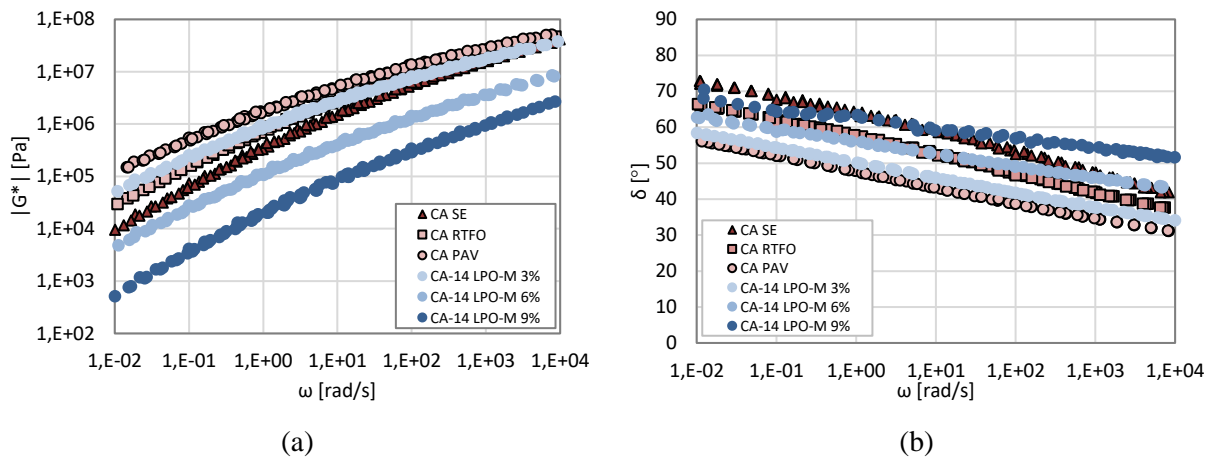


Figura 3.1.4. Curvas maestras de CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% y sin LPO-M en estado de envejecimiento SE, RTFO y PAV del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.

Para las curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) presentadas en la Figura 3.1.4 (b) se observa que, con dosis de 3% de LPO-M se aleja muy poco del ligante PAV y que ninguna dosis alcanza el nivel de ligante sin envejecer en todo su rango de frecuencia. Se puede demostrar que, al igual que para el CA-24, las dosis aplicadas de LPO-M no son suficientes para restaurar esta propiedad reológica a un nivel sin envejecer. Sin embargo, si se analiza a altas frecuencias ( $\geq 10$  rad/s) las muestras con dosis de 6% y 9% logran sobrepasar la curva del ligante RTFO y sin envejecer, respectivamente. A pesar de que el comportamiento de las muestras con líquido varía en su rango de frecuencia, estas presentan un comportamiento más claro en comparación con el del CA-24, ya que las curvas muestran una diferencia mayor entre la dosis aplicada.

### 3.1.2.3. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de RAP con LPO-M

Considerando que las muestras de RAP provenían de un pavimento asfáltico construido originalmente con asfalto de tipo CA-24, y que no se tiene la información de ese ligante en estado original, se utilizó para efectos comparativos las curvas del ligante CA-24 evaluado anteriormente en la sección 3.1.1. en estado sin envejecer (CA-24 SE), con envejecimiento primario (CA-24 RTFO) y envejecimiento secundario (CA-24 PAV). Con estas curvas se estimó el nivel de rejuvenecimiento alcanzado con las distintas dosis de LPO-M aplicadas al RAP, donde las dosis a mezclar fueron de 3, 6 y 9%, al igual que para el caso de CA-14 PAV. Los resultados mostraron que, debido a su nivel de envejecimiento y alta rigidez, este material requiere dosis mayores, por lo que adicionalmente se mezcló con dosis de un 12, 15 y 18%.

Las curvas maestras de módulo dinámico y ángulo de fase para muestras de RAP con LPO-M se presentan en la Figura 3.1.5 (a) y (b), respectivamente. Al analizar las curvas obtenidas se observa que, con dosis de 3% se alcanza un nivel PAV del ligante base (CA-24) y dosis de 9% se asemeja a la curva del RTFO. Sin embargo, ninguna de las dosis (3, 6 y 9%) sobrepasa la curva sin envejecer del CA-24 en todo su rango de frecuencia. Con estos resultados, se concluye que para alcanzar un nivel sin envejecer se deben aplicar dosis mayores al ligante recuperado de RAP.

Las muestras con dosis de 9 y 12% no alcanzan la curva de módulo dinámico del ligante sin envejecer en todo su rango de frecuencia. Mientras que, la curva con dosis de 15 y 18% están por debajo de la curva sin envejecer, pero disminuye significativamente la rigidez del ligante. Sin embargo, a altas frecuencias ( $\geq 100$  rad/s) dosis mayores o iguales a 9% logran disminuir el módulo dinámico y restaurar esta propiedad del ligante sin envejecimiento. Además, a frecuencias bajas e intermedias ( $\leq 10$  rad/s) las muestras con dosis de 9 y 12% se acercan a la curva del ligante RTFO y SE, respectivamente.

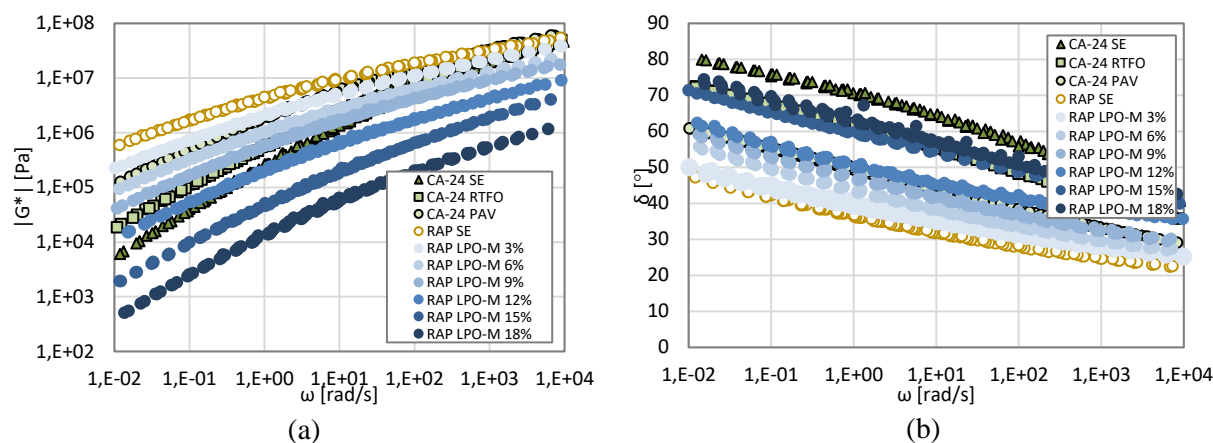


Figura 3.1.5. Curvas maestras de RAP con LPO-M en dosis de 3, 6, 9, 12, 15 y 18% y sin LPO-M en estado de envejecimiento SE del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, al evaluar el efecto sobre el ángulo de fase en la Figura 3.1.5 (b) se observa que, en las muestras con mayores dosis aumentan su valor y que todas las dosis aplicadas superan la curva del RAP en estado sin envejecer (RAP SE), demostrando que el LPO-M tiene efectos rejuvenecedores en este tipo de material. Por otra parte, las curvas maestras con dosis de 12% y 15% alcanzan un nivel PAV y RTFO del ligante base CA-24, respectivamente. A altas frecuencias ( $\geq 100$  rad/s) la curva con dosis de 18% se asemeja al del ligante sin envejecer. Sin embargo, al igual que en los otros dos ligantes evaluados con LPO-M, las dosis no son suficientes para alcanzar el estado de un ligante sin envejecer en todo su rango de frecuencia.

### 3.1.3. Propiedades reológicas de muestras con rejuvenecedor comercial (RC)

Para evaluar las ventajas y/o desventajas del LPO-M en comparación a los rejuvenecedores utilizados en la industria, se utiliza un rejuvenecedor comercial (RC) y se evalúa su efecto sobre las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos envejecidos. El producto RC es mezclado con cementos asfálticos envejecidos de tipo CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP en distintas dosis y al igual que en la sección 3.1.2 todas las muestras son comparadas con el ligante en estado sin envejecer (SE), con envejecimiento primario (RTFO) y envejecimiento secundario (PAV).

El comportamiento reológico de las distintas muestras se puede observar en las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase, donde el rango de temperatura de medición es de 5 a 40°C.

#### 3.1.3.1. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-24 con RC

El rejuvenecedor comercial es mezclado con el CA-24 PAV en dosis de 3, 6 y 9%. Las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase se observan en Figura 3.1.6 (a) y (b), respectivamente. Se observa que, todas las muestras con el producto aplicado en dosis de 3, 6 y 9% sus curvas se encuentran por debajo del ligante envejecido PAV, disminuyendo claramente la rigidez del material. La curva con dosis de 3% muestra un acercamiento a la curva del ligante RTFO y la curva con dosis de 6% se asemeja a la curva del ligante sin envejecer, en casi todo el rango de

frecuencias. Con dosis de 9% aplicado se disminuye la rigidez del material y su curva está por debajo del ligante sin envejecer.

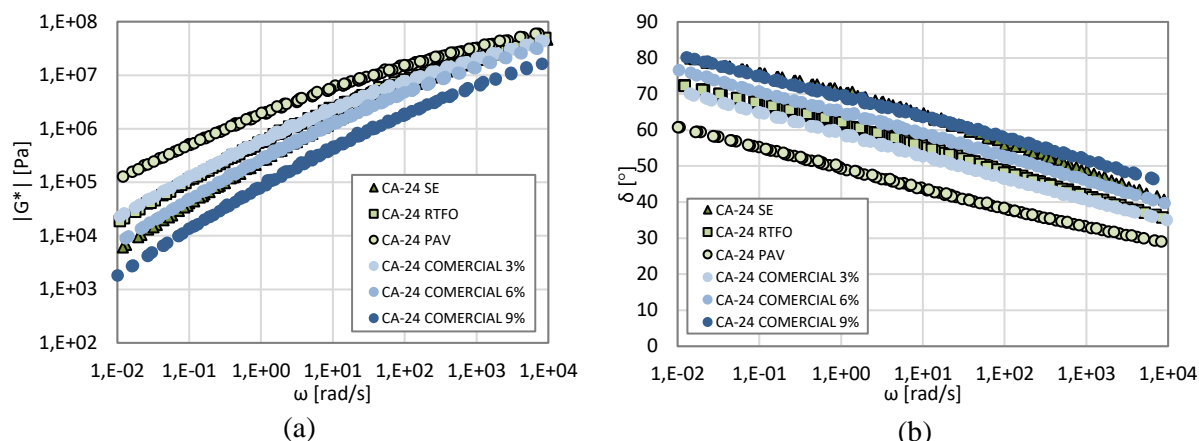


Figura 3.1.6. Curvas maestras de CA-24 con RC en dosis de 3, 6 y 9% y sin RC en estado de envejecimiento SE, RTFO y PAV del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.

Al evaluar el efecto de este producto sobre el ángulo de fase, se observa en la Figura 3.1.6 (b) que a mayor dosis aplicada aumentan los valores de esta propiedad. Todas las curvas con dosis aplicadas sobrepasan la curva del ligante PAV. La curva con dosis de 3% a bajas frecuencias ( $\leq 0,1$  rad/s) se asemeja al ligante RTFO y dosis de 6% a altas frecuencias ( $\geq 100$  rad/s) su curva alcanza un nivel sin envejecer. La curva con 9% se asemeja a un ligante sin envejecer en casi todo su rango de frecuencias. El RC aplicado en distintas dosis en el cemento asfáltico CA-24 PAV logra recuperar las propiedades del ligante sin envejecer.

### 3.1.3.2. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-14 con RC

El rejuvenecedor comercial es mezclado con el CA-14 PAV en dosis de 3, 6 y 9%. En la Figura 3.1.7 (a) y (b) se presentan las curvas maestras para el módulo dinámico y ángulo de fase, respectivamente. Los resultados muestran que con todas las dosis aplicadas hay una disminución de la rigidez y que, a medida que se aumenta la dosis, disminuye el valor del módulo. Se visualiza en la Figura 3.1.7 (a) que, la curva con dosis de 3% se acerca a un ligante RTFO y a altas frecuencias ( $\geq 10$  rad/s) la curva con dosis de 6% se asemeja a la del ligante sin envejecer. Mientras que, dosis de 9% la curva del módulo dinámico de corte alcanza un nivel por debajo de la sin envejecer.

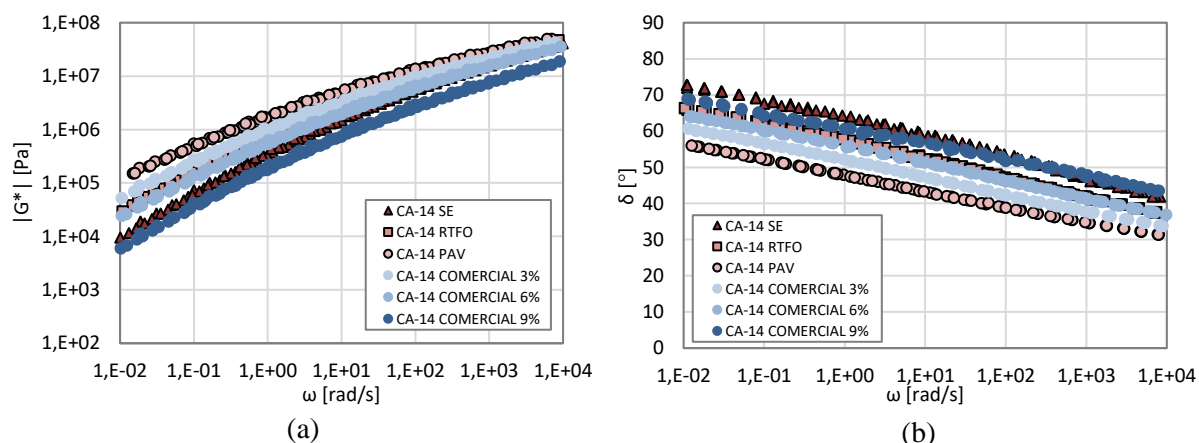


Figura 3.1.7. Curvas maestras de CA-14 con RC en dosis de 3, 6 y 9% y sin RC en estado de envejecimiento SE, RTFO y PAV del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.1.7 (b) para el ángulo de fase ( $\delta$ ) se observa que con dosis de 3 y 6% se alejan muy poco del ligante PAV. Además, a altas frecuencias ( $\geq 10$  rad/s) la curva con dosis de 6% se asemeja a

un ligante RTFO y con dosis de 9% alcanza un ligante sin envejecer. Cabe recalcar que, ninguna dosis alcanza el nivel de curva maestra de ángulo de fase del ligante sin envejecer en todo su rango de frecuencia. La aplicación del RC a un CA-14 PAV en distintas dosis tiene un efecto rejuvenecedor, donde sus curvas tanto para el módulo dinámico como el ángulo de fase presentan un comportamiento claro en todo su rango de frecuencias, a medida que se aumenta la dosis aplicada, disminuye la rigidez (módulo dinámico) y aumenta su comportamiento viscoso (ángulo de fase). Por otro lado, las curvas mantienen una pendiente similar a las del ligante original en todos sus niveles de envejecimiento.

### 3.1.3.3. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de RAP con RC

Para el caso de este tipo de ligante asfáltico proveniente de RAP, al igual que en la sección 3.1.2.3 se utilizó para efectos comparativos las curvas de cemento asfáltico CA-24 (sin envejecer, RTFO y PAV). Se mezcló el RAP con dosis de rejuvenecedor comercial de 3, 6, 9 y 12%.

Las curvas maestras de módulo dinámico y ángulo de fase se presentan en la Figura 3.1.8 (a) y (b), respectivamente. Se observa que, todas las dosis aplicadas disminuyen la rigidez y aumentan el comportamiento viscoso respecto del RAP original. Al evaluar la variación del módulo dinámico de corte se observa que, la curva con dosis de 3% se acerca a su ligante base CA-24 PAV y con 6% no presenta mucha diferencia. A bajas frecuencias (<10 rad/s) dosis de 9% alcanzan un nivel RTFO del ligante base y a altas frecuencias ( $\geq 10$  rad/s) esta curva alcanza a un ligante sin envejecer. Mientras que, la curva con dosis de 12% está por debajo del ligante sin envejecer y además a bajas frecuencias ( $\leq 100$  rad/s) su curva se asemeja a la sin envejecer.

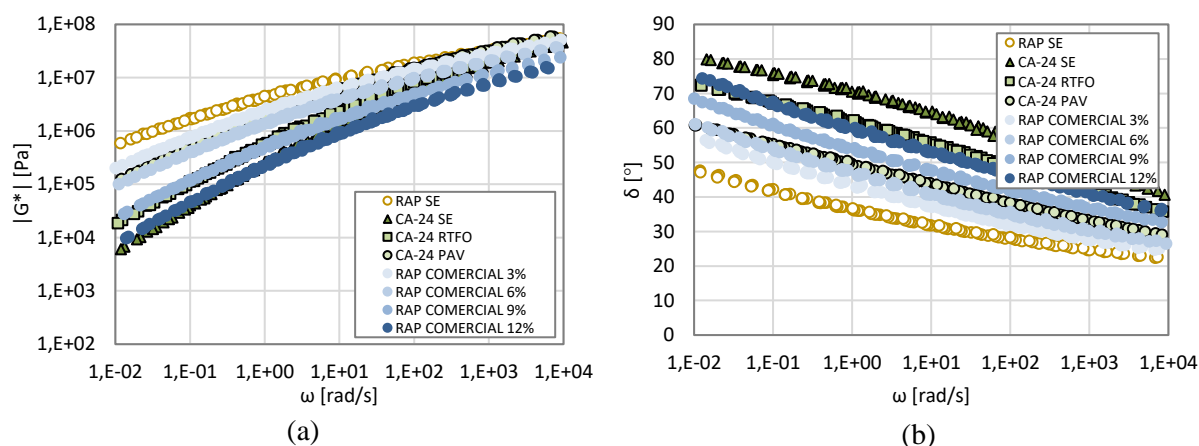


Figura 3.1.8. Curvas maestras de RAP con RC en dosis de 3, 6, 9 y 12% y sin RC en estado de envejecimiento SE del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, al evaluar las curvas maestras del ángulo de fase se observa que a medida que se aumenta la dosis aplicada, aumenta su valor y que todas las dosis superan la curva del RAP en estado sin envejecer (RAP SE). Se puede concluir que, el producto si tiene un efecto rejuvenecedor sobre este tipo de ligante proveniente de un reciclado de pavimento asfáltico. Además, la curva con dosis de 3 y 6% no alcanzan la curva de su ligante base con envejecimiento secundario (CA-24 PAV) y con dosis de 9% se asemeja a un nivel RTFO con valores de ángulo de fase superiores en todo su rango de frecuencias. Por último, la curva con dosis de 12% se acerca al CA-24 RTFO y ninguna dosis alcanza el nivel de un ligante sin envejecer en todo su rango de frecuencias, por lo que, se requiere aplicar dosis mayores a estas para alcanzar la viscosidad del material original.

## 3.2. Resultados para determinación de dosis óptimas

Se utiliza el parámetro de ahuellamiento Superpave para determinar la dosis óptima a aplicar del líquido pirolítico minero (LPO-M) y el producto rejuvenecedor comercial (RC) a cada tipo de cemento asfáltico envejecido (CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP). En esta sección el criterio utilizado para determinar el contenido óptimo se basa en que, al ser aplicado en el cemento asfáltico envejecido este

se comporte como un ligante sin envejecer a altas temperaturas (64°C), es decir, el objetivo es que se logren restaurar las propiedades reológicas de un ligante sin envejecimiento. Para esto, se utiliza la ecuación de ajuste polinómica de las curvas maestras y la ecuación de WLF para hacer un corrimiento de las curvas y obtener los valores del módulo dinámico y ángulo de fase a la temperatura de 64°C.

Los resultados de los parámetros estimados mediante superposición de tiempo y temperatura a 64°C y 10 rad/s de las muestras de los ligantes asfálticos sin envejecimiento, RTFO y PAV se muestran en la Tabla 3.2.1. Se puede observar que, los tres cementos asfálticos en su estado sin envejecer tienen un valor  $|G^*|/\text{sen}(\delta) \geq 1,00$  kPa, por lo que cumplen con el criterio PG indicado en la normativa. Donde, el RAP tiene una rigidez muy alta en comparación a un cemento asfáltico tradicional, con un valor de módulo dinámico de corte de 320,4 kPa, este resultado es esperado debido al nivel de envejecimiento que posee este tipo de ligante. Por otra parte, el parámetro de ahuellamiento para un ligante envejecido RTFO el CA-24 y CA-14 tienen un valor  $|G^*|/\text{sen}(\delta) \geq 2,20$  kPa, cumpliendo con lo indicado en la norma.

Tabla 3.2.1. Propiedades reológicas y parámetro de ahuellamiento de cementos asfálticos a 64°C y 10 rad/s.

Cemento asfáltico	Nivel envejecimiento	$ G^* $ [kPa]	$\delta$ [°]	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ [kPa]
CA-24	Sin envejecer	1,36	84,04	1,37
	RTFO	3,98	79,76	4,04
	PAV	32,2	71,11	34,03
CA-14	Sin envejecer	1,31	84,35	1,32
	RTFO	4,63	78,62	4,73
	PAV	34,01	69,41	36,33
RAP	Sin envejecer (*)	320,37	53,3	399,61

(\*): Sin aplicar envejecimiento en laboratorio, es decir, en su condición de recuperado a partir del RAP mediante rotavapor.

Además, se calcula el parámetro de fatiga a 25°C y 10 rad/s de los cementos asfálticos sin envejecer, con un envejecimiento primario (RTFO) y secundario (PAV), cuyas propiedades se presentan en la Tabla 3.2.2. Donde se observa que, el CA-24 y CA-14 con envejecimiento PAV tienen un valor  $|G^*|/\text{sen}(\delta) \leq 6000$  kPa, cumpliendo con lo exigido en la normativa de PG. Cabe recalcar que, los cementos asfálticos fueron sometidos a un envejecimiento primario (RTFO) y luego al secundario (PAV).

Tabla 3.2.2. Propiedades reológicas y parámetro de fatiga de cementos asfálticos a 25°C y 10 rad/s.

Cemento asfáltico	Nivel envejecimiento	$ G^* $ [kPa]	$\delta$ [°]	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ [kPa]
CA-24	Sin envejecer	1267,79	64,05	1140,04
	RTFO	2705,70	52,59	1822,43
	PAV	5454,53	43,62	3762,62
CA-14	Sin envejecer	1514,14	64,06	1361,57
	RTFO	2705,69	52,59	2149,06
	PAV	4894,13	43,02	3339,09
RAP	Sin envejecer	9040,42	31,82	4766,02

### 3.2.1. Parámetro de ahuellamiento muestras con LPO-M

Como se mencionó anteriormente, en esta sección se utiliza el parámetro de ahuellamiento superpave para determinar las dosis óptimas de aplicación del LPO-M. En la Tabla 3.2.3 se presentan los valores obtenidos para el módulo dinámico de corte y ángulo de fase para las distintas muestras con líquido aplicado.

Se observa que, a altas temperaturas a medida que aumento las dosis el módulo dinámico disminuye y el ángulo de fase aumenta en los tres ligantes evaluados. Para el caso del CA-24 existe una

disminución gradual del módulo donde la muestra con 12% la rigidez disminuye de manera significativa respecto al ligante sin envejecer mostrados en la Tabla 3.2.1. Las muestras de RAP con dosis bajas se mantienen muy rígido y con un comportamiento más elástico por lo que hay que aplicar mayores dosis para evitar posibles deterioros. En las muestras con CA-14, se observa que la disminución de la rigidez es mayor que en los otros dos ligantes, donde dosis de 6% se alcanzan un valor menor que su ligante sin envejecer, esto reafirma lo dicho anteriormente que el LPO-M tiene un efecto mayor sobre el CA-14.

Tabla 3.2.3. Módulo dinámico y ángulo de fase de muestras con LPO-M a 64°C y 10 rad/s.

Muestra	Dosis [%]	$ G^* $ (T=64°C) [Pa]	$ G^* $ (T=64°C) [kPa]	$\delta$ (T=64°C) [°]
CA-24 + LPO-M	3	4856,07	4,86	76,92
	6	2204,99	2,20	81,82
	9	1239,39	1,24	84,95
	12	563,89	0,53	85,43
CA-14 + LPO-M	3	4534,17	4,33	72,56
	6	394,97	0,39	78,82
	9	59,31	0,06	82,91
RAP + LPO-M	3	41481,04	41,48	60,52
	6	15039,44	15,04	69,71
	9	7331,07	7,33	71,55
	12	2096,37	2,10	75,85
	15	455,92	0,46	78,89
	18	48,93	0,05	80,67

Luego, al estimar las propiedades reológicas a altas temperaturas de los ligantes asfálticos rejuvenecidos con LPO-M, se determina el parámetro de ahuellamiento para los tres cementos asfálticos (CA-24, CA-14 y RAP) en sus distintas dosis. Los resultados de los parámetros estimados mediante superposición de tiempo y temperatura a 64°C y 10 rad/s de las muestras en sus distintas dosis aplicadas se muestran en la Tabla 3.2.4.

Tabla 3.2.4. Parámetros de ahuellamiento de muestras con dosis de LPO-M a 64°C y 10 rad/s y criterio PG.

Muestra	Dosis [%]	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ [kPa] a 64°C y 10 rad/s	Criterio PG original ( $\geq$ 1 kPa)
CA-24 + LPO-M	3	4,99	Cumple
	6	2,23	Cumple
	9	1,24	Cumple
	12	0,57	No cumple
CA-14 + LPO-M	3	4,53	Cumple
	6	0,39	No cumple
	9	0,06	No cumple
RAP + LPO-M	3	47,65	Cumple
	6	16,03	Cumple
	9	7,73	Cumple
	12	2,16	Cumple
	15	0,46	No cumple
	18	0,05	No cumple

De los resultados se observa que, hay algunas muestras que no cumplen con el criterio PG indicado en la normativa ( $|G^*|/\text{sen}(\delta) \geq 1,00$  kPa), como por ejemplo el CA-24 con 12%, CA-14 con 6 y 9% y el RAP en dosis de 15 y 18% de LPO-M. De esto se concluye que, al aplicar dosis altas de rejuvenecedor LPO-M el material se ablanda mucho y no cumpliría con lo exigido por la normativa de PG. Dicho lo

anterior, bajo el criterio de cumplir con lo exigido por la normativa PG a altas temperaturas, las dosis máximas del LPO-M de aplicación para los distintos asfaltos estarían en un rango de: 9% y 12% para CA-24, 3% y 6% para el CA-14 y 12% y 15% para el RAP, este análisis se profundiza en secciones posteriores.

### 3.2.2. Parámetro de ahuellamiento muestras con RC

En base al mismo procedimiento que fue utilizado para el LPO-M en la sección 3.2.1 se estima el parámetro de ahuellamiento para determinar las dosis óptimas de aplicación del RC para un asfalto de tipo CA-24, CA-14 y RAP. En la Tabla 3.2.5 se presentan los valores obtenidos para el módulo dinámico de corte y ángulo de fase para las distintas muestras con RC aplicado.

Tabla 3.2.5. Módulo dinámico y ángulo de fase de muestras con RC a 64°C y 10 rad/s.

Muestra	Dosis [%]	$ G^* $ (T=64°C) [Pa]	$ G^* $ (T=64°C) [kPa]	$\delta$ (T=64°C) [°]
CA-24 + RC	3	4893,40	4,89	80,16
	6	1359,92	1,36	86,33
	9	371,45	0,37	90,00
CA-14 + RC	3	12714,45	12,71	79,83
	6	2284,91	2,28	82,28
	9	466,93	0,47	85,77
RAP + RC	3	25902,21	25,90	68,71
	6	10545,54	10,55	73,36
	9	1976,79	1,98	81,60
	12	490,52	0,49	88,42

De los resultados se observa que, a medida que aumento las dosis aplicadas el módulo dinámico va disminuyendo su valor, es decir, va disminuyendo la rigidez del material a altas temperaturas. Además, un 9% aplicado a un CA-14 y al CA-24, disminuye de manera significativa la rigidez y de forma similar para los dos tipos de asfalto. Para el caso del RAP se observa que, con dosis menores que para el LPO-M se logra disminuir la rigidez y alcanzar las propiedades originales de su ligante base CA-24, valores que se observan en la Tabla 3.2.1.

Luego, se determina el parámetro de ahuellamiento para los tres ligantes (CA-24, CA-14 y RAP) en sus distintas dosis. Los resultados de los parámetros estimados mediante superposición de tiempo y temperatura a 64°C y 10 rad/s de las muestras en sus distintas dosis aplicadas se muestran en la Tabla 3.2.6.

Tabla 3.2.6. Parámetros de ahuellamiento de muestras con dosis de RC a 64°C y 10 rad/s y criterio PG.

Muestra	Dosis [%]	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ [kPa] a 64°C y 10 rad/s	Criterio PG original ( $\geq$ 1 kPa)
CA-24 + RC	3	4,97	Cumple
	6	1,36	Cumple
	9	0,37	No cumple
CA-14 + RC	3	12,92	Cumple
	6	2,31	Cumple
	9	0,47	No cumple
RAP + RC	3	27,80	Cumple
	6	11,01	Cumple
	9	2,00	Cumple
	12	0,49	No cumple

Al analizar los resultados obtenidos, hay algunas muestras que no cumplen con el criterio PG indicado en la normativa ( $|G^*|/\text{sen}(\delta) \geq 1,00 \text{ kPa}$ ), como por ejemplo el CA-24 y CA-14 con 9% y el RAP en dosis de 12% de rejuvenecedor comercial. De esto se concluye que, al aplicar dosis altas de RC, el material se ablanda mucho y no cumplirían con lo exigido por la normativa. Dicho lo anterior, bajo el criterio de cumplir con lo exigido por la normativa PG a altas temperaturas, las dosis máximas de rejuvenecedor comercial de aplicación para los distintos asfaltos estarían en un rango de: 6% y 9% para CA-24, 6% y 9% para el CA-14 y 9% y 12% para el RAP. Si se compara con el efecto del LPO-M, este producto rejuvenecedor comercial aplicado en el CA-24 y RAP a menores dosis no cumple con el criterio, este análisis se profundiza en secciones posteriores.

### 3.2.3. Dosis óptima para aplicación en mezclas con RAP

Con los resultados obtenidos, se procede a determinar la dosis óptima a aplicar del LPO-M y RC a cada tipo de cemento asfáltico envejecido (CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP). Para esto, se considera como criterio que el cemento asfáltico con la dosis aplicada de rejuvenecedor (LPO-M o RC) debe presentar un comportamiento semejante al ligante sin envejecer a altas temperaturas (64°C), es decir, el objetivo es que se logren restaurar las propiedades reológicas de un ligante original sin envejecimiento con el fin de que el rejuvenecedor sea aplicado en mezclas con RAP.

En la Tabla 3.2.7 y Tabla 3.2.8 se pueden comparar los resultados del parámetro de ahuellamiento con aplicación del LPO-M y RC, respectivamente.

Tabla 3.2.7. Comparación parámetros de ahuellamiento con ligante SE y dosis óptima de LPO-M.

Cemento asfáltico	Estado muestra	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ [kPa] a 64°C y 10 rad/s	Dosis óptima LPO-M [%]
CA-24	SE	1,37	8,6
	6% LPO-M	2,23	
	9% LPO-M	1,24	
CA-14	SE	1,32	5,3
	3% LPO-M	4,53	
	6% LPO-M	0,39	
RAP	SE CA-24	1,37	13,4
	12% LPO-M	2,16	
	15% LPO-M	0,46	

Tabla 3.2.8. Comparación parámetros de ahuellamiento con ligante SE y dosis óptima de RC.

Cemento asfáltico	Estado muestra	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ [kPa] a 64°C y 10 rad/s	Dosis óptima RC [%]
CA-24	SE	1,37	5,9
	3% RC	4,97	
	6% RC	1,36	
CA-14	SE	1,32	7,6
	6% RC	2,31	
	9% RC	0,47	
RAP	SE CA-24	1,37	10,3
	9% RC	2,00	
	12% RC	0,49	

En la Tabla 3.2.7 se observa que, el parámetro de ahuellamiento de los ligantes sin envejecer para el CA-24 se encuentra entre las dosis 6% y 9%, para el CA-14 entre 3% y 6%, y para el RAP entre 12% y 15%. Para el caso del RC, en la Tabla 3.2.8 se observa que el parámetro de ahuellamiento de los ligantes sin envejecer para el CA-24 se encuentra entre las dosis 3% y 6%, para el CA-14 entre 6% y 9%, y para el RAP entre 9% y 12%.

Al realizar la interpolación, se obtiene que las dosis óptimas de aplicación del LPO-M son 8,6%, 5,3% y 13,4% para un asfalto CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Mientras que, para el RC son 5,9%, 7,6% y 10,3% para un asfalto CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente.

### 3.2.4. Dosis óptima para aplicación superficial y con encapsulamiento

Se utiliza el mismo análisis realizado en la sección anterior 3.2.3 para determinar la dosis óptima a aplicar del LPO-M y RC a cada tipo de cemento asfáltico envejecido (CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP). En esta sección el criterio utilizado para determinar el contenido óptimo se basa en que, al ser aplicado en el cemento asfáltico envejecido este se comporte como un ligante original con envejecimiento primario (RTFO) a altas temperaturas (64°C), es decir, el objetivo es que se logren restaurar las propiedades reológicas de un ligante RTFO para que el rejuvenecedor pueda ser utilizado de manera superficial y encapsulado.

Cabe recalcar que los valores estimados para el módulo dinámico y ángulo de fase a 64°C y 10 rad/s para las distintas muestras ya fueron estimados y se presentaron en la Tabla 3.2.3 y Tabla 3.2.5 con LPO-M y RC aplicado, respectivamente. Los resultados del parámetro de ahuellamiento para poder estimar las dosis mediante interpolación se presentan en la Tabla 3.2.9 y Tabla 3.2.10 para LPO-M y RC, respectivamente.

Tabla 3.2.9. Comparación parámetros de ahuellamiento con ligante RTFO y dosis óptima de LPO-M.

Cemento asfáltico	Estado muestra	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ [kPa] a 64°C y 10 rad/s	Dosis óptima LPO-M [%]
CA-24	RTFO	4,04	4,0
	3% LPO-M	4,99	
	6% LPO-M	2,23	
CA-14	RTFO	4,73	2,9
	0% LPO-M	36,33	
	3% LPO-M	4,53	
RAP	RTFO CA-24	4,04	11,0
	9% LPO-M	7,73	
	12% LPO-M	2,16	

(\*): 0% de producto aplicado corresponde al ligante original con envejecimiento en PAV.

Tabla 3.2.10. Comparación parámetros de ahuellamiento con ligante RTFO y dosis óptima de RC.

Cemento asfáltico	Estado muestra	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ [kPa] a 64°C y 10 rad/s	Dosis óptima RC [%]
CA-24	RTFO	4,04	3,8
	3% RC	4,97	
	6% RC	1,36	
CA-14	RTFO	4,73	5,3
	3% RC	12,92	
	6% RC	2,31	
RAP	RTFO CA-24	4,04	8,3
	9% RC	2,00	
	12% RC	0,49	

Se observa que el parámetro de ahuellamiento de los ligantes RTFO para el CA-24 se encuentra entre las dosis 3% y 6%, para el CA-14 entre 0% y 3%, y para el RAP entre 9% y 12%. Para el caso del RC, en la Tabla 3.2.10 se observa que el parámetro de ahuellamiento de los ligantes RTFO para el CA-24 y CA-14 se encuentra entre las dosis 3% y 6% y para el RAP entre 6% y 9%.

Al realizar la interpolación, se obtiene que las dosis óptimas de aplicación del LPO-M son 4,0%, 2,9% y 11,0% para un asfalto CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Mientras que, para el RC son 3,8%, 5,3% y 8,3% para un asfalto CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente.

### 3.2.5. Verificación de dosis óptimas mediante estimación parámetro de fatiga

Se estiman los valores de las propiedades reológicas a 25°C y 10 rad/s, con el fin de verificar los resultados de las dosis óptimas determinadas y la susceptibilidad a la fatiga de los productos aplicados. En la Tabla 3.2.11 se presentan los valores obtenidos para el módulo dinámico de corte y ángulo de fase para las distintas muestras con líquido aplicado.

Tabla 3.2.11. Módulo dinámico y ángulo de fase de muestras con LPO-M a 25°C y 10 rad/s.

Muestra	Dosis [%]	$ G^*  (T=25^\circ C)$ [Pa]	$ G^*  (T=25^\circ C)$ [kPa]	$\delta (T=25^\circ C)$ [°]
CA-24 + LPO-M	3	1,8E+06	1788,96	50,65
	6	5,1E+05	509,45	55,54
	9	2,7E+05	265,28	58,25
	12	1,5E+05	152,23	61,64
CA-14 + LPO-M	3	2,7E+06	2651,75	49,77
	6	3,9E+05	394,90	55,20
	9	8,1E+04	81,31	59,52
RAP + LPO-M	3	4,8E+06	4845,00	35,21
	6	2,6E+06	2584,75	38,18
	9	1,6E+06	1598,42	41,49
	12	6,1E+05	609,22	45,44
	15	1,8E+05	178,64	54,04
	18	5,4E+04	54,43	56,49

De los resultados se observa que, a temperaturas intermedias a medida que aumento las dosis de LPO-M el módulo dinámico disminuye su valor y el ángulo de fase aumenta. Para el caso de los tres ligantes esta variación es gradual, donde en el RAP se marca la diferencia en la restauración de sus propiedades originales ya que requiere de dosis mayores. Lo importante de recalcar es que, a temperaturas intermedias (25°C) con diferentes dosis de LPO-M se logra restaurar las propiedades respecto de un ligante sin envejecer del CA-24, CA-14 y RAP, mostrados en la Tabla 3.2.2.

En base al mismo procedimiento que fue utilizado para el LPO-M se estima el parámetro de fatiga para las muestras con aplicación de RC para un asfalto de tipo CA-24, CA-14 y RAP. En la Tabla 3.2.12 se presentan los valores obtenidos para el módulo dinámico de corte y ángulo de fase para las distintas muestras con RC aplicado estimados a 25°C y 10 rad/s.

Se observa que, el efecto del RC a temperaturas intermedias no difiere del LPO-M y a medida que se aumenta las dosis las propiedades reológicas se van restaurando. Luego, al estimar las propiedades reológicas a temperaturas intermedias de los ligantes asfálticos rejuvenecidos con LPO-M y RC, se evalúa el parámetro de fatiga  $|G^*|\text{sen}(\delta)$  de todas las muestras con sus dosis óptimas correspondientes, mediante una interpolación lineal a 25°C y 10 rad/s. Los resultados para el parámetro de fatiga se presentan en la Tabla 3.2.13.

Además, aplicando el contenido óptimo de LPO-M y RC, el valor del parámetro de fatiga disminuye respecto a los valores del ligante original tanto para el CA-24, CA-14 y RAP. El parámetro estimado con LPO-M se disminuye en mayor medida respecto al RC, es decir, el LPO-M tiene un mayor efecto rejuvenecedor sobre el parámetro de fatiga. Sin embargo, el RC presenta valores más cercanos al del ligante original, por lo que este presentaría un mejor desempeño si el objetivo fuera restaurar las propiedades del ligante original a temperaturas intermedias.

Tabla 3.2.12. Módulo dinámico y ángulo de fase de muestras con RC a 25°C y 10 rad/s.

Muestra	Dosis [%]	$ G^* $ (T=25°C) [Pa]	$ G^* $ (T=25°C) [kPa]	$\delta$ (T=25°C) [°]
CA-24 + RC	3	2,2E+06	2187,18	52,67
	6	1,2E+06	1156,93	58,85
	9	4,0E+05	404,24	63,61
CA-14 + RC	3	3,2E+06	3162,34	47,21
	6	1,9E+06	1945,99	51,29
	9	7,5E+05	746,35	56,76
RAP + RC	3	6,1E+06	6075,65	37,30
	6	3,8E+06	3776,55	40,57
	9	1,6E+06	1615,38	47,50
	12	8,5E+05	845,23	52,87

Tabla 3.2.13. Parámetro de fatiga con dosis óptima de LPO-M y RC a 25°C y 10 rad/s, estimados mediante interpolación lineal.

Ligante asfáltico	Estado muestra	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]	$\left( \frac{( G^* sen(\delta))_{DO} - ( G^* sen(\delta))_{CA\_SE}}{( G^* sen(\delta))_{CA\_SE}} \right)$
CA-24	Original (SE)	<b>1140,04</b>	0%
	8,6% LPO-M	238,87	<b>-79%</b>
	5,9% RC	991,27	<b>-13%</b>
CA-14	Original (SE)	<b>1361,57</b>	0%
	5,3% LPO-M	733,61	<b>-46%</b>
	7,6% RC	1054,50	<b>-19%</b>
RAP	Original (SE)	<b>4766,02</b>	0%
	13,4% LPO-M	310,57	<b>30%</b>
	10,3% RC	988,52	<b>-13%</b>

De manera adicional se evalúa esta susceptibilidad al agrietamiento por fatiga comparando el parámetro del ligante rejuvenecido con dosis óptima con el del ligante sin envejecer. La variación de este parámetro se presenta en la Tabla 3.2.13, donde para el caso del LPO-M es de 79%, 46% y 30% para el CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Mientras que, para el caso del RC es de 13%, 19% y 12%, para el CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Cabe recalcar que, estos resultados son obtenidos mediante una interpolación lineal y no de las mediciones de estas muestras, solo para verificar el comportamiento de las dosis óptimas determinadas, más adelante se profundiza este análisis.

### 3.3. Resultados ensayos de muestras con dosis óptimas determinadas

En esta sección el objetivo es evaluar el efecto del LPO-M y RC en las dosis óptimas determinadas en la sección 3.2.3 sobre los ligantes CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP. Los ligantes mencionados son mezclados en las dosis óptimas (Tabla 3.3.1) determinadas para el primer tipo de aplicación (mezclas con RAP), para luego evaluar estas muestras mediante diferentes ensayos de laboratorio: primero se determina el grado de desempeño superpave, luego se determinan las propiedades físicas mediante ensayo de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad a 60°C y 135°C, se caracteriza reológicamente a las muestras mediante barridos de frecuencia y temperatura, para finalmente realizar un análisis químico mediante ensayos FTIR.

Tabla 3.3.1. Resumen de dosis óptimas determinadas para el LPO-M y RC para un nivel SE.

Aplicación	Cemento asfáltico	Dosis óptima [%]	
		LPO-M	RC
Mezclas con RAP (SE*)	CA-24	8,6	5,9
	CA-14	5,3	7,6
	RAP	13,4	10,3

(\*): Tipo de aplicación con contenido óptimo estimado respecto a un ligante original, sin envejecimiento.

### 3.3.1. Especificación por grado de desempeño (PG)

Las muestras de ligante con y sin productos rejuvenecedores fueron sometidos a ensayos de laboratorio a temperaturas altas e intermedias mediante el DSR, y a bajas temperaturas mediante BBR para determinar su especificación por grado de desempeño (PG), los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.3.2.

Tabla 3.3.2. Resultados PG de cementos asfálticos originales y rejuvenecidos con LPO-M y RC en sus dosis óptimas.

Cemento asfáltico	Estado	Dosis óptima	T. Alta	T. Intermedia	T. Baja	Grado PG
CA-24	Original (*)	0%	69,2	25,9	-27,6	64-22
	LPO-M	8,6%	66,45	25	-18,1	64-16
	RC	5,9%	69	14,25	-26,9	64-22
CA-14	Original (*)	0%	65,7	25,6	-25	64-22
	LPO-M	5,3%	72,7	24,65	-17,5	70-16
	RC	7,6%	63,6	15,9	-26,1	58-22
RAP	Original (*)	0%	99,3	42,3	-2	94 2
	LPO-M	13,4%	69,65	25,6	-1,5	64 2
	RC	10,3%	68,6	15	-24,2	64-22

(\*): Ligante original, sin envejecimiento.

De los resultados se observa que, para el caso del CA-24 con LPO-M aplicado se alcanza un PG 64-16, el CA-14 un PG 70-16 y el RAP un PG 64 2. Mientras que, con RC aplicado el CA-24 y RAP obtiene un PG 64-22, y para el CA-14 un PG 58-22.

En general, el LPO-M presenta buen desempeño como rejuvenecedor a altas temperaturas alcanzando el grado PG objetivo de un ligante sin envejecer. Sin embargo, a bajas temperaturas no se alcanza el grado PG. Por otro lado, el RC si alcanza el grado PG objetivo 64-22 en los ligantes CA-24 y RAP.

### 3.3.2. Propiedades físicas mediante ensayos tradicionales

A las muestras antes mencionadas se les realizaron ensayos tradicionales para medir las propiedades físicas de los CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP rejuvenecidos, con el objetivo de contar con una referencia estándar del rejuvenecimiento de acuerdo con parámetros utilizados en especificaciones tradicionales de cemento asfáltico. A las muestras se le realizaron ensayos como penetración, punto de ablandamiento y viscosidad a 60°C y 135°C. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.3.3.

De los resultados se observa que, la aplicación de LPO-M en sus dosis óptimas en todos los ligantes envejecidos cumple con la especificación del MC V8 en el ensayo de penetración con valores de 102, 48 y 83 dmm para un CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Además, con el LPO-M se obtienen valores más cercanos de penetración al ligante original respecto al RC. Por otro lado, en el punto de ablandamiento no hay mayor diferencia en el efecto de los dos productos, incluso para el RAP se tiene el mismo resultado con un valor de 47,8 °C. En caso de la viscosidad de las muestras con LPO-M el único ligante que no cumple con exigido en el MC, es el CA-24 con un valor de 1771 poise, donde se

puede inferir que las dosis aplicadas para este ligante fueron muy altas y aumentaron mucho su comportamiento viscoso.

Tabla 3.3.3. Resultados penetración, punto de ablandamiento y viscosidad a 60°C y 135°C a muestras sin y con LPO-M y RC en dosis óptimas.

Cemento asfáltico	Estado	Dosis óptima	Penetración (25°C, dmm)	Punto de ablandamiento (°C)	Viscosidad	
					@60°C	@135°C
CA-24	Original (*)	0%	54	50	3363	5,0
	LPO-M	8,6%	102	45,6	<b>1771</b>	3,5
	RC	5,9%	79	50	3835	5,3
CA-14	Original (*)	0%	50	50	2267	3,9
	LPO-M	5,3%	48	52,2	5621	4,9
	RC	7,6%	74	48	1669	3,5
RAP	Original (*)	0%	-	-	-	-
	LPO-M	13,4%	83	47,8	2675	3,75
	RC	10,3%	91	47,8	2683	5,2

(\*): Ligante original, sin envejecimiento.

Adicionalmente, se realizaron ensayos de cambio de masa y punto de inflamación de los ligantes CA-24 PAV y CA-14 PAV rejuvenecidos con ambos productos en dosis óptimas, estos resultados se presentan en la Tabla 3.3.4. Respecto a los resultados de punto de inflamación se reporta que las muestras con LPO-M aplicado en dosis óptimas no cumplen con lo mínimo exigido en el Manual de Carreteras (232°C). Mientras que, los valores de cambio de masa de las muestras con LPO-M presentan valores altos respecto al ligante original y el RC.

Tabla 3.3.4. Resultados punto de inflamación y cambio de masa para CA-24 y CA-14 a muestras sin y con LPO-M y RC en dosis óptimas.

Cemento asfáltico	Estado	Dosis óptima	Punto de inflamación (°C)	Cambio de masa
CA-24	Original	0%	<b>345</b>	<b>-0,116</b>
	LPO-M	8,6%	191	-6,57
	RC	5,9%	296	-0,834
CA-14	Original	0%	<b>350</b>	<b>-0,639</b>
	LPO-M	5,3%	216	-3,81
	RC	7,6%	280	-1,168

### 3.3.3. Propiedades reológicas de muestras con dosis óptimas de LPO-M y RC

Para complementar el análisis de las muestras, en esta sección se evalúa el efecto sobre las propiedades reológicas del LPO-M y RC en las dosis óptimas sobre los ligantes CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP. Para esto las muestras fueron caracterizadas reológicamente mediante ensayos de barridos de frecuencia y temperatura, en un rango de temperatura de 5°C a 75°C y las frecuencias de ensayo variaron entre 100 a 0,1 [rad/s]. Luego, se construyeron curvas maestras de todas las muestras ensayadas tanto para el módulo dinámico como para el ángulo de fase.

#### 3.3.3.1. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-24 en dosis óptimas

Las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidas para las muestras con LPO-M y RC aplicado a un CA-24 PAV en dosis óptimas se observan en la Figura 3.3.1 y Figura 3.3.2, respectivamente.

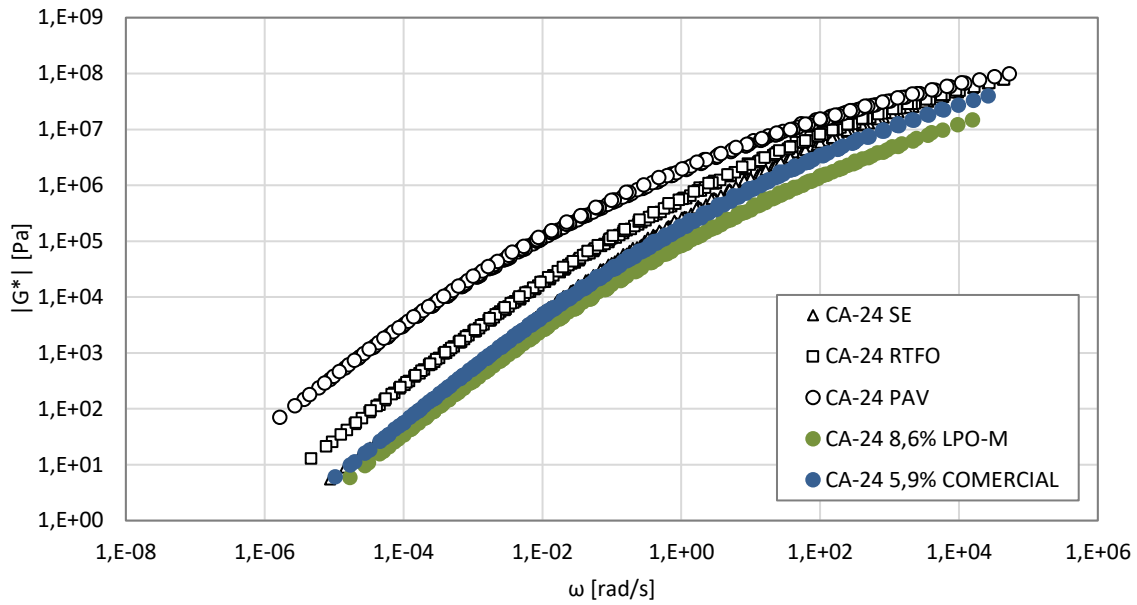


Figura 3.3.1. Curvas maestras del módulo dinámico de corte de CA-24 con LPO-M y RC en dosis de 8,6% y 5,9%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

En el caso del módulo dinámico de corte se observa que, las muestras con LPO-M y RC alcanzan un nivel sin envejecer en todo su rango de frecuencias, donde a bajas frecuencias las curvas son muy similares entre sí, es decir, presentan un mismo efecto rejuvenecedor a altas temperaturas restaurando la rigidez del ligante original. Para el caso del ángulo de fase, se presenta una leve diferencia en el efecto de los dos productos sobre el ligante CA-24, la curva con RC esta por sobre la de LPO-M en casi todo su rango de frecuencias, donde esta última solo a altas frecuencias recién alcanza un nivel sin envejecer.

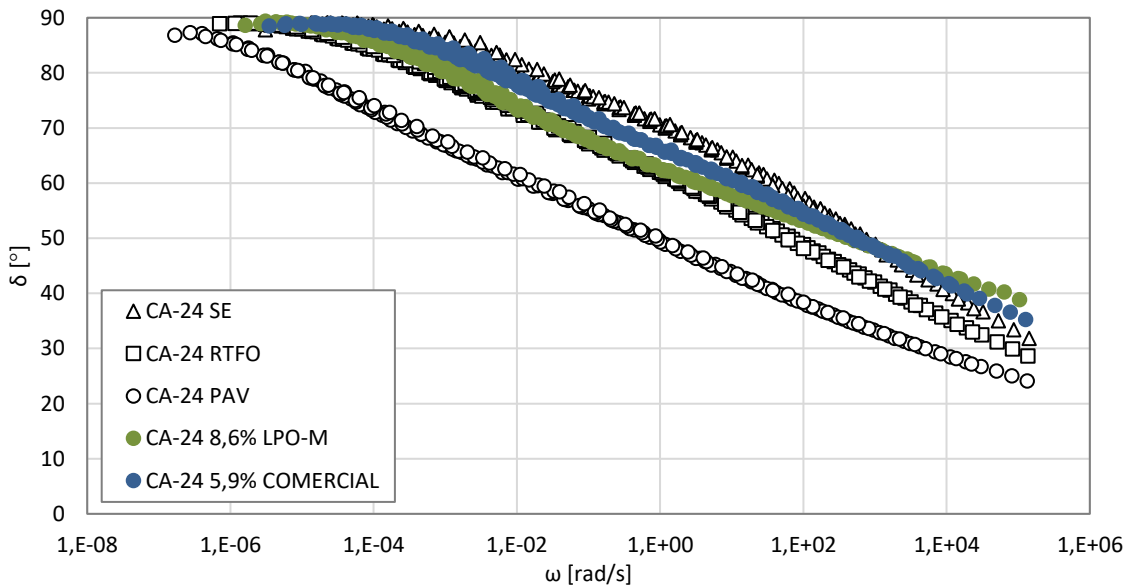


Figura 3.3.2. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24 con LPO-M y RC en dosis de 8,6% y 5,9%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.2. *Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-14 en dosis óptimas*

El mismo análisis es realizado para el CA-14 PAV con dosis óptimas de LPO-M y RC, donde las curvas maestras de módulo dinámico y ángulo de fase con 5,3% de LPO-M y 7,6% de RC se presentan en la Figura 3.3.3 y Figura 3.3.4, respectivamente.

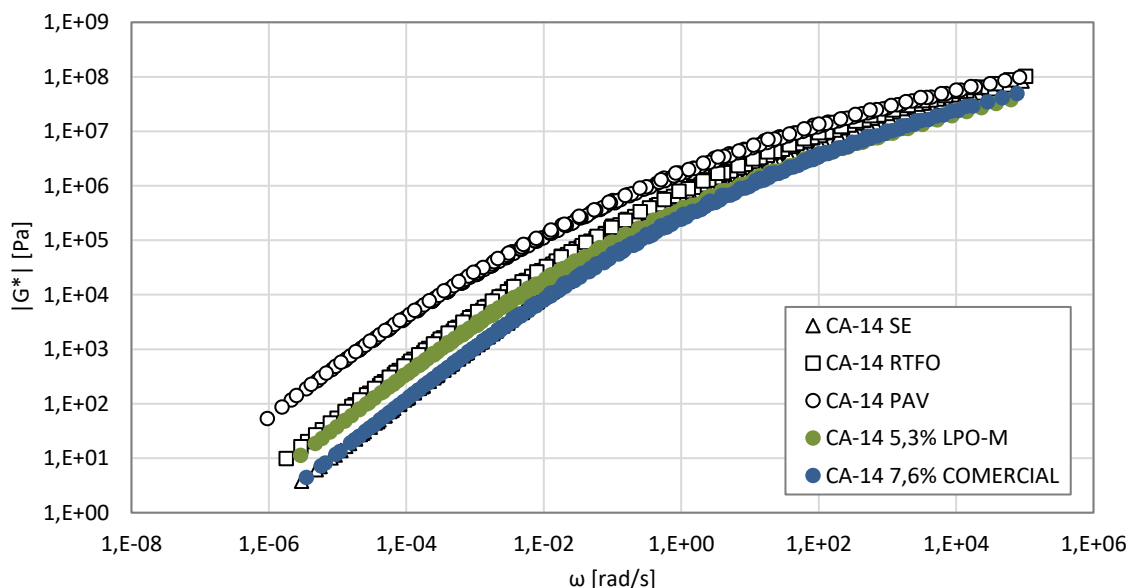


Figura 3.3.3. Curvas maestras del módulo dinámico de corte de CA-14 con LPO-M y RC en dosis de 5,3% y 7,6%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

En las curvas del módulo dinámico se presenta un comportamiento diferente que para el CA-24, donde el LPO-M a bajas frecuencias (altas temperaturas) se asemeja a una curva RTFO. Por otro lado, el producto RC si logra restaurar los valores de ángulo de fase de un ligante sin envejecer en casi todo su rango de frecuencias.

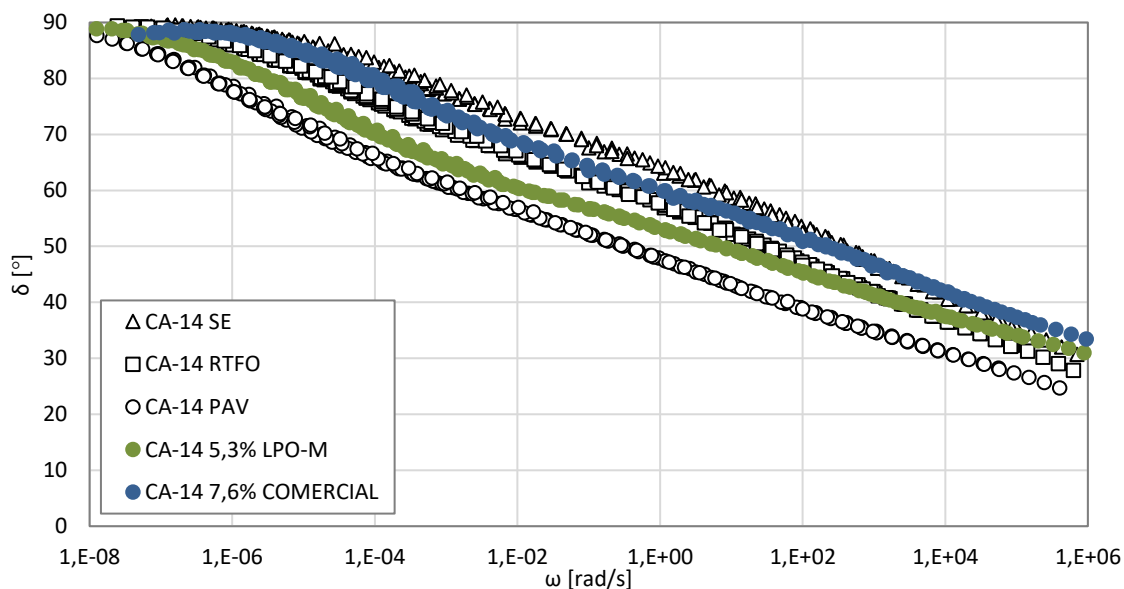


Figura 3.3.4. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-14 con LPO-M y RC en dosis de 5,3% y 7,6%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.3.3. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de RAP en dosis óptimas

Para el último ligante proveniente de RAP las muestras se mezclaron con 13,4% de LPO-M y 10,3% de RC. Las curvas maestras del módulo dinámico y ángulo de fase se presentan en la Figura 3.3.5 y Figura 3.3.6, respectivamente.

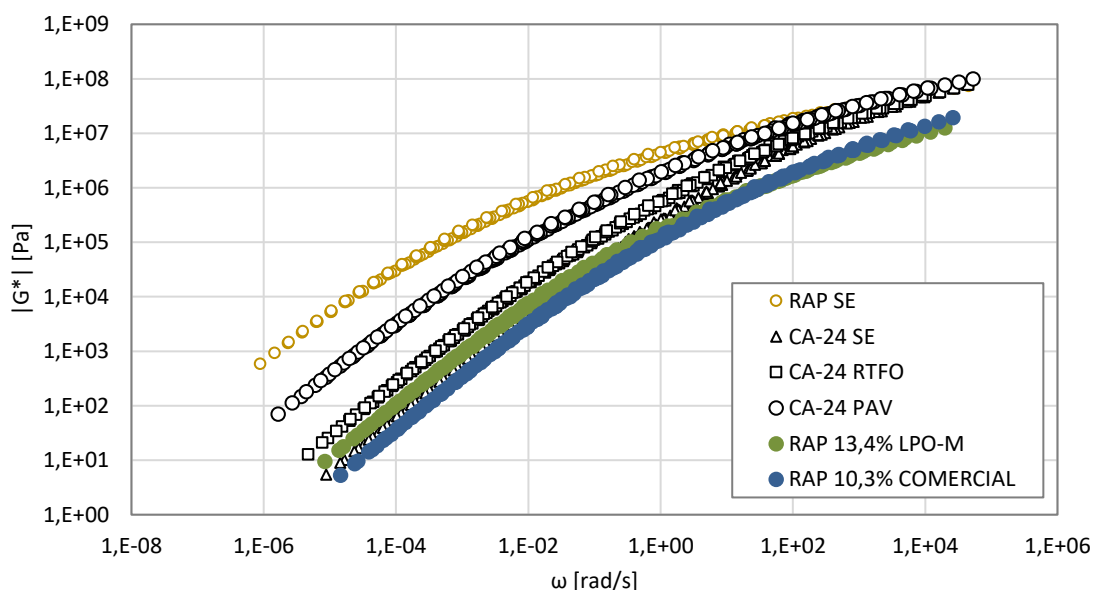


Figura 3.3.5. Curvas maestras del módulo dinámico de corte de RAP con LPO-M y RC en dosis de 13,4% y 10,3%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

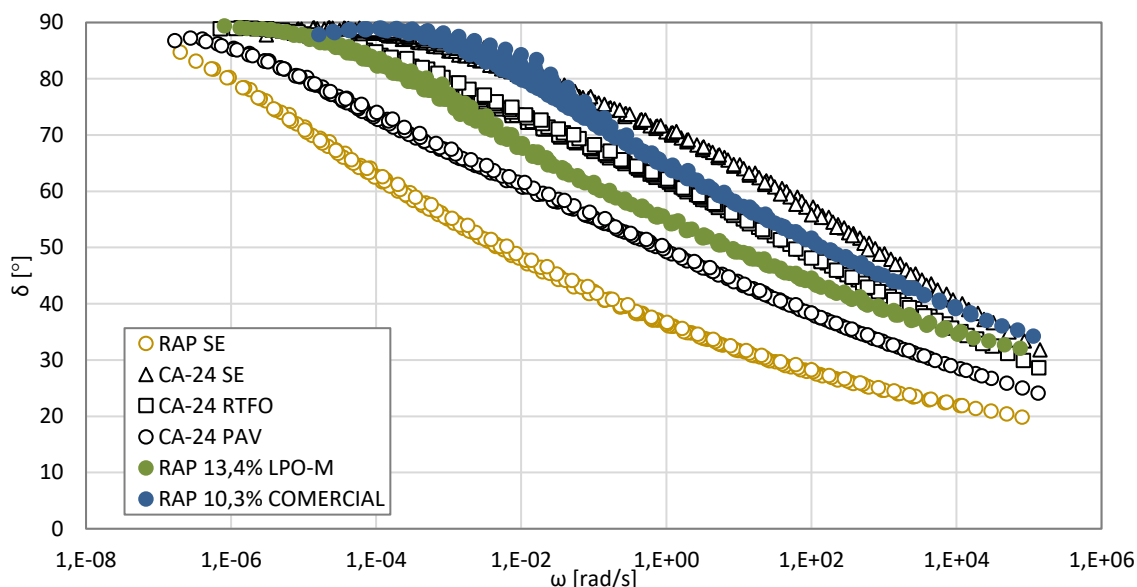


Figura 3.3.6. Curvas maestras del ángulo de fase de RAP con LPO-M y RC en dosis de 13,4% y 10,3%, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del módulo dinámico de corte las curvas con LPO-M y RC se asemejan entre sí en casi todo su rango de frecuencias, donde a bajas frecuencias (altas temperaturas) presentan una leve diferencia y la curva con LPO-M se aleja a la sin envejecer. Sin embargo, el líquido presenta un buen desempeño al disminuir la rigidez a pesar de la alta rigidez de este tipo de materiales, donde claramente con 13,4% aplicado la curva se aleja del ligante RAP original, incluso a altas frecuencias (bajas temperaturas) la curva está por debajo de la muestra con RC.

Como último análisis de estas curvas maestras, el ángulo de fase del RAP se observa claramente lo reforzado en secciones anteriores, que el LPO-M no restaura en gran medida esta propiedad reológica respecto al efecto que tiene en el módulo dinámico de corte. En específico, la curva con 13,4% de LPO-M no alcanza su nivel sin envejecer, al contrario del efecto de RC. Sin embargo, a altas temperaturas (bajas frecuencias) presenta un buen comportamiento como rejuvenecedor restaurando el comportamiento viscoso a un nivel sin envejecer.

### 3.3.4. Análisis químico mediante ensayo FTIR

Para complementar el análisis y los ensayos realizados a las muestras rejuvenecidas con dosis óptimas se determinan los índices de recuperación química, en específico, se mide el índice carbonilo, sulfóxido y de envejecimiento combinado a través del análisis de espectros por FTIR. Los resultados se presentan en la Tabla 3.3.5, las muestras analizadas fueron los cementos asfálticos CA-24 y CA-14 en sus tres estados de envejecimiento (SE, RTFO y PAV) y el RAP en estado original. También, se analizaron las muestras con las dosis óptimas para LPO-M y RC, considerando lo re-envejecido en RTFO y PAV.

Se observa en general que, el incremento en el índice de oxidación combinado se atribuye principalmente a las variaciones en el índice de oxidación sulfóxido. Para el caso del CA-24 con 8,6% LPO-M no hay disminución del índice de oxidación del ligante respecto a su ligante original en PAV. Mientras que, para el CA-24 con 5,9% RC se disminuye levemente respecto al ligante PAV. El ligante extraído de RAP presentó el mayor índice de oxidación combinado, resultado concordante con el nivel de envejecimiento presentado por este material. Al compararlo con su ligante base CA-24, este claramente presenta un daño oxidativo mayor a la de un ligante PAV. Este análisis se replica para el ligante CA-14, el LPO-M presenta una disminución del índice de oxidación combinado de su ligante base en PAV y el RC disminuye aún más este valor. Finalmente, las muestras con 13,4% de LPO-M y 10,3% de RC presentaron una disminución del valor del índice de envejecimiento combinado respecto al RAP original. Sin embargo, al aplicar LPO-M o RC no disminuyen el valor respecto al ligante base CA-24 PAV.

Tabla 3.3.5. Resultados análisis químico mediante ensayos FTIR, de muestras con dosis óptimas aplicadas de LPO-M y RC.

Cemento asfáltico	Estado	Valor índice		
		$I_{C=O}$	$I_{S=O}$	$I_{comb}$
CA-24	Original	0,0010	0,0050	0,0060
	RTFO	0,0010	0,0063	0,0073
	PAV	0,0010	0,0097	0,0107
	8,6% LPO-M	0,0013	0,0103	0,0117
	8,6% LPO-M RTFO	0,0020	0,0073	0,0093
	8,6% LPO-M PAV	0,0017	0,0087	0,0103
	5,9% RC	0,0013	0,0087	0,0100
	5,9% RC RTFO	0,0013	0,0093	0,0107
	5,9% RC PAV	0,0017	0,0090	0,0107
CA-14	Original	0,0010	0,0033	0,0043
	RTFO	0,0010	0,0043	0,0037
	PAV	0,0013	0,0067	0,0080
	5,3% LPO-M	0,0013	0,0063	0,0077
	5,3% LPO-M RTFO	0,0010	0,0060	0,0070
	5,3% LPO-M PAV	0,0020	0,0087	0,0107
	7,6% RC	0,0010	0,0070	0,0057
	7,6% RC RTFO	0,0010	0,0070	0,0080
	7,6% RC PAV	0,0023	0,0057	0,0080

RAP	Original	0,0060	0,0100	0,0160
	13,4% LPO-M	0,0027	0,0093	0,0120
	13,4% LPO-M RTFO	0,0017	0,0083	0,0100
	13,4% LPO-M PAV	0,0010	0,0077	0,0060
	10,3% RC	0,0030	0,0077	0,0107
	10,3% RC RTFO	0,0013	0,0073	0,0087
	10,3% RC PAV	0,0017	0,0080	0,0097

También, se determinaron los índices de recuperación química de las muestras con diferentes dosis de aplicación tanto de LPO-M como del RC aplicado a los tres cementos asfálticos envejecidos. Los resultados se presentan en la Tabla 3.3.6.

Tabla 3.3.6. Resultados análisis químico mediante ensayos FTIR de muestras con diferentes dosis de aplicación de LPO-M y RC.

Cemento asfáltico	Estado	Valor índice		
		$I_{c=0}$	$I_{s=0}$	$I_{comb}$
CA-24	3% LPO-M	0,0017	0,0083	0,0100
	6% LPO-M	0,0020	0,0067	0,0087
	9% LPO-M	0,0027	0,0090	0,0117
	3% RC	0,0010	0,0060	0,0070
	6% RC	0,0010	0,0073	0,0083
	9% RC	0,0010	0,0077	0,0087
CA-14	3% LPO-M	0,0017	0,0067	0,0083
	6% LPO-M	0,0023	0,0067	0,0090
	9% LPO-M	0,0020	0,0067	0,0087
	3% RC	0,0017	0,0060	0,0077
	6% RC	0,0013	0,0070	0,0083
	9% RC	0,0010	0,0063	0,0073
RAP	3% LPO-M	0,0010	0,0057	0,0067
	6% LPO-M	0,0013	0,0083	0,0097
	9% LPO-M	0,0017	0,0083	0,0073
	12% LPO-M	0,0017	0,0077	0,0093
	3% RC	0,0013	0,0083	0,0097
	6% RC	0,0017	0,0090	0,0107
	9% RC	0,0017	0,0080	0,0067
	12% RC	0,0017	0,0093	0,0110

### 3.4. Susceptibilidad al envejecimiento de muestras rejuvenecidas con LPO-M y RC

El último análisis realizado es evaluar la susceptibilidad al envejecimiento que tiene el producto LPO-M aplicado a los ligantes CA-24, CA-14 y RAP en sus dosis óptimas de aplicación determinadas en la sección anterior (inciso 3.2.3), y comparar con los resultados del RC.

Las muestras fueron caracterizadas reológicamente mediante barridos de frecuencia-temperatura, para construir las curvas maestras de las propiedades viscoelásticas y evaluar la susceptibilidad al proceso de envejecimiento que tienen los productos. Posteriormente, a modo de verificación de las dosis óptimas aplicadas se determina el parámetro de fatiga Superpave ( $|G^*| \sin(\delta)$ ) de todas las muestras,

para comparar con los valores de los ligantes sin envejecer y también con lo indicado en la especificación.

### 3.4.1. Curvas maestras de muestras re- envejecidas

Los ensayos de barridos frecuencia-temperatura fueron realizados en un rango de temperatura de 5°C a 40°C y las frecuencias de ensayo variaron entre 100 a 0,1 [rad/s]. Se construyeron las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase para todas las muestras con las dosis óptimas aplicadas en un estado sin envejecer (SE), re-envejecido en RTFO y re-envejecido en PAV.

#### 3.4.1.1. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-24 en dosis óptimas

El CA-24 PAV es mezclado con el LPO-M y RC en las dosis óptimas de 8,6% y 5,9%, respectivamente. Los ligantes rejuvenecidos en estas dosis fueron sometidos a un re-envejecimiento primario RTFO y PAV, para luego ser ensayadas en sus tres estados de envejecimiento (SE, RTFO y PAV). Todas las muestras son comparadas con el ligante original en estado sin envejecer (CA-24 SE), con envejecimiento primario (CA-24 RTFO) y envejecimiento secundario (CA-24 PAV). Las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidas para las muestras con LPO-M se observan en la Figura 3.4.1 y Figura 3.4.2, respectivamente.

A partir de los resultados se observa que, el ligante rejuvenecido con LPO-M al ser re-envejecido la rigidez es aún mayor comparado con el ligante original en las mismas condiciones de envejecimiento. En específico, la curva del ligante re-envejecido en RTFO alcanza un nivel PAV del ligante original. Mientras que, para el ángulo de fase la curva del ligante re-envejecido en RTFO está por debajo de la curva PAV original, presentando ángulos de fase significativamente menores en todo el rango de frecuencias.

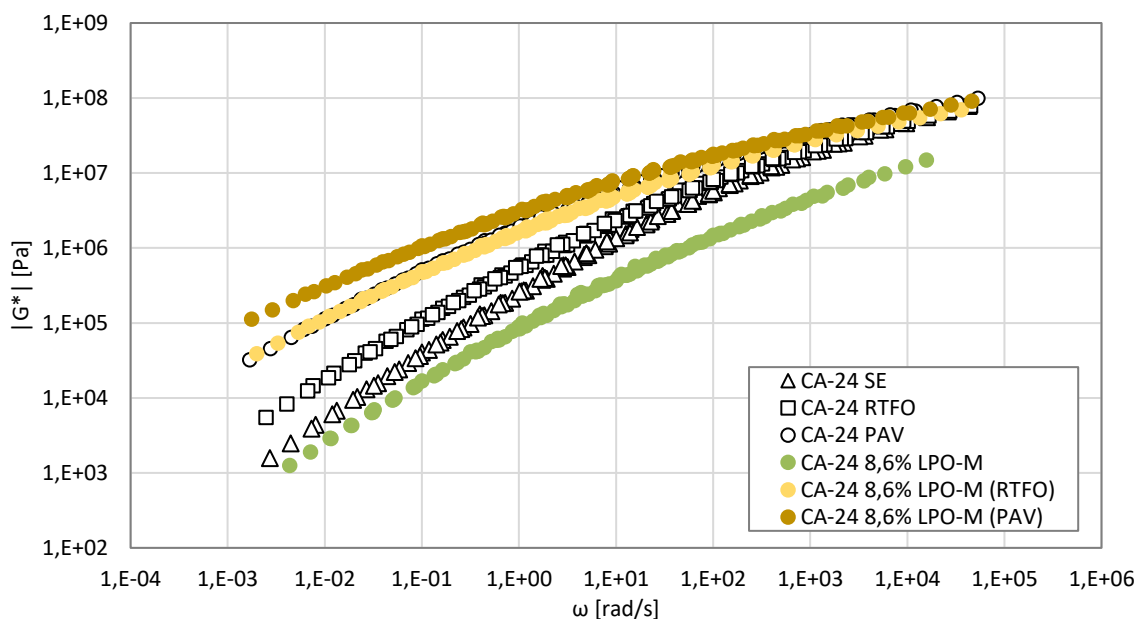


Figura 3.4.1. Curvas maestras de CA-24 con LPO-M en dosis de 8,6% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

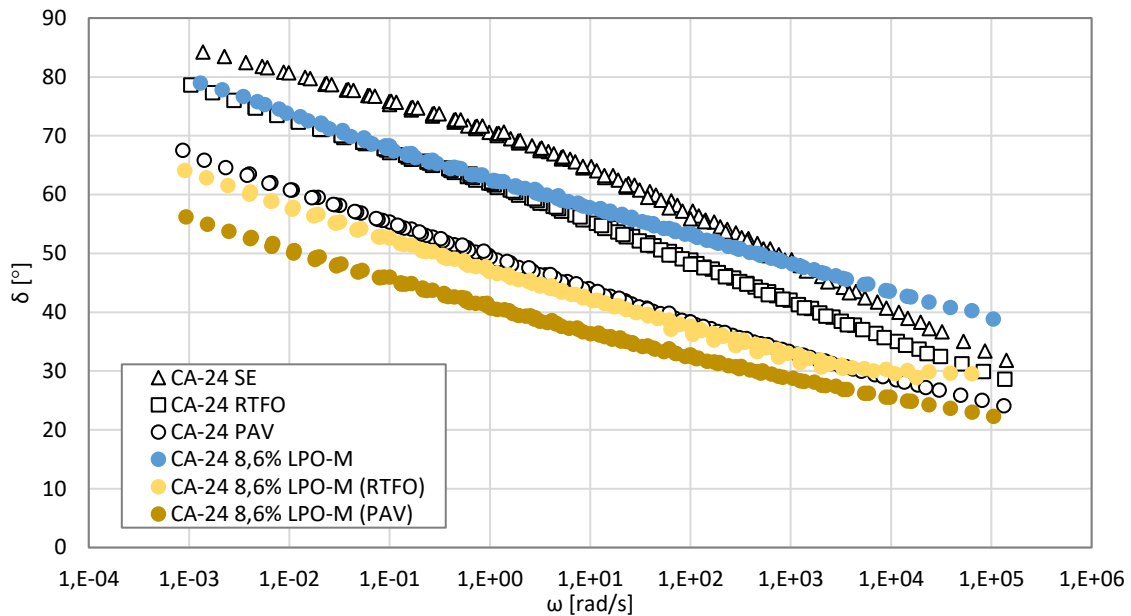


Figura 3.4.2. Curvas maestras de CA-24 con LPO-M en dosis de 8,6% del ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

Por otro lado, las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidas para las muestras con RC se observan en la Figura 3.4.3 y Figura 3.4.4, respectivamente.

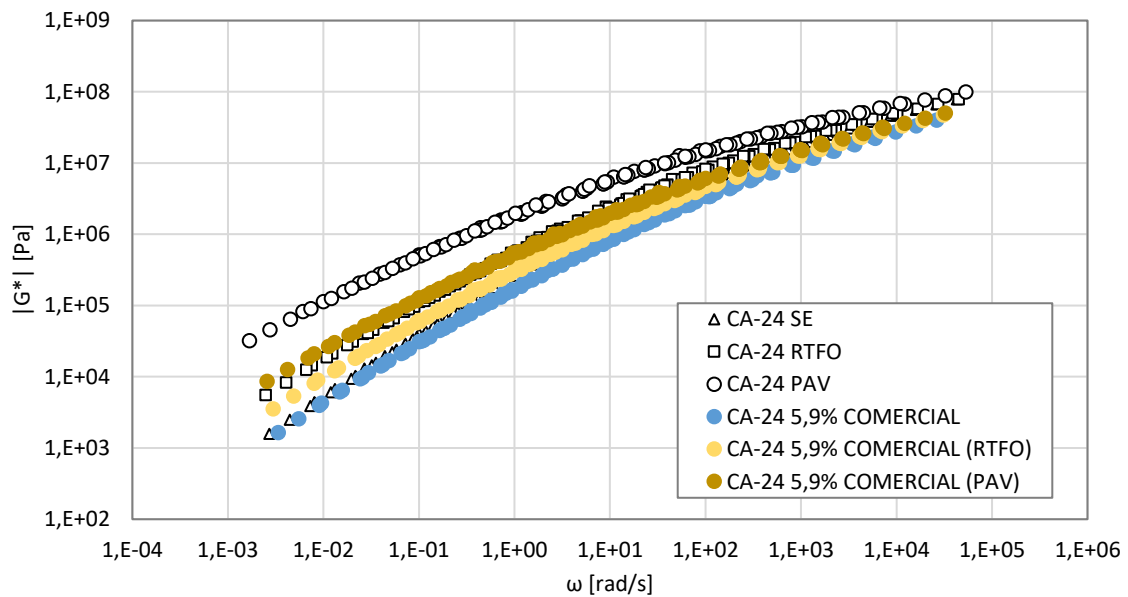


Figura 3.4.3. Curvas maestras de CA-24 con y RC en dosis de 5,9% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

De las gráficas se puede observar como el re-envejecimiento de las muestras rejuvenecidas con RC no se alejan significativamente de la muestra sin envejecer. En específico, la curva del ligante re-envejecido en PAV alcanza el nivel del ligante original en RTFO. Mientras que, para el ángulo de fase la curva con re-envejecimiento en RTFO alcanza la curva del ligante original en las mismas condiciones de envejecimiento y el re-envejecido en PAV no logra el nivel PAV del ligante original. Con estos resultados se puede observar como el producto RC presenta una menor susceptibilidad al envejecimiento que el LPO-M sobre el CA-24, este análisis de profundidad más adelante.

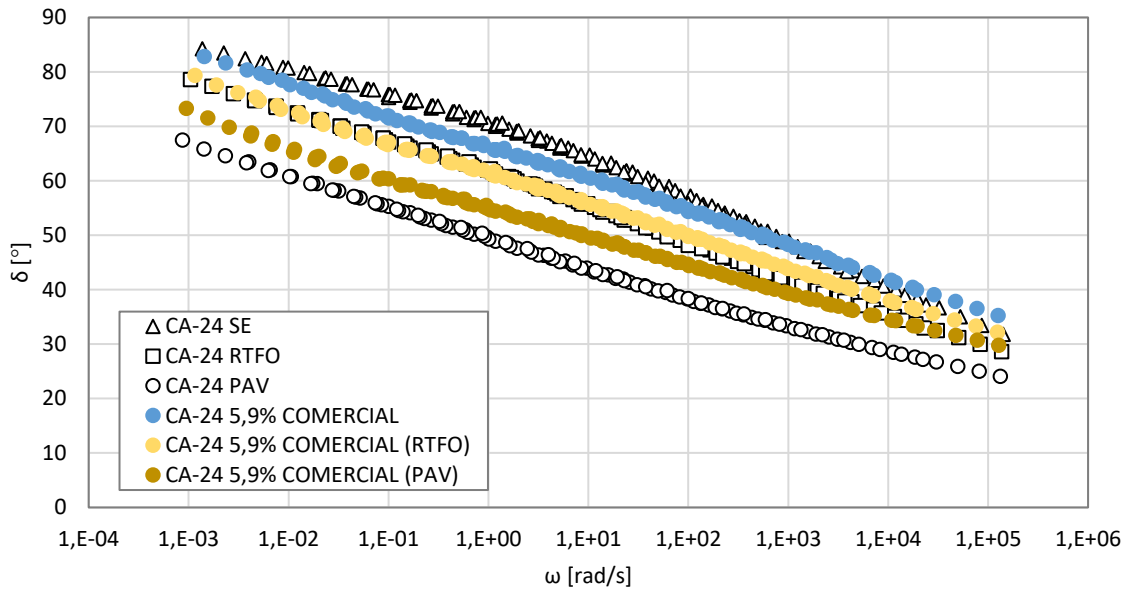


Figura 3.4.4. Curvas maestras de CA-24 con RC en dosis de 5,9% ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

### 3.4.1.2. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de CA-14 en dosis óptimas

El CA-14 PAV es mezclado con el LPO-M y RC en las dosis óptimas de 5,3% y 7,6%, respectivamente. Al igual que para el CA-24 los ligantes rejuvenecidos fueron sometidos a un re-envejecimiento RTFO y PAV. Las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidas para las muestras con LPO-M se observan en la Figura 3.4.5 y Figura 3.4.6, respectivamente.

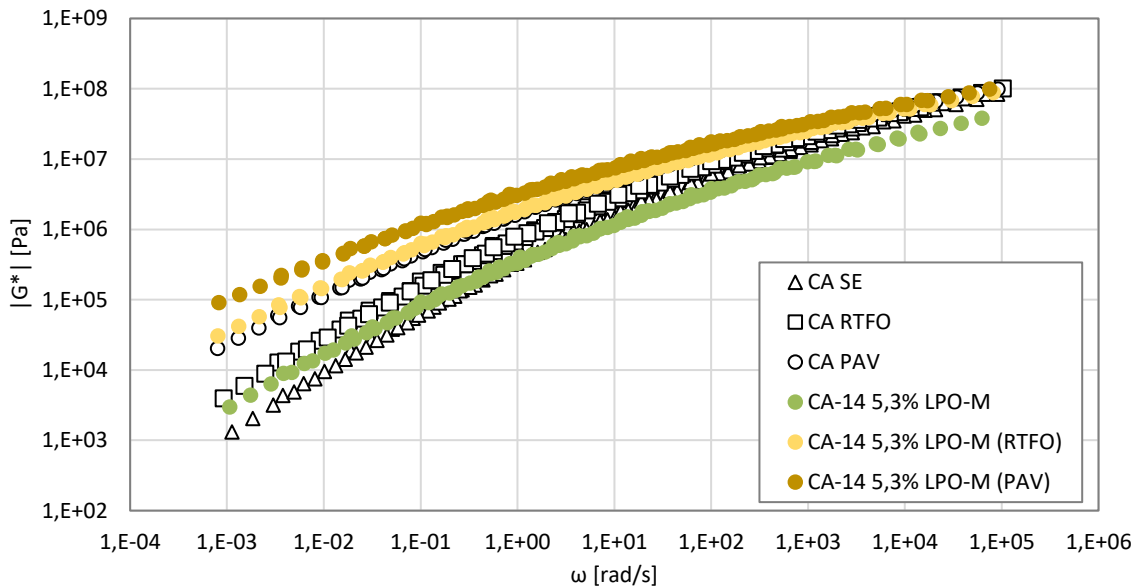


Figura 3.4.5. Curvas maestras de CA-14 con LPO-M en dosis de 5,3% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV

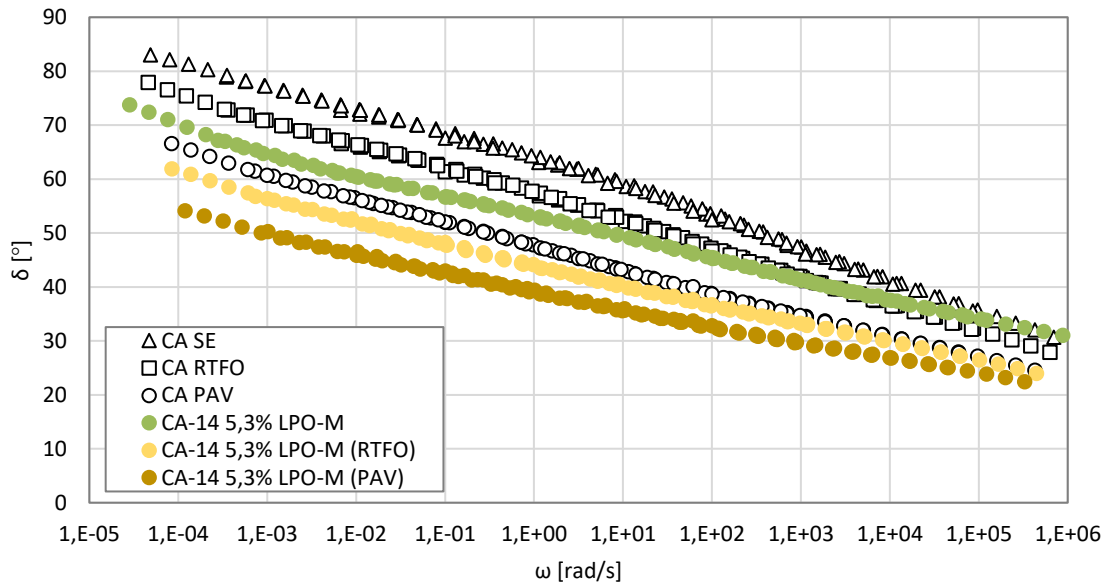


Figura 3.4.6. Curvas maestras de CA-14 con LPO-M en dosis de 5,3% del ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

En la Figura 3.4.5 sobre la variación de rigidez se observa que, el proceso de envejecimiento del ligante rejuvenecido es mayor que el del ligante original, donde el aumento de la rigidez es notoriamente mayor. En específico, el re-envejecimiento en RTFO alcanza el nivel de un envejecimiento PAV original. Por otro lado, el comportamiento viscoso de las muestras al ser re-envejecido disminuye de manera significativa, esto también debido a que el ligante rejuvenecido no alcanzó un nivel sin envejecer, por lo que es de esperar que la tendencia del proceso de envejecimiento de mantenga.

También se presentan las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidas para las muestras con RC en la Figura 3.4.7 y Figura 3.4.8, respectivamente.

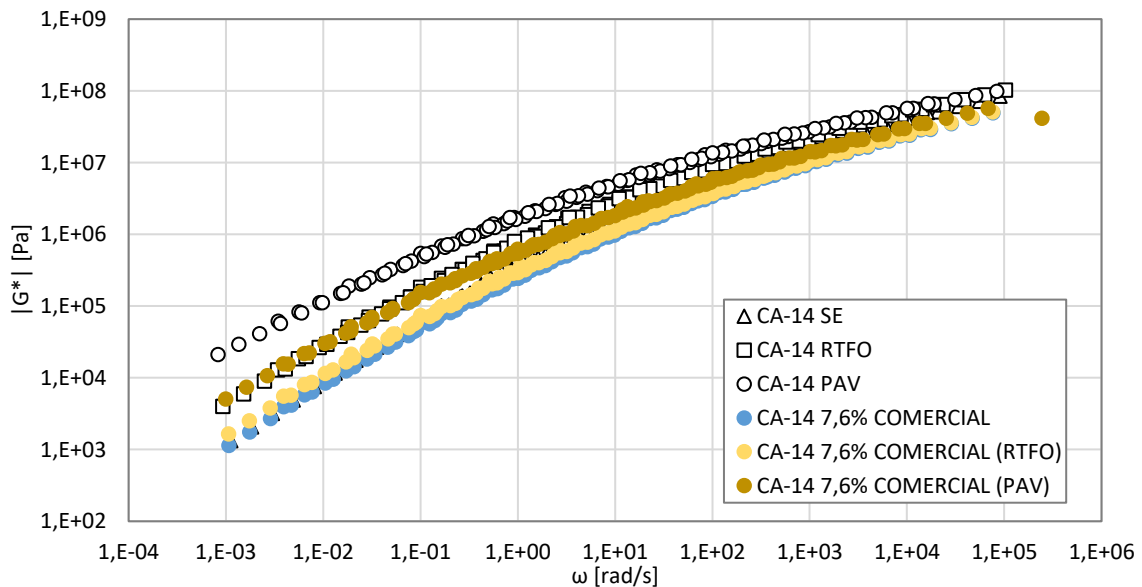


Figura 3.4.7. Curvas maestras de CA-14 con RC en dosis de 7,6% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

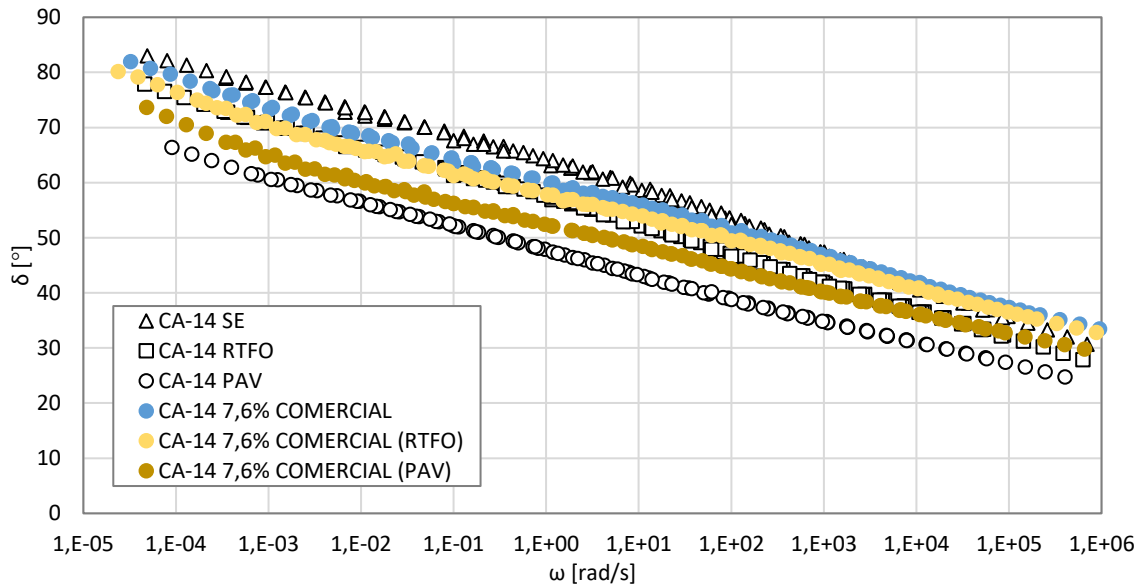


Figura 3.4.8. Curvas maestras de CA-14 con RC en dosis de 7,6% ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

Se observa que, para las curvas del módulo dinámico no hay mayor diferencia entre la muestra del ligante rejuvenecido sin envejecer y en RTFO, incluso la re-envejecido en PAV se aleja muy poco. En específico, la curva del ligante re-envejecido en PAV alcanza el nivel del ligante original en RTFO. Mientras que, para el ángulo de fase la curva con re-envejecimiento en RTFO y PAV no alcanzan las curvas del ligante original en las mismas condiciones de envejecimiento, donde incluso el re-envejecido en PAV se aleja muy poco se la curva RTFO original.

### 3.4.1.3. Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase de RAP en dosis óptimas

Para el caso del ligante extraído de RAP, en su estado original (SE) es mezclado con el LPO-M y RC en las dosis óptimas de 13,4% y 10,3%, respectivamente. Las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase se observan en la Figura 3.4.9 y Figura 3.4.10, respectivamente.

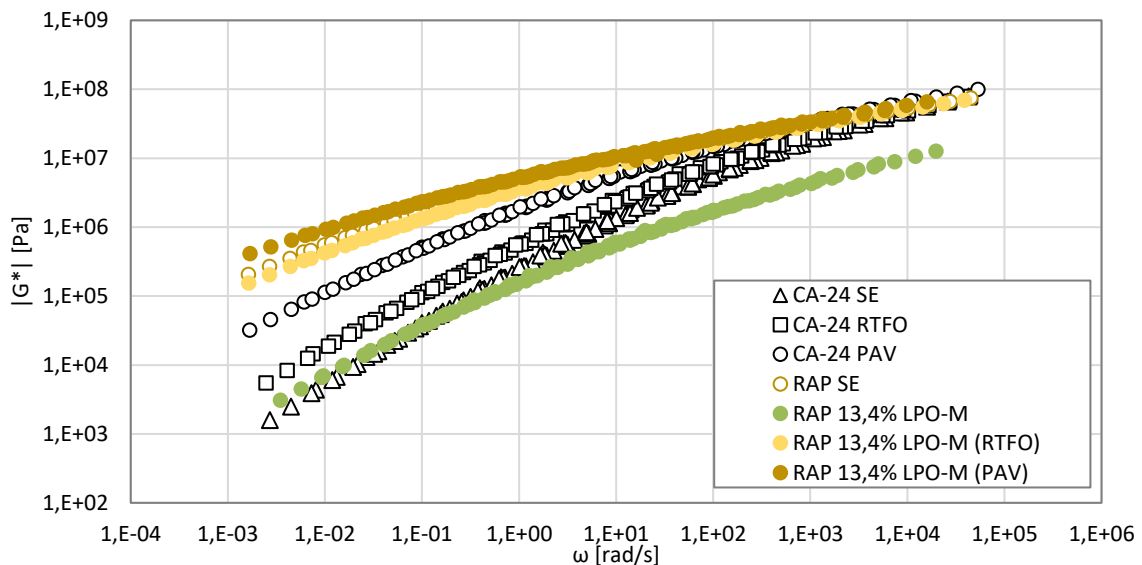


Figura 3.4.9. Curvas maestras de RAP con LPO-M en dosis de 13,4% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

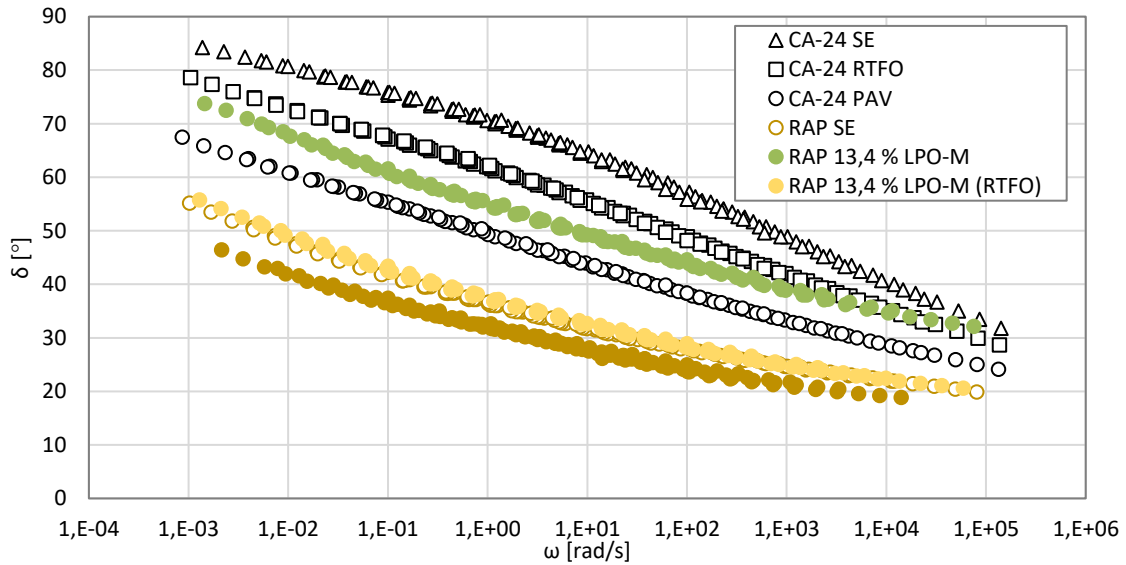


Figura 3.4.10. Curvas maestras de RAP con LPO-M en dosis de 13,4% ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

Se observa en la Figura 3.4.9 que, las curvas de las muestras de RAP re-envejecido en RTFO y PAV son muy similares entre sí y alcanzan un nivel del RAP original, es decir, re-envejecido se alcanza la rigidez del material original. Mientras que, para el ángulo de fase el ligante rejuvenecido RTFO se comporta como el ligante RAP original sin envejecer. Es claro que, el LPO-M aplicado sobre el ligante RAP es muy susceptible al envejecimiento, modificando incluso sus propiedades reológicas desde un nivel sin envejecer (CA-24 SE) a un nivel del ligante original (RAP SE).

Para el caso de las muestras con RC en la Figura 3.4.11 y Figura 3.4.12 se presentan las curvas maestras de módulo dinámico de corte y ángulo de fase, respectivamente.

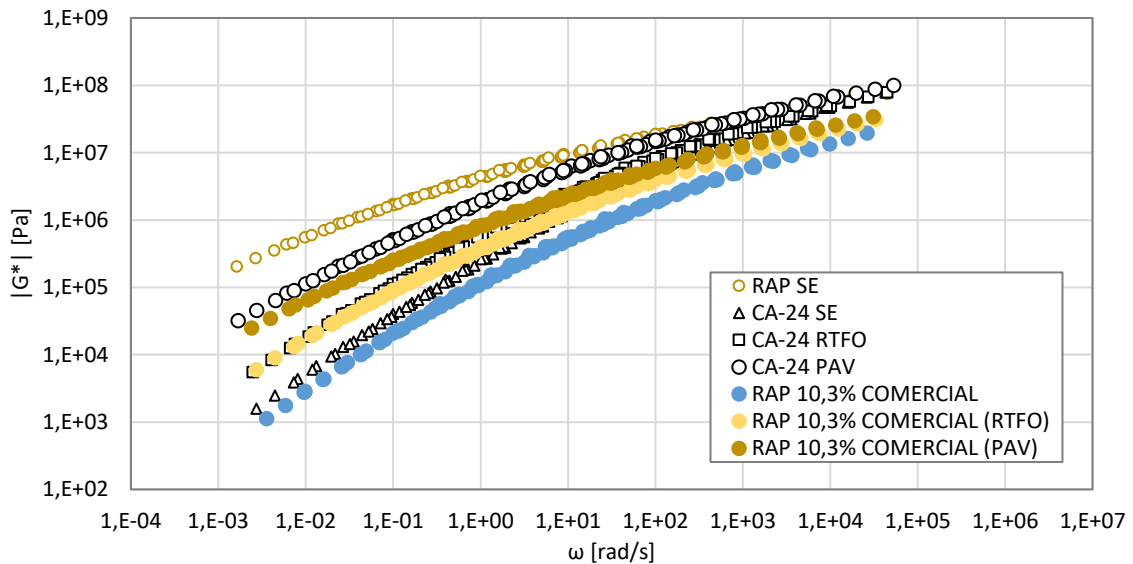


Figura 3.4.11. Curvas maestras de RAP con RC en dosis de 10,3% del módulo dinámico de corte en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

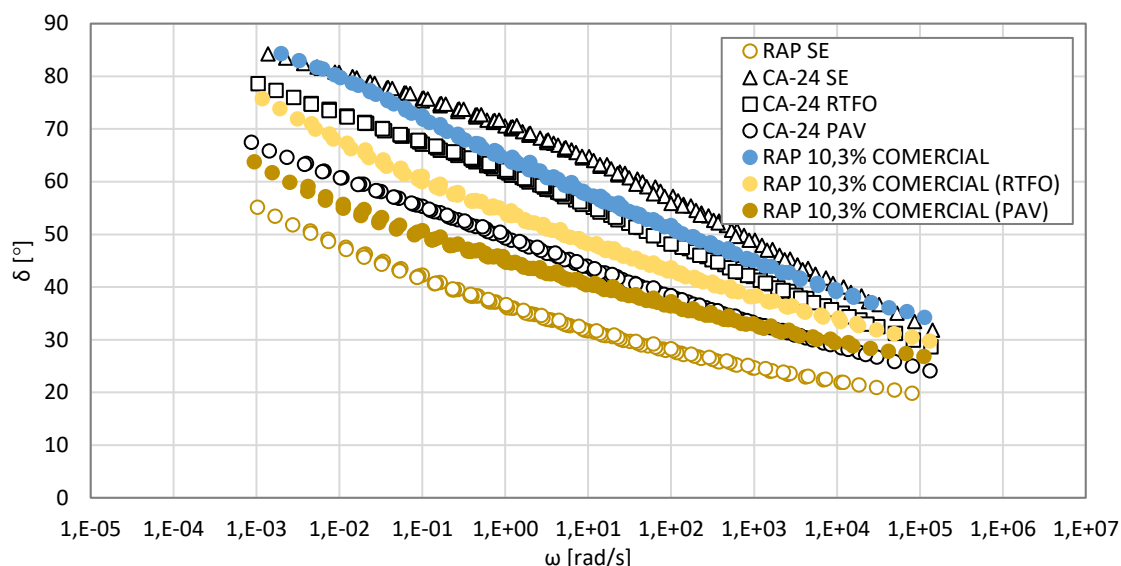


Figura 3.4.12. Curvas maestras de RAP con RC en dosis de 10,3% ángulo de fase en estado SE y re-envejecido en RTFO y PAV.

Se observa en las gráficas que, para la variación de rigidez no hay mayor diferencia en el proceso de envejecimiento entre ligante rejuvenecido y el ligante original. En específico, el ligante rejuvenecido PAV está por debajo del ligante PAV original, donde a bajas frecuencias ( $\leq 0,1$  rad/s) se asimilan las curvas. Para el caso del ángulo de fase ocurre algo similar, el ligante rejuvenecido PAV alcanza el comportamiento viscoso del PAV original, es decir, el RAP con RC aplicado presenta baja susceptibilidad al envejecimiento.

### 3.4.2. Evaluación susceptibilidad de envejecimiento mediante el parámetro de fatiga

Con los resultados de los ensayos de barrido frecuencia-temperatura se calculan los valores de las propiedades reológicas a 25°C y 10 rad/s de las muestras con dosis óptimas aplicadas de LPO-M y RC. Para luego determinar el parámetro de fatiga ( $|G^*| \text{sen}(\delta)$ ), con el objetivo de evaluar la susceptibilidad a la fatiga de las muestras con dosis óptimas aplicadas, la susceptibilidad al envejecimiento de los productos y verificar el cumplimiento del criterio de fatiga ( $|G^*| \text{sen}(\delta)_{PAV} \leq 6000$  kPa) especificado en la especificación PG.

En la Tabla 3.4.1 se presentan los valores obtenidos del parámetro de fatiga para los ligantes con LPO-M y RC, comparados con el ligante original sin envejecer respectivo. De manera adicional, se evalúa la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga comparando el parámetro del ligante rejuvenecido con dosis óptima con el del ligante sin envejecer.

Tabla 3.4.1. Parámetro de fatiga con dosis óptima de LPO-M y RC y susceptibilidad al agrietamiento por fatiga del ligante rejuvenecido respecto al ligante original sin envejecer.

Ligante asfáltico	Estado muestra	$ G^*  \text{sen}(\delta)_{DO\_SE}$ [kPa]	$\left( \frac{( G^*  \text{Sen}(\delta))_{DO\_SE} - ( G^*  \text{Sen}(\delta))_{CA\_SE}}{( G^*  \text{Sen}(\delta))_{CA\_SE}} \right)$
	Original (SE)	<b>1140,04</b>	0%
CA-24	8,6% LPO-M	306,81	<b>-73%</b>
	5,9% RC	692,66	<b>-39%</b>
	Original (SE)	<b>1361,57</b>	0%
CA-14	5,3% LPO-M	880,38	<b>-35%</b>
	7,6% RC	831,15	<b>-36%</b>
	Original (SE)	<b>4766,02</b>	0%
RAP	13,4% LPO-M	408,34	<b>-64%</b>
	10,3% RC	415,23	<b>-64%</b>

De los resultados se observa que, el valor del parámetro de fatiga disminuye respecto a los valores del ligante original tanto para el CA-24, CA-14 y RAP. Donde la variación de este parámetro de fatiga rejuvenecido para el caso del LPO-M es de 73%, 35% y 64% para el CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Mientras que, para el caso del RC es de 39%, 36% y 64% para el CA-24, CA-14 y RAP, respectivamente. Cabe recalcar que, para el caso del ligante RAP los cálculos fueron realizados en base a su ligante base CA-24 sin envejecer. El ligante CA-24 con LPO-M es el que presenta mayor variación del parámetro respecto al ligante original, seguido del RAP con LPO-M y RC. En la Tabla 3.4.2 y Tabla 3.4.3 se presentan los valores obtenidos del parámetro de fatiga para los ligantes con LPO-M y RC, respectivamente. Aplicado en dosis óptimas en estado sin envejecer, re-envejecido en RTFO y PAV.

Tabla 3.4.2. Parámetro de fatiga con dosis óptima de LPO-M a 25°C y 10 rad/s.

Muestra	Dosis óptima [%]	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]
		SE	RTFO	PAV
CA-24 + LPO-M	8,6	306,81	3114,24	4405,38
CA-14 + LPO-M	5,3	880,38	3172,15	4366,91
RAP + LPO-M	13,4	408,34	4163,11	4731,14

Tabla 3.4.3. Parámetro de fatiga con dosis óptima de RC a 25°C y 10 rad/s.

Muestra	Dosis óptima [%]	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]
		SE	RTFO	PAV
CA-24 + RC	5,9	692,66	1018,07	1406,95
CA-14 + RC	7,6	831,15	920,45	1382,99
RAP + RC	10,3	415,23	939,03	1440,71

De los resultados se observa que, a medida que aumenta el nivel de envejecimiento va aumentando el valor del parámetro, de manera más significativa en el caso del LPO-M. Finalmente, se determina la susceptibilidad al envejecimiento del ligante rejuvenecido comparando el parámetro de fatiga del ligante rejuvenecido en dosis óptimas (DO) sin envejecer (DO\_SE) con el rejuvenecido RTFO (DO\_RTFO) y PAV (DO\_PAV). Los resultados se presentan en la Tabla 3.4.4. Además, en la Tabla 3.4.5 se presenta el análisis del cumplimiento del parámetro de fatiga indicado en la normativa PG.

Tabla 3.4.4. Resultados de susceptibilidad al envejecimiento en estado RTFO y PAV de las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas.

Análisis susceptibilidad	Muestra					
	CA-24		CA-14		RAP	
	LPO-M	RC	LPO-M	RC	LPO-M	RC
$\left( \frac{( G^* Sen(\delta))_{DO\_RTFO} - ( G^* Sen(\delta))_{DO\_SE}}{( G^* Sen(\delta))_{DO\_SE}} \right)$	<b>915%</b>	47%	<b>260%</b>	11%	<b>920%</b>	126%
$\left( \frac{( G^* Sen(\delta))_{DO\_PAV} - ( G^* Sen(\delta))_{DO\_SE}}{( G^* Sen(\delta))_{DO\_SE}} \right)$	<b>1336%</b>	103%	<b>396%</b>	66%	<b>1059%</b>	247%

De los resultados se observa claramente que el producto LPO-M presenta una mayor susceptibilidad al envejecimiento respecto al RC con valores de 1336%, 396% y 1059% de variación para el ligante CA-14, CA-14 y RAP, respectivamente.

Tabla 3.4.5. Resultados de parámetros de fatiga para ligantes re-envejecido en PAV comparados con su ligante base PAV y criterio PG.

Ligante asfáltico	Estado muestra	$ G^* _{\text{sen}(\delta)}_{\text{PAV}}$ [kPa]	Criterio PG original ( $\leq 6000$ kPa)
CA-24	Original	3762,62	Cumple
	8,6% LPO-M	4405,38	Cumple
	5,9% RC	1406,95	Cumple
CA-14	Original	3339,09	Cumple
	5,3% LPO-M	4366,91	Cumple
	7,6% RC	1382,99	Cumple
RAP	Original	4766,02	Cumple
	13,4% LPO-M	4731,14	Cumple
	10,3% RC	1440,71	Cumple

Se puede observar que los tres cementos asfálticos en su estado PAV tienen un valor  $|G^*|_{\text{sen}(\delta)} \geq 6000$  kPa, por lo que cumplen con el criterio PG indicado en la especificación. Donde, las muestras con LPO-M presentan los valores mayores del parámetro de fatiga similares las del ligante RAP en estado original, es decir, presentarían un comportamiento similar a las de un ligante extraído de RAP.

## Capítulo 4: Análisis comparativo de resultados

El presente capítulo tiene por objetivo presentar un análisis de los resultados obtenidos, donde principalmente se realiza una comparación entre los efectos del rejuvenecedor LPO-M con el RC. Por lo tanto, el capítulo se estructura de la siguiente forma:

- En la sección 4.1, se presenta una comparación sobre las propiedades reológicas módulo dinámico y ángulo de fase de los rejuvenecedores LPO-M y RC.
- En la sección 4.2, se realiza un análisis comparativo de las dosis óptimas determinadas y los parámetro de ahuellamiento obtenidos para las diferentes dosis.
- En la sección 4.3, se presentan un análisis de los resultados obtenidos para las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas ensayadas.
- Y finalmente, en la sección 4.4, se presenta un análisis de la susceptibilidad al envejecimiento de los rejuvenecedores LPO-M y RC.

## 4.1. Comparación de propiedades reológicas de LPO-M y RC

En esta sección el objetivo es poder comparar los resultados de las propiedades reológicas entre LPO-M y RC. Para el primer análisis comparativo se seleccionan las muestras de los tres ligantes (CA-24, CA-14 y RAP) con aplicación del LPO-M y RC en una misma dosis. Luego, se selecciona un solo ligante con aplicación de LPO-M y RC en dosis de 6% y 9%.

### 4.1.1. Muestras rejuvenecidas con LPO-M en mismas dosis de aplicación

En la Figura 4.1.1 se presenta el efecto rejuvenecedor sobre las propiedades reológicas del producto LPO-M con aplicación de un 3% sobre los cementos asfálticos CA-24, CA-14 y RAP. Las curvas maestras del módulo dinámico y ángulo de fase se presentan en la Figura 4.1.1 (a) y (b), respectivamente.

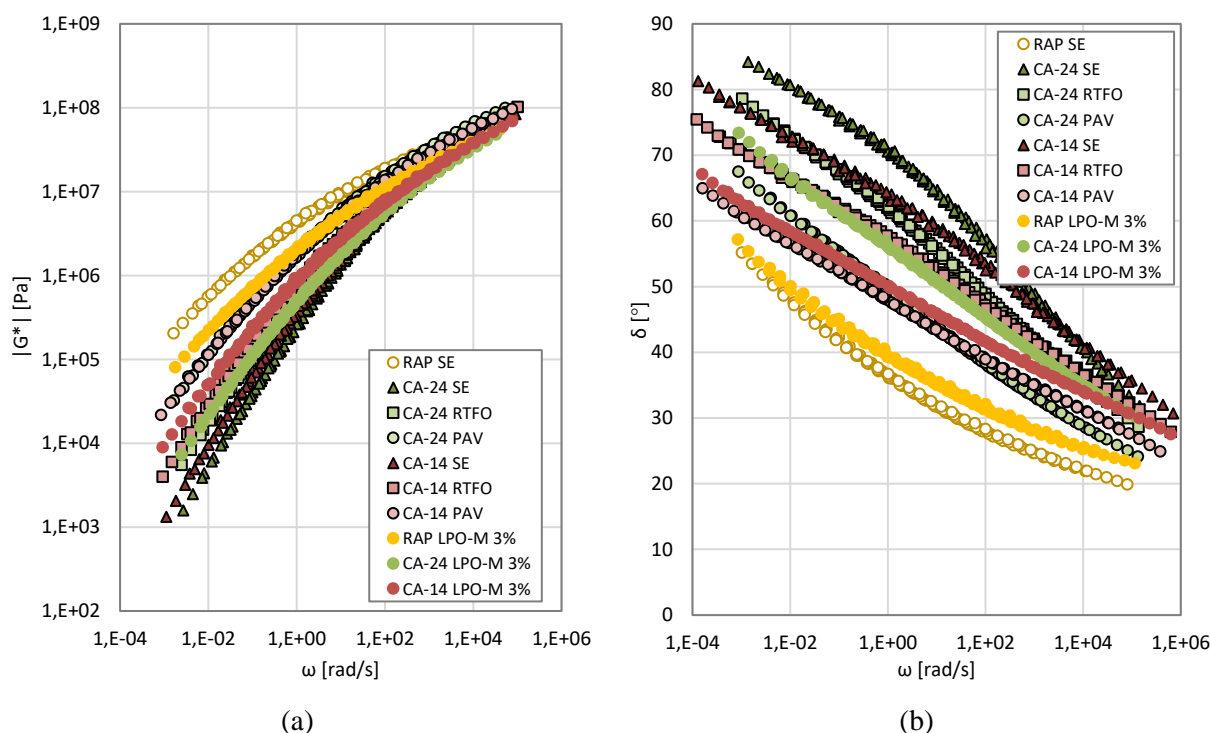


Figura 4.1.1. Curvas maestras del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 3%. Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas se logra observar que hay una diferencia en el efecto del LPO-M sobre el módulo dinámico dependiendo del tipo de ligante evaluado. La curva de la muestra RAP con 3% se asemeja a la curva de CA-24 y CA-14 con envejecimiento PAV, pero está muy lejos de alcanzar el estado de su ligante base sin envejecer (CA-24), esto es esperado debido a su alta rigidez. Al comparar el efecto entre el CA-14 y CA-24 a frecuencias bajas e intermedias ( $\leq 10$  rad/s, altas temperaturas) tiene mayor efecto rejuvenecedor en el CA-24 ya que este alcanza un nivel RTFO, no así el CA-14 que se aleja un poco de la curva. Para el caso del ángulo de fase observa algo similar, un 3% aplicado a un RAP sería una dosis muy baja debido que no aumenta el ángulo de fase lo suficiente para siquiera alcanzar la curva PAV de su ligante base CA-24. La curva del CA-24 3% alcanza un nivel RTFO del CA-14 y se aleja bastante de su curva PAV. Mientras que, un 3% aplicado al CA-14 no tiene gran efecto sobre esta propiedad alejando su curva muy poco respecto al PAV.

El mismo análisis se puede realizar para otras dosis aplicadas, en el Anexo 8: Curvas maestras análisis comparativo LPO-M y RC (inciso 7.8.1) se encuentran las curvas maestras para el caso de aplicar un 6% y 9% de LPO-M. Para el caso de aplicar dosis mayores, se observa en la Figura 4.1.2 que las curvas del CA-14 y CA-24 con 9% de LPO-M están muy por debajo de las curvas del ligante sin

envejecer, es decir, se disminuye significativamente la rigidez del material. Al evaluar el efecto sobre el ángulo de fase se observa que, el RAP alcanza un nivel con envejecimiento PAV de su ligante base, el CA-24 alcanza un nivel RTFO y el CA-14 alcanza un nivel sin envejecer. Por lo que, con dosis más altas el CA-14 presenta un mayor efecto rejuvenecedor.

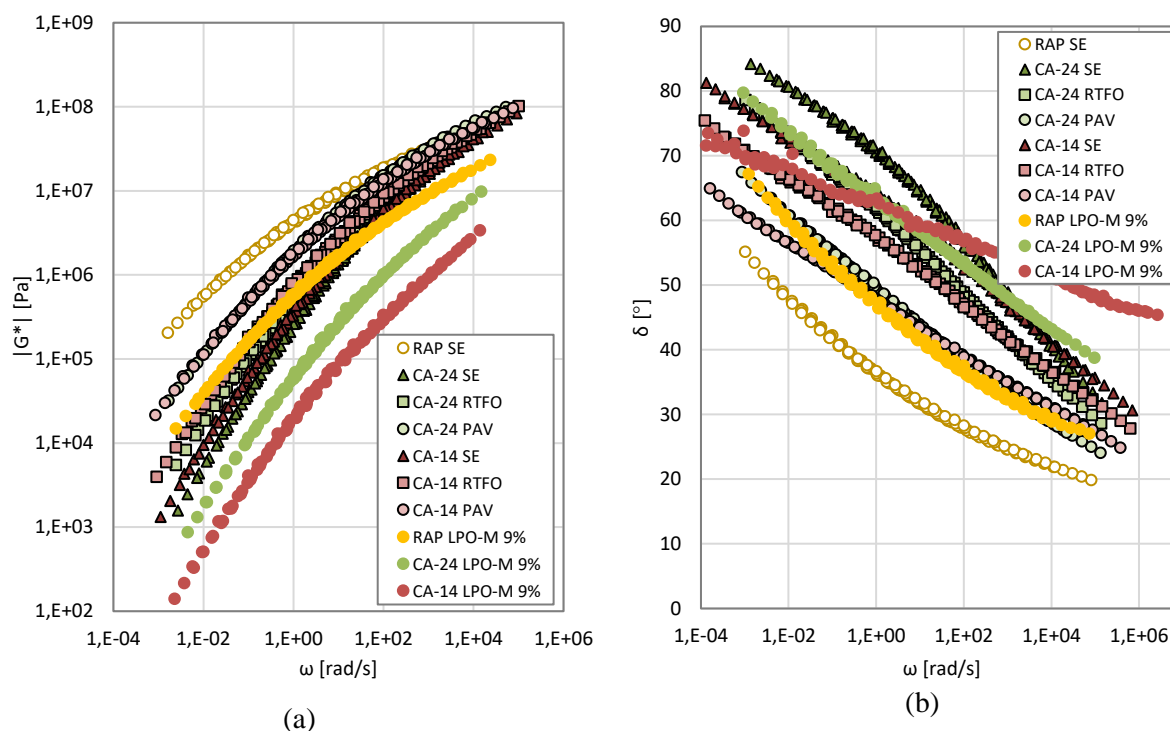


Figura 4.1.2. Curvas maestras del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 9%. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, al comparar se puede afirmar que al aplicar una dosis de 3% de LPO-M tiene mayor efecto rejuvenecedor sobre el CA-24, es decir, la disminución del módulo dinámico y aumento del ángulo de fase son más significativas. Además, una dosis de 3% no es suficiente para restaurar las propiedades reológicas a un nivel sin envejecer en ningún material. Para dosis altas (>6%), el mayor efecto rejuvenecedor es en el CA-14, seguido del CA-24 y luego el RAP. Este resultado se puede relacionar con la diferencia de viscosidad y rigidez de los ligantes, el CA-14 presenta un comportamiento menos viscoso y más rígido a bajas frecuencias (altas temperaturas), por lo que es de esperar que a una misma dosis aplicada el efecto rejuvenecedor sea mayor que para el CA-24 y RAP, es decir, el CA-14 necesitaría una menor dosis para restaurar sus propiedades reológicas.

#### 4.1.2. Muestras rejuvenecidas con RC en mismas dosis de aplicación

En la Figura 4.1.3 se presenta el efecto rejuvenecedor sobre las propiedades reológicas del producto RC con aplicación de un 3% sobre los cementos asfálticos CA-24, CA-14 y RAP. Se presentan las curvas maestras del módulo dinámico y ángulo de fase en la Figura 4.1.3 (a) y (b), respectivamente.

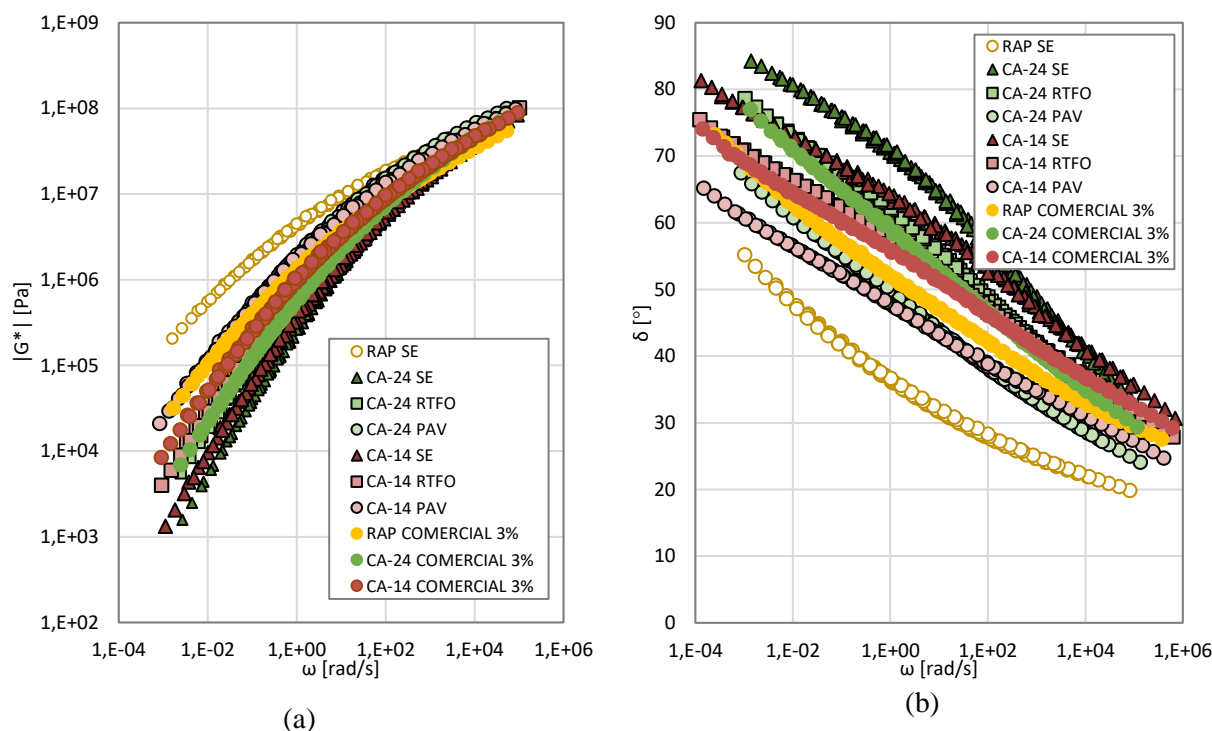


Figura 4.1.3. Curvas maestras del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 3%. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se observa que, al igual que para el caso del LPO-M existe una diferencia en el efecto del producto dependiendo del tipo de ligante a evaluar. Para el módulo dinámico la curva del RAP 3% está levemente por debajo del ligante CA-24 y CA-14 PAV, y las muestras de CA-24 y CA-14 con 3% presentan una leve diferencia a bajas frecuencias. Para el caso del ángulo de fase se observa algo similar, el efecto rejuvenecedor es diferente para los tres tipos de ligante donde, el RAP 3% está por sobre los ligantes PAV y para CA-24 y CA-14 sus curvas alcanzan un nivel RTFO. Dicho lo anterior, a bajas frecuencias (altas temperaturas) el mayor efecto rejuvenecedor del RC es sobre el CA-24 y esta diferencia en su efecto es menor que para el LPO-M, es decir, el RC presenta un efecto rejuvenecedor más similar para los tres ligantes evaluados.

El mismo análisis se realiza para otras dosis aplicadas, en el Anexo 8: Curvas maestras análisis comparativo LPO-M y RC (inciso 7.8.2), se encuentran las curvas maestras para el caso de aplicar un 6% y 9% de RC. Para el caso de aplicar dosis mayores como 9%, se observa en la Figura 4.1.4 que el mayor efecto rejuvenecedor es en el CA-24, disminuyendo significativamente su rigidez y alcanzando un ángulo de fase al nivel sin envejecer. Sin embargo, no existe una gran diferencia entre ligantes ya que, el CA-14 alcanza un nivel sin envejecer y el RAP se acerca mucho más a la curva de su ligante base en comparación con el LPO-M aplicado.

Dicho lo anterior, el efecto sobre las propiedades reológicas difiere entre aplicar LPO-M y RC, en especial para el ángulo de fase donde este último producto tiene un mayor efecto, pero para el módulo dinámico no presentan mayor diferencia. Además, es de esperar que para restaurar las propiedades originales (sin envejecer) de los ligantes las dosis necesarias también sean levemente diferentes.

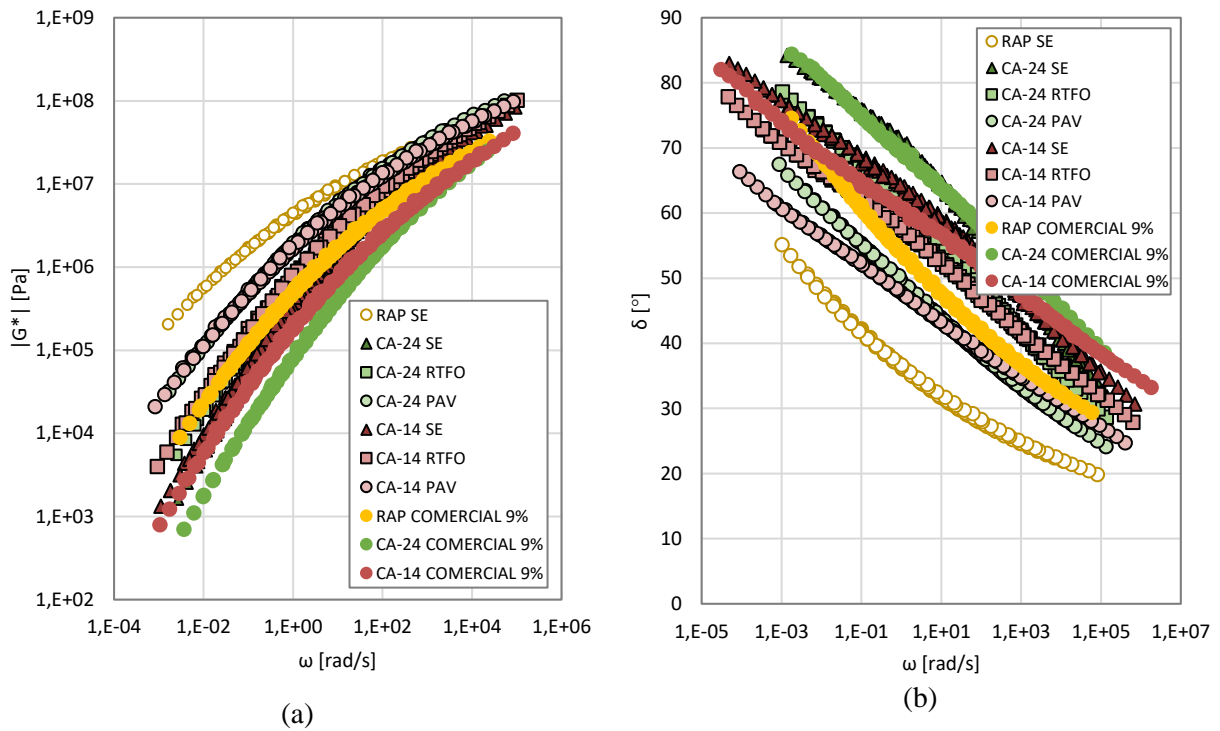


Figura 4.1.4. Curvas maestras del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 9%. Fuente: Elaboración propia.

### 4.1.3. Muestras rejuvenecidas con LPO-M y RC aplicadas a un mismo tipo de ligante

En esta sección se compara el efecto del LPO-M y RC aplicado en el ligante asfáltico CA-24 PAV, CA-14 PAV y RAP en dosis de 6 y 9% sobre las propiedades reológicas. En la Figura 4.1.5 (a) y (b) se presentan las curvas maestras para el módulo dinámico y ángulo de fase del CA-24, respectivamente.

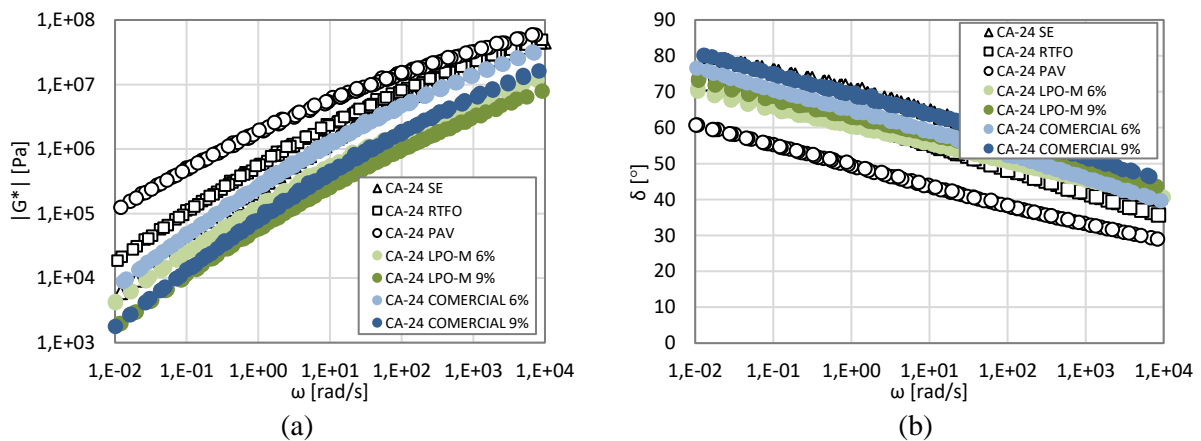


Figura 4.1.5. Curvas maestras de CA-24 con RC y LPO-M en dosis de 6 y 9% del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.

En las curvas se observa que, ambos productos presentan un efecto similar en el módulo dinámico visualizándose más claro a bajas frecuencias ( $\leq 10$  rad/s, altas temperaturas), mientras que a altas frecuencias ( $\geq 100$  rad/s, bajas temperaturas) el LPO-M disminuye más la rigidez del material. Por otro lado, en la Figura 4.1.5 (b) se observa lo contrario, el efecto del LPO-M es menor sobre el ángulo de fase respecto al RC.

El mismo análisis se realiza para el asfalto tradicional CA-14, en la Figura 4.1.6 (a) y (b) se presentan las curvas maestras para el módulo dinámico y ángulo da fase del CA-14, respectivamente. En la Figura 4.1.6 (a) se observa claramente que, el efecto rejuvenecedor sobre el módulo dinámico del LPO-M es mayor que el RC, donde dosis de 6% se asemejan a 9% de RC. Para el caso del ángulo de fase las curvas maestras se asemejan, es decir, tienen un efecto similar sobre esta propiedad a diferencia del caso del CA-24. Incluso a altas frecuencias ( $\geq 100$  rad/s) la curva 9% LPO-M es superior a las demás presentando un comportamiento viscoso mayor.

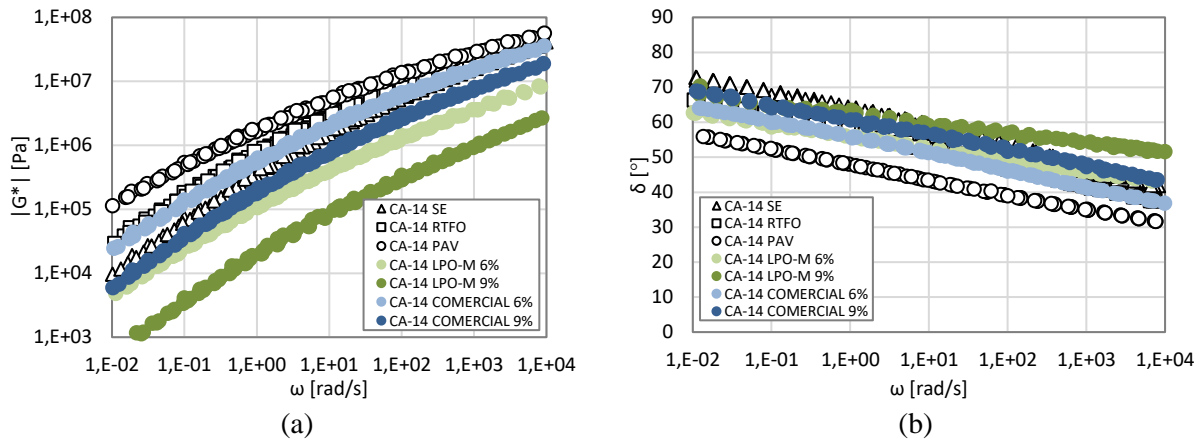


Figura 4.1.6. Curvas maestras de CA-14 con RC y LPO-M en dosis de 6 y 9% del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para el caso del RAP las dosis de análisis son mayores (9 y 12%) debido a su alta rigidez. En la Figura 4.1.7 (a) y (b) se observan las curvas maestras para el módulo dinámico y ángulo da fase, respectivamente.

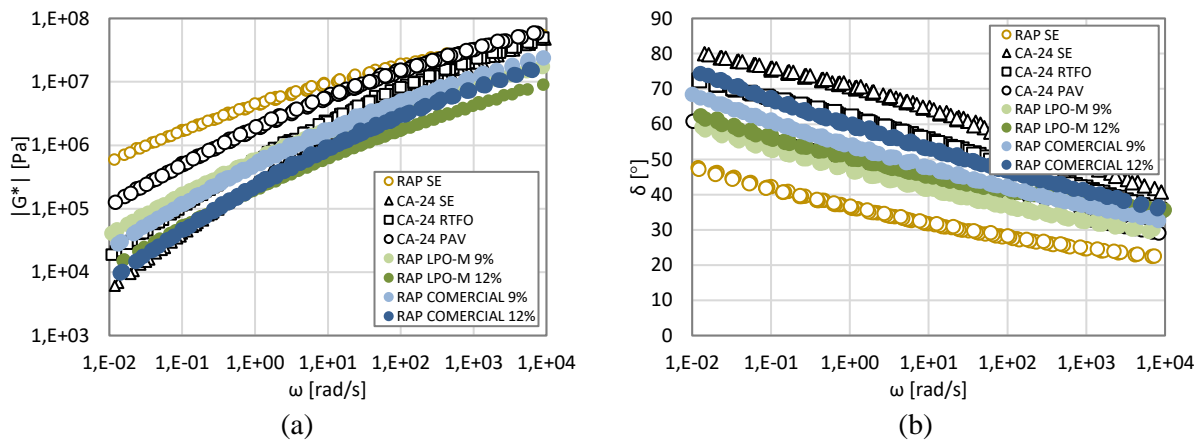


Figura 4.1.7. Curvas maestras de RAP con RC y LPO-M en dosis de 9 y 12% del a) módulo dinámico de corte y b) ángulo de fase. Fuente: Elaboración propia.

En estas últimas graficas se puede observar que para el caso del RAP ambos productos necesitan dosis mayores de aplicación para este tipo de ligante, no presentando mayor diferencia en la disminución del módulo dinámico, pero si en el ángulo de fase, en esta última propiedad el RC presenta un aumento levemente mayor con las mismas dosis aplicadas, es de esperar que se necesiten dosis menores de RC para restaurar esta propiedad reológica del ligante sin envejecer.

## 4.2. Comparación de dosis óptimas y máximas determinadas de LPO-M y RC

### 4.2.1. Análisis resultados dosis óptimas

Las dosis óptimas determinadas fueron en base al desempeño del ligante a altas temperaturas mediante el parámetro de ahuellamiento, que considera el efecto del LPO-M y RC sobre las dos propiedades reológicas ( $|G^*|$  y  $\delta$ ) del ligante. Además, estas dosis determinadas se verificaron a temperaturas intermedias mediante el parámetro de fatiga.

En la Figura 4.2.1 (a) y (b) se presenta una gráfica comparativa del valor  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  para las muestras de ligante con diferentes dosis de aplicación de LPO-M y RC, respectivamente. Cabe recalcar que, todas las muestras son comparadas con el ligante original sin envejecer (SE) respectivo. De las gráficas se observa que, a altas temperaturas ( $64^\circ\text{C}$ ) a medida que se aumenta la dosis aplicada de LPO-M o RC, va disminuyendo el valor del parámetro. Incluso se obtienen valores mucho menores al del ligante sin envejecer.

Al comparar, el producto LPO-M a altas temperaturas presenta un mayor efecto sobre el ligante CA-14, disminuyendo en mayor medida el parámetro de ahuellamiento. Mientras que, para el caso del RC la mayor disminución del parámetro se da para el ligante CA-24. A pesar de que se presenten diferencias entre cementos asfálticos evaluados, no hay mayor diferencia en el efecto rejuvenecedor a altas temperaturas entre productos (LPO-M y RC), donde claramente con dosis similares se alcanza el valor del parámetro de un ligante sin envejecer.

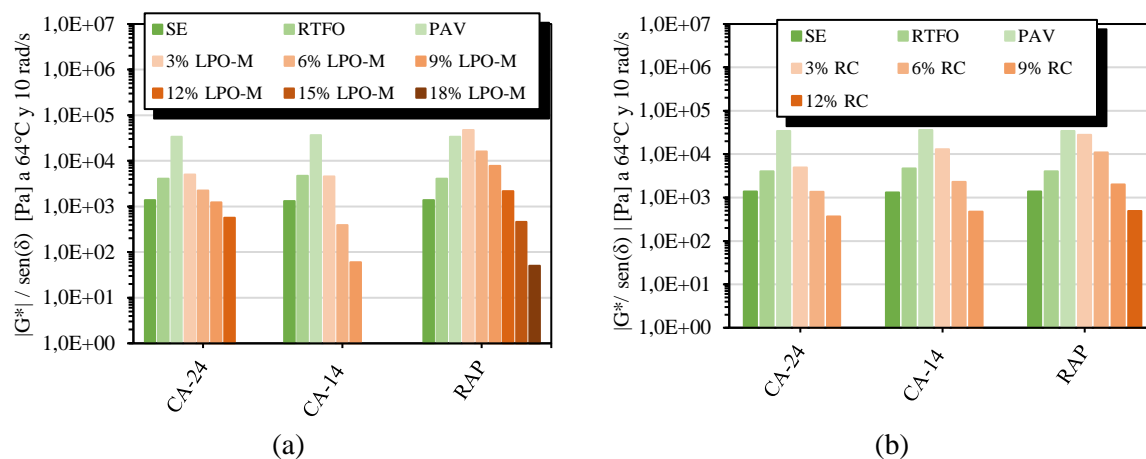


Figura 4.2.1. Comparación de resultados de  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  de muestras con LPO-M y RC en diferentes dosis con el ligante sin envejecer. Fuente: Elaboración propia.

Dicho lo anterior, las dosis óptimas determinadas fueron con el objetivo de restaurar las propiedades reológicas a altas temperaturas del ligante original sin envejecimiento y con envejecimiento RTFO según el tipo de aplicación. En la Tabla 4.2.1 se presenta un resumen de las dosis determinadas para los dos productos aplicados a los tres ligantes asfálticos, tanto para aplicación en mezclas con RAP o de manera superficial y encapsulamiento.

Para el caso de aplicación de mezclas con RAP, el CA-24 y RAP requieren dosis mayores de LPO-M. Mientras que, para el asfalto CA-14 se requieren dosis menores de aplicación que las requeridas para del RC. Esto podría deberse a que el RC tiene un efecto similar en las dos propiedades reológicas evaluadas, y el LPO-M disminuye de manera significativa la rigidez, pero no aumenta en gran medida el comportamiento viscoso de los cementos asfálticos envejecidos. Para el segundo tipo de aplicación claramente las dosis determinadas para restaurar las propiedades a un nivel RTFO son menores, donde el CA-14 con LPO-M tiene la menor dosis óptima.

Tabla 4.2.1. Resumen de dosis óptimas determinadas para el LPO-M y RC en sus dos tipos de aplicación.

Aplicación	Cemento asfáltico	Dosis óptima [%]	
		LPO-M	RC
Mezclas con RAP (SE*)	CA-24	8,6	5,9
	CA-14	5,3	7,6
	RAP	13,4	10,3
Aplicación superficial y encapsulamiento (RTFO**)	CA-24	4,0	3,8
	CA-14	2,9	5,3
	RAP	11,0	8,3

(\*): Tipo de aplicación con contenido óptimo estimado respecto a un ligante original, sin envejecimiento.

(\*\*): Tipo de aplicación con contenido óptimo estimado respecto a un ligante con envejecimiento primario RTFO.

#### 4.2.2. Análisis resultados dosis máximas

De los resultados presentados en la sección anterior (4.2.1) se observa que, hay muestras que disminuyen mucho el parámetro de ahuellamiento respecto al ligante original. Además, en la especificación PG se indica un límite inferior para el parámetro de ahuellamiento ( $|G^*|/\text{sen}(\delta) \geq 1,00$  kPa). En la Figura 4.2.2 se observa la variación del valor de este parámetro al aplicar LPO-M y RC comparado con el límite antes mencionado. Cabe recalcar que, las muestras con 0% de rejuvenecedor corresponden al ligante con envejecimiento secundario PAV.

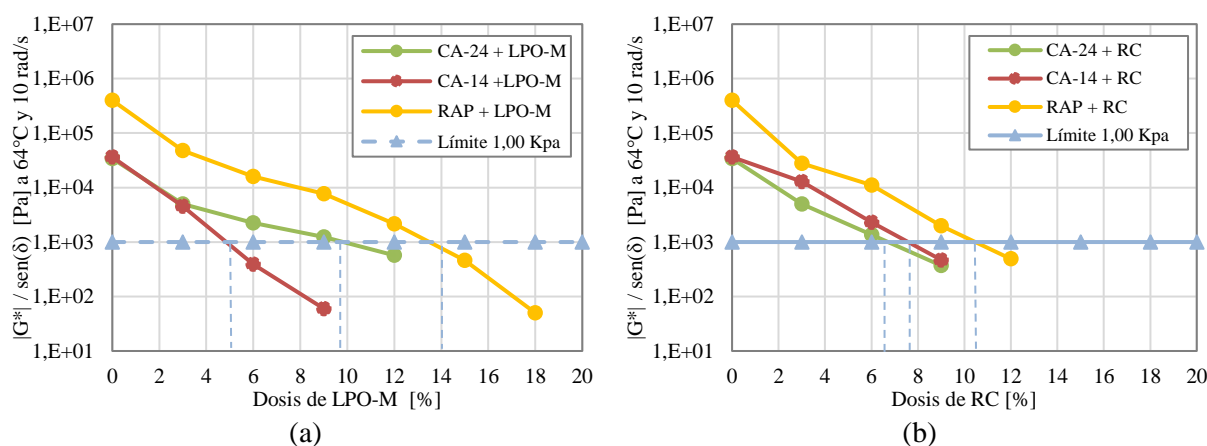


Figura 4.2.2. Gráficas comparativas  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  v/s dosis de aplicación de LPO-M y RC. Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas se observa cómo hay algunas dosis que no cumplen con el criterio PG a altas temperaturas ( $|G^*|/\text{sen}(\delta) \geq 1,00$  kPa), lo que indicaría que al aplicar dosis altas de rejuvenecedor LPO-M y RC el material se ablanda mucho y no cumpliría con lo exigido por la normativa. Dicho lo anterior, para cumplir con la especificación existen dosis máximas de aplicación para los dos productos rejuvenecedores aplicados al CA-24, CA-14 y RAP. En la Tabla 4.2.2 se presenta un resumen de las dosis máximas de aplicación para el LPO-M y RC aplicado a ligantes tipo CA-24, CA-14 y RAP.

Las dosis máximas de aplicación son muy cercanas a las dosis óptimas determinadas para aplicación en mezclas en RAP (nivel SE), debido a que estas dosis máximas son determinadas en base al desempeño a altas temperaturas del ligante en estado sin envejecimiento, en otras palabras, son las dosis máximas aplicables de LPO-M o RC para que el ligante rejuvenecido presente un grado de desempeño PG 64 (grado desempeño del ligante original). Si dosis mayores son aplicadas es de esperar que la temperatura alta PG sea mayor.

Tabla 4.2.2. Resumen de dosis máximas para LPO-M y RC.

Cemento asfáltico	Dosis máxima [%]	
	LPO-M	RC
CA-24	9,7	6,2
CA-14	5,5	8,1
RAP	14,1	11,0

### 4.3. Análisis resultados muestras con dosis óptimas

#### 4.3.1. Comparación de propiedades reológicas módulo dinámico y ángulo de fase

En primer lugar, con las dosis óptimas determinadas se pudo evaluar el efecto del LPO-M y RC sobre las propiedades reológicas, en la Figura 4.3.1 (a) y Figura 4.3.2(a) se presentan las curvas maestras del módulo dinámico y ángulo de fase con las muestras con LPO-M y RC aplicado en dosis óptimas sobre el CA-24 a modo de ejemplo. Por otro lado, en la Figura 4.3.1 (b) y Figura 4.3.2(b) se presentan los valores del módulo dinámico y ángulo de fase para las muestras de los ligantes CA-24, CA-14 y RAP medidas a frecuencias de 0,0001 rad/s, 0,01rad/s y 100 rad/s.

En las curvas del módulo dinámico y ángulo de fase se observa como los dos productos se acercan a las curvas del ligante sin envejecer. Sin embargo, presentan algunas diferencias en su comportamiento dependiendo de la frecuencia (o temperatura) evaluada. Este comportamiento se repite para los ligantes CA-14 y RAP, sus curvas maestras ya fueron presentadas en la sección anterior (inciso 3.3.3).

Al comparar el módulo dinámico medido a diferentes frecuencias, para el caso del CA-24 se observa claramente como el LPO-M en dosis óptimas tanto para frecuencias bajas (altas temperaturas) y frecuencias altas (bajas temperaturas) se acerca mucho más al módulo dinámico del ligante sin envejecer respecto al RC, mostrando un mejor desempeño para restaurar su rigidez. El CA-14 difiere su comportamiento respecto al CA-24, donde el RC presenta una mayor disminución de la rigidez a bajas frecuencias, pero a altas frecuencias el efecto es similar ente el LPO-M y RC. Para el RAP, es el ligante que presenta mayor similitud en el efecto de los dos productos rejuvenecedores en las distintas frecuencias, pero a bajas frecuencias el LPO-M logra disminuir la rigidez del material aún más que el RC.

Para el caso del ángulo de fase, se reafirma lo mencionado en secciones anteriores, que el LPO-M aplicado al ligante CA-24, CA-14 y RAP presenta un menor efecto rejuvenecedor sobre esta propiedad respecto al módulo dinámico. Sin embargo, a bajas frecuencias (altas temperaturas) no presenta mayor diferencia entre el LPO-M y RC, donde el ángulo de fase tiende a 90° por lo que no sería un parámetro tan relevante para evaluar el desempeño del ligante a altas temperaturas ya que este tendrá un comportamiento altamente viscoso independiente del producto y dosis aplicada.

Dicho lo anterior, para los tres ligantes evaluados en sus dosis óptimas presentan un efecto rejuvenecedor similar entre el LPO-M y RC a altas frecuencias (100 rad/s), disminuyendo la rigidez aún más que la del ligante sin envejecer. Mientras que, a bajas frecuencias (altas temperaturas) los resultados indican que las dosis estimadas para el LPO-M sobre el CA-24 serían suficientes para restaurar la rigidez del ligante original. Mientras que, para el CA-14 y RAP, para asegurar restaurar la rigidez de un ligante sin envejecer a altas temperaturas se debiera aplicar dosis mayores de LPO-M, es decir, la dosis óptima de aplicación debe ser levemente mayor.

A pesar de que las dosis óptimas fueron determinadas en base a un criterio a altas temperaturas, las dosis logran mejorar las propiedades reológicas en todo el rango de frecuencia, es decir, en todo el rango de temperatura medido que en este caso fue de 5°C a 75°C. Los resultados demuestran que, para determinar un contenido óptimo de rejuvenecedor de LPO-M utilizar un criterio a altas temperaturas sería adecuado para un ligante tradicional tipo CA-24 y CA-14 y un ligante extraído de RAP.

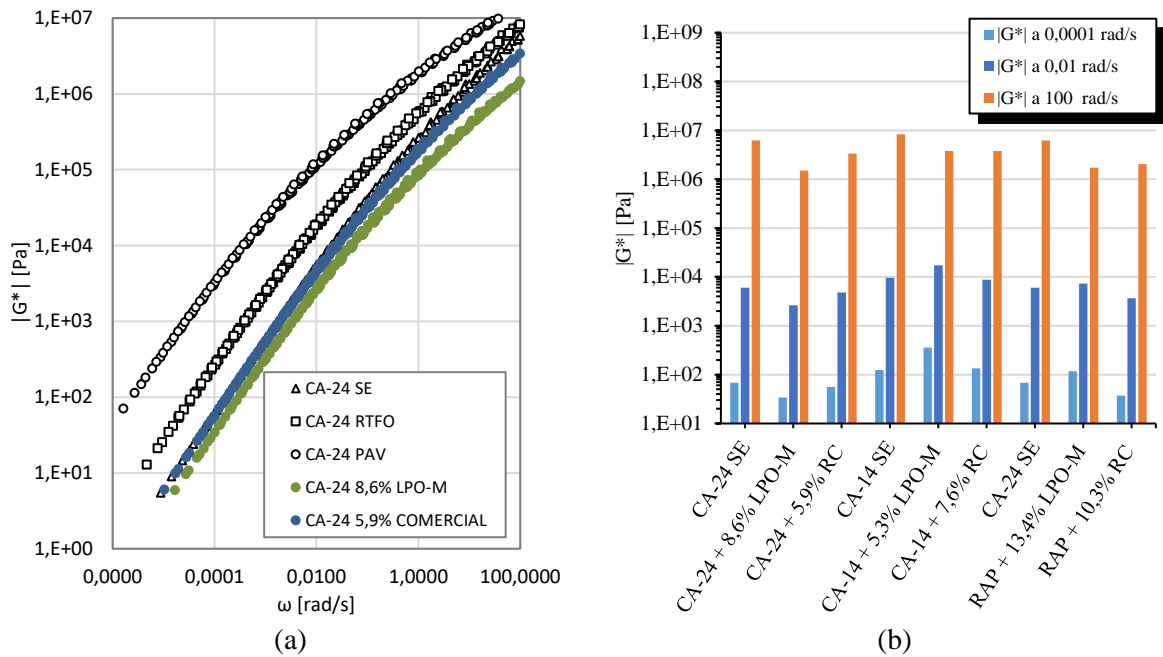


Figura 4.3.1. Comparación de resultados de modulo dinámico de corte ( $|G^*|$  y  $\delta$ ) de muestras con LPO-M y RC en dosis óptimas, a) curvas maestras del CA-24 de y b) valores de  $|G^*|$  medidos a frecuencias de 0,0001 rad/s, 0,01 rad/s y 100 rad/s. Fuente: Elaboración propia.

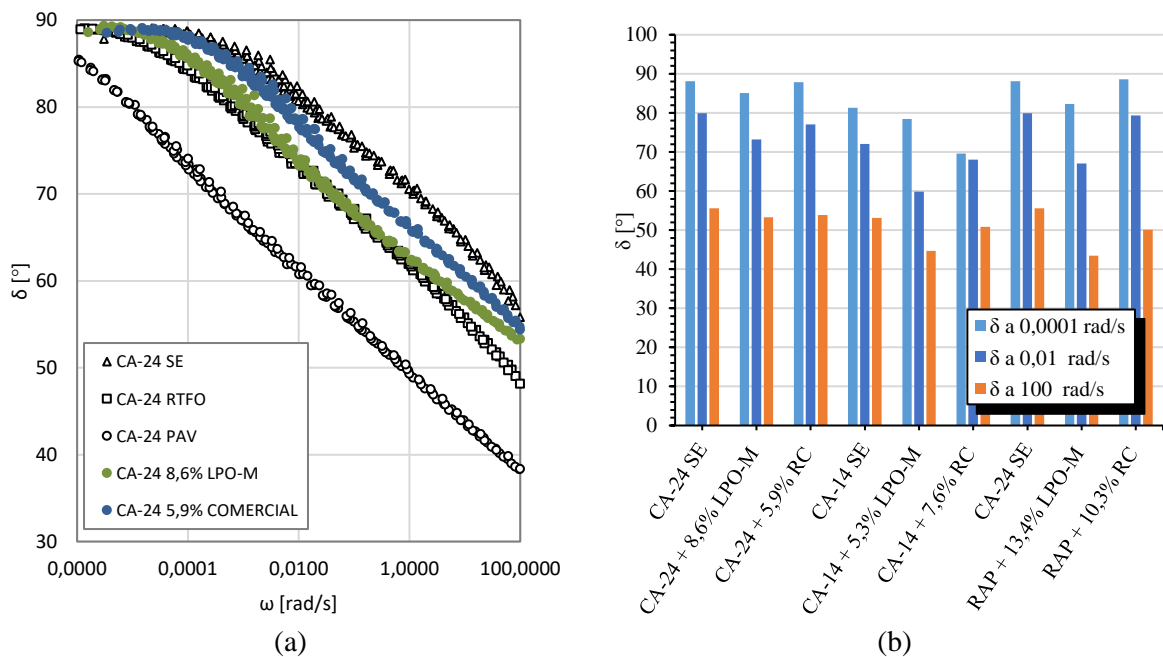


Figura 4.3.2. Comparación de resultados de ángulo de fase ( $\delta$ ) entre muestras con LPO-M y RC en dosis óptimas, a) curvas maestras del CA-24 de y b) valores de  $\delta$  medidos a frecuencias de 0,0001 rad/s, 0,01 rad/s y 100 rad/s. Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.2. Comparación de especificación PG y ensayos tradicionales

Con respecto al resto de los ensayos realizados a las muestras rejuvenecidas en sus dosis óptimas, en la Tabla 4.3.1 se muestra un resumen de los resultados para el grado de desempeño PG, penetración, punto de ablandamiento y viscosidad.

Tabla 4.3.1. Resumen de resultados de especificación PG y ensayos tradicionales a muestras rejuvenecidas en dosis óptimas de LPO-M y RC.

Cemento asfáltico	Estado	Grado PG	Penetración (25°C, dmm)	Punto de ablandamiento (°C)	Viscosidad	
					@60°C	@135°C
CA-24	Original (*)	<b>64-22</b>	54	50	3363	5,0
	8,6% LPO-M	<b>64-16</b>	102	45,6	<b>1771</b>	3,5
	5,9% RC	<b>64-22</b>	79	50	3835	5,3
CA-14	Original (*)	<b>64-22</b>	50	50	2267	3,9
	5,3% LPO-M	<b>70-16</b>	48	52,2	5621	4,9
	7,6% RC	<b>58-22</b>	74	48	1669	3,5
RAP	Original (*)	<b>94 2</b>	-	-	-	-
	13,4% LPO-M	<b>64 2</b>	83	47,8	2675	3,75
	10,3% RC	<b>64-22</b>	91	47,8	2683	5,2

(\*): Ligante original, sin envejecimiento.

De los resultados se observa que, al aplicar el LPO-M en dosis óptimas se logra rejuvenecer y alcanzar el grado PG a altas temperaturas de los tres ligantes evaluados, mientras que para bajas temperaturas no se alcanza el grado PG, esto puede atribuirse a su alta volatilidad que al ser sometido a un re-envejecimiento en PAV el líquido no permanece en las concentraciones iniciales. Para el caso específico del ligante CA-14 se obtiene un grado PG 70, esto indicaría que la dosis óptima debe ser levemente mayor para alcanzar el PG del ligante sin envejecer. Además, hay que mencionar que, el RC si alcanza el grado PG objetivo 64-22 en el CA-24 y RAP, por lo que se podría asumir que el análisis utilizado para determinar el contenido óptimo sería adecuado para este tipo de producto rejuvenecedor.

La aplicación de LPO-M en sus dosis óptimas en todos los ligantes envejecidos cumple con la especificación del MC V8 en el ensayo de penetración y punto de ablandamiento, obteniendo valores cercanos a las del ligante sin envejecer. Para el caso del CA-14 y RAP dan penetraciones aún más cercanas al valor del ligante original que el RC, pudiendo concluir que tiene un buen desempeño como rejuvenecedor al mejorar estas propiedades físicas. En caso de la viscosidad de las muestras con LPO-M el único ligante que no cumple con exigido en el MC, es el CA-24 con un valor de 1771 poise, donde se puede inferir que las dosis aplicadas para este ligante fueron muy altas y aumentaron mucho su comportamiento viscoso.

Adicionalmente, en la Tabla 4.3.2 se presentan los resultados de los parámetros de ahuellamiento y fatiga de las muestras del ligante rejuvenecido medidos mediante los ensayos PG versus los estimados utilizados para determinar y verificar las dosis óptimas. Cabe recalcar que, la estimación del  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  se realizó mediante extrapolación de las curvas maestras a 64°C y 10 rad/s (según metodología 2.2.2.1) y para estimar  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  se realizó mediante interpolación de los resultados obtenidos en la curva maestras a 25°C y 10 rad/s (según metodología en 2.2.2.3).

Las dosis óptimas fueron determinadas para obtener el parámetro de ahuellamiento de un ligante sin envejecer, por lo que la estimación tiene el mismo valor de este y para el nivel de envejecimiento RTFO solo se compara con el valor de ligante original. A grandes rasgos, se observa una diferencia en los valores medidos y estimados tanto para el parámetro de ahuellamiento como el de fatiga, pero no son diferencias significativas. Esto indicaría que el método utilizado para determinar las dosis óptimas sería adecuado, obteniendo resultados similares a temperaturas altas (64°C) e intermedias (25°C).

Tabla 4.3.2. Resumen de resultados de  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  y  $|G^*|/\text{sen}(\delta)$  medidos versus los estimados.

Cemento asfáltico	Estado	$ G^* /\text{sen}(\delta)$ SE a 64°C [kPa]		$ G^* /\text{sen}(\delta)$ RTFO a 64°C [kPa]		$ G^* /\text{sen}(\delta)$ PAV a 25°C [kPa]	
		Medidos (*)	Estimación (**)	Medidos (*)	Estimación (**)	Medidos (*)	Estimación (***)
CA-24	Original	<b>1,91</b>		<b>5,00</b>		<b>5587,54</b>	3762,62
	8,6% LPO-M	<b>1,31</b>	1,37	<b>4,99</b>	4,04	<b>6272,34</b>	4405,38
	5,9% RC	<b>2,12</b>		<b>4,06</b>		<b>1832,04</b>	1406,95
CA-14	Original	<b>1,23</b>		<b>4,99</b>		<b>5617,83</b>	3339,09
	5,3% LPO-M	<b>2,79</b>	1,32	<b>21,80</b>	4,73	<b>5783,98</b>	4366,91
	7,6% RC	<b>1,39</b>		<b>2,08</b>		<b>1843,06</b>	1382,99
RAP	Original	<b>118,11</b>	399,61	-		-	4766,02
	13,4% LPO-M	<b>1,90</b>	1,37	-	4,04	<b>6063,40</b>	4731,14
	10,3% RC	<b>1,72</b>		<b>6,25</b>		<b>2150,05</b>	1440,71

(\*): medido mediante DSR por ensayo especificación PG

(\*\*): Estimado mediante extrapolación de curva maestra

(\*\*\*): Estimado mediante interpolación de barrido frecuencia-temperatura

### 4.3.3. Comparación resultados de análisis químico mediante FTIR

En la Figura 4.3.3 se presentan de manera gráfica los resultados del índice carbonilo, sulfóxido y de envejecimiento combinado a través del análisis de espectros por FTIR realizado a las muestras rejuvenecidas con dosis óptimas de LPO-M y RC. También, en la Figura 4.3.4 se presentan los índices de recuperación química de las muestras con diferentes dosis de aplicación tanto de LPO-M como del RC aplicado a los tres cementos asfálticos envejecidos. Los resultados muestran que, al aplicar las dosis óptimas del LPO-M a los tres tipos de ligantes no presenta una disminución significativa de los índices medidos. El caso del CA-14 es el más notorio al disminuir los índices respecto al PAV, pero no alcanza los valores del ligante sin envejecer.

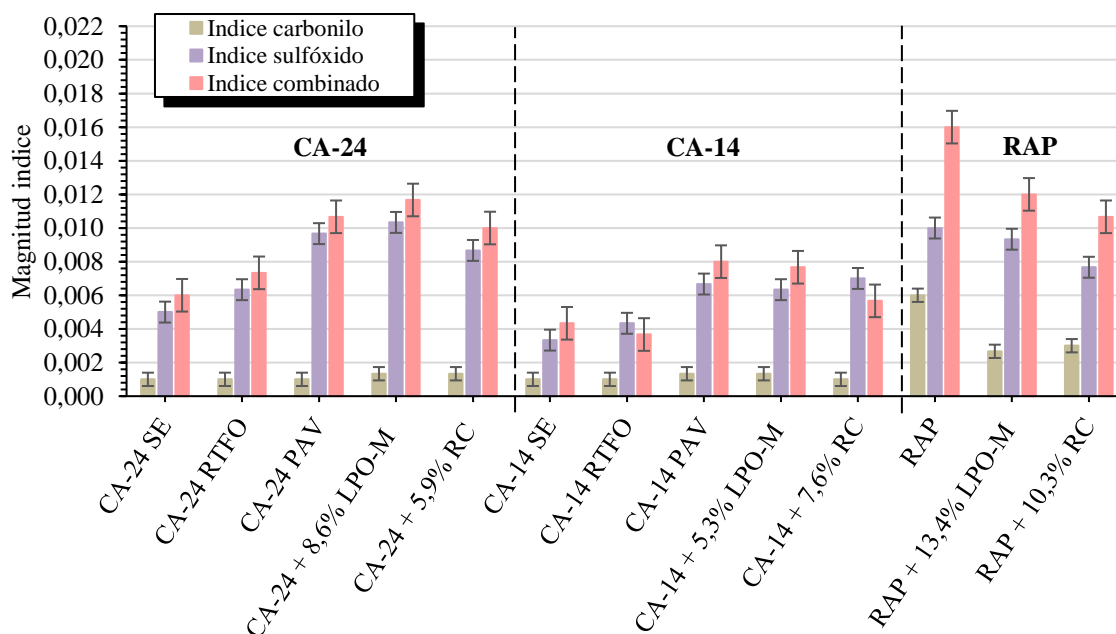


Figura 4.3.3. Gráfica comparativa de índices carbonilo, sulfóxido y combinado para las muestras sin y con adición de LPO-M y RC en sus dosis óptimas. Fuente: Elaboración propia.

En general, las dosis óptimas aplicadas de LPO-M y RC presentan una disminución del valor del

índice de envejecimiento combinado, pero ninguna muestra con LPO-M o RC se acercan al valor del ligante sin envejecer. Los resultados muestran que al agregar LPO-M o RC hay una recuperación al daño oxidativo de los cementos asfálticos envejecidos, sin embargo, se requieren más estudios para determinar si el LPO-M restaura la composición química del cemento asfáltico envejecido. Por lo que, este tipo de análisis no es concluyente para evaluar el desempeño de los productos como rejuvenecedores de asfalto.

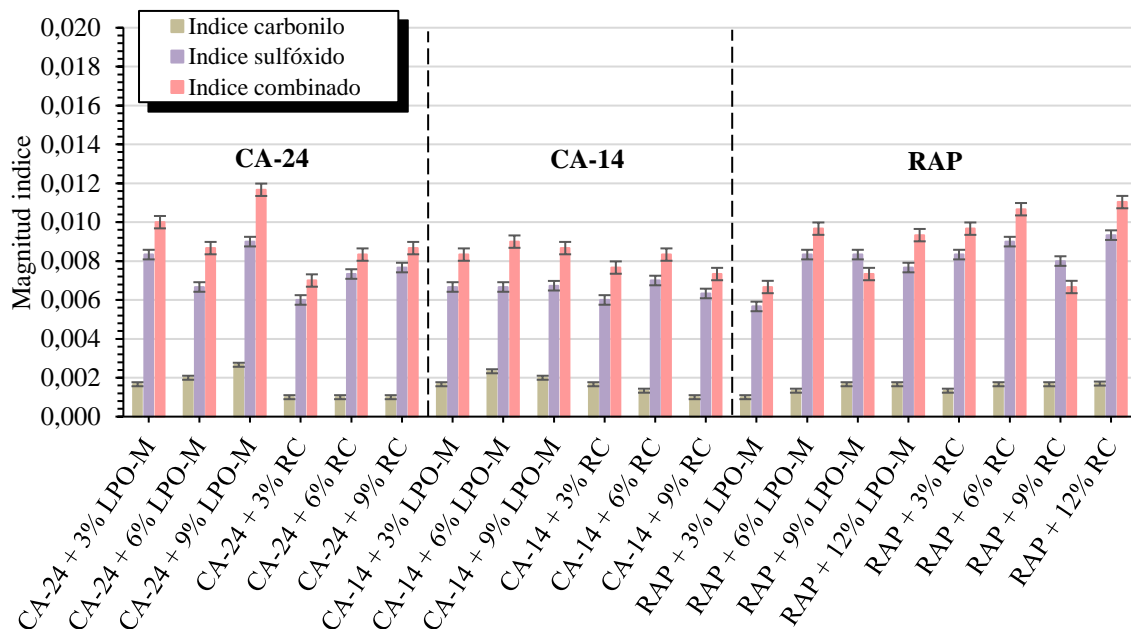


Figura 4.3.4. Gráfica comparativa de índices carbonilo, sulfóxido y combinado para las muestras sin y con adición de LPO-M y RC en diferentes dosis de aplicación. Fuente: Elaboración propia.

## 4.4. Análisis de susceptibilidad al envejecimiento

### 4.4.1. Comparación resultados parámetro de fatiga de muestras re-envejecidas

En la Tabla 4.4.1 se presenta un resumen del valor para el parámetro de fatiga de las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas en estado sin envejecer y con un re-envejecimiento en RTFO y PAV comparados respecto a los valores del ligante original. Principalmente se observa que, para las muestras en estado sin envejecimiento (SE) el parámetro de fatiga disminuye al aplicar dosis óptimas de LPO-M y RC respecto al ligante original tanto para el CA-24, CA-14 y RAP.

Tabla 4.4.1. Comparación del parámetro de fatiga del ligante original respecto al rejuvenecido en dosis óptima de LPO-M y RC a 25°C y 10 rad/s.

Ligante asfáltico	Estado muestra	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]	$ G^* sen(\delta)$ [kPa]
		SE	RTFO	PAV
CA-24	Original	<b>1140,04</b>	<b>1822,43</b>	<b>3762,62</b>
	8,6% LPO-M	306,81	3114,24	4405,38
	5,9% RC	692,66	1018,07	1406,95
CA-14	Original	<b>1361,57</b>	<b>2149,06</b>	<b>3339,09</b>
	5,3% LPO-M	880,38	3172,15	4366,91
	7,6% RC	831,15	920,45	1382,99
RAP	Original	<b>4766,02</b>	-	-
	13,4% LPO-M	408,34	4163,11	4731,14
	10,3% RC	415,23	939,03	1440,71

Al evaluar los valores del parámetro en RTFO y PAV, las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas de LPO-M muestran un aumento considerable respecto al ligante original. Mientras que, el RC presenta valores menores. El LPO-M aplicado en dosis óptimas al ser sometido a un re-envejecimiento, las muestras son más susceptible al agrietamiento por fatiga respecto al RC. Sin embargo, evaluando solo los resultados de las muestras sin envejecer hay similitud entre los efectos de los dos productos, mostrando un buen desempeño el LPO-M al disminuir el parámetro de fatiga incluso menor al del ligante original.

Respecto a la susceptibilidad al envejecimiento, en la Tabla 4.4.2 se presenta un resumen de las variaciones determinadas del parámetro de fatiga en todos sus niveles de envejecimiento.

Tabla 4.4.2. Resumen resultados de susceptibilidad al envejecimiento en estado RTFO y PAV de las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas.

Análisis susceptibilidad	CA-24		CA-14		RAP	
	LPO-M	RC	LPO-M	RC	LPO-M	RC
$\left(\frac{( G * Sen(\delta))_{DO\_SE} - ( G * Sen(\delta))_{CA\_SE}}{( G * Sen(\delta))_{CA\_SE}}\right)$	<b>-73%</b>	-39%	<b>-35%</b>	-36%	<b>-64%</b>	-64%
$\left(\frac{( G * Sen(\delta))_{CA\_RTFO} - ( G * Sen(\delta))_{CA\_SE}}{( G * Sen(\delta))_{CA\_SE}}\right)$	60%		58%		60%	
$\left(\frac{( G * Sen(\delta))_{DO\_RTFO} - ( G * Sen(\delta))_{DO\_SE}}{( G * Sen(\delta))_{DO\_SE}}\right)$	<b>915%</b>	47%	<b>260%</b>	11%	<b>920%</b>	126%
$\left(\frac{( G * Sen(\delta))_{CA\_PAV} - ( G * Sen(\delta))_{CA\_SE}}{( G * Sen(\delta))_{CA\_SE}}\right)$	230%		145%		230%	
$\left(\frac{( G * Sen(\delta))_{DO\_PAV} - ( G * Sen(\delta))_{DO\_SE}}{( G * Sen(\delta))_{DO\_SE}}\right)$	<b>1336%</b>	103%	<b>396%</b>	66%	<b>1059%</b>	247%

De los resultados, el LPO-M presenta la mayor diferencia en el parámetro al ser sometido a un nuevo ciclo de envejecimiento, aumentando de manera significativa la variación entre SE- RTFO y SE-PAV respecto al ligante original. En la Figura 4.4.1 (a) y (b) se presentan los resultados de la variación del proceso de envejecimiento de manera comparativa para la variación del ligante con envejecimiento primario (RTFO) y secundario (PAV) respecto al ligante SE, respectivamente.

De todas las muestras con LPO-M el CA-14 es el que presenta la menor susceptibilidad al envejecimiento tanto para el RTFO como el PAV, esto podría deberse a que es el ligante con menor dosis aplicada. Para las muestras con RC el resultado es similar, el CA-14 es el ligante con menor susceptibilidad y el RAP con la mayor. Caber recalcar que, para las comparaciones del ligante RAP se utilizó su ligante base CA-24, por lo que las variaciones en estado original son las mismas. Además, el producto RC en el caso de los asfaltos tradicionales CA-24 y CA-14 presenta la menor susceptibilidad al envejecimiento con una variación en sus propiedades reológicas incluso menor que su ligante original.

Dicho lo anterior, las muestras con LPO-M presentan una mayor susceptibilidad al envejecimiento, donde al aplicar dosis óptimas se obtienen variaciones mayores en las propiedades reológicas al someterlo a un nuevo ciclo de envejecimiento, en otras palabras, las muestras rejuvenecidas se envejecen más rápido que un ligante original. En este sentido, el LPO-M presenta un envejecimiento más rápido siendo una característica no deseada en un rejuvenecedor de cementos asfálticos envejecidos, esto podría deberse a la alta volatilidad que presenta al ser sometido a un nuevo ciclo de envejecimiento no permanece en sus concentraciones iniciales, esto se constató en los resultados

presentados anteriormente de cambio de masa (Tabla 3.3.4) que dieron valores muy altos y lejos de lo exigido por el manual de carreteras para un ligante tradicional.

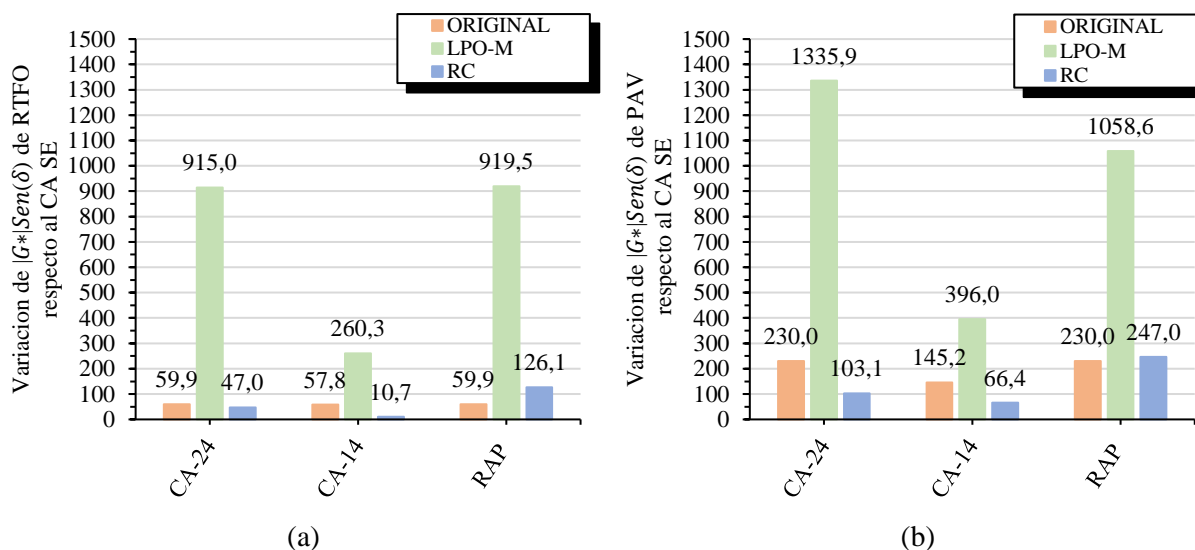


Figura 4.4.1. Gráfica comparativa de la variación porcentual de  $|G^*|Sen(\delta)$  de las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas respecto al ligante original a) variación de RTFO respecto al SE y b) variación del de PAV respecto al SE. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.2. Comparación resultados FTIR de muestras re-envejecidas

En la Figura 4.4.2 se presentan de manera gráfica los resultados del índice carbonilo, sulfóxido y de envejecimiento combinado a través del análisis de espectros por FTIR realizado a las muestras rejuvenecidas con dosis óptimas de LPO-M y RC, envejecidas nuevamente en RTFO y PAV.

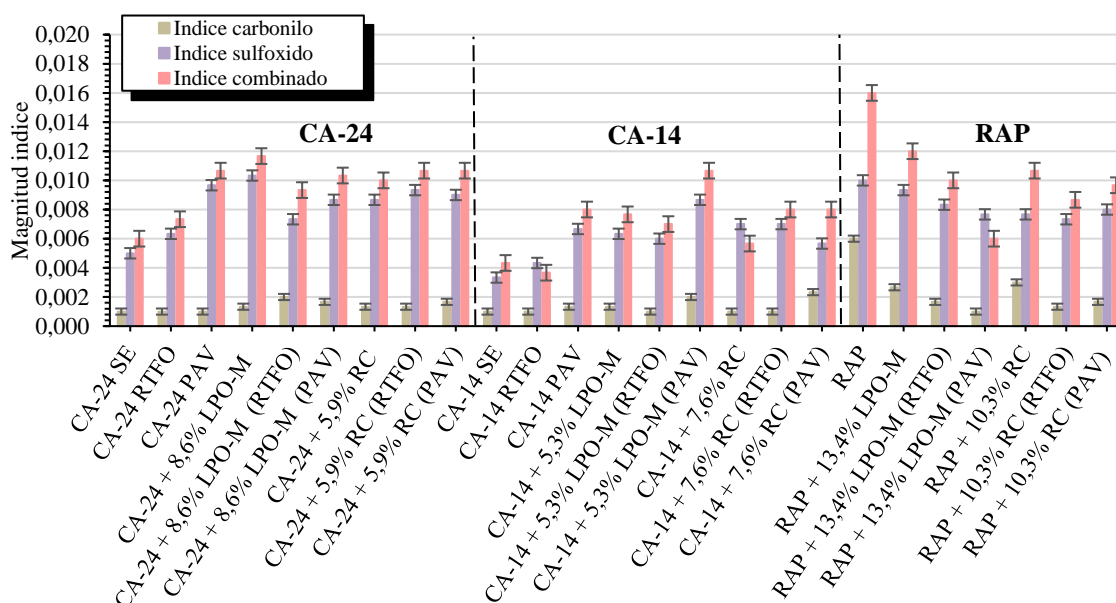


Figura 4.4.2. Gráfica comparativa de índices carbonilo, sulfóxido y combinado para las muestras sin y con adición de LPO-M y RC en sus dosis óptimas. Fuente: Elaboración propia.

Para las muestras con LPO-M, la variación en los índices a medida que aumenta el envejecimiento difiere del comportamiento del ligante original, es decir, los índices no aumentan claramente junto con

el envejecimiento del material. Mientras que, las muestras con RC solo los asfaltos tradicionales CA-24 y CA-14 muestran un aumento del índice de envejecimiento combinado re-envejecido en RTFO y PAV, alcanzando los valores del ligante original con ese mismo envejecimiento. Dicho lo anterior, para un análisis de re-envejecimiento de las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas de LPO-M y RC los resultados de los índices mediante FTIR no son concluyentes para determinar una recuperación del daño oxidativo del cemento asfáltico envejecido.

# Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

## 5.1. Conclusiones generales

En este estudio se realizaron ensayos de barrido de frecuencia y temperatura a un ligante envejecido CA-24, CA-14 y recuperado de RAP, con aplicación en diferentes dosis de un líquido rejuvenecedor obtenido a partir de pirólisis de neumáticos mineros fuera de uso. Se evaluó y comparó el efecto de este líquido sobre las propiedades reológicas de los materiales respecto a un rejuvenecedor comercial, estimando las dosis óptimas de aplicación para cada producto.

Se demostró que el LPO-M posee un efecto rejuvenecedor sobre los tres ligantes asfálticos evaluados (CA-24, CA-14 y RAP), restaurando sus propiedades reológicas mediante una disminución del módulo dinámico ( $|G^*|$ ) y un aumento del ángulo de fase ( $\delta$ ). Además, el LPO-M no presentó gran diferencia en su efecto rejuvenecedor respecto a un producto comercial. Sin embargo, cada producto por separado si presenta diferencias en su efecto dependiendo del cemento asfáltico evaluado.

En general, de los resultados se concluye que el efecto rejuvenecedor del LPO-M sobre el módulo dinámico del CA-24, CA-14 y RAP es mayor en casi todo el rango de frecuencias respecto al RC, donde a altas frecuencias (bajas temperaturas) se acentúa más y a bajas frecuencias (altas temperaturas) el efecto es similar. Para el caso del CA-14, el LPO-M disminuye considerablemente la rigidez respecto al RC. El efecto rejuvenecedor sobre el módulo dinámico del CA-14 con dosis de 6% de LPO-M se asemeja a un 9% de RC. Mientras que, para el ligante RAP no se presenta gran diferencia en la disminución del módulo dinámico entre los dos productos.

Al aplicar el líquido LPO-M a un ligante tipo CA-24, CA-14 y RAP, el efecto rejuvenecedor sobre el módulo dinámico es mayor que para el ángulo de fase en todas las dosis aplicadas, es decir, restaura en mayor medida la rigidez que el ángulo de fase, donde con la misma dosis aplicada la rigidez alcanzó el valor del ligante sin envejecer en todo el rango de frecuencias. Mientras que, para el ángulo de fase solo se alcanzaba a altas frecuencias (bajas temperaturas). Al comparar el LPO-M con el RC, este último presenta un efecto similar sobre las dos propiedades reológicas.

Dicho lo anterior, el LPO-M difiere del RC teniendo un mayor efecto en el módulo dinámico respecto al ángulo de fase, mientras que el RC tiene el mismo efecto sobre las dos propiedades por lo que presenta mejor rendimiento al restaurar el comportamiento viscoso del ligante original. Sin embargo, al estimar las dosis óptimas de aplicación en base al desempeño a altas temperaturas no presentan gran diferencia entre los dos productos, donde el módulo dinámico de corte es una propiedad importante para asegurar un buen desempeño del ligante a altas temperaturas y el ángulo de fase tiende a tener un comportamiento altamente viscoso y la rigidez se vuelve fundamental para evitar posibles deterioros en los pavimentos asfálticos.

Las dosis óptimas determinadas demostraron que, el LPO-M requiere dosis mayores de aplicación para el CA-24 y RAP. Mientras que, para el CA-14 las dosis óptimas fueron menores respecto al RC.

Estas dosis determinadas bajo el criterio del parámetro de ahuellamiento muestran ser las ideales para cumplir con el objetivo de restaurar las propiedades reológicas a altas temperaturas, ya sea para

aplicaciones en mezclas con RAP o mediante encapsulamiento o aplicación superficial del rejuvenecedor.

El desempeño del LPO-M comparando las dosis óptimas y máximas determinadas es similar al producto comercial (RC), donde hay una diferencia aproximadamente del 2 al 3% para todos los ligantes, de esto se puede concluir que el LPO-M requiere dosis similares de aplicación siendo un producto rejuvenecedor competitivo. Las dosis óptimas seleccionadas de LPO-M para evaluar su efecto sobre los ligantes CA-24, CA-14 y RAP fueron las de aplicación de mezclas en RAP con porcentajes de 8,6%, 5,3% y 13,4%, respectivamente. Mientras que, para el RC a modo comparativo sobre el CA-24, CA-14 y RAP las dosis fueron de 5,9%, 7,6% y 10,3%, respectivamente.

En base a los ensayos realizados a las muestras rejuvenecidas en dosis óptimas, se observa claramente como el LPO-M restaura la rigidez del material tanto para bajas frecuencias (altas temperaturas) como altas frecuencias (bajas temperaturas), mostrando un mejor desempeño como rejuvenecedor que el RC sobre esta propiedad reológica. Mientras que, para el ángulo de fase solo a bajas frecuencias (altas temperaturas) no existe mayor diferencia en el aumento del comportamiento viscoso.

Los tres cementos asfálticos envejecidos evaluados (CA-24, CA-14 y RAP) en sus dosis óptimas presentan un efecto rejuvenecedor similar entre el LPO-M y RC a altas frecuencias (bajas temperaturas). Donde el ligante proveniente de RAP es el que requiere las mayores dosis de aplicación debido a su alta rigidez.

Al aplicar el LPO-M en dosis óptimas de aplicación para mezclas en RAP, se logra rejuvenecer y alcanzar el grado PG a altas temperaturas del CA-24, CA-14 y RAP. Mientras que, para bajas temperaturas no se logra alcanzar el grado de desempeño del ligante sin envejecer. Para el caso del CA-24 y RAP con el rejuvenecimiento se alcanza un PG 64 tanto para el LPO-M como el RC. Mientras que, para el CA-14 se alcanza un PG 70 y PG 58 para el LPO-M y RC, respectivamente. Esto último indica que las dosis estimadas para el ligante tradicional CA-14 debieran ser mayores para el líquido LPO-M y levemente menor para el RC. Por otro lado, para alcanzar el grado de desempeño (PG) a bajas temperaturas faltaría otro tipo de análisis para determinar las dosis necesarias de LPO-M. Sin embargo, las muestras con RC del CA-24 y RAP obtuvieron un PG 64- 22, lo que indicaría que el análisis utilizado para determinar el contenido óptimo en base al desempeño a altas temperaturas mediante el parámetro de ahuellamiento sería adecuado para este tipo de producto rejuvenecedor.

Respecto a los resultados de ensayos tradicionales, las muestras rejuvenecidas con LPO-M cumplen con la especificación del Volumen 8 del Manual de Carreteras en el ensayo de penetración y punto de ablandamiento, obteniendo valores cercanos a las del ligante sin envejecer incluso más que con el RC. Mientras que, el punto de inflamación se reporta que las muestras con LPO-M aplicado en dosis óptimas no cumplen con lo mínimo exigido en el manual de carreteras (232°C), por lo que se concluye que sería un producto aplicable a mezclas tibias y/o frías.

Adicionalmente, los resultados mediante ensayos de FTIR muestran que al agregar LPO-M o RC hay una recuperación al daño oxidativo de los cementos asfálticos envejecidos, sin embargo, se requieren más estudios para determinar si el LPO-M restaura la composición química del cemento asfáltico envejecido. Por lo que, este tipo de análisis no es concluyente para evaluar el desempeño de los productos como rejuvenecedores de asfalto.

Dicho lo anterior, el producto LPO-M evaluado en sus dosis óptimas de aplicación para mezclas en RAP presenta un buen desempeño para el alcance de un PG objetivo, alguna de sus propiedades físicas y la restauración de propiedades reológicas respecto a un producto rejuvenecedor comercial utilizado en la industria, es decir, es un producto rejuvenecedor competitivo y con potencial uso a nivel nacional.

Las muestras rejuvenecidas con LPO-M presentaron una alta sensibilidad al ser ensayados con un barrido de frecuencia-temperatura, donde los resultados extraídos de las curvas maestras para estimar tanto el parámetro de ahuellamiento como el parámetro de fatiga mostraron diferencias respecto a los medidos mediante el ensayo de clasificación PG. En general, se obtuvieron valores menores en los parámetros estimados mediante extrapolación e interpolación de las curvas maestras en comparación

de los parámetros medidos por la especificación PG. A pesar de la sensibilidad en los resultados, la diferencia presentada no es significativa, concluyendo que el método utilizado para determinar las dosis óptimas sería adecuado, obteniendo resultados similares a temperaturas altas (64°C) e intermedias (25°C).

Los ligantes rejuvenecidos con LPO-M en sus dosis óptimas sometidos a un re-envejecimiento en RTFO y PAV, mostraron una variación mayor de las propiedades reológicas en su proceso de envejecimiento respecto al ligante original presentando una mayor susceptibilidad al envejecimiento, es decir, las muestras rejuvenecidas se envejecen más rápido que un ligante original. Al compararlo con el RC, este último presenta variaciones mucho menores respecto al ligante original, por lo que presenta un buen desempeño como rejuvenecedor para alargar la vida útil de los cementos asfálticos. En ese sentido, el LPO-M presenta un envejecimiento más rápido siendo una característica no deseada en un rejuvenecedor de cementos asfálticos. El ligante rejuvenecido CA-14 es el con menor susceptibilidad al envejecimiento, seguido del CA-24 y luego el RAP para los dos productos rejuvenecedores. El LPO-M presenta un efecto deseado sobre los cementos asfálticos a temperaturas intermedias, obteniendo valores bajos para el parámetro de fatiga lo que es deseado para un buen desempeño del cemento asfáltico frente al agrietamiento por fatiga, donde un asfalto blando se espera presente mejores propiedades de fatiga que los duros.

Por último, el LPO-M presentó un efecto rejuvenecedor similar al de un rejuvenecedor comercial utilizado en la industria del asfalto, presentando una ventaja adicional de ser un producto que utiliza un residuo industrial de origen sintético crítico y estratégico para ser valorizado como lo son los NFU. Así, el desarrollo de este producto es innovador y tiene una doble labor en los desafíos de sostenibilidad y cuidado del medio ambiente, alargando la vida útil de los pavimentos asfálticos y reciclando materiales en desuso.

## 5.2. Conclusiones específicas

En base a los resultados obtenidos, se concluye que:

- El líquido pirolítico presenta un efecto rejuvenecedor sobre el ligante asfáltico CA-24, CA-14 y RAP, disminuyendo el módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) y un aumentando el ángulo de fase ( $\delta$ ).
- El ligante recuperado de RAP requiere de mayores dosis de aplicación para restaurar sus propiedades reológicas de su ligante base (CA-24) sin envejecer, al ser un material con una rigidez mayor.
- El LPO-M presenta un mayor efecto rejuvenecedor sobre el módulo dinámico respecto al ángulo de fase, en comparación al RC que presenta un efecto similar sobre las dos propiedades.
- El desempeño del LPO-M comparando las dosis óptimas y máximas es similar al producto comercial (RC), con una diferencia aproximada del 2 al 3% para todos los ligantes, de esto se puede concluir que el LPO-M requiere dosis similares de aplicación siendo un producto rejuvenecedor competitivo.
- Las dosis óptimas determinadas mejoran el desempeño a altas temperaturas del cemento asfáltico envejecido CA-24, CA-14 y RAP, alcanzando el PG del ligante sin envejecer, mejorando sus propiedades físicas y restaurando las propiedades reológicas.
- El LPO-M presenta un efecto deseado sobre los cementos asfálticos a temperaturas intermedias, pero con una velocidad de envejecimiento mayor que el ligante original.
- El producto líquido LPO-M proveniente de la pirólisis de neumáticos mineros fuera de uso evaluado en esta investigación es altamente innovador, competitivo y con potencial uso como un agente rejuvenecedor en la industria del asfalto.

### 5.3. Futuras investigaciones

Con el fin de poder complementar los resultados obtenidos en este estudio, se sugiere para futuros trabajos de investigación:

- Evaluar el efecto del LPO-M en mayores dosis de aplicación y en un rango mayor de temperatura (bajas, intermedias y altas) mediante barridos de frecuencia-temperatura con el equipo DSR, con el fin de tener una mayor precisión en los resultados.
- Trabajar en un criterio para determinar las dosis óptimas de aplicación en base al desempeño del ligante asfáltico a bajas temperaturas.
- Mejorar el desarrollo de optimización química del líquido pirolítico para obtener un producto con menor volatilidad y en consecuencia una menor susceptibilidad al envejecimiento. Además, evaluar el uso de aditivos que disminuyan el punto de inflamación para poder trabajar con mezclas en caliente.
- Evaluar el efecto de incorporar el líquido LPO-M en mezclas asfálticas con uso de material reciclado RAP, considerando la interacción entre los siguientes componentes: ligante, agregados pétreos, rejuvenecedor y RAP. Trabajando con tres procesos diferentes: mezclas asfálticas frías (Cold Mixed Asphalt CMA), mezclas asfálticas semi-tibias (Hot Warm Mixed Asphalt HWMA) y mezclas asfálticas tibias (Warm Mixed Asphalt WMA).

## Referencias

- Airey G., "Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data", Road Materials and Pavement Design, 2002.
- Asphalt Institute. (2014). *Asphalt mix design methods*.
- Asphalt institute, Instituto panamericano de carreteras. (1996). *Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas de Superpave*.
- ASTM International. (2015). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer* (ASTM D7175-15).
- ASTM International. (2007). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder* (D6373-21a).
- ASTM International. (2016). *Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer* (BBR) (D6648-08).
- ASTM International. (2019a). *Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)* (ASTM D2872-19).
- ASTM International. (2019b). *Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurised aging vessel (PAV)* (ASTM D6521-19).
- Behnood, A. (2019). Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *In Journal of Cleaner Production* (Vol. 231, pp. 171–182). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>.
- Cámara de la Industria del Neumático en Chile (CINC). (2022). *Generación de NFU por regiones en Chile*. <https://cinc.cl/estadisticas/> (accessed July 23, 2022).
- Cavalli, M.C., Zaumanis, M., Mazza, E., Partl, M.N., Poulikakos, L.D., 2018b. *Aging effect on rheology and cracking behaviour of reclaimed binder with bio-based rejuvenators*. *J. Clean. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.060>*.
- Chen, M., Leng, B., Wu, S., Sang, Y., 2014a. *Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders*. *Constr. Build. Mater.* DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.033>.
- Concha, J. L., Arteaga-Pérez, L. E., Alpizar-Reyes, L.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. doi.org/10.1080/14680629.2022.2092026.
- C.T. Chiu, M.G. Lee, *Effectiveness of seal rejuvenators for bituminous pavement surfaces*, J. Test. Eval. 34 (5) (2006).
  - Delgadillo, R. (2022). *Apuntes Tecnología del Asfalto*. En departamento de obras civiles, Universidad Técnica Federico Santa María.
  - Delgado, J. S. (2011). *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01. 22: 047)*. Métodos y Materiales, 1, 25-38.
  - De Soliminihac, H., Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2018). *Gestión de Infraestructura Vial*.
  - El América-Diario Digital. (2021, 20 de febrero). Reciclaje de Neumáticos Mineros: “Solo un 17% de los neumáticos mineros se maneja de forma ambientalmente racional”. <https://elamerica.cl/2021/02/20/reciclaje-de-neumaticos-mineros-solo-un-17-de-los-neumaticos-se-maneja-en-forma-ambientalmente-racional/>.
  - González, A. (2012). *Determinación de las Propiedades Viscoelásticas de Betunes Asfálticos Tradicionales y Modificados Mediante la Utilización del Reómetro de Corte Dinámico (DSR)*. [Memoria de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María].
  - González, A., Marzal, I., Delgadillo, R., Concha, J.L., Arteaga-Pérez, L.E., Segura, C., Norambuena-Contreras, J. (2022). *Efecto de rejuvenecedores líquidos y encapsulados basados en pirólisis de neumáticos en las propiedades reológicas de un ligante asfáltico*. XXI Congreso Ibero latinoamericano del Asfalto (CILA). Punta del Este, Uruguay.
  - González, A. (2023). *Efecto de rejuvenecedores líquidos y encapsulados basados en pirólisis de neumáticos en las propiedades reológicas de un ligante asfáltico*. [Memoria de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María].
  - García, A., 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.078>.
  - Hassan A. Tabatabaee & Todd L. Kurth (2017): *Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen*, Road Materials and Pavement Design, DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1304257>.
  - Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2022a). *Manual de Carreteras Sección 8.302.3. Asfaltos: Método de ensaye de penetración*. Dirección de Vialidad, Chile.
  - Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2022b). *Manual de Carreteras Sección 8.302.9. Asfaltos: Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland*. Dirección de Vialidad, Chile.
  - Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2022c). *Manual de Carreteras Sección 8.302.3. Asfaltos: Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de Anillo y bola*. Dirección de Vialidad, Chile.

- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2022d). *Manual de Carreteras Sección 8.302.3. Asfaltos: Método para medir la viscosidad mediante el viscosímetro rotacional*. Dirección de Vialidad, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2022e). *Manual de Carreteras Sección 8.302.22. Asfaltos: Método SUPERPAVE para determinar las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR)*. Dirección de Vialidad, Chile.
- MOP 2016. *Valor del Patrimonio de la Red Vial Nacional*. Departamento de Gestión Vial, Subdirección de Desarrollo, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile, septiembre de 2016.
- MOP 2023. *Red Vial Nacional, Dimensionamiento y Características*. Subdirección de Desarrollo, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2023.
- Nam H. Tran, Ph.D., P.E., LEED GA Adam Taylor, P.E. Richard Willis, Ph.D. (2012). *Effect of rejuvenator on performance properties of hma mixtures with high rap and ras contents*.
- Norambuena, J., Segura, C., Arteaga, L., Delgadillo, R., Vergara, J. (2021). Proyecto FONDEF ID21110127: “Desarrollo de productos rejuvenecedores a partir de la pirólisis de neumáticos fuera de uso para el mejoramiento de las propiedades reológicas y de autorreparación en cementos asfálticos envejecidos”.
- Norambuena-Contreras J, Arteaga-Pérez LE, Concha JL, Gonzalez-Torre I. *Pyrolytic oil from waste tyres as a promising encapsulated rejuvenator for the extrinsic self-healing of bituminous materials*. *Road Mater Pavement* 2021, DOI <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1907216>.
- Norambuena-Contreras J, Yalcin E, Hudson-Griffiths R, García A. *Mechanical and self-healing properties of stone mastic asphalt containing encapsulated rejuvenators*. *J Mater Civil Eng*. 2019;31(5).
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons.
- Prospero, E., & Bocci, E. (2021). *A review on bitumen aging and rejuvenation chemistry: processes, materials and analyses*. *Sustainability*, 13(12), 6523.
- Ramirez-Canon, A., Muñoz-Camelo, Y. F., & Singh, P. (2018). *Decomposition of used Tyre Rubber by pyrolysis: enhancement of the physical properties of the liquid fraction using a hydrogen stream*. *Environments*, 5(6), 72.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The shell bitumen handbook*. Thomas Telford.
- R. Jing, A. Varveri, X. Liu, A. Scarpas, S. Erkens. *Ageing effect on chemo-mechanics of bitumen*, *Road Mater. Pavement Des.* 22 (2019) 1044–1059. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1661275>
- Tran, N., Taylor, A., Willis, R., 2012. *Effect of Rejuvenator on Performance Properties of HMA Mixtures with High RAP and RAS Contents*. Auburn, Alabama.

- Wang, W. L., Chang, J. M., Cai, L. P., & Shi, S. Q. (2014). *Quality improvement of pyrolysis oil from waste rubber by adding sawdust*. *Waste management*, 34(12), 2603-2610.
- Weigel, S., & Stephan, D. (2018). *Relationships between the chemistry and the physical properties of bitumen*. *Road Materials and Pavement Design*, 19(7), 1636-1650.
- Williams, P. T. (2013). *Pyrolysis of waste tyres: a review*. *Waste management*, 33(8), 1714-1728.
- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R., 2014b. *Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications*. *Constr. Build. Mater.* DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.035>.
- Zhao, K., Wang, Y., Chen, L., Li, F., 2018. *Diluting or dissolving? The use of relaxation spectrum to assess rejuvenation effects in asphalt recycling*. *Constr. Build. Mater.* DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.098>.

# ANEXOS

## 7.1. Anexo 1: Barridos de frecuencia- temperatura

### 7.1.1. CA-24 (SE, RTFO y PAV)

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5 a 75°C para el ligante CA-24 en su estado sin envejecer, con envejecimiento RTFO y PAV se presentan desde la Tabla 7.1.1 hasta la Tabla 7.1.6.

Tabla 7.1.1. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 SE (M1). (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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
100	7,9E+07	32	4,7E+07	37	2,5E+07	43	1,3E+07	50	5,9E+06	56	2,7E+06	61	1,2E+06	66	5,8E+05	70	2,4E+05	74	1,2E+05	77	6,1E+04	79	3,2E+04	81	1,7E+04	83	9,1E+03	84	4,9E+03	86
61,1	6,6E+07	34	3,8E+07	39	2,0E+07	45	9,6E+06	52	4,4E+06	58	1,9E+06	63	8,6E+05	68	3,9E+05	72	1,6E+05	75	7,8E+04	78	3,9E+04	80	2,1E+04	81	1,1E+04	83	5,7E+03	84	3,1E+03	86
37,3	5,6E+07	35	3,1E+07	41	1,5E+07	47	7,2E+06	54	3,2E+06	60	1,4E+06	65	5,9E+05	69	2,7E+05	73	1,0E+05	76	5,1E+04	79	2,5E+04	81	1,3E+04	82	6,8E+03	84	3,6E+03	85	1,9E+03	87
22,8	4,6E+07	37	2,5E+07	43	1,2E+07	49	5,4E+06	55	2,3E+06	61	9,6E+05	66	4,1E+05	70	1,8E+05	74	6,9E+04	77	3,3E+04	80	1,6E+04	82	8,3E+03	83	4,3E+03	85	2,2E+03	86	1,2E+03	87
13,9	3,8E+07	39	2,0E+07	44	9,2E+06	51	4,0E+06	57	1,6E+06	63	6,7E+05	68	2,8E+05	72	1,2E+05	75	4,5E+04	78	2,1E+04	80	1,0E+04	82	5,3E+03	84	2,7E+03	85	1,4E+03	87	7,4E+02	88
8,48	3,1E+07	40	1,6E+07	46	7,0E+06	53	2,9E+06	59	1,2E+06	65	4,6E+05	69	1,9E+05	73	7,9E+04	76	2,9E+04	79	1,4E+04	81	6,6E+03	83	3,3E+03	85	1,7E+03	86	8,6E+02	87	4,6E+02	88
5,18	2,5E+07	42	1,2E+07	48	5,3E+06	55	2,1E+06	61	8,2E+05	66	3,2E+05	70	1,3E+05	74	5,2E+04	77	1,9E+04	80	8,7E+03	82	4,2E+03	84	2,1E+03	86	1,0E+03	87	5,3E+02	88	2,8E+02	89
3,16	2,0E+07	44	9,5E+06	50	3,9E+06	56	1,5E+06	62	5,7E+05	67	2,2E+05	71	8,4E+04	75	3,4E+04	77	1,2E+04	81	5,5E+03	83	2,6E+03	85	1,3E+03	86	6,4E+02	87	3,3E+02	88	1,7E+02	89
1,93	1,6E+07	46	7,3E+06	52	2,9E+06	58	1,1E+06	64	4,0E+05	69	1,5E+05	73	5,6E+04	76	2,3E+04	78	7,7E+03	82	3,5E+03	84	1,6E+03	86	8,0E+02	87	4,0E+02	88	2,0E+02	89	1,1E+02	89
1,18	1,3E+07	47	5,6E+06	54	2,1E+06	60	7,7E+05	66	2,7E+05	70	9,9E+04	74	3,7E+04	77	1,5E+04	79	4,9E+03	83	2,2E+03	85	1,0E+03	86	5,0E+02	88	2,4E+02	88	1,2E+02	89	6,5E+01	89
0,72	1,0E+07	49	4,2E+06	55	1,6E+06	62	5,4E+05	67	1,9E+05	71	6,7E+04	75	2,5E+04	78	9,6E+03	80	3,1E+03	84	1,4E+03	86	6,4E+02	87	3,1E+02	88	1,5E+02	89	7,6E+01	89	4,0E+01	89
0,44	7,9E+06	51	3,2E+06	57	1,1E+06	63	3,8E+05	68	1,3E+05	72	4,5E+04	76	1,6E+04	79	6,2E+03	81	2,0E+03	85	8,6E+02	87	3,9E+02	88	1,9E+02	89	9,2E+01	89	4,6E+01	89	2,4E+01	89
0,27	6,2E+06	53	2,4E+06	59	8,2E+05	65	2,7E+05	69	8,8E+04	73	3,0E+04	77	1,1E+04	80	4,0E+03	82	1,2E+03	86	5,3E+02	87	2,4E+02	88	1,1E+02	89	5,6E+01	89	2,8E+01	89	1,5E+01	89
0,16	4,9E+06	54	1,8E+06	61	5,9E+05	66	1,9E+05	70	6,1E+04	74	2,0E+04	78	6,9E+03	80	2,5E+03	83	7,6E+02	87	3,3E+02	88	1,5E+02	89	7,0E+01	89	3,4E+01	89	1,7E+01	89	8,9E+00	89
0,1	3,9E+06	56	1,4E+06	62	4,3E+05	67	1,3E+05	72	4,1E+04	75	1,3E+04	78	4,5E+03	82	1,6E+03	84	4,8E+02	87	2,0E+02	88	9,1E+01	89	4,3E+01	89	2,1E+01	89	1,0E+01	89	5,5E+00	88

Tabla 7.1.2. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 SE (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	7,8E+07	32	4,5E+07	37	2,4E+07	43	1,2E+07	50	5,7E+06	56	2,6E+06	62	1,2E+06	67	5,6E+05	71	2,3E+05	75	1,1E+05	77	5,7E+04	79	3,0E+04	81	1,6E+04	82	8,5E+03	84	4,8E+03	85
61,1	6,6E+07	33	3,7E+07	39	1,9E+07	45	9,2E+06	52	4,2E+06	58	1,9E+06	63	8,3E+05	68	3,8E+05	72	1,5E+05	76	7,3E+04	78	3,7E+04	80	1,9E+04	82	9,9E+03	83	5,3E+03	85	3,0E+03	86
37,3	5,5E+07	35	3,0E+07	41	1,5E+07	47	6,9E+06	54	3,0E+06	60	1,3E+06	65	5,7E+05	69	2,6E+05	73	9,9E+04	77	4,7E+04	79	2,4E+04	81	1,2E+04	82	6,3E+03	84	3,3E+03	85	1,9E+03	86
22,8	4,6E+07	36	2,4E+07	42	1,2E+07	49	5,1E+06	55	2,2E+06	61	9,2E+05	66	3,9E+05	70	1,7E+05	74	6,5E+04	78	3,1E+04	80	1,5E+04	82	7,8E+03	83	3,9E+03	85	2,1E+03	86	1,2E+03	87
13,9	3,8E+07	38	1,9E+07	44	8,9E+06	51	3,8E+06	57	1,6E+06	63	6,4E+05	68	2,7E+05	72	1,2E+05	75	4,2E+04	78	2,0E+04	81	9,7E+03	82	4,9E+03	84	2,5E+03	85	1,3E+03	87	7,2E+02	88
8,48	3,1E+07	40	1,5E+07	46	6,7E+06	53	2,8E+06	59	1,1E+06	65	4,4E+05	69	1,8E+05	73	7,7E+04	76	2,7E+04	79	1,3E+04	82	6,2E+03	83	3,1E+03	85	1,5E+03	86	8,1E+02	87	4,4E+02	88
5,18	2,5E+07	41	1,2E+07	48	5,1E+06	54	2,0E+06	61	7,8E+05	66	3,0E+05	70	1,2E+05	74	5,1E+04	77	1,8E+04	80	8,1E+03	82	3,9E+03	84	1,9E+03	86	9,6E+02	87	5,0E+02	88	2,7E+02	88
3,16	2,0E+07	43	9,3E+06	50	3,8E+06	56	1,4E+06	62	5,4E+05	67	2,1E+05	72	8,1E+04	75	3,3E+04	78	1,1E+04	81	5,2E+03	83	2,4E+03	85	1,2E+03	86	5,9E+02	87	3,1E+02	88	1,7E+02	89
1,93	1,6E+07	45	7,1E+06	52	2,8E+06	58	1,0E+06	64	3,8E+05	69	1,4E+05	73	5,4E+04	76	2,2E+04	79	7,3E+03	82	3,3E+03	84	1,5E+03	86	7,5E+02	87	3,7E+02	88	1,9E+02	89	1,0E+02	89
1,18	1,3E+07	47	5,4E+06	53	2,1E+06	60	7,4E+05	66	2,6E+05	70	9,5E+04	74	3,6E+04	77	1,4E+04	80	4,6E+03	83	2,1E+03	85	9,6E+02	86	4,6E+02	88	2,3E+02	88	1,2E+02	89	6,3E+01	89
0,72	1,0E+07	49	4,1E+06	55	1,5E+06	61	5,2E+05	67	1,8E+05	71	6,4E+04	75	2,3E+04	78	9,2E+03	81	2,9E+03	84	1,3E+03	86	5,9E+02	87	2,9E+02	88	1,4E+02	89	7,1E+01	89	3,9E+01	89
0,44	8,0E+06	50	3,1E+06	57	1,1E+06	63	3,7E+05	68	1,2E+05	72	4,3E+04	76	1,5E+04	79	5,9E+03	82	1,8E+03	85	8,0E+02	86	3,7E+02	88	1,8E+02	88	8,5E+01	89	4,3E+01	89	2,4E+01	89
0,27	6,3E+06	52	2,4E+06	59	8,0E+05	65	2,6E+05	70	8,5E+04	73	2,9E+04	77	1,0E+04	80	3,8E+03	83	1,1E+03	86	5,0E+02	87	2,3E+02	88	1,1E+02	89	5,2E+01	89	2,7E+01	89	1,4E+01	89
0,16	5,0E+06	54	1,8E+06	60	5,8E+05	66	1,8E+05	71	5,8E+04	74	1,9E+04	78	6,6E+03	81	2,4E+03	84	7,2E+02	87	3,1E+02	88	1,4E+02	88	6,6E+01	88	3,2E+01	89	1,6E+01	89	8,9E+00	88
0,1	3,9E+06	55	1,3E+06	62	4,2E+05	67	1,3E+05	72	4,0E+04	75	1,3E+04	79	4,3E+03	82	1,5E+03	85	4,5E+02	87	1,9E+02	88	8,5E+01	88	4,0E+01	89	1,9E+01	89	9,9E+00	89	5,4E+00	88

Tabla 7.1.3. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 RTFO (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	7,4E+07	29	4,7E+07	33	2,7E+07	38	1,5E+07	43	7,7E+06	48	3,9E+06	53	2,0E+06	58	1,0E+06	62	4,8E+05	67	2,4E+05	70	1,3E+05	73	6,7E+04	75	3,5E+04	77	1,9E+04	79	1,0E+04	81
61,1	6,4E+07	30	3,9E+07	35	2,2E+07	40	1,2E+07	45	5,9E+06	50	2,9E+06	55	1,5E+06	60	7,3E+05	64	3,3E+05	68	1,6E+05	71	8,5E+04	74	4,4E+04	76	2,3E+04	78	1,2E+04	80	6,5E+03	82
37,3	5,4E+07	31	3,3E+07	36	1,8E+07	41	9,1E+06	46	4,5E+06	52	2,2E+06	56	1,1E+06	61	5,2E+05	65	2,3E+05	69	1,1E+05	72	5,6E+04	75	2,9E+04	77	1,5E+04	79	7,8E+03	82	4,2E+03	84

<b>22,8</b>	4,6E+07	33	2,7E+07	37	1,4E+07	42	7,1E+06	48	3,4E+06	53	1,6E+06	58	7,6E+05	62	3,6E+05	66	1,5E+05	70	7,5E+04	73	3,7E+04	76	1,9E+04	78	9,5E+03	80	4,9E+03	82	2,6E+03	84
<b>13,9</b>	3,9E+07	34	2,2E+07	39	1,1E+07	44	5,5E+06	49	2,6E+06	54	1,2E+06	59	5,4E+05	63	2,5E+05	67	1,0E+05	71	5,0E+04	74	2,5E+04	77	1,2E+04	79	6,1E+03	81	3,1E+03	83	1,7E+03	85
<b>8,48</b>	3,3E+07	35	1,8E+07	40	8,9E+06	45	4,2E+06	51	1,9E+06	56	8,5E+05	61	3,8E+05	65	1,8E+05	68	7,1E+04	72	3,3E+04	75	1,6E+04	78	8,0E+03	80	3,9E+03	82	2,0E+03	84	1,0E+03	86
<b>5,18</b>	2,7E+07	37	1,5E+07	42	7,0E+06	47	3,2E+06	52	1,4E+06	57	6,1E+05	62	2,7E+05	66	1,2E+05	69	4,8E+04	73	2,2E+04	76	1,1E+04	79	5,1E+03	81	2,5E+03	83	1,2E+03	85	6,4E+02	86
<b>3,16</b>	2,2E+07	38	1,2E+07	43	5,5E+06	49	2,4E+06	54	1,0E+06	59	4,3E+05	63	1,9E+05	67	8,3E+04	70	3,2E+04	75	1,4E+04	77	6,8E+03	80	3,3E+03	82	1,6E+03	84	7,8E+02	86	4,0E+02	87
<b>1,93</b>	1,8E+07	39	9,3E+06	45	4,2E+06	50	1,8E+06	55	7,5E+05	60	3,1E+05	64	1,3E+05	68	5,7E+04	71	2,1E+04	76	9,5E+03	79	4,4E+03	81	2,1E+03	83	9,8E+02	85	4,8E+02	87	2,5E+02	88
<b>1,18</b>	1,5E+07	41	7,4E+06	46	3,3E+06	52	1,4E+06	57	5,4E+05	61	2,2E+05	65	9,0E+04	69	3,9E+04	72	1,4E+04	77	6,2E+03	80	2,8E+03	82	1,3E+03	84	6,1E+02	86	3,0E+02	87	1,5E+02	88
<b>0,72</b>	1,2E+07	42	5,9E+06	48	2,5E+06	53	1,0E+06	58	3,9E+05	63	1,5E+05	67	6,2E+04	70	2,6E+04	74	9,1E+03	78	4,0E+03	81	1,8E+03	83	8,2E+02	85	3,8E+02	87	1,9E+02	88	9,3E+01	89
<b>0,44</b>	1,0E+07	44	4,6E+06	49	1,9E+06	55	7,4E+05	60	2,8E+05	64	1,1E+05	68	4,3E+04	71	1,8E+04	75	5,9E+03	80	2,5E+03	82	1,1E+03	84	5,1E+02	86	2,3E+02	88	1,1E+02	88	5,7E+01	89
<b>0,27</b>	8,2E+06	45	3,6E+06	51	1,4E+06	56	5,5E+05	61	2,0E+05	65	7,6E+04	69	2,9E+04	73	1,2E+04	76	3,8E+03	81	1,6E+03	83	7,0E+02	85	3,2E+02	87	1,4E+02	88	6,9E+01	89	3,5E+01	89
<b>0,16</b>	6,7E+06	47	2,9E+06	52	1,1E+06	58	4,0E+05	62	1,5E+05	66	5,3E+04	70	2,0E+04	74	7,8E+03	77	2,5E+03	82	1,0E+03	84	4,4E+02	86	1,9E+02	88	8,8E+01	89	4,2E+01	89	2,1E+01	89
<b>0,1</b>	5,5E+06	48	2,3E+06	53	8,4E+05	59	3,0E+05	63	1,0E+05	67	3,7E+04	71	1,4E+04	75	5,2E+03	79	1,6E+03	83	6,3E+02	86	2,7E+02	87	1,2E+02	88	5,4E+01	89	2,6E+01	89	1,3E+01	89

Tabla 7.1.4. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 RTFO (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	8,2E+07	28	5,2E+07	33	3,0E+07	38	1,6E+07	43	8,6E+06	48	4,4E+06	53	2,2E+06	58	1,1E+06	62	4,6E+05	67	2,4E+05	70	1,2E+05	73	6,5E+04	75	3,4E+04	77	1,8E+04	79	1,0E+04	81
<b>61,1</b>	7,0E+07	30	4,4E+07	34	2,4E+07	39	1,3E+07	44	6,6E+06	49	3,3E+06	54	1,6E+06	59	8,1E+05	63	3,2E+05	68	1,6E+05	71	8,2E+04	74	4,3E+04	76	2,2E+04	78	1,2E+04	80	6,4E+03	82
<b>37,3</b>	6,0E+07	31	3,6E+07	35	2,0E+07	40	1,0E+07	46	5,1E+06	51	2,4E+06	56	1,2E+06	60	5,8E+05	64	2,2E+05	69	1,1E+05	72	5,5E+04	75	2,8E+04	77	1,4E+04	79	7,5E+03	82	4,1E+03	84
<b>22,8</b>	5,1E+07	32	3,0E+07	37	1,6E+07	42	8,0E+06	47	3,8E+06	53	1,8E+06	57	8,4E+05	62	4,0E+05	65	1,5E+05	70	7,3E+04	73	3,6E+04	76	1,9E+04	78	9,3E+03	80	4,8E+03	82	2,6E+03	84
<b>13,9</b>	4,3E+07	33	2,5E+07	38	1,3E+07	43	6,2E+06	49	2,9E+06	54	1,3E+06	59	6,0E+05	63	2,8E+05	67	1,0E+05	71	4,9E+04	74	2,4E+04	77	1,2E+04	79	5,9E+03	81	3,0E+03	83	1,6E+03	85
<b>8,48</b>	3,7E+07	35	2,0E+07	40	1,0E+07	45	4,7E+06	50	2,1E+06	55	9,6E+05	60	4,3E+05	64	2,0E+05	68	6,9E+04	73	3,2E+04	75	1,6E+04	78	7,8E+03	80	3,8E+03	82	1,9E+03	84	1,0E+03	86
<b>5,18</b>	3,0E+07	36	1,6E+07	41	7,9E+06	46	3,6E+06	52	1,6E+06	57	61	3,0E+05	65	1,4E+05	69	4,6E+04	74	2,1E+04	76	1,0E+04	79	5,0E+03	81	2,4E+03	83	1,2E+03	85	6,3E+02	86	
<b>3,16</b>	2,5E+07	37	1,3E+07	43	6,2E+06	48	2,7E+06	53	1,2E+06	58	4,9E+05	63	2,1E+05	67	9,3E+04	70	3,1E+04	75	1,4E+04	77	6,6E+03	80	3,2E+03	82	1,5E+03	84	7,5E+02	86	3,9E+02	87
<b>1,93</b>	2,1E+07	39	1,1E+07	44	4,8E+06	49	2,1E+06	55	8,5E+05	60	3,5E+05	64	1,5E+05	68	6,4E+04	71	2,0E+04	76	9,2E+03	79	4,3E+03	81	2,0E+03	83	9,5E+02	85	4,7E+02	87	2,4E+02	88
<b>1,18</b>	1,7E+07	40	8,4E+06	46	3,7E+06	51	1,5E+06	56	6,2E+05	61	2,5E+05	65	1,0E+05	69	4,3E+04	72	1,3E+04	77	6,0E+03	80	2,7E+03	82	1,3E+03	84	5,9E+02	86	2,9E+02	87	1,5E+02	88

<b>0,72</b>	1,4E+07	42	6,7E+06	47	2,9E+06	53	1,1E+06	58	4,5E+05	62	1,8E+05	66	7,0E+04	70	2,9E+04	73	8,8E+03	78	3,8E+03	81	1,7E+03	84	8,0E+02	85	3,7E+02	87	1,8E+02	88	9,1E+01	89
<b>0,44</b>	1,1E+07	43	5,3E+06	49	2,2E+06	54	8,5E+05	59	3,2E+05	64	1,2E+05	67	4,8E+04	71	2,0E+04	75	5,7E+03	80	2,5E+03	82	1,1E+03	84	5,0E+02	86	2,3E+02	87	1,1E+02	88	5,6E+01	89
<b>0,27</b>	9,4E+06	44	4,2E+06	50	1,7E+06	55	6,3E+05	61	2,3E+05	65	8,6E+04	69	3,3E+04	72	1,3E+04	76	3,7E+03	81	1,6E+03	84	6,8E+02	85	3,1E+02	87	1,4E+02	88	6,7E+01	89	3,4E+01	89
<b>0,16</b>	7,7E+06	46	3,3E+06	51	1,3E+06	57	4,7E+05	62	1,7E+05	66	6,1E+04	70	2,3E+04	74	8,8E+03	77	2,4E+03	82	9,8E+02	84	4,2E+02	86	1,9E+02	88	8,5E+01	88	4,1E+01	89	2,1E+01	89
<b>0,1</b>	6,3E+06	47	2,6E+06	53	9,7E+05	58	3,4E+05	63	1,2E+05	67	4,2E+04	71	1,5E+04	75	5,8E+03	79	1,5E+03	83	6,1E+02	85	2,6E+02	87	1,2E+02	88	5,2E+01	89	2,5E+01	89	1,3E+01	89

Tabla 7.1.5. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 PAV (M1). (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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
<b>100</b>	1,0E+08	24	6,9E+07	27	4,4E+07	31	2,6E+07	35	1,5E+07	38	8,8E+06	42	4,8E+06	46	2,6E+06	50	1,4E+06	55	7,6E+05	58	4,1E+05	61	2,2E+05	64	1,2E+05	67	6,5E+04	70	3,6E+04	73		
<b>61,1</b>	8,8E+07	25	6,0E+07	28	3,7E+07	32	2,2E+07	36	1,3E+07	40	7,0E+06	44	3,8E+06	48	2,0E+06	51	1,0E+06	56	5,5E+05	59	2,9E+05	62	1,6E+05	65	8,3E+04	68	4,4E+04	71	2,4E+04	74		
<b>37,3</b>	7,7E+07	26	5,1E+07	29	3,1E+07	33	1,8E+07	37	1,0E+07	41	5,5E+06	45	2,9E+06	49	1,5E+06	53	7,6E+05	57	4,0E+05	60	2,1E+05	64	1,1E+05	67	5,7E+04	69	3,0E+04	72	1,6E+04	75		
<b>22,8</b>	6,7E+07	27	4,4E+07	30	2,6E+07	34	1,5E+07	38	8,1E+06	42	4,3E+06	46	2,2E+06	50	1,1E+06	54	5,6E+05	58	2,9E+05	61	1,5E+05	65	7,6E+04	68	3,9E+04	71	2,0E+04	74	1,1E+04	76		
<b>13,9</b>	5,9E+07	28	3,8E+07	31	2,2E+07	35	1,2E+07	39	6,5E+06	43	3,4E+06	47	1,7E+06	51	8,3E+05	55	4,0E+05	60	2,0E+05	63	1,0E+05	66	5,2E+04	69	2,6E+04	72	1,3E+04	75	6,9E+03	78		
<b>8,48</b>	5,1E+07	29	3,2E+07	32	1,8E+07	36	9,9E+06	40	5,1E+06	44	2,6E+06	48	1,3E+06	52	6,1E+05	56	2,9E+05	61	1,4E+05	64	7,2E+04	67	3,6E+04	70	1,8E+04	73	8,8E+03	76	4,5E+03	79		
<b>5,18</b>	4,4E+07	29	2,7E+07	33	1,5E+07	37	8,0E+06	41	4,1E+06	45	2,0E+06	49	9,7E+05	53	4,5E+05	57	2,1E+05	62	1,0E+05	65	5,0E+04	68	2,4E+04	71	1,2E+04	74	5,8E+03	78	2,9E+03	80		
<b>3,16</b>	3,8E+07	30	2,3E+07	34	1,2E+07	38	6,4E+06	42	3,2E+06	46	1,5E+06	51	7,2E+05	55	3,3E+05	58	1,5E+05	63	7,1E+04	66	3,4E+04	69	1,6E+04	73	7,8E+03	76	3,8E+03	79	1,9E+03	82		
<b>1,93</b>	3,2E+07	31	1,9E+07	35	1,0E+07	39	5,2E+06	43	2,5E+06	48	1,2E+06	52	5,4E+05	56	2,4E+05	59	1,1E+05	64	5,0E+04	67	2,3E+04	71	1,1E+04	74	5,1E+03	77	2,4E+03	80	1,2E+03	83		
<b>1,18</b>	2,8E+07	32	1,6E+07	36	8,4E+06	40	4,1E+06	45	1,9E+06	49	8,9E+05	53	4,0E+05	57	1,7E+05	61	7,5E+04	65	3,4E+04	69	1,6E+04	72	7,3E+03	76	3,3E+03	79	1,6E+03	82	7,5E+02	84		
<b>0,72</b>	2,4E+07	33	1,3E+07	37	6,8E+06	41	3,3E+06	46	1,5E+06	50	6,7E+05	54	2,9E+05	58	1,3E+05	62	5,2E+04	67	2,4E+04	70	1,1E+04	74	4,8E+03	77	2,2E+03	80	1,0E+03	83	4,7E+02	85		
<b>0,44</b>	2,0E+07	34	1,1E+07	38	5,5E+06	43	2,6E+06	47	1,2E+06	51	5,0E+05	56	2,2E+05	60	9,0E+04	63	3,6E+04	68	1,6E+04	72	7,1E+03	75	3,1E+03	79	1,4E+03	82	6,3E+02	84	3,0E+02	86		
<b>0,27</b>	1,7E+07	35	9,2E+06	40	4,5E+06	44	2,0E+06	48	8,8E+05	53	3,8E+05	57	1,6E+05	61	6,4E+04	65	2,5E+04	70	1,1E+04	73	4,7E+03	77	2,0E+03	80	8,7E+02	83	3,9E+02	85	1,8E+02	87		
<b>0,16</b>	1,5E+07	37	7,7E+06	41	3,6E+06	45	1,6E+06	50	6,8E+05	54	2,8E+05	58	1,1E+05	62	4,5E+04	66	1,7E+04	71	7,2E+03	75	3,0E+03	78	1,3E+03	82	5,5E+02	84	2,4E+02	86	1,1E+02	87		
<b>0,1</b>	1,3E+07	38	6,4E+06	42	2,9E+06	46	1,3E+06	51	5,2E+05	55	2,1E+05	60	8,3E+04	64	3,2E+04	67	1,2E+04	73	4,8E+03	76	2,0E+03	80	8,2E+02	83	3,4E+02	85	1,5E+02	87	7,2E+01	87		

Tabla 7.1.6. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 PAV (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ		
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]		
100	9,9E+07	24	6,8E+07	27	4,3E+07	31	2,6E+07	34	1,5E+07	38	8,5E+06	42	4,7E+06	46	2,6E+06	50	1,3E+06	55	7,3E+05	59	4,0E+05	62	2,1E+05	65	1,2E+05	68	6,2E+04	70	3,4E+04	73		
61,1	8,7E+07	25	5,8E+07	28	3,6E+07	32	2,1E+07	35	1,2E+07	40	6,8E+06	43	3,7E+06	48	2,0E+06	51	1,0E+06	56	5,3E+05	60	2,8E+05	63	1,5E+05	66	7,9E+04	69	4,2E+04	72	2,3E+04	74		
37,3	7,6E+07	26	5,0E+07	29	3,1E+07	33	1,8E+07	37	9,9E+06	41	5,4E+06	45	2,8E+06	49	1,5E+06	53	7,3E+05	58	3,8E+05	61	2,0E+05	64	1,0E+05	67	5,4E+04	70	2,9E+04	73	1,5E+04	76		
22,8	6,7E+07	27	4,3E+07	30	2,6E+07	34	1,5E+07	38	7,9E+06	42	4,2E+06	46	2,2E+06	50	1,1E+06	54	5,3E+05	59	2,7E+05	62	1,4E+05	65	7,2E+04	68	3,7E+04	71	1,9E+04	74	1,0E+04	77		
13,9	5,8E+07	28	3,7E+07	31	2,1E+07	35	1,2E+07	39	6,3E+06	43	3,3E+06	47	1,7E+06	51	8,3E+05	55	3,9E+05	60	1,9E+05	63	9,8E+04	66	5,0E+04	69	2,5E+04	72	1,3E+04	75	6,6E+03	78		
8,48	5,0E+07	28	3,1E+07	32	1,8E+07	36	9,7E+06	40	5,0E+06	44	2,5E+06	48	1,3E+06	52	6,1E+05	56	2,8E+05	61	1,4E+05	64	6,8E+04	67	3,4E+04	70	1,7E+04	73	8,4E+03	76	4,3E+03	79		
5,18	4,4E+07	29	2,7E+07	33	1,5E+07	37	7,8E+06	41	4,0E+06	45	1,9E+06	49	9,4E+05	53	4,5E+05	57	2,0E+05	62	9,7E+04	65	4,7E+04	68	2,3E+04	72	1,1E+04	75	5,5E+03	78	2,8E+03	81		
3,16	3,7E+07	30	2,2E+07	34	1,2E+07	38	6,3E+06	42	3,1E+06	46	1,5E+06	50	7,1E+05	55	3,3E+05	58	1,4E+05	63	6,8E+04	66	3,2E+04	70	1,6E+04	73	7,4E+03	76	3,6E+03	79	1,8E+03	82		
1,93	3,2E+07	31	1,9E+07	35	1,0E+07	39	5,0E+06	43	2,4E+06	48	1,1E+06	52	5,3E+05	56	2,4E+05	59	1,0E+05	65	4,7E+04	68	2,2E+04	71	1,0E+04	74	4,9E+03	78	2,3E+03	81	1,1E+03	83		
1,18	2,7E+07	32	1,6E+07	36	8,2E+06	40	4,0E+06	44	1,9E+06	49	8,6E+05	53	3,9E+05	57	1,7E+05	61	7,1E+04	66	3,2E+04	69	1,5E+04	72	6,9E+03	76	3,2E+03	79	1,5E+03	82	7,2E+02	84		
0,72	2,3E+07	33	1,3E+07	37	6,6E+06	41	3,2E+06	46	1,5E+06	50	6,5E+05	54	2,9E+05	58	1,3E+05	62	5,0E+04	67	2,2E+04	70	1,0E+04	74	4,5E+03	77	2,0E+03	81	9,4E+02	83	4,5E+02	85		
0,44	2,0E+07	34	1,1E+07	38	5,4E+06	43	2,5E+06	47	1,1E+06	51	4,9E+05	56	2,1E+05	60	9,0E+04	63	3,4E+04	68	1,5E+04	72	6,6E+03	75	2,9E+03	79	1,3E+03	82	5,9E+02	84	2,8E+02	86		
0,27	1,7E+07	35	9,0E+06	39	4,4E+06	44	2,0E+06	48	8,6E+05	53	3,7E+05	57	1,5E+05	61	6,4E+04	65	2,4E+04	70	1,0E+04	74	4,4E+03	77	1,9E+03	80	8,2E+02	83	3,7E+02	85	1,8E+02	87		
0,16	1,5E+07	36	7,5E+06	41	3,5E+06	45	1,6E+06	50	6,6E+05	54	2,7E+05	58	1,1E+05	62	4,5E+04	66	1,6E+04	71	6,8E+03	75	2,9E+03	79	1,2E+03	82	5,2E+02	85	2,3E+02	86	1,1E+02	88		
0,1	1,3E+07	37	6,2E+06	42	2,8E+06	46	1,2E+06	51	5,1E+05	55	2,0E+05	59	8,1E+04	63	3,2E+04	67	1,1E+04	73	4,5E+03	77	1,8E+03	80	7,7E+02	83	3,2E+02	86	1,4E+02	87	6,9E+01	86		

### 7.1.2. CA-14 (SE, RTFO y PAV)

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5 a 75°C para el ligante CA-14 en su estado sin envejecer, con envejecimiento RTFO y PAV se presentan desde la Tabla 7.1.7 hasta la Tabla 7.1.12.

Tabla 7.1.7. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 SE (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ		

[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	8,5E+07	31	5,0E+07	35	2,7E+07	40	1,3E+07	46	6,0E+06	52	2,5E+06	59	9,5E+05	65	4,3E+05	70	1,5E+05	75	7,5E+04	77	3,9E+04	79	2,1E+04	81	1,1E+04	82	6,0E+03	84	3,4E+03	87
61,1	7,2E+07	32	4,1E+07	37	2,2E+07	42	1,0E+07	48	4,6E+06	54	1,8E+06	60	6,6E+05	66	2,9E+05	71	9,9E+04	76	4,9E+04	78	2,5E+04	80	1,4E+04	81	7,0E+03	83	3,8E+03	84	2,1E+03	87
37,3	6,1E+07	33	3,4E+07	38	1,7E+07	43	8,0E+06	49	3,4E+06	55	1,3E+06	61	4,6E+05	67	2,0E+05	71	6,5E+04	76	3,2E+04	78	1,6E+04	80	8,7E+03	82	4,5E+03	84	2,4E+03	85	1,3E+03	87
22,8	5,1E+07	34	2,8E+07	39	1,4E+07	44	6,2E+06	50	2,5E+06	57	9,3E+05	63	3,2E+05	69	1,3E+05	72	4,3E+04	77	2,1E+04	79	1,1E+04	81	5,5E+03	83	2,8E+03	84	1,5E+03	86	8,2E+02	87
13,9	4,3E+07	36	2,3E+07	41	1,1E+07	46	4,7E+06	52	1,9E+06	58	6,7E+05	64	2,2E+05	70	9,0E+04	73	2,8E+04	78	1,3E+04	80	6,8E+03	82	3,5E+03	83	1,8E+03	85	9,3E+02	86	5,1E+02	87
8,48	3,6E+07	37	1,8E+07	42	8,5E+06	47	3,5E+06	53	1,4E+06	59	4,7E+05	65	1,5E+05	71	6,1E+04	74	1,8E+04	79	8,7E+03	81	4,3E+03	83	2,2E+03	84	1,1E+03	86	5,8E+02	87	3,2E+02	88
5,18	3,0E+07	38	1,5E+07	43	6,6E+06	49	2,7E+06	55	9,9E+05	60	3,3E+05	66	1,0E+05	71	4,0E+04	75	1,2E+04	80	5,6E+03	82	2,7E+03	84	1,4E+03	85	6,9E+02	86	3,6E+02	87	1,9E+02	88
3,16	2,4E+07	39	1,2E+07	45	5,1E+06	50	2,0E+06	56	7,2E+05	61	2,3E+05	67	7,0E+04	72	2,7E+04	76	7,6E+03	81	3,5E+03	83	1,7E+03	84	8,7E+02	86	4,3E+02	87	2,2E+02	88	1,2E+02	89
1,93	2,0E+07	40	9,3E+06	46	3,9E+06	51	1,5E+06	57	5,2E+05	62	1,6E+05	68	4,7E+04	73	1,8E+04	77	4,9E+03	82	2,3E+03	84	1,1E+03	85	5,4E+02	86	2,7E+02	88	1,4E+02	88	7,3E+01	89
1,18	1,6E+07	42	7,4E+06	47	3,0E+06	53	1,1E+06	58	3,8E+05	63	1,1E+05	69	3,2E+04	74	1,2E+04	78	3,1E+03	83	1,4E+03	84	6,8E+02	86	3,4E+02	87	1,6E+02	88	8,3E+01	89	4,5E+01	89
0,72	1,3E+07	43	5,8E+06	49	2,3E+06	54	8,2E+05	59	2,7E+05	64	8,0E+04	69	2,2E+04	75	7,7E+03	79	2,0E+03	84	8,9E+02	85	4,2E+02	87	2,1E+02	88	1,0E+02	88	5,1E+01	89	2,8E+01	89
0,44	1,1E+07	44	4,6E+06	50	1,8E+06	55	6,1E+05	60	2,0E+05	65	5,6E+04	70	1,4E+04	76	5,0E+03	80	1,3E+03	84	5,6E+02	86	2,6E+02	87	1,3E+02	88	6,2E+01	89	3,1E+01	89	1,7E+01	90
0,27	8,9E+06	45	3,7E+06	51	1,4E+06	56	4,6E+05	61	1,4E+05	66	3,9E+04	71	9,8E+03	77	3,3E+03	81	7,9E+02	85	3,5E+02	87	1,6E+02	88	7,8E+01	89	3,8E+01	89	1,9E+01	89	1,0E+01	89
0,16	7,3E+06	46	2,9E+06	52	1,1E+06	57	3,4E+05	62	1,0E+05	66	2,7E+04	71	6,6E+03	77	2,1E+03	82	4,9E+02	86	2,2E+02	87	9,9E+01	88	4,8E+01	89	2,3E+01	89	1,2E+01	90	6,3E+00	89
0,1	6,1E+06	48	2,3E+06	53	8,1E+05	58	2,6E+05	63	7,5E+04	67	1,9E+04	72	4,5E+03	78	1,4E+03	82	3,1E+02	87	1,3E+02	88	6,1E+01	89	2,9E+01	89	1,4E+01	90	7,1E+00	89	3,9E+00	88

Tabla 7.1.8. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 SE (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ		
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	8,3E+07	31	5,0E+07	36	2,7E+07	41	1,4E+07	46	6,3E+06	53	2,6E+06	60	9,8E+05	66	4,4E+05	70	1,4E+05	75	7,2E+04	77	3,8E+04	79	2,0E+04	80	1,1E+04	83	5,8E+03	84	3,3E+03	86		
61,1	7,0E+07	32	4,1E+07	37	2,2E+07	42	1,1E+07	48	4,7E+06	54	1,9E+06	61	6,8E+05	67	3,0E+05	71	9,3E+04	76	4,7E+04	78	2,4E+04	80	1,3E+04	81	6,8E+03	83	3,7E+03	84	2,0E+03	86		
37,3	6,0E+07	33	3,4E+07	38	1,8E+07	43	8,2E+06	49	3,5E+06	56	1,3E+06	62	4,7E+05	69	2,0E+05	72	6,1E+04	77	3,0E+04	79	1,6E+04	81	8,3E+03	82	4,3E+03	84	2,3E+03	85	1,3E+03	86		
22,8	5,0E+07	35	2,8E+07	39	1,4E+07	45	6,3E+06	51	2,6E+06	57	9,5E+05	64	3,2E+05	70	1,3E+05	73	4,0E+04	78	2,0E+04	80	1,0E+04	81	5,3E+03	83	2,7E+03	84	1,4E+03	86	7,9E+02	87		
13,9	4,2E+07	36	2,3E+07	41	1,1E+07	46	4,8E+06	52	1,9E+06	59	6,7E+05	65	2,2E+05	71	9,0E+04	74	2,6E+04	78	1,3E+04	80	6,5E+03	82	3,3E+03	83	1,7E+03	85	9,0E+02	86	4,9E+02	87		
8,48	3,5E+07	37	1,8E+07	42	8,6E+06	48	3,6E+06	54	1,4E+06	60	4,7E+05	66	1,5E+05	72	6,0E+04	75	1,7E+04	79	8,2E+03	81	4,1E+03	83	2,1E+03	84	1,1E+03	86	5,6E+02	87	3,0E+02	88		
5,18	2,9E+07	38	1,5E+07	43	6,6E+06	49	2,7E+06	55	1,0E+06	61	3,3E+05	67	1,0E+05	72	4,0E+04	76	1,1E+04	80	5,2E+03	82	2,6E+03	84	1,3E+03	85	6,7E+02	86	3,5E+02	87	1,9E+02	88		

<b>3,16</b>	2,4E+07	40	1,2E+07	45	5,1E+06	51	2,0E+06	57	7,2E+05	63	2,3E+05	68	6,9E+04	73	2,6E+04	77	7,1E+03	81	3,3E+03	83	1,6E+03	84	8,3E+02	86	4,2E+02	87	2,1E+02	88	1,2E+02	89
<b>1,93</b>	1,9E+07	41	9,3E+06	46	3,9E+06	52	1,5E+06	58	5,2E+05	64	1,6E+05	69	4,7E+04	74	1,7E+04	78	4,6E+03	82	2,1E+03	84	1,0E+03	85	5,2E+02	86	2,6E+02	88	1,3E+02	88	7,1E+01	89
<b>1,18</b>	1,6E+07	42	7,3E+06	48	3,0E+06	53	1,1E+06	59	3,7E+05	65	1,1E+05	70	3,1E+04	75	1,1E+04	79	2,9E+03	83	1,3E+03	85	6,5E+02	86	3,2E+02	87	1,6E+02	88	8,1E+01	89	4,4E+01	89
<b>0,72</b>	1,3E+07	43	5,8E+06	49	2,3E+06	55	8,1E+05	60	2,6E+05	66	7,7E+04	71	2,1E+04	76	7,4E+03	80	1,9E+03	84	8,4E+02	85	4,0E+02	87	2,0E+02	88	9,8E+01	89	5,0E+01	89	2,7E+01	89
<b>0,44</b>	1,0E+07	45	4,6E+06	50	1,8E+06	56	6,0E+05	62	1,9E+05	66	5,3E+04	72	1,4E+04	77	4,8E+03	81	1,2E+03	85	5,2E+02	86	2,5E+02	87	1,2E+02	88	6,0E+01	89	3,0E+01	89	1,6E+01	89
<b>0,27</b>	8,6E+06	46	3,6E+06	52	1,3E+06	57	4,5E+05	62	1,4E+05	67	3,7E+04	72	9,4E+03	78	3,1E+03	82	7,3E+02	85	3,3E+02	87	1,5E+02	88	7,5E+01	89	3,7E+01	89	1,8E+01	89	9,9E+00	90
<b>0,16</b>	7,1E+06	47	2,9E+06	53	1,0E+06	58	3,3E+05	63	9,8E+04	68	2,6E+04	73	6,3E+03	79	2,0E+03	83	4,6E+02	86	2,0E+02	87	9,5E+01	88	4,6E+01	89	2,2E+01	89	1,1E+01	90	6,0E+00	89
<b>0,1</b>	5,9E+06	48	2,3E+06	54	8,0E+05	59	2,5E+05	64	7,1E+04	68	1,8E+04	73	4,2E+03	79	1,3E+03	84	2,9E+02	87	1,3E+02	88	5,8E+01	89	2,8E+01	89	1,4E+01	89	6,9E+00	89	3,7E+00	89

Tabla 7.1.9. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 RTFO (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	1,1E+08	28	6,9E+07	32	3,9E+07	36	2,1E+07	41	1,0E+07	47	4,4E+06	53	1,8E+06	59	8,3E+05	64	3,3E+05	67	1,7E+05	70	9,1E+04	72	4,9E+04	74	2,6E+04	76	1,4E+04	79	7,6E+03	80
<b>61,1</b>	9,5E+07	29	5,8E+07	33	3,2E+07	37	1,7E+07	42	7,8E+06	48	3,3E+06	54	1,3E+06	60	5,8E+05	65	2,3E+05	68	1,2E+05	71	6,1E+04	73	3,3E+04	75	1,7E+04	77	9,1E+03	79	4,9E+03	81
<b>37,3</b>	8,2E+07	30	4,9E+07	34	2,7E+07	39	1,3E+07	43	6,1E+06	49	2,5E+06	55	9,4E+05	62	4,1E+05	66	1,6E+05	69	8,0E+04	71	4,1E+04	74	2,2E+04	76	1,1E+04	79	5,9E+03	80	3,1E+03	82
<b>22,8</b>	7,0E+07	31	4,1E+07	35	2,2E+07	40	1,0E+07	45	4,6E+06	50	1,8E+06	57	6,7E+05	63	2,9E+05	66	1,1E+05	70	5,4E+04	72	2,7E+04	75	1,4E+04	77	7,3E+03	79	3,8E+03	81	2,0E+03	83
<b>13,9</b>	6,0E+07	32	3,4E+07	36	1,8E+07	41	8,3E+06	46	3,5E+06	52	1,3E+06	58	4,8E+05	64	2,0E+05	67	7,4E+04	71	3,6E+04	73	1,8E+04	75	9,4E+03	78	4,7E+03	80	2,4E+03	82	1,2E+03	84
<b>8,48</b>	5,1E+07	33	2,8E+07	37	1,4E+07	42	6,5E+06	47	2,7E+06	53	9,9E+05	59	3,4E+05	65	1,4E+05	68	5,0E+04	71	2,4E+04	74	1,2E+04	77	6,1E+03	79	3,0E+03	81	1,5E+03	83	7,8E+02	85
<b>5,18</b>	4,3E+07	34	2,3E+07	38	1,1E+07	43	5,0E+06	48	2,0E+06	54	7,2E+05	60	2,4E+05	65	9,5E+04	69	3,4E+04	72	1,6E+04	75	7,9E+03	78	3,9E+03	80	1,9E+03	82	9,6E+02	84	4,9E+02	86
<b>3,16</b>	3,6E+07	35	1,9E+07	40	9,1E+06	44	3,9E+06	50	1,5E+06	55	5,2E+05	61	1,7E+05	66	6,5E+04	70	2,3E+04	73	1,1E+04	76	5,2E+03	79	2,5E+03	81	1,2E+03	83	6,0E+02	85	3,0E+02	87
<b>1,93</b>	3,0E+07	36	1,5E+07	41	7,2E+06	45	3,0E+06	51	1,1E+06	56	3,8E+05	62	1,2E+05	67	4,5E+04	71	1,5E+04	75	7,0E+03	77	3,3E+03	80	1,6E+03	82	7,7E+02	84	3,8E+02	86	1,9E+02	87
<b>1,18</b>	2,5E+07	37	1,3E+07	42	5,7E+06	47	2,3E+06	52	8,3E+05	58	2,7E+05	63	8,1E+04	68	3,0E+04	72	1,0E+04	76	4,6E+03	79	2,1E+03	81	1,0E+03	83	4,8E+02	85	2,3E+02	87	1,2E+02	88
<b>0,72</b>	2,1E+07	39	1,0E+07	43	4,5E+06	48	1,8E+06	53	6,2E+05	59	1,9E+05	64	5,7E+04	69	2,1E+04	73	6,8E+03	77	3,0E+03	80	1,4E+03	82	6,5E+02	85	3,0E+02	86	1,5E+02	88	7,2E+01	89
<b>0,44</b>	1,7E+07	40	8,3E+06	44	3,6E+06	49	1,4E+06	54	4,6E+05	59	1,4E+05	65	3,9E+04	70	1,4E+04	74	4,4E+03	78	1,9E+03	81	8,7E+02	84	4,0E+02	85	1,9E+02	87	8,9E+01	88	4,4E+01	89
<b>0,27</b>	1,5E+07	41	6,8E+06	45	2,8E+06	50	1,0E+06	55	3,4E+05	60	1,0E+05	65	2,7E+04	71	9,3E+03	76	2,9E+03	80	1,2E+03	82	5,5E+02	85	2,5E+02	86	1,1E+02	88	5,4E+01	89	2,7E+01	89
<b>0,16</b>	1,2E+07	42	5,6E+06	46	2,3E+06	51	8,0E+05	56	2,6E+05	61	7,3E+04	66	1,9E+04	72	6,2E+03	77	1,9E+03	81	7,8E+02	83	3,4E+02	85	1,6E+02	87	7,1E+01	88	3,3E+01	89	1,6E+01	89

0,1	1,0E+07	43	4,6E+06	47	1,8E+06	52	6,2E+05	57	1,9E+05	62	5,3E+04	67	1,3E+04	73	4,1E+03	78	1,2E+03	82	4,9E+02	85	2,1E+02	86	9,6E+01	88	4,3E+01	89	2,0E+01	89	9,8E+00	89
-----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----

Tabla 7.1.10. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 RTFO (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ		
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	9,3E+07	28	5,8E+07	32	3,4E+07	37	1,8E+07	41	8,7E+06	47	3,9E+06	53	1,6E+06	59	7,5E+05	64	3,4E+05	67	1,7E+05	70	9,2E+04	72	5,0E+04	74	2,6E+04	76	1,4E+04	79	7,7E+03	81		
61,1	8,0E+07	29	4,9E+07	33	2,8E+07	38	1,4E+07	42	6,8E+06	48	2,9E+06	54	1,2E+06	60	5,3E+05	65	2,3E+05	68	1,2E+05	71	6,2E+04	73	3,3E+04	75	1,7E+04	77	9,1E+03	79	4,9E+03	81		
37,3	6,9E+07	30	4,1E+07	35	2,3E+07	39	1,1E+07	44	5,3E+06	49	2,2E+06	55	8,4E+05	61	3,7E+05	65	1,6E+05	69	8,0E+04	71	4,2E+04	74	2,2E+04	76	1,1E+04	78	5,9E+03	80	3,1E+03	82		
22,8	5,9E+07	31	3,4E+07	36	1,8E+07	40	9,0E+06	45	4,0E+06	51	1,6E+06	56	6,0E+05	62	2,6E+05	66	1,1E+05	70	5,4E+04	72	2,8E+04	75	1,4E+04	77	7,3E+03	79	3,8E+03	81	2,0E+03	83		
13,9	5,0E+07	32	2,9E+07	37	1,5E+07	41	7,1E+06	46	3,1E+06	52	1,2E+06	58	4,3E+05	63	1,8E+05	67	7,5E+04	71	3,6E+04	73	1,8E+04	75	9,4E+03	78	4,7E+03	80	2,4E+03	82	1,3E+03	84		
8,48	4,2E+07	34	2,4E+07	38	1,2E+07	42	5,5E+06	47	2,3E+06	53	8,8E+05	59	3,0E+05	64	1,3E+05	68	5,1E+04	71	2,4E+04	74	1,2E+04	76	6,1E+03	79	3,0E+03	81	1,5E+03	83	7,9E+02	85		
5,18	3,6E+07	35	1,9E+07	39	9,6E+06	43	4,3E+06	48	1,7E+06	54	6,4E+05	60	2,1E+05	65	8,7E+04	69	3,4E+04	72	1,6E+04	75	8,0E+03	78	4,0E+03	80	1,9E+03	82	9,6E+02	84	4,9E+02	86		
3,16	3,0E+07	36	1,6E+07	40	7,7E+06	44	3,3E+06	50	1,3E+06	55	4,6E+05	61	1,5E+05	66	6,0E+04	70	2,3E+04	73	1,1E+04	76	5,2E+03	79	2,5E+03	81	1,2E+03	83	6,0E+02	85	3,1E+02	87		
1,93	2,5E+07	37	1,3E+07	41	6,1E+06	46	2,6E+06	51	9,8E+05	56	3,4E+05	62	1,1E+05	67	4,1E+04	71	1,5E+04	74	7,1E+03	77	3,4E+03	80	1,6E+03	82	7,8E+02	84	3,8E+02	86	1,9E+02	87		
1,18	2,1E+07	38	1,1E+07	42	4,8E+06	47	2,0E+06	52	7,3E+05	57	2,4E+05	63	7,4E+04	68	2,8E+04	72	1,0E+04	76	4,6E+03	79	2,2E+03	81	1,0E+03	83	4,9E+02	85	2,4E+02	87	1,2E+02	88		
0,72	1,7E+07	39	8,6E+06	43	3,8E+06	48	1,5E+06	53	5,4E+05	58	1,8E+05	63	5,2E+04	69	1,9E+04	73	6,8E+03	77	3,0E+03	80	1,4E+03	82	6,5E+02	84	3,0E+02	86	1,5E+02	88	7,3E+01	88		
0,44	1,4E+07	40	7,0E+06	44	3,0E+06	49	1,2E+06	54	4,0E+05	59	1,3E+05	64	3,6E+04	70	1,3E+04	74	4,5E+03	78	1,9E+03	81	8,8E+02	83	4,1E+02	85	1,9E+02	87	8,9E+01	88	4,4E+01	89		
0,27	1,2E+07	41	5,7E+06	45	2,4E+06	50	9,0E+05	55	3,0E+05	60	9,2E+04	65	2,5E+04	70	8,6E+03	75	2,9E+03	79	1,2E+03	82	5,5E+02	85	2,5E+02	86	1,2E+02	88	5,5E+01	88	2,7E+01	89		
0,16	1,0E+07	42	4,7E+06	46	1,9E+06	51	6,9E+05	56	2,3E+05	61	6,7E+04	66	1,8E+04	71	5,8E+03	76	1,9E+03	80	7,9E+02	83	3,5E+02	85	1,6E+02	87	7,1E+01	88	3,3E+01	89	1,6E+01	89		
0,1	8,6E+06	43	3,9E+06	47	1,5E+06	52	5,4E+05	57	1,7E+05	61	4,9E+04	66	1,2E+04	73	3,8E+03	78	1,2E+03	82	5,0E+02	84	2,2E+02	86	9,7E+01	88	4,3E+01	89	2,0E+01	89	9,9E+00	90		

Tabla 7.1.11. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 PAV (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ		
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]

<b>100</b>	9,9E+07	25	6,7E+07	28	4,2E+07	31	2,5E+07	35	1,4E+07	39	7,0E+06	43	3,3E+06	48	1,7E+06	52	9,5E+05	56	5,2E+05	59	2,8E+05	61	1,6E+05	64	8,5E+04	66	4,6E+04	69	2,6E+04	71
<b>61,1</b>	8,7E+07	25	5,8E+07	29	3,5E+07	32	2,0E+07	36	1,1E+07	40	5,5E+06	44	2,6E+06	49	1,3E+06	53	7,0E+05	57	3,7E+05	59	2,0E+05	62	1,1E+05	65	5,9E+04	67	3,2E+04	70	1,7E+04	73
<b>37,3</b>	7,6E+07	26	5,0E+07	30	3,0E+07	33	1,7E+07	36	8,9E+06	41	4,4E+06	45	2,0E+06	50	9,4E+05	54	5,1E+05	57	2,7E+05	60	1,4E+05	63	7,7E+04	65	4,1E+04	68	2,2E+04	71	1,2E+04	74
<b>22,8</b>	6,7E+07	27	4,3E+07	30	2,5E+07	34	1,4E+07	37	7,2E+06	41	3,4E+06	46	1,5E+06	51	7,0E+05	55	3,7E+05	58	1,9E+05	61	1,0E+05	64	5,4E+04	66	2,8E+04	69	1,5E+04	72	7,8E+03	75
<b>13,9</b>	5,8E+07	28	3,6E+07	31	2,1E+07	34	1,1E+07	38	5,7E+06	42	2,7E+06	47	1,1E+06	52	5,2E+05	56	2,7E+05	59	1,4E+05	62	7,2E+04	64	3,7E+04	67	1,9E+04	70	9,9E+03	73	5,2E+03	76
<b>8,48</b>	5,0E+07	29	3,1E+07	32	1,8E+07	35	9,4E+06	39	4,6E+06	43	2,1E+06	48	8,6E+05	53	3,8E+05	57	2,0E+05	60	9,9E+04	63	5,0E+04	65	2,6E+04	68	1,3E+04	71	6,6E+03	75	3,4E+03	78
<b>5,18</b>	4,4E+07	30	2,6E+07	33	1,5E+07	36	7,6E+06	40	3,6E+06	44	1,6E+06	49	6,4E+05	54	2,8E+05	58	1,4E+05	61	7,0E+04	63	3,5E+04	66	1,8E+04	70	8,7E+03	73	4,4E+03	76	2,2E+03	79
<b>3,16</b>	3,7E+07	30	2,2E+07	33	1,2E+07	37	6,2E+06	41	2,9E+06	45	1,2E+06	50	4,8E+05	55	2,0E+05	59	1,0E+05	62	5,0E+04	64	2,4E+04	68	1,2E+04	71	5,8E+03	74	2,9E+03	78	1,4E+03	80
<b>1,93</b>	3,2E+07	31	1,9E+07	34	1,0E+07	38	5,0E+06	42	2,3E+06	46	9,5E+05	51	3,6E+05	56	1,5E+05	60	7,3E+04	63	3,5E+04	66	1,7E+04	69	8,2E+03	72	3,9E+03	76	1,9E+03	79	9,1E+02	82
<b>1,18</b>	2,8E+07	32	1,6E+07	35	8,4E+06	39	4,1E+06	43	1,8E+06	47	7,2E+05	52	2,7E+05	57	1,1E+05	61	5,2E+04	64	2,4E+04	67	1,2E+04	70	5,5E+03	74	2,5E+03	77	1,2E+03	80	5,8E+02	83
<b>0,72</b>	2,4E+07	33	1,3E+07	36	6,9E+06	40	3,3E+06	44	1,4E+06	48	5,5E+05	53	2,0E+05	58	7,8E+04	62	3,7E+04	65	1,7E+04	68	7,9E+03	72	3,7E+03	75	1,7E+03	79	7,7E+02	82	3,7E+02	84
<b>0,44</b>	2,0E+07	34	1,1E+07	37	5,7E+06	41	2,6E+06	45	1,1E+06	49	4,2E+05	54	1,5E+05	59	5,6E+04	63	2,6E+04	66	1,2E+04	70	5,3E+03	73	2,4E+03	77	1,1E+03	80	4,9E+02	83	2,3E+02	85
<b>0,27</b>	1,7E+07	35	9,5E+06	38	4,7E+06	42	2,1E+06	46	8,7E+05	50	3,2E+05	55	1,1E+05	59	4,0E+04	64	1,8E+04	67	8,0E+03	71	3,5E+03	75	1,6E+03	79	6,8E+02	82	3,0E+02	84	1,4E+02	86
<b>0,16</b>	1,5E+07	35	8,0E+06	39	3,9E+06	42	1,7E+06	47	6,8E+05	51	2,5E+05	55	8,1E+04	61	2,9E+04	65	1,3E+04	69	5,4E+03	73	2,3E+03	77	1,0E+03	80	4,3E+02	83	1,9E+02	85	8,7E+01	87
<b>0,1</b>	1,3E+07	36	6,9E+06	40	3,3E+06	44	1,4E+06	48	5,4E+05	52	1,9E+05	57	6,0E+04	61	2,0E+04	67	8,7E+03	71	3,6E+03	75	1,5E+03	78	6,4E+02	82	2,7E+02	84	1,2E+02	86	5,4E+01	88

Tabla 7.1.12. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 PAV (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ		
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]		
<b>100</b>	9,6E+07	25	6,6E+07	28	4,1E+07	32	2,5E+07	35	1,4E+07	39	7,1E+06	43	3,5E+06	48	1,8E+06	53	8,8E+05	57	4,9E+05	59	2,7E+05	62	1,5E+05	64	8,4E+04	67	4,7E+04	69	2,6E+04	72		
<b>61,1</b>	8,4E+07	26	5,6E+07	29	3,5E+07	32	2,0E+07	36	1,1E+07	40	5,6E+06	44	2,7E+06	49	1,3E+06	53	6,4E+05	57	3,6E+05	60	1,9E+05	62	1,1E+05	65	5,8E+04	68	3,2E+04	70	1,8E+04	73		
<b>37,3</b>	7,4E+07	27	4,8E+07	30	2,9E+07	33	1,7E+07	37	9,0E+06	41	4,4E+06	45	2,0E+06	50	9,8E+05	54	4,7E+05	58	2,6E+05	61	1,4E+05	63	7,5E+04	66	4,0E+04	69	2,2E+04	72	1,2E+04	74		
<b>22,8</b>	6,4E+07	28	4,1E+07	31	2,5E+07	34	1,4E+07	38	7,2E+06	42	3,5E+06	46	1,6E+06	51	7,3E+05	55	3,4E+05	59	1,8E+05	61	9,7E+04	64	5,2E+04	67	2,7E+04	70	1,5E+04	72	7,8E+03	75		
<b>13,9</b>	5,6E+07	28	3,5E+07	32	2,1E+07	35	1,1E+07	38	5,8E+06	43	2,7E+06	47	1,2E+06	52	5,4E+05	56	2,5E+05	60	1,3E+05	62	6,8E+04	65	3,6E+04	68	1,9E+04	71	9,8E+03	74	5,2E+03	76		
<b>8,48</b>	4,8E+07	29	3,0E+07	32	1,7E+07	36	9,3E+06	39	4,6E+06	44	2,1E+06	48	8,9E+05	53	4,0E+05	57	1,8E+05	61	9,3E+04	63	4,8E+04	66	2,5E+04	69	1,3E+04	72	6,5E+03	75	3,4E+03	78		
<b>5,18</b>	4,2E+07	30	2,5E+07	33	1,4E+07	37	7,6E+06	40	3,6E+06	45	1,6E+06	49	6,7E+05	54	2,9E+05	58	1,3E+05	62	6,6E+04	64	3,3E+04	67	1,7E+04	70	8,5E+03	73	4,3E+03	76	2,2E+03	79		

<b>3,16</b>	3,6E+07	31	2,1E+07	34	1,2E+07	37	6,2E+06	41	2,9E+06	46	1,2E+06	50	5,0E+05	55	2,1E+05	59	9,2E+04	63	4,6E+04	65	2,3E+04	68	1,2E+04	71	5,7E+03	75	2,8E+03	78	1,4E+03	80
<b>1,93</b>	3,1E+07	32	1,8E+07	35	9,8E+06	38	5,0E+06	42	2,3E+06	47	9,6E+05	51	3,7E+05	56	1,6E+05	60	6,5E+04	64	3,2E+04	66	1,6E+04	70	7,8E+03	73	3,8E+03	76	1,8E+03	79	9,1E+02	82
<b>1,18</b>	2,6E+07	33	1,5E+07	36	8,1E+06	39	4,0E+06	43	1,8E+06	48	7,3E+05	52	2,8E+05	57	1,1E+05	60	4,6E+04	65	2,2E+04	68	1,1E+04	71	5,2E+03	74	2,5E+03	78	1,2E+03	81	5,8E+02	83
<b>0,72</b>	2,2E+07	33	1,3E+07	37	6,7E+06	40	3,2E+06	44	1,4E+06	48	5,6E+05	53	2,1E+05	58	8,2E+04	61	3,3E+04	66	1,6E+04	69	7,3E+03	73	3,5E+03	76	1,6E+03	79	7,6E+02	82	3,6E+02	84
<b>0,44</b>	1,9E+07	34	1,1E+07	38	5,5E+06	41	2,6E+06	45	1,1E+06	50	4,3E+05	54	1,5E+05	59	5,9E+04	63	2,3E+04	67	1,1E+04	70	4,9E+03	74	2,3E+03	78	1,0E+03	81	4,8E+02	83	2,3E+02	85
<b>0,27</b>	1,6E+07	35	9,1E+06	38	4,6E+06	42	2,1E+06	46	8,7E+05	51	3,3E+05	55	1,1E+05	60	4,2E+04	64	1,6E+04	69	7,2E+03	72	3,2E+03	76	1,5E+03	79	6,6E+02	82	3,0E+02	84	1,4E+02	86
<b>0,16</b>	1,4E+07	36	7,7E+06	39	3,8E+06	43	1,7E+06	47	6,8E+05	51	2,5E+05	56	8,4E+04	60	3,0E+04	65	1,1E+04	70	4,9E+03	74	2,1E+03	78	9,4E+02	80	4,2E+02	83	1,9E+02	85	8,8E+01	87
<b>0,1</b>	1,2E+07	37	6,6E+06	40	3,2E+06	44	1,4E+06	48	5,4E+05	52	1,9E+05	57	6,2E+04	61	2,2E+04	66	7,5E+03	72	3,3E+03	76	1,4E+03	79	6,0E+02	82	2,6E+02	84	1,2E+02	86	5,4E+01	88

### 7.1.3. RAP (SE)

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5 a 75°C para el ligante RAP en su estado sin envejecer se presentan en la Tabla 7.1.13 y Tabla 7.1.14.

Tabla 7.1.13. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP SE (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	8,1E+07	19	6,0E+07	21	4,3E+07	22,7	3,0E+07	25	2,1E+07	27,1	1,4E+07	30	9,1E+06	32,5	5,9E+06	36	4,3E+06	39,6	2,6E+06	43	1,6E+06	46	9,3E+05	50	5,3E+05	54	3,0E+05	57	1,7E+05	61
<b>61,1</b>	7,3E+07	19	5,3E+07	21	3,8E+07	23,1	2,7E+07	25	1,8E+07	27,9	1,2E+07	30	7,6E+06	33,4	4,8E+06	36	3,5E+06	40,6	2,1E+06	44	1,2E+06	47	7,1E+05	51	4,0E+05	55	2,2E+05	59	1,2E+05	62
<b>37,3</b>	6,6E+07	20	4,8E+07	22	3,4E+07	23,6	2,3E+07	26	1,5E+07	28,4	1,0E+07	31	6,4E+06	34,4	4,0E+06	37	2,8E+06	41,6	1,6E+06	45	9,5E+05	49	5,3E+05	52	2,9E+05	56	1,6E+05	60	8,6E+04	64
<b>22,8</b>	5,9E+07	20	4,2E+07	22	3,0E+07	24,1	2,0E+07	26	1,3E+07	29,1	8,5E+06	32	5,3E+06	35,2	3,2E+06	38	2,2E+06	42,7	1,3E+06	46	7,2E+05	50	4,0E+05	54	2,1E+05	58	1,1E+05	61	6,1E+04	65
<b>13,9</b>	5,3E+07	21	3,8E+07	23	2,6E+07	24,7	1,8E+07	27	1,1E+07	29,9	7,2E+06	33	4,4E+06	36,1	2,6E+06	40	1,8E+06	43,9	1,0E+06	47	5,5E+05	51	3,0E+05	55	1,6E+05	59	8,2E+04	63	4,2E+04	67
<b>8,48</b>	4,8E+07	21	3,4E+07	23	2,3E+07	25,3	1,5E+07	28	9,7E+06	30,7	6,0E+06	34	3,6E+06	37,2	2,1E+06	41	1,4E+06	45,1	7,7E+05	49	4,2E+05	53	2,2E+05	57	1,1E+05	61	5,7E+04	65	2,9E+04	69
<b>5,18</b>	4,3E+07	22	3,0E+07	24	2,0E+07	25,9	1,3E+07	29	8,3E+06	31,6	5,0E+06	35	3,0E+06	38,3	1,7E+06	42	1,1E+06	46,5	5,9E+05	50	3,1E+05	54	1,6E+05	58	8,0E+04	62	4,0E+04	66	2,0E+04	70
<b>3,16</b>	3,8E+07	22	2,6E+07	24	1,8E+07	26,6	1,1E+07	29	7,0E+06	32,6	4,2E+06	36	2,4E+06	39,5	1,4E+06	43	8,5E+05	47,8	4,5E+05	52	2,3E+05	56	1,2E+05	60	5,7E+04	64	2,8E+04	68	1,4E+04	72
<b>1,93</b>	3,4E+07	23	2,3E+07	25	1,5E+07	27,4	9,8E+06	30	5,9E+06	33,6	3,5E+06	37	2,0E+06	40,8	1,1E+06	45	6,6E+05	49,3	3,4E+05	53	1,7E+05	57	8,4E+04	61	4,0E+04	66	1,9E+04	70	9,0E+03	74
<b>1,18</b>	3,1E+07	23	2,1E+07	26	1,3E+07	28,3	8,4E+06	31	5,0E+06	34,7	2,8E+06	38	1,6E+06	42,2	8,5E+05	46	5,0E+05	50,8	2,5E+05	55	1,2E+05	59	6,0E+04	63	2,8E+04	68	1,3E+04	72	6,0E+03	76
<b>0,72</b>	2,7E+07	24	1,8E+07	26	1,2E+07	29,2	7,1E+06	32	4,2E+06	35,9	2,3E+06	40	1,3E+06	43,5	6,6E+05	48	3,8E+05	52,4	1,9E+05	56	9,0E+04	61	4,2E+04	65	1,9E+04	70	8,7E+03	74	3,9E+03	78

<b>0,44</b>	2,4E+07	25	1,6E+07	27	1,0E+07	30,2	6,1E+06	34	3,5E+06	37,1	1,9E+06	41	1,0E+06	45,1	5,1E+05	49	2,9E+05	54,1	1,4E+05	58	6,5E+04	62	2,9E+04	67	1,3E+04	72	5,7E+03	76	2,5E+03	80
<b>0,27</b>	2,2E+07	25	1,4E+07	28	8,8E+06	31,2	5,2E+06	35	2,9E+06	38,4	1,5E+06	42	8,0E+05	46,5	4,0E+05	51	2,1E+05	55,8	1,0E+05	60	4,6E+04	64	2,0E+04	69	8,7E+03	74	3,7E+03	78	1,6E+03	82
<b>0,16</b>	1,9E+07	26	1,2E+07	29	7,6E+06	32,2	4,4E+06	36	2,4E+06	39,8	1,3E+06	44	6,3E+05	48,0	3,0E+05	52	1,6E+05	57,6	7,2E+04	62	3,2E+04	66	1,4E+04	71	5,8E+03	76	2,4E+03	80	1,0E+03	83
<b>0,1</b>	1,7E+07	27	1,1E+07	30	6,6E+06	33,4	3,7E+06	37	2,0E+06	41,2	1,0E+06	45	4,9E+05	49,8	2,3E+05	54	1,2E+05	59,4	5,2E+04	64	2,2E+04	68	9,3E+03	73	3,8E+03	78	1,6E+03	81	6,4E+02	85

Tabla 7.1.14. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP SE (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	6,7E+07	21	4,9E+07	23	3,5E+07	25	2,5E+07	27	1,7E+07	29	1,2E+07	32	7,7E+06	35	5,1E+06	38	3,9E+06	40	2,4E+06	43	1,4E+06	47	8,3E+05	51	4,7E+05	54	2,7E+05	58	1,5E+05	62
<b>61,1</b>	6,0E+07	21	4,3E+07	24	3,0E+07	26	2,1E+07	28	1,4E+07	30	9,7E+06	33	6,4E+06	36	4,1E+06	39	3,2E+06	41	1,9E+06	44	1,1E+06	48	6,3E+05	52	3,5E+05	56	1,9E+05	59	1,1E+05	63
<b>37,3</b>	5,3E+07	22	3,8E+07	24	2,6E+07	27	1,8E+07	29	1,2E+07	31	8,2E+06	34	5,3E+06	37	3,4E+06	40	2,5E+06	42	1,5E+06	46	8,5E+05	49	4,7E+05	53	2,6E+05	57	1,4E+05	61	7,6E+04	64
<b>22,8</b>	4,7E+07	23	3,3E+07	25	2,3E+07	27	1,6E+07	29	1,0E+07	32	6,8E+06	35	4,3E+06	38	2,7E+06	41	2,0E+06	43	1,2E+06	47	6,4E+05	51	3,5E+05	54	1,9E+05	58	1,0E+05	62	5,3E+04	66
<b>13,9</b>	4,2E+07	23	2,9E+07	26	2,0E+07	28	1,4E+07	30	8,9E+06	33	5,7E+06	35	3,6E+06	38	2,2E+06	42	1,6E+06	44	8,9E+05	48	4,9E+05	52	2,6E+05	56	1,4E+05	60	7,1E+04	64	3,7E+04	68
<b>8,48</b>	3,8E+07	24	2,6E+07	26	1,7E+07	29	1,2E+07	31	7,5E+06	33	4,7E+06	36	2,9E+06	39	1,7E+06	43	1,3E+06	46	6,9E+05	49	3,7E+05	53	1,9E+05	57	9,8E+04	61	5,0E+04	65	2,5E+04	69
<b>5,18</b>	3,3E+07	24	2,3E+07	27	1,5E+07	29	9,9E+06	32	6,3E+06	34	3,9E+06	37	2,4E+06	41	1,4E+06	44	9,8E+05	47	5,2E+05	51	2,7E+05	55	1,4E+05	59	7,0E+04	63	3,5E+04	67	1,7E+04	71
<b>3,16</b>	3,0E+07	25	2,0E+07	27	1,3E+07	30	8,5E+06	32	5,3E+06	35	3,2E+06	38	1,9E+06	42	1,1E+06	45	7,6E+05	48	4,0E+05	52	2,0E+05	56	1,0E+05	60	4,9E+04	65	2,4E+04	69	1,2E+04	73
<b>1,93</b>	2,6E+07	25	1,7E+07	28	1,1E+07	31	7,3E+06	33	4,5E+06	36	2,7E+06	39	1,5E+06	43	8,6E+05	47	5,8E+05	50	3,0E+05	54	1,5E+05	58	7,3E+04	62	3,5E+04	66	1,6E+04	71	7,7E+03	75
<b>1,18</b>	2,4E+07	26	1,5E+07	29	9,9E+06	31	6,2E+06	34	3,7E+06	37	2,2E+06	41	1,2E+06	44	6,7E+05	48	4,4E+05	52	2,2E+05	55	1,1E+05	60	5,2E+04	64	2,4E+04	68	1,1E+04	73	5,1E+03	77
<b>0,72</b>	2,1E+07	27	1,3E+07	30	8,6E+06	32	5,3E+06	35	3,1E+06	38	1,8E+06	42	9,7E+05	46	5,2E+05	50	3,4E+05	53	1,6E+05	57	7,8E+04	61	3,6E+04	66	1,6E+04	70	7,4E+03	75	3,3E+03	79
<b>0,44</b>	1,9E+07	27	1,2E+07	30	7,4E+06	33	4,5E+06	36	2,6E+06	40	1,4E+06	43	7,7E+05	47	4,0E+05	51	2,5E+05	55	1,2E+05	59	5,6E+04	63	2,5E+04	68	1,1E+04	72	4,8E+03	77	2,1E+03	80
<b>0,27</b>	1,7E+07	28	1,0E+07	31	6,4E+06	34	3,8E+06	37	2,2E+06	41	1,2E+06	45	6,1E+05	49	3,1E+05	53	1,9E+05	56	8,7E+04	61	3,9E+04	65	1,7E+04	70	7,4E+03	74	3,1E+03	79	1,3E+03	82
<b>0,16</b>	1,5E+07	29	9,1E+06	32	5,5E+06	35	3,2E+06	38	1,8E+06	42	9,4E+05	46	4,8E+05	50	2,3E+05	54	1,4E+05	58	6,2E+04	63	2,7E+04	67	1,2E+04	72	4,9E+03	76	2,0E+03	81	8,5E+02	83
<b>0,1</b>	1,3E+07	30	8,0E+06	33	4,8E+06	36	2,7E+06	40	1,5E+06	43	7,6E+05	47	3,7E+05	51	1,8E+05	56	1,0E+05	60	4,4E+04	65	1,9E+04	69	7,9E+03	74	3,2E+03	79	1,3E+03	82	5,3E+02	85

## 7.1.4. CA-24 con LPO-M

## 7.1.4.1. Muestras de CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12%

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5°C a 40°C para el ligante CA-24 en dosis de 3, 6, 9 y 12% de LPO-M se presentan desde la Tabla 7.1.15 hasta la Tabla 7.1.22.

Tabla 7.1.15. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 3% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	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	5,5E+07	30	3,5E+07	33	2,1E+07	37,1	1,2E+07	41	6,6E+06	45,2	3,6E+06	49	1,9E+06	53,2	1,0E+06	57
61,1	4,7E+07	31	2,9E+07	34	1,7E+07	38,2	9,5E+06	42	5,1E+06	46,3	2,7E+06	50	1,4E+06	54,2	7,5E+05	58
37,3	4,0E+07	32	2,5E+07	35	1,4E+07	39,2	7,6E+06	43	4,0E+06	47,5	2,1E+06	51	1,1E+06	55,2	5,5E+05	59
22,8	3,4E+07	33	2,0E+07	36	1,1E+07	40,3	6,0E+06	44	3,1E+06	48,6	1,6E+06	53	7,9E+05	56,2	4,0E+05	60
13,9	2,8E+07	34	1,7E+07	37	9,1E+06	41,4	4,7E+06	46	2,4E+06	49,7	1,2E+06	54	5,8E+05	57,3	2,9E+05	61
8,48	2,4E+07	35	1,4E+07	38	7,3E+06	42,5	3,7E+06	47	1,8E+06	50,9	8,8E+05	55	4,2E+05	58,3	2,1E+05	62
5,18	2,0E+07	36	1,1E+07	40	5,8E+06	43,7	2,9E+06	48	1,4E+06	52,0	6,5E+05	56	3,1E+05	59,4	1,5E+05	63
3,16	1,6E+07	37	9,1E+06	41	4,6E+06	44,8	2,2E+06	49	1,0E+06	53,2	4,8E+05	57	2,2E+05	60,4	1,0E+05	64
1,93	1,4E+07	38	7,4E+06	42	3,6E+06	46,1	1,7E+06	50	7,8E+05	54,3	3,5E+05	58	1,6E+05	61,6	7,4E+04	65
1,18	1,1E+07	39	5,9E+06	43	2,8E+06	47,3	1,3E+06	52	5,9E+05	55,5	2,6E+05	59	1,2E+05	62,7	5,2E+04	66
0,72	9,3E+06	40	4,8E+06	44	2,2E+06	48,5	1,0E+06	53	4,4E+05	56,7	1,9E+05	60	8,2E+04	63,9	3,6E+04	68
0,44	7,7E+06	41	3,8E+06	46	1,7E+06	49,8	7,6E+05	54	3,2E+05	57,8	1,4E+05	62	5,8E+04	65,2	2,5E+04	69
0,27	6,3E+06	42	3,0E+06	47	1,3E+06	51,1	5,8E+05	55	2,4E+05	58,9	9,9E+04	63	4,1E+04	66,6	1,7E+04	70
0,16	5,3E+06	43	2,4E+06	48	1,1E+06	52,3	4,4E+05	56	1,8E+05	60,2	7,2E+04	64	2,9E+04	67,9	1,2E+04	72
0,1	4,3E+06	45	1,9E+06	49	8,2E+05	53,4	3,3E+05	58	1,3E+05	61,4	5,2E+04	65	2,0E+04	69,1	8,2E+03	73

Tabla 7.1.16. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 3% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	4,1E+07	30	2,6E+07	34	1,5E+07	37	8,8E+06	41	4,9E+06	45	2,7E+06	49	1,5E+06	53	8,0E+05	57
61,1	3,5E+07	31	2,2E+07	35	1,3E+07	39	7,1E+06	43	3,8E+06	47	2,0E+06	51	1,1E+06	54	5,9E+05	58
37,3	2,9E+07	32	1,8E+07	36	1,0E+07	40	5,6E+06	44	3,0E+06	48	1,6E+06	52	8,1E+05	55	4,3E+05	59
22,8	2,5E+07	33	1,5E+07	37	8,3E+06	41	4,4E+06	45	2,3E+06	49	1,2E+06	53	6,0E+05	56	3,1E+05	60
13,9	2,1E+07	34	1,2E+07	38	6,6E+06	42	3,5E+06	46	1,8E+06	50	8,8E+05	54	4,4E+05	57	2,2E+05	61
8,48	1,7E+07	35	1,0E+07	39	5,3E+06	43	2,7E+06	47	1,3E+06	51	6,6E+05	55	3,2E+05	58	1,6E+05	62
5,18	1,5E+07	36	8,1E+06	40	4,2E+06	44	2,1E+06	48	1,0E+06	52	4,9E+05	56	2,3E+05	59	1,2E+05	63
3,16	1,2E+07	37	6,6E+06	41	3,3E+06	45	1,6E+06	49	7,7E+05	53	3,6E+05	57	1,7E+05	61	8,2E+04	64
1,93	9,9E+06	38	5,3E+06	42	2,6E+06	46	1,3E+06	51	5,8E+05	55	2,7E+05	58	1,2E+05	62	5,8E+04	65
1,18	8,2E+06	39	4,3E+06	43	2,1E+06	48	9,6E+05	52	4,3E+05	56	1,9E+05	59	8,8E+04	63	4,1E+04	66
0,72	6,8E+06	41	3,4E+06	45	1,6E+06	49	7,3E+05	53	3,2E+05	57	1,4E+05	60	6,3E+04	64	2,8E+04	68
0,44	5,6E+06	42	2,8E+06	46	1,3E+06	50	5,6E+05	54	2,4E+05	58	1,0E+05	62	4,5E+04	65	2,0E+04	69
0,27	4,6E+06	43	2,2E+06	47	9,9E+05	51	4,2E+05	55	1,8E+05	59	7,4E+04	63	3,2E+04	66	1,4E+04	70
0,16	3,8E+06	44	1,8E+06	48	7,7E+05	53	3,2E+05	56	1,3E+05	60	5,4E+04	64	2,2E+04	68	9,4E+03	72
0,1	3,1E+06	45	1,4E+06	49	6,0E+05	54	2,4E+05	58	9,7E+04	61	3,9E+04	65	1,6E+04	69	6,5E+03	73

Tabla 7.1.17. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 6% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	1,9E+07	35	1,2E+07	39	6,7E+06	42,9	3,7E+06	47	2,1E+06	50,8	1,1E+06	55	6,3E+05	58,4	3,6E+05	62
61,1	1,6E+07	37	9,5E+06	40	5,3E+06	43,9	2,9E+06	48	1,6E+06	51,8	8,4E+05	56	4,6E+05	59,1	2,6E+05	62
37,3	1,3E+07	37	7,7E+06	41	4,2E+06	45,0	2,2E+06	49	1,2E+06	52,7	6,2E+05	56	3,3E+05	59,9	1,8E+05	63

<b>22,8</b>	1,1E+07	38	6,1E+06	42	3,3E+06	46,1	1,7E+06	50	8,9E+05	53,8	4,6E+05	57	2,4E+05	60,7	1,3E+05	64
<b>13,9</b>	8,8E+06	39	4,9E+06	43	2,6E+06	47,1	1,3E+06	51	6,7E+05	54,8	3,3E+05	58	1,7E+05	61,6	9,2E+04	65
<b>8,48</b>	7,1E+06	40	3,9E+06	44	2,0E+06	48,1	1,0E+06	52	4,9E+05	55,9	2,4E+05	59	1,2E+05	62,6	6,5E+04	66
<b>5,18</b>	5,8E+06	41	3,1E+06	45	1,5E+06	49,2	7,6E+05	53	3,7E+05	56,9	1,8E+05	60	8,8E+04	63,6	4,5E+04	67
<b>3,16</b>	4,6E+06	42	2,4E+06	46	1,2E+06	50,3	5,7E+05	54	2,7E+05	58,0	1,3E+05	61	6,2E+04	64,7	3,2E+04	68
<b>1,93</b>	3,7E+06	43	1,9E+06	47	9,1E+05	51,4	4,3E+05	55	2,0E+05	59,0	9,1E+04	63	4,4E+04	65,9	2,2E+04	69
<b>1,18</b>	3,0E+06	44	1,5E+06	48	7,0E+05	52,6	3,2E+05	56	1,4E+05	60,1	6,5E+04	64	3,1E+04	67,0	1,5E+04	70
<b>0,72</b>	2,4E+06	46	1,2E+06	50	5,3E+05	53,7	2,4E+05	58	1,0E+05	61,2	4,7E+04	65	2,2E+04	68,3	1,0E+04	72
<b>0,44</b>	1,9E+06	47	9,1E+05	51	4,0E+05	54,9	1,8E+05	59	7,6E+04	62,3	3,3E+04	66	1,5E+04	69,8	6,9E+03	73
<b>0,27</b>	1,6E+06	48	7,1E+05	52	3,1E+05	55,9	1,3E+05	60	5,5E+04	63,4	2,3E+04	67	1,0E+04	71,2	4,7E+03	75
<b>0,16</b>	1,3E+06	49	5,5E+05	53	2,3E+05	57,0	9,6E+04	61	4,0E+04	64,7	1,6E+04	69	7,1E+03	72,6	3,1E+03	76
<b>0,1</b>	1,0E+06	50	4,3E+05	54	1,8E+05	58,3	7,1E+04	62	2,9E+04	66,1	1,2E+04	70	4,9E+03	74,1	2,1E+03	78

Tabla 7.1.18. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 6% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	1,5E+07	36	9,4E+06	39	5,3E+06	43	3,0E+06	47	1,6E+06	51	8,8E+05	55	4,8E+05	58	2,7E+05	62
<b>61,1</b>	1,3E+07	37	7,6E+06	40	4,2E+06	44	2,3E+06	48	1,2E+06	52	6,6E+05	56	3,5E+05	59	2,0E+05	62
<b>37,3</b>	1,0E+07	38	6,1E+06	42	3,3E+06	45	1,8E+06	49	9,4E+05	53	4,9E+05	56	2,6E+05	60	1,4E+05	63
<b>22,8</b>	8,5E+06	39	4,9E+06	42	2,6E+06	46	1,4E+06	50	7,1E+05	54	3,6E+05	57	1,9E+05	61	1,0E+05	64
<b>13,9</b>	6,9E+06	40	3,9E+06	43	2,0E+06	47	1,0E+06	51	5,3E+05	55	2,6E+05	58	1,3E+05	61	7,1E+04	64
<b>8,48</b>	5,6E+06	41	3,1E+06	44	1,6E+06	48	8,0E+05	52	3,9E+05	56	1,9E+05	59	9,7E+04	62	5,0E+04	65
<b>5,18</b>	4,5E+06	42	2,4E+06	46	1,2E+06	49	6,0E+05	53	2,9E+05	57	1,4E+05	60	6,9E+04	63	3,5E+04	66
<b>3,16</b>	3,6E+06	43	1,9E+06	47	9,4E+05	50	4,5E+05	54	2,1E+05	58	1,0E+05	61	4,9E+04	64	2,4E+04	68
<b>1,93</b>	2,9E+06	44	1,5E+06	48	7,2E+05	52	3,4E+05	55	1,6E+05	59	7,2E+04	62	3,4E+04	66	1,7E+04	69
<b>1,18</b>	2,3E+06	45	1,2E+06	49	5,5E+05	53	2,5E+05	57	1,1E+05	60	5,2E+04	63	2,4E+04	67	1,2E+04	70
<b>0,72</b>	1,9E+06	46	9,2E+05	50	4,2E+05	54	1,9E+05	58	8,3E+04	61	3,7E+04	65	1,7E+04	68	8,0E+03	71

<b>0,44</b>	1,5E+06	47	7,1E+05	51	3,2E+05	55	1,4E+05	59	6,0E+04	62	2,6E+04	66	1,2E+04	69	5,4E+03	73
<b>0,27</b>	1,2E+06	48	5,6E+05	52	2,4E+05	56	1,0E+05	60	4,3E+04	64	1,9E+04	67	8,1E+03	71	3,7E+03	74
<b>0,16</b>	9,7E+05	49	4,3E+05	54	1,8E+05	57	7,6E+04	61	3,1E+04	65	1,3E+04	68	5,6E+03	72	2,5E+03	75
<b>0,1</b>	7,8E+05	51	3,4E+05	55	1,4E+05	59	5,6E+04	62	2,3E+04	66	9,2E+03	69	3,8E+03	73	1,7E+03	76

Tabla 7.1.19. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 9% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	7,6E+06	39	4,7E+06	42	2,7E+06	45,9	1,5E+06	50	8,4E+05	53,5	4,7E+05	57	2,7E+05	61,1	1,6E+05	65
<b>61,1</b>	6,2E+06	40	3,8E+06	43	2,1E+06	46,9	1,2E+06	51	6,3E+05	54,5	3,5E+05	58	1,9E+05	61,5	1,1E+05	65
<b>37,3</b>	5,0E+06	41	3,0E+06	44	1,6E+06	47,8	8,8E+05	52	4,7E+05	55,2	2,5E+05	59	1,4E+05	62,1	8,0E+04	65
<b>22,8</b>	4,0E+06	42	2,4E+06	45	1,3E+06	48,8	6,7E+05	53	3,5E+05	56,2	1,9E+05	60	1,0E+05	62,9	5,6E+04	66
<b>13,9</b>	3,2E+06	43	1,9E+06	46	9,7E+05	49,9	5,1E+05	54	2,6E+05	57,2	1,3E+05	61	7,2E+04	63,7	3,9E+04	67
<b>8,48</b>	2,6E+06	44	1,4E+06	47	7,5E+05	50,9	3,8E+05	55	1,9E+05	58,2	9,7E+04	62	5,1E+04	64,7	2,7E+04	68
<b>5,18</b>	2,1E+06	45	1,1E+06	48	5,7E+05	52,0	2,8E+05	56	1,4E+05	59,2	6,9E+04	63	3,6E+04	65,8	1,9E+04	69
<b>3,16</b>	1,6E+06	46	8,8E+05	49	4,3E+05	53,1	2,1E+05	57	1,0E+05	60,3	5,0E+04	64	2,5E+04	67,0	1,3E+04	70
<b>1,93</b>	1,3E+06	47	6,8E+05	50	3,3E+05	54,2	1,5E+05	58	7,3E+04	61,4	3,5E+04	65	1,7E+04	68,2	8,9E+03	71
<b>1,18</b>	1,0E+06	48	5,2E+05	52	2,5E+05	55,3	1,1E+05	59	5,3E+04	62,5	2,5E+04	66	1,2E+04	69,4	6,0E+03	73
<b>0,72</b>	8,1E+05	49	4,0E+05	53	1,8E+05	56,5	8,4E+04	60	3,8E+04	63,7	1,8E+04	67	8,3E+03	70,6	4,1E+03	74
<b>0,44</b>	6,4E+05	50	3,1E+05	54	1,4E+05	57,6	6,1E+04	61	2,7E+04	64,9	1,2E+04	68	5,7E+03	72,0	2,7E+03	75
<b>0,27</b>	5,1E+05	51	2,4E+05	55	1,0E+05	58,7	4,5E+04	62	1,9E+04	66,1	8,6E+03	70	3,9E+03	73,3	1,8E+03	77
<b>0,16</b>	4,0E+05	52	1,8E+05	56	7,7E+04	59,9	3,3E+04	63	1,4E+04	67,3	6,0E+03	71	2,6E+03	74,5	1,2E+03	78
<b>0,1</b>	3,2E+05	53	1,4E+05	57	5,8E+04	60,9	2,4E+04	65	9,9E+03	68,3	4,2E+03	72	1,8E+03	76,0	8,1E+02	79

Tabla 7.1.20. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 9% (M2). (Elaboración propia)

Plato 8 [mm]

Frecuencia angular [rad/s]	T= 5 °C		T= 10 °C		T= 15 °C		T= 20 °C		T= 25 °C		T= 30 °C		T= 35 °C		T= 40 °C	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	1,2E+07	39	7,1E+06	42	4,0E+06	46	2,2E+06	50	1,2E+06	54	6,5E+05	58	3,6E+05	62	2,0E+05	65
61,1	9,7E+06	40	5,7E+06	43	3,1E+06	47	1,7E+06	51	9,0E+05	55	4,8E+05	58	2,6E+05	62	1,4E+05	65
37,3	7,9E+06	41	4,5E+06	44	2,4E+06	48	1,3E+06	52	6,7E+05	56	3,5E+05	59	1,8E+05	63	1,0E+05	66
22,8	6,3E+06	42	3,6E+06	45	1,9E+06	49	9,7E+05	53	5,0E+05	57	2,5E+05	60	1,3E+05	63	7,0E+04	66
13,9	5,0E+06	43	2,8E+06	46	1,4E+06	50	7,3E+05	54	3,6E+05	58	1,8E+05	61	9,3E+04	64	4,9E+04	67
8,48	4,0E+06	44	2,2E+06	47	1,1E+06	51	5,5E+05	55	2,7E+05	59	1,3E+05	62	6,6E+04	65	3,4E+04	68
5,18	3,2E+06	45	1,7E+06	49	8,4E+05	52	4,1E+05	56	1,9E+05	60	9,4E+04	63	4,6E+04	66	2,3E+04	70
3,16	2,5E+06	46	1,3E+06	50	6,3E+05	53	3,0E+05	57	1,4E+05	61	6,7E+04	64	3,2E+04	68	1,6E+04	71
1,93	2,0E+06	47	1,0E+06	51	4,8E+05	55	2,2E+05	58	1,0E+05	62	4,7E+04	65	2,2E+04	69	1,1E+04	72
1,18	1,6E+06	48	7,7E+05	52	3,6E+05	56	1,6E+05	59	7,3E+04	63	3,3E+04	67	1,5E+04	70	7,3E+03	74
0,72	1,2E+06	49	5,9E+05	53	2,7E+05	57	1,2E+05	61	5,2E+04	64	2,3E+04	68	1,1E+04	72	4,9E+03	75
0,44	9,7E+05	50	4,5E+05	54	2,0E+05	58	8,6E+04	62	3,7E+04	65	1,6E+04	69	7,1E+03	73	3,3E+03	76
0,27	7,7E+05	51	3,5E+05	55	1,5E+05	59	6,3E+04	63	2,6E+04	67	1,1E+04	71	4,8E+03	74	2,2E+03	78
0,16	6,1E+05	52	2,6E+05	57	1,1E+05	60	4,6E+04	64	1,9E+04	68	7,7E+03	72	3,3E+03	76	1,4E+03	79
0,1	4,8E+05	54	2,0E+05	58	8,2E+04	61	3,3E+04	65	1,3E+04	69	5,3E+03	73	2,2E+03	77	9,4E+02	80

Tabla 7.1.21. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 12% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
100	6,9E+06	45	4,4E+06	48	2,5E+06	50,9	1,3E+06	54	7,2E+05	57,2	3,9E+05	60	2,2E+05	63,2	1,2E+05	66
61,1	5,4E+06	46	3,4E+06	49	1,9E+06	51,8	9,9E+05	55	5,3E+05	58,2	2,8E+05	61	1,5E+05	64,0	8,5E+04	67
37,3	4,2E+06	47	2,6E+06	49	1,4E+06	52,7	7,4E+05	56	3,8E+05	59,0	2,0E+05	62	1,1E+05	65,0	5,9E+04	68
22,8	3,3E+06	48	2,0E+06	50	1,1E+06	53,7	5,5E+05	57	2,8E+05	59,9	1,4E+05	63	7,6E+04	65,8	4,1E+04	69
13,9	2,5E+06	49	1,5E+06	51	7,9E+05	54,6	4,0E+05	58	2,0E+05	60,8	1,0E+05	64	5,3E+04	66,7	2,8E+04	70

<b>8,48</b>	2,0E+06	50	1,2E+06	52	5,9E+05	55,5	2,9E+05	59	1,5E+05	61,8	7,2E+04	65	3,7E+04	67,8	1,9E+04	71
<b>5,18</b>	1,5E+06	51	8,8E+05	53	4,4E+05	56,5	2,1E+05	60	1,0E+05	62,7	5,1E+04	66	2,5E+04	68,9	1,3E+04	72
<b>3,16</b>	1,1E+06	52	6,6E+05	54	3,2E+05	57,5	1,6E+05	61	7,4E+04	63,7	3,6E+04	67	1,7E+04	70,1	8,8E+03	73
<b>1,93</b>	8,8E+05	53	5,0E+05	55	2,4E+05	58,4	1,1E+05	62	5,2E+04	64,9	2,5E+04	68	1,2E+04	71,3	5,9E+03	74
<b>1,18</b>	6,6E+05	54	3,7E+05	56	1,7E+05	59,5	8,1E+04	63	3,7E+04	66,0	1,7E+04	69	8,1E+03	72,5	4,0E+03	76
<b>0,72</b>	5,0E+05	55	2,8E+05	57	1,3E+05	60,4	5,8E+04	64	2,6E+04	67,2	1,2E+04	70	5,5E+03	73,8	2,6E+03	77
<b>0,44</b>	3,8E+05	56	2,1E+05	58	9,4E+04	61,6	4,1E+04	65	1,8E+04	68,5	8,1E+03	72	3,7E+03	75,0	1,7E+03	78
<b>0,27</b>	2,9E+05	57	1,5E+05	60	6,8E+04	62,6	3,0E+04	66	1,3E+04	69,7	5,5E+03	73	2,5E+03	76,3	1,1E+03	79
<b>0,16</b>	2,2E+05	58	1,2E+05	61	5,0E+04	63,6	2,1E+04	67	8,9E+03	70,9	3,8E+03	74	1,6E+03	77,4	7,4E+02	80
<b>0,1</b>	1,7E+05	59	8,6E+04	61	3,6E+04	65,0	1,5E+04	68	6,2E+03	71,9	2,6E+03	75	1,1E+03	78,2	4,9E+02	81

Tabla 7.1.22. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 12% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	5,2E+06	45	3,4E+06	48	1,9E+06	51	1,0E+06	54	5,7E+05	58	3,1E+05	61	1,8E+05	63	1,0E+05	67
<b>61,1</b>	4,1E+06	46	2,6E+06	49	1,4E+06	52	7,8E+05	55	4,2E+05	58	2,3E+05	61	1,2E+05	64	7,0E+04	67
<b>37,3</b>	3,2E+06	47	2,0E+06	50	1,1E+06	53	5,8E+05	56	3,1E+05	59	1,6E+05	62	8,8E+04	65	4,9E+04	68
<b>22,8</b>	2,5E+06	48	1,5E+06	51	8,2E+05	54	4,3E+05	57	2,2E+05	60	1,2E+05	63	6,2E+04	66	3,4E+04	69
<b>13,9</b>	1,9E+06	49	1,2E+06	52	6,1E+05	55	3,2E+05	58	1,6E+05	61	8,3E+04	64	4,3E+04	67	2,3E+04	69
<b>8,48</b>	1,5E+06	50	8,8E+05	53	4,6E+05	56	2,3E+05	59	1,2E+05	62	5,9E+04	65	3,0E+04	68	1,6E+04	70
<b>5,18</b>	1,1E+06	51	6,7E+05	54	3,4E+05	57	1,7E+05	60	8,3E+04	63	4,1E+04	66	2,1E+04	69	1,1E+04	72
<b>3,16</b>	8,6E+05	52	5,0E+05	55	2,5E+05	57	1,2E+05	61	5,9E+04	64	2,9E+04	67	1,4E+04	70	7,4E+03	73
<b>1,93</b>	6,6E+05	53	3,8E+05	55	1,8E+05	58	8,8E+04	61	4,2E+04	65	2,0E+04	68	9,8E+03	71	5,0E+03	74
<b>1,18</b>	5,0E+05	54	2,8E+05	56	1,4E+05	59	6,4E+04	63	3,0E+04	66	1,4E+04	69	6,7E+03	72	3,3E+03	75
<b>0,72</b>	3,8E+05	55	2,1E+05	57	9,9E+04	60	4,6E+04	64	2,1E+04	67	9,6E+03	70	4,5E+03	73	2,2E+03	76
<b>0,44</b>	2,9E+05	56	1,6E+05	58	7,2E+04	61	3,3E+04	65	1,5E+04	68	6,6E+03	71	3,0E+03	75	1,5E+03	77

<b>0,27</b>	2,2E+05	57	1,2E+05	59	5,3E+04	62	2,3E+04	66	1,0E+04	69	4,5E+03	72	2,0E+03	76	9,6E+02	78
<b>0,16</b>	1,7E+05	57	8,7E+04	60	3,8E+04	64	1,7E+04	67	7,1E+03	70	3,1E+03	74	1,4E+03	77	6,3E+02	79
<b>0,1</b>	1,3E+05	58	6,5E+04	62	2,8E+04	65	1,2E+04	68	5,0E+03	71	2,1E+03	75	9,2E+02	78	4,2E+02	80

7.1.4.2. Muestras de CA-24 con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5 a 75°C para el ligante CA-24 en las dosis óptimas de LPO-M en estado sin envejecer, con envejecimiento RTFO y PAV se presentan desde Tabla 7.1.23 hasta la Tabla 7.1.28.

Tabla 7.1.23. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 8,6% SE (M1).  
(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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ		
<b>100</b>	1,4E+07	39	8,3E+06	43	4,7E+06	46	2,6E+06	50	1,4E+06	53	7,7E+05	57	4,3E+05	60	2,4E+05	62	1,7E+05	65	9,2E+04	68	5,1E+04	70	2,9E+04	73	1,6E+04	75	9,4E+03	78	5,5E+03	80		
<b>61,1</b>	1,2E+07	40	6,6E+06	44	3,6E+06	47	2,0E+06	51	1,1E+06	54	5,6E+05	58	3,1E+05	61	1,7E+05	63	1,2E+05	66	6,3E+04	69	3,5E+04	71	2,0E+04	74	1,1E+04	77	6,1E+03	79	3,5E+03	81		
<b>37,3</b>	9,3E+06	41	5,2E+06	45	2,8E+06	48	1,5E+06	52	7,8E+05	55	4,1E+05	59	2,2E+05	62	1,2E+05	64	8,1E+04	67	4,3E+04	70	2,4E+04	73	1,3E+04	75	7,1E+03	78	3,9E+03	80	2,3E+03	82		
<b>22,8</b>	7,5E+06	42	4,1E+06	46	2,2E+06	49	1,1E+06	53	5,8E+05	56	3,0E+05	59	1,6E+05	63	8,6E+04	65	5,6E+04	68	3,0E+04	71	1,6E+04	74	8,6E+03	76	4,6E+03	79	2,5E+03	81	1,4E+03	83		
<b>13,9</b>	6,0E+06	43	3,2E+06	47	1,7E+06	50	8,5E+05	54	4,3E+05	57	2,2E+05	60	1,1E+05	64	6,0E+04	66	3,9E+04	69	2,0E+04	72	1,0E+04	75	5,6E+03	78	3,0E+03	80	1,6E+03	82	9,1E+02	84		
<b>8,48</b>	4,7E+06	44	2,5E+06	48	1,3E+06	51	6,3E+05	55	3,1E+05	58	1,6E+05	61	8,0E+04	65	4,2E+04	68	2,6E+04	71	1,3E+04	74	6,9E+03	76	3,7E+03	79	1,9E+03	82	1,0E+03	84	5,7E+02	85		
<b>5,18</b>	3,7E+06	45	1,9E+06	49	9,6E+05	52	4,7E+05	56	2,3E+05	59	1,1E+05	62	5,6E+04	66	2,9E+04	69	1,8E+04	72	8,9E+03	75	4,5E+03	78	2,4E+03	80	1,2E+03	83	6,4E+02	85	3,6E+02	86		
<b>3,16</b>	3,0E+06	46	1,5E+06	50	7,2E+05	53	3,5E+05	57	1,7E+05	60	8,0E+04	64	3,9E+04	67	2,0E+04	70	1,2E+04	73	5,9E+03	76	3,0E+03	79	1,5E+03	82	7,7E+02	84	4,0E+02	86	2,2E+02	87		
<b>1,93</b>	2,3E+06	47	1,1E+06	51	5,4E+05	54	2,6E+05	58	1,2E+05	61	5,7E+04	65	2,7E+04	68	1,3E+04	71	8,1E+03	75	3,9E+03	78	1,9E+03	81	9,6E+02	83	4,8E+02	85	2,5E+02	87	1,4E+02	88		
<b>1,18</b>	1,8E+06	48	8,7E+05	52	4,1E+05	56	1,9E+05	59	8,7E+04	62	4,0E+04	66	1,9E+04	69	9,2E+03	73	5,4E+03	76	2,5E+03	79	1,2E+03	82	6,1E+02	84	3,0E+02	86	1,6E+02	87	8,4E+01	88		
<b>0,72</b>	1,4E+06	49	6,6E+05	53	3,0E+05	57	1,4E+05	60	6,2E+04	64	2,8E+04	67	1,3E+04	71	6,2E+03	74	3,5E+03	78	1,6E+03	80	7,8E+02	83	3,8E+02	85	1,9E+02	87	9,7E+01	88	5,2E+01	89		
<b>0,44</b>	1,1E+06	50	5,1E+05	54	2,3E+05	58	1,0E+05	61	4,4E+04	65	2,0E+04	68	8,9E+03	72	4,1E+03	75	2,3E+03	79	1,0E+03	82	4,9E+02	84	2,4E+02	86	1,2E+02	88	5,9E+01	89	3,2E+01	89		
<b>0,27</b>	8,7E+05	51	3,9E+05	55	1,7E+05	59	7,3E+04	62	3,1E+04	66	1,4E+04	70	6,0E+03	74	2,7E+03	77	1,5E+03	81	6,7E+02	83	3,1E+02	85	1,5E+02	87	7,1E+01	88	3,6E+01	89	1,9E+01	90		
<b>0,16</b>	6,8E+05	52	2,9E+05	56	1,3E+05	60	5,3E+04	64	2,2E+04	67	9,5E+03	71	4,1E+03	75	1,8E+03	78	9,6E+02	82	4,2E+02	84	1,9E+02	86	9,1E+01	87	4,4E+01	89	2,2E+01	89	1,2E+01	89		
<b>0,1</b>	5,3E+05	53	2,2E+05	57	9,3E+04	61	3,9E+04	64	1,6E+04	68	6,6E+03	72	2,8E+03	76	1,2E+03	79	6,1E+02	83	2,7E+02	85	1,2E+02	87	5,6E+01	88	2,7E+01	89	1,4E+01	89	7,3E+00	89		

Tabla 7.1.24. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 8,6% SE (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	1,5E+07	39	9,1E+06	42	5,1E+06	46	2,8E+06	50	1,5E+06	53	8,3E+05	56	4,6E+05	60	2,6E+05	62	9,5E+04	68	5,3E+04	70	3,0E+04	73	1,7E+04	75	9,9E+03	77	5,8E+03	80	3,5E+03	83
61,1	1,3E+07	40	7,2E+06	43	4,0E+06	47	2,1E+06	51	1,1E+06	54	6,1E+05	57	3,3E+05	60	1,8E+05	63	6,6E+04	69	3,6E+04	71	2,0E+04	74	1,1E+04	76	6,4E+03	79	3,7E+03	81	2,2E+03	83
37,3	1,0E+07	41	5,7E+06	45	3,1E+06	48	1,6E+06	52	8,6E+05	55	4,5E+05	58	2,4E+05	61	1,3E+05	64	4,5E+04	70	2,5E+04	73	1,3E+04	75	7,5E+03	77	4,2E+03	80	2,4E+03	82	1,4E+03	84
22,8	8,1E+06	42	4,5E+06	45	2,4E+06	49	1,2E+06	53	6,4E+05	56	3,3E+05	59	1,7E+05	62	9,1E+04	65	3,1E+04	71	1,6E+04	74	8,9E+03	76	4,9E+03	79	2,7E+03	81	1,5E+03	83	8,9E+02	84
13,9	6,5E+06	43	3,5E+06	46	1,8E+06	50	9,3E+05	54	4,7E+05	57	2,4E+05	60	1,2E+05	63	6,4E+04	66	2,1E+04	72	1,1E+04	75	5,8E+03	77	3,2E+03	80	1,7E+03	82	9,6E+02	84	5,6E+02	85
8,48	5,2E+06	44	2,7E+06	47	1,4E+06	51	6,9E+05	55	3,4E+05	58	1,7E+05	61	8,6E+04	64	4,5E+04	67	1,4E+04	73	7,2E+03	76	3,8E+03	79	2,0E+03	81	1,1E+03	83	6,1E+02	85	3,5E+02	86
5,18	4,1E+06	45	2,1E+06	48	1,1E+06	52	5,2E+05	56	2,5E+05	59	1,2E+05	62	6,1E+04	65	3,1E+04	68	9,3E+03	75	4,8E+03	78	2,5E+03	80	1,3E+03	82	6,9E+02	84	3,8E+02	86	2,2E+02	87
3,16	3,2E+06	46	1,6E+06	50	8,0E+05	53	3,8E+05	57	1,8E+05	60	8,7E+04	63	4,3E+04	67	2,1E+04	70	6,2E+03	76	3,1E+03	79	1,6E+03	81	8,3E+02	83	4,3E+02	85	2,4E+02	87	1,3E+02	88
1,93	2,6E+06	47	1,3E+06	51	6,0E+05	54	2,8E+05	58	1,3E+05	61	6,2E+04	64	3,0E+04	68	1,5E+04	71	4,1E+03	77	2,0E+03	80	1,0E+03	83	5,2E+02	84	2,7E+02	86	1,5E+02	87	8,3E+01	88
1,18	2,0E+06	48	9,7E+05	52	4,5E+05	55	2,1E+05	59	9,6E+04	62	4,4E+04	66	2,1E+04	69	9,9E+03	72	2,7E+03	79	1,3E+03	81	6,4E+02	84	3,3E+02	86	1,7E+02	87	9,1E+01	88	5,1E+01	89
0,72	1,6E+06	49	7,4E+05	53	3,4E+05	56	1,5E+05	60	6,9E+04	63	3,1E+04	67	1,4E+04	70	6,7E+03	74	1,7E+03	80	8,2E+02	83	4,1E+02	85	2,0E+02	86	1,0E+02	88	5,6E+01	88	3,2E+01	89
0,44	1,2E+06	50	5,7E+05	54	2,5E+05	57	1,1E+05	61	4,9E+04	64	2,2E+04	68	9,7E+03	72	4,5E+03	75	1,1E+03	82	5,2E+02	84	2,5E+02	86	1,3E+02	87	6,4E+01	88	3,4E+01	89	1,9E+01	89
0,27	9,7E+05	51	4,3E+05	55	1,9E+05	58	8,1E+04	62	3,5E+04	66	1,5E+04	69	6,6E+03	73	3,0E+03	76	7,1E+02	83	3,3E+02	85	1,6E+02	87	7,8E+01	88	3,9E+01	88	2,1E+01	89	1,2E+01	89
0,16	7,6E+05	52	3,3E+05	56	1,4E+05	59	5,9E+04	63	2,5E+04	67	1,0E+04	71	4,5E+03	74	2,0E+03	78	4,5E+02	84	2,1E+02	86	9,8E+01	87	4,8E+01	88	2,4E+01	89	1,3E+01	89	7,3E+00	88
0,1	6,0E+05	53	2,5E+05	57	1,1E+05	61	4,3E+04	64	1,8E+04	68	7,3E+03	72	3,0E+03	76	1,3E+03	78	2,8E+02	85	1,3E+02	87	6,1E+01	88	2,9E+01	89	1,5E+01	89	8,0E+00	90	4,6E+00	88

Tabla 7.1.25. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 8,6% RTFO (M1).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	7,9E+07	25	5,4E+07	28	3,5E+07	31	2,1E+07	34	1,3E+07	37	7,6E+06	41	4,4E+06	44	2,5E+06	47
61,1	6,9E+07	25	4,6E+07	29	2,9E+07	32	1,8E+07	35	1,1E+07	38	6,1E+06	42	3,4E+06	45	1,9E+06	48
37,3	6,0E+07	26	4,0E+07	29	2,5E+07	33	1,5E+07	36	8,6E+06	39	4,8E+06	43	2,7E+06	46	1,5E+06	49

<b>22,8</b>	5,2E+07	27	3,4E+07	30	2,1E+07	33	1,2E+07	37	6,9E+06	40	3,8E+06	43	2,1E+06	47	1,1E+06	50
<b>13,9</b>	4,6E+07	28	2,9E+07	31	1,7E+07	34	1,0E+07	38	5,6E+06	41	3,0E+06	44	1,6E+06	48	8,7E+05	51
<b>8,48</b>	3,9E+07	29	2,4E+07	32	1,4E+07	35	8,2E+06	39	4,5E+06	42	2,4E+06	45	1,3E+06	49	6,6E+05	52
<b>5,18</b>	3,4E+07	30	2,1E+07	33	1,2E+07	36	6,6E+06	40	3,6E+06	43	1,9E+06	46	9,6E+05	50	4,9E+05	54
<b>3,16</b>	2,9E+07	30	1,7E+07	34	9,9E+06	37	5,4E+06	40	2,8E+06	44	1,5E+06	47	7,3E+05	51	3,7E+05	55
<b>1,93</b>	2,5E+07	31	1,5E+07	35	8,2E+06	38	4,3E+06	41	2,2E+06	45	1,1E+06	49	5,6E+05	52	2,7E+05	56
<b>1,18</b>	2,1E+07	32	1,2E+07	36	6,7E+06	39	3,5E+06	42	1,8E+06	46	8,7E+05	50	4,2E+05	54	2,0E+05	57
<b>0,72</b>	1,8E+07	33	1,0E+07	37	5,5E+06	40	2,8E+06	44	1,4E+06	47	6,7E+05	51	3,2E+05	55	1,5E+05	59
<b>0,44</b>	1,5E+07	34	8,5E+06	38	4,5E+06	41	2,2E+06	45	1,1E+06	48	5,1E+05	52	2,4E+05	56	1,1E+05	60
<b>0,27</b>	1,3E+07	35	7,1E+06	39	3,6E+06	42	1,8E+06	46	8,4E+05	50	3,9E+05	54	1,7E+05	57	7,8E+04	61
<b>0,16</b>	1,1E+07	36	5,9E+06	39	3,0E+06	43	1,4E+06	47	6,5E+05	51	2,9E+05	55	1,3E+05	59	5,6E+04	63
<b>0,1</b>	9,4E+06	37	4,9E+06	41	2,4E+06	44	1,1E+06	48	5,1E+05	52	2,2E+05	56	9,5E+04	60	4,0E+04	64

Tabla 7.1.26. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 8,6% RTFO (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	6,1E+07	35	4,8E+07	30	3,3E+07	31	2,1E+07	34	1,2E+07	38	7,3E+06	41	4,2E+06	45	2,4E+06	48
<b>61,1</b>	5,4E+07	34	4,2E+07	31	2,8E+07	32	1,7E+07	36	1,0E+07	39	5,8E+06	42	3,3E+06	46	1,9E+06	49
<b>37,3</b>	4,8E+07	33	3,6E+07	31	2,4E+07	33	1,4E+07	36	8,2E+06	40	4,6E+06	43	2,6E+06	47	1,4E+06	50
<b>22,8</b>	4,3E+07	33	3,2E+07	31	2,0E+07	34	1,2E+07	37	6,6E+06	41	3,7E+06	44	2,0E+06	48	1,1E+06	51
<b>13,9</b>	3,8E+07	33	2,7E+07	31	1,6E+07	35	9,5E+06	38	5,3E+06	42	2,9E+06	45	1,5E+06	49	8,2E+05	52
<b>8,48</b>	3,4E+07	32	2,3E+07	32	1,4E+07	36	7,7E+06	39	4,2E+06	43	2,2E+06	46	1,2E+06	50	6,1E+05	53
<b>5,18</b>	3,0E+07	31	1,9E+07	33	1,1E+07	37	6,3E+06	40	3,3E+06	44	1,7E+06	48	8,9E+05	51	4,6E+05	54
<b>3,16</b>	2,7E+07	31	1,6E+07	34	9,3E+06	38	5,1E+06	41	2,6E+06	45	1,3E+06	49	6,8E+05	52	3,4E+05	55
<b>1,93</b>	2,3E+07	32	1,4E+07	35	7,7E+06	39	4,1E+06	42	2,1E+06	46	1,0E+06	50	5,1E+05	53	2,5E+05	57
<b>1,18</b>	2,0E+07	33	1,1E+07	36	6,3E+06	40	3,3E+06	44	1,6E+06	47	8,0E+05	51	3,8E+05	54	1,9E+05	58

<b>0,72</b>	1,7E+07	34	9,6E+06	37	5,1E+06	41	2,6E+06	45	1,3E+06	48	6,1E+05	52	2,9E+05	56	1,4E+05	59
<b>0,44</b>	1,4E+07	35	7,9E+06	38	4,2E+06	42	2,1E+06	46	9,9E+05	50	4,6E+05	53	2,1E+05	57	9,8E+04	60
<b>0,27</b>	1,2E+07	36	6,6E+06	39	3,4E+06	43	1,6E+06	47	7,6E+05	51	3,5E+05	55	1,6E+05	58	7,1E+04	62
<b>0,16</b>	1,0E+07	36	5,5E+06	40	2,7E+06	44	1,3E+06	48	5,9E+05	52	2,6E+05	56	1,2E+05	59	5,1E+04	63
<b>0,1</b>	8,8E+06	37	4,6E+06	41	2,2E+06	45	1,0E+06	49	4,6E+05	53	2,0E+05	57	8,6E+04	61	3,7E+04	64

Tabla 7.1.27. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 8,6% PAV (MI).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	1,0E+08	22	7,2E+07	25	4,8E+07	27	3,1E+07	30	2,0E+07	33	1,2E+07	36	7,6E+06	39	4,6E+06	41
<b>61,1</b>	9,3E+07	23	6,3E+07	25	4,2E+07	28	2,7E+07	31	1,7E+07	34	1,0E+07	36	6,1E+06	39	3,6E+06	42
<b>37,3</b>	8,3E+07	23	5,5E+07	26	3,6E+07	29	2,3E+07	31	1,4E+07	34	8,4E+06	37	5,0E+06	40	2,9E+06	43
<b>22,8</b>	7,3E+07	24	4,8E+07	27	3,1E+07	29	1,9E+07	32	1,2E+07	35	6,9E+06	38	4,0E+06	41	2,3E+06	44
<b>13,9</b>	6,4E+07	25	4,2E+07	27	2,6E+07	30	1,6E+07	33	9,6E+06	36	5,6E+06	39	3,2E+06	42	1,8E+06	45
<b>8,48</b>	5,7E+07	25	3,6E+07	28	2,3E+07	31	1,4E+07	34	7,9E+06	37	4,5E+06	40	2,5E+06	43	1,4E+06	46
<b>5,18</b>	5,0E+07	26	3,1E+07	29	1,9E+07	31	1,1E+07	34	6,5E+06	37	3,6E+06	41	2,0E+06	44	1,1E+06	47
<b>3,16</b>	4,3E+07	27	2,7E+07	29	1,6E+07	32	9,5E+06	35	5,3E+06	38	2,9E+06	42	1,6E+06	45	8,5E+05	48
<b>1,93</b>	3,8E+07	27	2,3E+07	30	1,4E+07	33	7,9E+06	36	4,4E+06	39	2,4E+06	43	1,2E+06	46	6,5E+05	49
<b>1,18</b>	3,3E+07	28	2,0E+07	31	1,2E+07	34	6,5E+06	37	3,5E+06	40	1,9E+06	44	9,8E+05	47	5,0E+05	50
<b>0,72</b>	2,9E+07	29	1,7E+07	32	9,7E+06	35	5,4E+06	38	2,9E+06	41	1,5E+06	45	7,6E+05	48	3,8E+05	51
<b>0,44</b>	2,5E+07	30	1,4E+07	33	8,1E+06	36	4,4E+06	39	2,3E+06	43	1,2E+06	46	5,9E+05	49	2,9E+05	52
<b>0,27</b>	2,2E+07	30	1,2E+07	34	6,8E+06	37	3,6E+06	40	1,9E+06	44	9,3E+05	47	4,5E+05	51	2,2E+05	54
<b>0,16</b>	1,9E+07	31	1,1E+07	35	5,7E+06	38	3,0E+06	41	1,5E+06	45	7,3E+05	48	3,5E+05	52	1,7E+05	55
<b>0,1</b>	1,6E+07	32	9,0E+06	36	4,8E+06	39	2,4E+06	43	1,2E+06	46	5,7E+05	50	2,7E+05	53	1,2E+05	56

Tabla 7.1.28. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con LPO-M 8,6% PAV (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	7,6E+07	23	5,4E+07	25	3,6E+07	28	2,4E+07	30	1,5E+07	33	9,6E+06	36	5,9E+06	39	3,6E+06	42
<b>61,1</b>	6,7E+07	23	4,7E+07	26	3,1E+07	28	2,0E+07	31	1,3E+07	34	7,9E+06	36	4,8E+06	39	2,9E+06	42
<b>37,3</b>	5,9E+07	24	4,1E+07	26	2,7E+07	29	1,7E+07	32	1,1E+07	34	6,5E+06	37	3,9E+06	40	2,3E+06	43
<b>22,8</b>	5,2E+07	25	3,6E+07	27	2,3E+07	30	1,5E+07	32	8,9E+06	35	5,3E+06	38	3,1E+06	41	1,8E+06	44
<b>13,9</b>	4,6E+07	25	3,1E+07	28	2,0E+07	30	1,2E+07	33	7,4E+06	36	4,3E+06	39	2,5E+06	42	1,4E+06	45
<b>8,48</b>	4,0E+07	26	2,7E+07	28	1,7E+07	31	1,0E+07	34	6,1E+06	37	3,5E+06	40	2,0E+06	43	1,1E+06	46
<b>5,18</b>	3,5E+07	27	2,3E+07	29	1,4E+07	32	8,6E+06	35	5,0E+06	38	2,8E+06	41	1,6E+06	44	8,7E+05	47
<b>3,16</b>	3,1E+07	27	2,0E+07	30	1,2E+07	33	7,1E+06	36	4,1E+06	39	2,3E+06	42	1,2E+06	45	6,8E+05	48
<b>1,93</b>	2,7E+07	28	1,7E+07	31	1,0E+07	34	5,9E+06	36	3,3E+06	40	1,8E+06	43	9,8E+05	46	5,2E+05	49
<b>1,18</b>	2,3E+07	29	1,5E+07	32	8,6E+06	34	4,9E+06	37	2,7E+06	41	1,5E+06	44	7,7E+05	47	4,0E+05	50
<b>0,72</b>	2,0E+07	29	1,2E+07	32	7,2E+06	35	4,1E+06	38	2,2E+06	42	1,2E+06	45	6,0E+05	48	3,1E+05	51
<b>0,44</b>	1,8E+07	30	1,1E+07	33	6,1E+06	36	3,3E+06	39	1,8E+06	43	9,2E+05	46	4,6E+05	49	2,3E+05	52
<b>0,27</b>	1,5E+07	31	9,1E+06	34	5,1E+06	37	2,7E+06	41	1,4E+06	44	7,2E+05	47	3,6E+05	50	1,8E+05	54
<b>0,16</b>	1,3E+07	32	7,8E+06	35	4,3E+06	38	2,3E+06	42	1,1E+06	45	5,7E+05	48	2,8E+05	52	1,3E+05	55
<b>0,1</b>	1,2E+07	33	6,6E+06	36	3,6E+06	39	1,9E+06	42	9,2E+05	46	4,5E+05	49	2,1E+05	53	1,0E+05	56

## 7.1.5. CA-14 con LPO-M

### 7.1.5.1. Muestras de CA-14 con LPO-M en dosis 3, 6 y 9%

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5°C a 40°C para el ligante CA-14 en dosis 3, 6 y 9% de LPO-M se presentan desde la Tabla 7.1.29 hasta la Tabla 7.1.34.

Tabla 7.1.29. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 3% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	7,6E+07	28	4,8E+07	31	2,9E+07	34,3	1,6E+07	38	8,6E+06	42,0	4,3E+06	47	2,0E+06	51,6	1,0E+06	56
61,1	6,5E+07	29	4,1E+07	32	2,4E+07	35,1	1,3E+07	39	6,9E+06	42,9	3,3E+06	48	1,5E+06	52,5	7,3E+05	57
37,3	5,6E+07	29	3,5E+07	33	2,0E+07	35,8	1,1E+07	40	5,5E+06	44,0	2,6E+06	48	1,1E+06	53,3	5,4E+05	57
22,8	4,8E+07	30	2,9E+07	33	1,6E+07	36,6	8,7E+06	40	4,3E+06	44,7	2,0E+06	49	8,4E+05	54,1	4,0E+05	58
13,9	4,1E+07	31	2,4E+07	34	1,4E+07	37,4	7,0E+06	41	3,4E+06	45,5	1,5E+06	50	6,3E+05	55,0	2,9E+05	59
8,48	3,5E+07	32	2,0E+07	35	1,1E+07	38,2	5,6E+06	42	2,6E+06	46,4	1,2E+06	51	4,7E+05	55,8	2,1E+05	60
5,18	3,0E+07	32	1,7E+07	36	9,1E+06	39,0	4,5E+06	43	2,1E+06	47,3	8,7E+05	52	3,4E+05	56,6	1,5E+05	60
3,16	2,5E+07	33	1,4E+07	36	7,4E+06	39,9	3,6E+06	44	1,6E+06	48,3	6,6E+05	53	2,5E+05	57,5	1,1E+05	61
1,93	2,1E+07	34	1,2E+07	37	6,0E+06	40,8	2,8E+06	45	1,2E+06	49,2	5,0E+05	54	1,9E+05	58,4	7,8E+04	62
1,18	1,8E+07	35	9,7E+06	38	4,9E+06	41,7	2,2E+06	46	9,6E+05	50,1	3,8E+05	55	1,4E+05	59,2	5,6E+04	63
0,72	1,5E+07	36	8,0E+06	39	3,9E+06	42,6	1,8E+06	47	7,4E+05	51,1	2,8E+05	55	1,0E+05	60,2	4,0E+04	65
0,44	1,3E+07	36	6,6E+06	40	3,2E+06	43,6	1,4E+06	48	5,7E+05	51,9	2,1E+05	56	7,3E+04	61,3	2,8E+04	66
0,27	1,1E+07	37	5,5E+06	41	2,6E+06	44,6	1,1E+06	49	4,4E+05	52,7	1,6E+05	57	5,3E+04	62,3	2,0E+04	67
0,16	9,0E+06	38	4,6E+06	42	2,1E+06	45,4	8,8E+05	49	3,4E+05	53,7	1,2E+05	58	3,9E+04	63,3	1,4E+04	69
0,1	7,7E+06	39	3,8E+06	42	1,7E+06	46,4	7,0E+05	50	2,6E+05	54,5	9,1E+04	59	2,8E+04	64,1	9,6E+03	70

Tabla 7.1.30. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 3% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	6,2E+07	27	4,1E+07	31	2,4E+07	34	1,4E+07	37	7,3E+06	41	3,6E+06	46	1,7E+06	51	8,4E+05	55
61,1	5,4E+07	28	3,4E+07	31	2,0E+07	35	1,1E+07	39	5,8E+06	42	2,8E+06	47	1,3E+06	52	6,2E+05	56
37,3	4,6E+07	29	2,9E+07	32	1,7E+07	35	9,2E+06	39	4,6E+06	43	2,2E+06	48	9,5E+05	53	4,6E+05	57

<b>22,8</b>	4,0E+07	30	2,5E+07	33	1,4E+07	36	7,4E+06	40	3,7E+06	44	1,7E+06	49	7,1E+05	54	3,3E+05	58
<b>13,9</b>	3,4E+07	30	2,1E+07	34	1,2E+07	37	6,0E+06	41	2,9E+06	45	1,3E+06	50	5,3E+05	55	2,4E+05	59
<b>8,48</b>	2,9E+07	31	1,7E+07	34	9,5E+06	38	4,8E+06	41	2,3E+06	46	9,9E+05	50	4,0E+05	55	1,8E+05	59
<b>5,18</b>	2,5E+07	32	1,4E+07	35	7,8E+06	38	3,9E+06	42	1,8E+06	47	7,5E+05	51	2,9E+05	56	1,3E+05	60
<b>3,16</b>	2,1E+07	33	1,2E+07	36	6,4E+06	39	3,1E+06	43	1,4E+06	47	5,7E+05	52	2,2E+05	57	9,2E+04	61
<b>1,93</b>	1,8E+07	33	1,0E+07	37	5,2E+06	40	2,5E+06	44	1,1E+06	48	4,3E+05	53	1,6E+05	58	6,6E+04	62
<b>1,18</b>	1,5E+07	34	8,4E+06	37	4,3E+06	41	2,0E+06	45	8,5E+05	49	3,3E+05	54	1,2E+05	59	4,7E+04	63
<b>0,72</b>	1,3E+07	35	7,0E+06	38	3,5E+06	42	1,6E+06	46	6,6E+05	50	2,5E+05	55	8,6E+04	60	3,4E+04	64
<b>0,44</b>	1,1E+07	36	5,8E+06	39	2,8E+06	43	1,2E+06	47	5,1E+05	51	1,9E+05	56	6,2E+04	61	2,4E+04	66
<b>0,27</b>	9,1E+06	37	4,8E+06	40	2,3E+06	44	9,9E+05	48	3,9E+05	52	1,4E+05	57	4,5E+04	62	1,7E+04	67
<b>0,16</b>	7,8E+06	37	4,0E+06	41	1,9E+06	45	7,9E+05	49	3,0E+05	53	1,1E+05	58	3,3E+04	63	1,2E+04	68
<b>0,1</b>	6,7E+06	38	3,4E+06	42	1,5E+06	45	6,3E+05	50	2,4E+05	54	8,0E+04	59	2,4E+04	65	8,2E+03	70

Tabla 7.1.31. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 6% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	1,9E+07	35	1,1E+07	38	6,2E+06	41,0	3,2E+06	45	1,6E+06	48,6	7,1E+05	53	3,2E+05	59,0	1,7E+05	63
<b>61,1</b>	1,5E+07	36	9,2E+06	38	5,0E+06	41,7	2,5E+06	45	1,2E+06	49,4	5,3E+05	54	2,3E+05	59,5	1,2E+05	63
<b>37,3</b>	1,3E+07	36	7,5E+06	39	4,0E+06	42,4	2,0E+06	46	9,1E+05	50,1	3,9E+05	55	1,7E+05	60,0	8,5E+04	64
<b>22,8</b>	1,0E+07	37	6,0E+06	40	3,2E+06	43,0	1,5E+06	47	6,9E+05	50,9	2,9E+05	56	1,2E+05	60,7	6,0E+04	64
<b>13,9</b>	8,6E+06	37	4,9E+06	40	2,5E+06	43,6	1,2E+06	47	5,3E+05	51,6	2,2E+05	57	8,7E+04	61,4	4,2E+04	65
<b>8,48</b>	7,0E+06	38	3,9E+06	41	2,0E+06	44,2	9,3E+05	48	4,0E+05	52,4	1,6E+05	57	6,2E+04	62,3	3,0E+04	66
<b>5,18</b>	5,8E+06	39	3,2E+06	42	1,6E+06	44,9	7,2E+05	49	3,0E+05	53,3	1,2E+05	58	4,4E+04	63,2	2,1E+04	67
<b>3,16</b>	4,7E+06	39	2,5E+06	42	1,2E+06	45,6	5,5E+05	49	2,3E+05	54,1	8,5E+04	59	3,1E+04	64,1	1,4E+04	68
<b>1,93</b>	3,8E+06	40	2,0E+06	43	9,7E+05	46,2	4,3E+05	50	1,7E+05	54,9	6,2E+04	60	2,2E+04	65,1	1,0E+04	69
<b>1,18</b>	3,1E+06	41	1,6E+06	44	7,7E+05	47,0	3,3E+05	51	1,3E+05	55,7	4,5E+04	61	1,6E+04	66,2	6,9E+03	70
<b>0,72</b>	2,5E+06	42	1,3E+06	44	6,0E+05	47,8	2,5E+05	52	9,5E+04	56,6	3,3E+04	62	1,1E+04	67,3	4,7E+03	71

<b>0,44</b>	2,1E+06	42	1,1E+06	45	4,7E+05	48,5	1,9E+05	53	7,1E+04	57,4	2,4E+04	62	7,7E+03	68,4	3,2E+03	73
<b>0,27</b>	1,7E+06	43	8,5E+05	46	3,8E+05	49,2	1,5E+05	54	5,3E+04	58,2	1,7E+04	63	5,4E+03	69,7	2,1E+03	74
<b>0,16</b>	1,4E+06	43	6,9E+05	47	3,0E+05	50,0	1,1E+05	54	4,0E+04	58,8	1,3E+04	64	3,7E+03	70,7	1,4E+03	75
<b>0,1</b>	1,2E+06	44	5,6E+05	47	2,4E+05	50,7	8,9E+04	55	3,0E+04	59,1	9,1E+03	65	2,6E+03	71,6	9,7E+02	77

Tabla 7.1.32. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 6% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	1,7E+07	36	9,6E+06	39	5,1E+06	42	2,6E+06	46	1,3E+06	49	5,8E+05	54	2,6E+05	60	1,3E+05	64
<b>61,1</b>	1,4E+07	37	7,7E+06	40	4,1E+06	43	2,0E+06	46	9,7E+05	50	4,3E+05	55	1,8E+05	60	9,3E+04	64
<b>37,3</b>	1,1E+07	37	6,3E+06	41	3,2E+06	43	1,6E+06	47	7,4E+05	51	3,2E+05	56	1,3E+05	61	6,6E+04	64
<b>22,8</b>	9,3E+06	38	5,0E+06	41	2,6E+06	44	1,2E+06	47	5,7E+05	51	2,4E+05	56	9,6E+04	61	4,7E+04	65
<b>13,9</b>	7,6E+06	38	4,0E+06	41	2,0E+06	44	9,6E+05	48	4,3E+05	52	1,8E+05	57	6,9E+04	62	3,3E+04	66
<b>8,48</b>	6,2E+06	39	3,2E+06	42	1,6E+06	45	7,5E+05	49	3,2E+05	53	1,3E+05	58	4,9E+04	63	2,3E+04	66
<b>5,18</b>	5,1E+06	39	2,6E+06	42	1,3E+06	45	5,8E+05	49	2,4E+05	54	9,4E+04	59	3,5E+04	64	1,6E+04	67
<b>3,16</b>	4,2E+06	40	2,1E+06	43	1,0E+06	46	4,4E+05	50	1,8E+05	55	6,9E+04	59	2,5E+04	65	1,1E+04	68
<b>1,93</b>	3,4E+06	40	1,7E+06	43	7,8E+05	47	3,4E+05	51	1,4E+05	55	5,0E+04	60	1,7E+04	65	7,6E+03	70
<b>1,18</b>	2,8E+06	41	1,3E+06	44	6,2E+05	48	2,6E+05	52	1,0E+05	56	3,7E+04	61	1,2E+04	66	5,2E+03	71
<b>0,72</b>	2,3E+06	41	1,1E+06	45	4,8E+05	48	2,0E+05	53	7,7E+04	57	2,7E+04	61	8,6E+03	67	3,6E+03	72
<b>0,44</b>	1,9E+06	42	8,7E+05	46	3,8E+05	49	1,5E+05	53	5,7E+04	57	1,9E+04	62	6,0E+03	68	2,4E+03	73
<b>0,27</b>	1,5E+06	43	7,0E+05	46	3,0E+05	50	1,2E+05	54	4,3E+04	58	1,4E+04	62	4,2E+03	69	1,6E+03	74
<b>0,16</b>	1,3E+06	43	5,7E+05	47	2,4E+05	51	9,1E+04	54	3,3E+04	58	1,1E+04	63	3,0E+03	70	1,1E+03	75
<b>0,1</b>	1,1E+06	44	4,6E+05	48	1,9E+05	51	7,1E+04	55	2,5E+04	58	7,8E+03	62	2,1E+03	71	7,3E+02	77

Tabla 7.1.33. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 9% (M1). (Elaboración propia)

Plato 8 [mm]

Frecuencia angular [rad/s]	T= 5 °C		T= 10 °C		T= 15 °C		T= 20 °C		T= 25 °C		T= 30 °C		T= 35 °C		T= 40 °C	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	5,9E+05	56	5,0E+05	55	2,8E+05	57,5	1,4E+05	62	6,3E+04	68,3	2,8E+04	79	1,5E+04	90,0	1,0E+04	90
61,1	4,4E+05	56	3,8E+05	55	2,1E+05	57,7	1,0E+05	62	4,5E+04	67,3	2,0E+04	75	1,0E+04	85,4	6,3E+03	90
37,3	3,3E+05	57	2,8E+05	56	1,5E+05	57,9	7,3E+04	62	3,2E+04	66,9	1,4E+04	73	6,8E+03	80,0	4,1E+03	86
22,8	2,4E+05	57	2,1E+05	56	1,1E+05	58,3	5,3E+04	62	2,2E+04	67,1	9,4E+03	72	4,6E+03	78,1	2,8E+03	82
13,9	1,8E+05	58	1,6E+05	57	8,3E+04	58,8	3,8E+04	63	1,6E+04	67,4	6,4E+03	72	3,1E+03	76,3	1,9E+03	79
8,48	1,3E+05	59	1,2E+05	57	6,1E+04	59,3	2,7E+04	63	1,1E+04	68,0	4,4E+03	73	2,1E+03	76,6	1,2E+03	79
5,18	9,7E+04	59	8,6E+04	58	4,5E+04	59,9	2,0E+04	64	7,7E+03	68,8	3,0E+03	74	1,4E+03	77,2	8,0E+02	79
3,16	7,1E+04	60	6,3E+04	59	3,3E+04	60,5	1,4E+04	64	5,3E+03	69,7	2,0E+03	75	9,1E+02	78,7	5,2E+02	82
1,93	5,2E+04	61	4,7E+04	59	2,4E+04	61,2	9,9E+03	65	3,7E+03	70,6	1,3E+03	76	5,9E+02	80,4	3,4E+02	82
1,18	3,8E+04	62	3,5E+04	60	1,7E+04	61,7	7,1E+03	66	2,5E+03	71,2	9,0E+02	77	3,8E+02	80,2	2,2E+02	83
0,72	2,8E+04	63	2,6E+04	61	1,3E+04	62,3	5,0E+03	66	1,7E+03	72,0	6,0E+02	77	2,5E+02	80,8	1,4E+02	81
0,44	2,0E+04	64	1,9E+04	61	9,3E+03	62,9	3,6E+03	67	1,2E+03	72,6	4,0E+02	78	1,6E+02	80,7	9,0E+01	80
0,27	1,5E+04	64	1,4E+04	62	6,9E+03	63,2	2,6E+03	67	8,4E+02	73,1	2,7E+02	78	1,0E+02	80,5	5,8E+01	75
0,16	1,1E+04	65	1,1E+04	62	5,1E+03	63,5	1,9E+03	67	5,9E+02	73,2	1,8E+02	78	6,9E+01	79,7	3,7E+01	71
0,1	8,2E+03	65	8,2E+03	63	3,9E+03	63,3	1,4E+03	67	4,2E+02	72,9	1,2E+02	76	4,6E+01	78,4	2,6E+01	67

Tabla 7.1.34. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 9% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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		
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	
[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	3,4E+06	45	2,4E+06	46	1,4E+06	48	7,1E+05	52	3,4E+05	57	1,5E+05	63	6,9E+04	70	3,9E+04	74	
61,1	2,7E+06	46	1,9E+06	46	1,1E+06	49	5,4E+05	52	2,5E+05	57	1,1E+05	63	4,9E+04	69	2,7E+04	72	
37,3	2,1E+06	46	1,5E+06	47	8,3E+05	49	4,1E+05	53	1,9E+05	58	7,8E+04	63	3,4E+04	68	1,9E+04	71	
22,8	1,6E+06	46	1,2E+06	47	6,4E+05	50	3,1E+05	54	1,4E+05	58	5,6E+04	63	2,4E+04	68	1,3E+04	71	
13,9	1,3E+06	47	9,2E+05	47	4,9E+05	50	2,3E+05	54	1,0E+05	59	4,0E+04	64	1,7E+04	69	8,8E+03	72	

<b>8,48</b>	1,0E+06	47	7,1E+05	48	3,8E+05	51	1,8E+05	55	7,4E+04	60	2,8E+04	65	1,2E+04	69	6,0E+03	73
<b>5,18</b>	7,8E+05	48	5,6E+05	49	2,9E+05	52	1,3E+05	56	5,3E+04	61	2,0E+04	66	7,9E+03	70	4,0E+03	74
<b>3,16</b>	6,1E+05	48	4,3E+05	49	2,2E+05	52	9,7E+04	56	3,9E+04	61	1,4E+04	66	5,4E+03	71	2,7E+03	75
<b>1,93</b>	4,8E+05	49	3,3E+05	50	1,7E+05	53	7,2E+04	57	2,8E+04	62	9,9E+03	67	3,7E+03	73	1,8E+03	76
<b>1,18</b>	3,7E+05	50	2,6E+05	51	1,3E+05	54	5,4E+04	58	2,0E+04	63	6,9E+03	68	2,5E+03	74	1,2E+03	77
<b>0,72</b>	2,9E+05	50	2,0E+05	52	9,7E+04	54	4,0E+04	58	1,5E+04	63	4,8E+03	69	1,7E+03	75	7,8E+02	78
<b>0,44</b>	2,3E+05	51	1,6E+05	52	7,4E+04	55	3,0E+04	59	1,0E+04	64	3,4E+03	69	1,1E+03	76	5,1E+02	79
<b>0,27</b>	1,8E+05	52	1,2E+05	53	5,7E+04	55	2,2E+04	59	7,6E+03	64	2,3E+03	70	7,5E+02	76	3,3E+02	80
<b>0,16</b>	1,4E+05	53	9,7E+04	53	4,4E+04	55	1,7E+04	59	5,6E+03	64	1,7E+03	70	5,1E+02	76	2,2E+02	80
<b>0,1</b>	1,1E+05	53	7,7E+04	54	3,4E+04	56	1,3E+04	59	4,1E+03	64	1,2E+03	70	3,4E+02	77	1,4E+02	81

7.1.5.2. Muestras de CA-14 con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5 a 75°C para el ligante CA-14 en las dosis óptimas de LPO-M en estado sin envejecer, con envejecimiento RTFO y PAV se presentan desde Tabla 7.1.35 hasta la Tabla 7.1.40.

Tabla 7.1.35. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 5,3% SE (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	3,9E+07	32	2,5E+07	35	1,5E+07	38	7,9E+06	42	4,1E+06	46	1,9E+06	51	8,8E+05	56	4,5E+05	60	2,2E+05	63	1,2E+05	65	6,9E+04	68	4,0E+04	70	2,2E+04	72	1,3E+04	75	7,1E+03	77
<b>61,1</b>	3,3E+07	33	2,1E+07	36	1,2E+07	39	6,3E+06	43	3,2E+06	47	1,5E+06	52	6,5E+05	57	3,2E+05	60	1,6E+05	64	8,6E+04	66	4,8E+04	69	2,7E+04	71	1,5E+04	74	8,3E+03	76	4,7E+03	78
<b>37,3</b>	2,8E+07	33	1,7E+07	36	9,6E+06	40	5,0E+06	44	2,4E+06	48	1,1E+06	53	4,8E+05	57	2,3E+05	61	1,1E+05	64	6,0E+04	67	3,3E+04	70	1,8E+04	72	1,0E+04	75	5,5E+03	77	3,0E+03	80
<b>22,8</b>	2,3E+07	34	1,4E+07	37	7,8E+06	41	4,0E+06	45	1,9E+06	49	8,4E+05	53	3,5E+05	58	1,7E+05	62	7,8E+04	65	4,1E+04	68	2,2E+04	71	1,2E+04	73	6,6E+03	76	3,6E+03	78	2,0E+03	81
<b>13,9</b>	2,0E+07	35	1,2E+07	38	6,3E+06	41	3,1E+06	45	1,5E+06	50	6,3E+05	54	2,6E+05	59	1,2E+05	62	5,5E+04	66	2,8E+04	69	1,5E+04	72	8,2E+03	74	4,3E+03	77	2,3E+03	80	1,2E+03	82
<b>8,48</b>	1,6E+07	35	9,6E+06	39	5,0E+06	42	2,5E+06	46	1,1E+06	50	4,7E+05	55	1,9E+05	60	8,5E+04	63	3,8E+04	67	2,0E+04	70	1,0E+04	73	5,5E+03	76	2,8E+03	78	1,5E+03	81	7,9E+02	83
<b>5,18</b>	1,3E+07	36	7,8E+06	39	4,0E+06	43	1,9E+06	47	8,5E+05	51	3,5E+05	56	1,3E+05	60	6,0E+04	64	2,6E+04	68	1,3E+04	71	6,9E+03	74	3,6E+03	77	1,8E+03	80	9,5E+02	82	5,0E+02	84
<b>3,16</b>	1,1E+07	37	6,4E+06	40	3,2E+06	44	1,5E+06	48	6,5E+05	52	2,6E+05	56	9,7E+04	61	4,3E+04	65	1,8E+04	70	9,0E+03	73	4,6E+03	76	2,3E+03	78	1,2E+03	81	6,0E+02	83	3,1E+02	85

<b>1,93</b>	9,3E+06	38	5,2E+06	41	2,5E+06	45	1,2E+06	49	4,9E+05	53	1,9E+05	57	7,0E+04	62	3,0E+04	66	1,2E+04	71	6,0E+03	74	3,0E+03	77	1,5E+03	80	7,5E+02	82	3,8E+02	84	2,0E+02	86
<b>1,18</b>	7,7E+06	39	4,2E+06	42	2,0E+06	46	9,0E+05	50	3,7E+05	54	1,4E+05	58	5,0E+04	63	2,1E+04	67	8,4E+03	72	4,0E+03	75	2,0E+03	79	9,8E+02	81	4,8E+02	83	2,4E+02	85	1,2E+02	87
<b>0,72</b>	6,3E+06	39	3,4E+06	43	1,6E+06	47	7,0E+05	51	2,8E+05	55	1,0E+05	59	3,6E+04	64	1,5E+04	69	5,7E+03	74	2,6E+03	77	1,3E+03	80	6,2E+02	82	3,0E+02	84	1,5E+02	86	7,6E+01	88
<b>0,44</b>	5,2E+06	40	2,8E+06	44	1,3E+06	48	5,4E+05	51	2,1E+05	55	7,7E+04	60	2,6E+04	65	1,0E+04	70	3,8E+03	75	1,7E+03	79	8,2E+02	81	3,9E+02	83	1,9E+02	86	9,2E+01	87	4,7E+01	88
<b>0,27</b>	4,3E+06	41	2,2E+06	45	1,0E+06	48	4,2E+05	52	1,6E+05	56	5,7E+04	60	1,8E+04	66	6,9E+03	72	2,5E+03	77	1,1E+03	80	5,2E+02	83	2,5E+02	85	1,2E+02	86	5,7E+01	87	2,9E+01	89
<b>0,16</b>	3,6E+06	42	1,8E+06	45	8,0E+05	49	3,3E+05	53	1,2E+05	57	4,2E+04	61	1,3E+04	67	4,7E+03	73	1,6E+03	78	7,2E+02	81	3,3E+02	84	1,5E+02	85	7,3E+01	87	3,5E+01	88	1,7E+01	89
<b>0,1</b>	3,0E+06	43	1,5E+06	46	6,4E+05	50	2,6E+05	53	9,4E+04	57	3,2E+04	62	9,5E+03	68	3,2E+03	74	1,1E+03	80	4,6E+02	82	2,1E+02	85	9,6E+01	87	4,5E+01	87	2,2E+01	89	1,1E+01	89

Tabla 7.1.36. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 5,3% SE (M2).  
(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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ		
<b>100</b>	3,7E+07	30	2,3E+07	33	1,3E+07	37	7,0E+06	40	3,6E+06	45	1,7E+06	50	7,3E+05	55	3,6E+05	58	2,5E+05	62	1,4E+05	64	7,7E+04	67	4,4E+04	69	2,4E+04	72	1,4E+04	74	7,8E+03	76		
<b>61,1</b>	3,1E+07	31	1,9E+07	34	1,1E+07	37	5,7E+06	41	2,8E+06	45	1,3E+06	50	5,4E+05	55	2,6E+05	59	1,8E+05	63	9,6E+04	65	5,3E+04	68	3,0E+04	70	1,6E+04	73	9,2E+03	75	5,1E+03	78		
<b>37,3</b>	2,7E+07	32	1,6E+07	35	8,8E+06	38	4,5E+06	42	2,2E+06	46	9,7E+05	51	4,0E+05	56	1,9E+05	60	1,3E+05	63	6,7E+04	66	3,7E+04	69	2,1E+04	71	1,1E+04	74	6,0E+03	76	3,3E+03	79		
<b>22,8</b>	2,3E+07	32	1,3E+07	35	7,2E+06	39	3,6E+06	43	1,7E+06	47	7,4E+05	52	3,0E+05	57	1,4E+05	61	8,9E+04	64	4,7E+04	67	2,5E+04	70	1,4E+04	72	7,3E+03	75	4,0E+03	78	2,2E+03	80		
<b>13,9</b>	1,9E+07	33	1,1E+07	36	5,8E+06	39	2,9E+06	43	1,3E+06	48	5,6E+05	53	2,2E+05	58	9,9E+04	61	6,3E+04	65	3,2E+04	68	1,7E+04	71	9,2E+03	74	4,8E+03	76	2,6E+03	79	1,4E+03	81		
<b>8,48</b>	1,6E+07	34	9,1E+06	37	4,7E+06	40	2,3E+06	44	1,0E+06	49	4,2E+05	54	1,6E+05	59	7,1E+04	62	4,4E+04	66	2,2E+04	69	1,2E+04	72	6,2E+03	75	3,2E+03	78	1,7E+03	80	8,8E+02	83		
<b>5,18</b>	1,3E+07	34	7,5E+06	37	3,8E+06	41	1,8E+06	45	7,9E+05	50	3,1E+05	54	1,2E+05	59	5,0E+04	63	3,1E+04	67	1,5E+04	70	7,8E+03	73	4,1E+03	76	2,1E+03	79	1,1E+03	82	5,6E+02	84		
<b>3,16</b>	1,1E+07	35	6,2E+06	38	3,1E+06	42	1,4E+06	46	6,1E+05	50	2,3E+05	55	8,4E+04	60	3,6E+04	64	2,1E+04	68	1,0E+04	72	5,2E+03	75	2,7E+03	78	1,3E+03	80	6,8E+02	83	3,5E+02	85		
<b>1,93</b>	9,4E+06	36	5,1E+06	39	2,5E+06	43	1,1E+06	47	4,6E+05	51	1,7E+05	56	6,1E+04	61	2,5E+04	65	1,5E+04	70	7,0E+03	73	3,5E+03	76	1,7E+03	79	8,5E+02	82	4,3E+02	84	2,2E+02	86		
<b>1,18</b>	7,8E+06	36	4,1E+06	40	2,0E+06	44	8,7E+05	48	3,5E+05	52	1,3E+05	57	4,4E+04	62	1,8E+04	67	9,9E+03	71	4,7E+03	74	2,3E+03	77	1,1E+03	80	5,4E+02	83	2,7E+02	85	1,4E+02	87		
<b>0,72</b>	6,5E+06	37	3,4E+06	41	1,6E+06	45	6,8E+05	49	2,7E+05	53	9,6E+04	58	3,2E+04	63	1,2E+04	68	6,7E+03	72	3,1E+03	76	1,5E+03	79	7,2E+02	82	3,4E+02	84	1,7E+02	86	8,5E+01	87		
<b>0,44</b>	5,5E+06	38	2,8E+06	42	1,3E+06	46	5,3E+05	50	2,1E+05	54	7,1E+04	58	2,3E+04	64	8,6E+03	69	4,5E+03	74	2,0E+03	77	9,6E+02	80	4,6E+02	83	2,2E+02	85	1,0E+02	87	5,2E+01	88		
<b>0,27</b>	4,6E+06	39	2,3E+06	42	1,0E+06	47	4,2E+05	51	1,6E+05	55	5,3E+04	59	1,6E+04	65	5,9E+03	70	3,0E+03	75	1,3E+03	79	6,1E+02	82	2,9E+02	84	1,3E+02	86	6,5E+01	87	3,2E+01	88		
<b>0,16</b>	3,8E+06	40	1,9E+06	43	8,2E+05	47	3,3E+05	51	1,2E+05	55	4,0E+04	60	1,2E+04	66	4,1E+03	72	2,0E+03	77	8,6E+02	80	3,9E+02	83	1,8E+02	85	8,3E+01	87	4,0E+01	88	2,0E+01	89		
<b>0,1</b>	3,2E+06	40	1,5E+06	44	6,6E+05	48	2,6E+05	52	9,2E+04	56	3,0E+04	60	8,5E+03	66	2,8E+03	73	1,3E+03	78	5,6E+02	82	2,5E+02	84	1,1E+02	86	5,2E+01	88	2,4E+01	89	1,2E+01	89		

Tabla 7.1.37. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 5,3% RTFO (M1).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	9,6E+07	24	6,5E+07	27	4,1E+07	30	2,5E+07	33	1,4E+07	37	7,5E+06	41	3,7E+06	46	2,0E+06	49
61,1	8,4E+07	25	5,6E+07	28	3,5E+07	31	2,1E+07	34	1,1E+07	38	6,0E+06	42	2,9E+06	46	1,5E+06	50
37,3	7,4E+07	26	4,8E+07	29	3,0E+07	32	1,7E+07	35	9,4E+06	39	4,8E+06	43	2,3E+06	47	1,1E+06	51
22,8	6,4E+07	27	4,2E+07	30	2,5E+07	32	1,4E+07	36	7,6E+06	39	3,8E+06	44	1,8E+06	48	8,6E+05	52
13,9	5,6E+07	27	3,6E+07	30	2,1E+07	33	1,2E+07	36	6,2E+06	40	3,0E+06	44	1,4E+06	49	6,5E+05	52
8,48	4,9E+07	28	3,0E+07	31	1,8E+07	34	9,7E+06	37	5,0E+06	41	2,4E+06	45	1,0E+06	50	4,9E+05	53
5,18	4,2E+07	29	2,6E+07	32	1,5E+07	35	8,0E+06	38	4,0E+06	42	1,9E+06	46	8,0E+05	50	3,7E+05	54
3,16	3,6E+07	29	2,2E+07	32	1,2E+07	35	6,6E+06	39	3,2E+06	43	1,5E+06	47	6,1E+05	51	2,7E+05	55
1,93	3,1E+07	30	1,9E+07	33	1,0E+07	36	5,4E+06	40	2,6E+06	44	1,1E+06	48	4,6E+05	52	2,0E+05	56
1,18	2,7E+07	31	1,6E+07	34	8,6E+06	37	4,4E+06	40	2,0E+06	44	8,8E+05	49	3,5E+05	53	1,5E+05	57
0,72	2,3E+07	32	1,3E+07	35	7,2E+06	38	3,6E+06	41	1,6E+06	45	6,9E+05	49	2,7E+05	54	1,1E+05	58
0,44	2,0E+07	32	1,1E+07	35	6,0E+06	39	2,9E+06	42	1,3E+06	46	5,3E+05	50	2,0E+05	55	8,2E+04	59
0,27	1,7E+07	33	9,6E+06	36	5,0E+06	40	2,4E+06	43	1,0E+06	47	4,1E+05	51	1,5E+05	55	6,0E+04	60
0,16	1,5E+07	34	8,2E+06	37	4,2E+06	40	1,9E+06	44	8,2E+05	48	3,2E+05	52	1,2E+05	56	4,4E+04	61
0,1	1,3E+07	35	7,0E+06	38	3,5E+06	41	1,6E+06	45	6,6E+05	49	2,5E+05	53	8,7E+04	57	3,2E+04	62

Tabla 7.1.38. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 5,3% RTFO (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	8,1E+07	24	5,5E+07	27	3,5E+07	30	2,1E+07	33	1,2E+07	36	6,4E+06	40	3,2E+06	44	1,7E+06	47
61,1	7,1E+07	25	4,7E+07	28	2,9E+07	31	1,7E+07	34	9,7E+06	37	5,1E+06	41	2,5E+06	44	1,3E+06	48
37,3	6,2E+07	26	4,1E+07	29	2,5E+07	31	1,4E+07	34	8,0E+06	38	4,1E+06	41	2,0E+06	45	1,0E+06	49

<b>22,8</b>	5,5E+07	26	3,5E+07	29	2,1E+07	32	1,2E+07	35	6,5E+06	38	3,3E+06	42	1,6E+06	46	7,7E+05	50
<b>13,9</b>	4,8E+07	27	3,0E+07	30	1,8E+07	33	1,0E+07	36	5,3E+06	39	2,6E+06	43	1,2E+06	47	5,9E+05	51
<b>8,48</b>	4,1E+07	28	2,6E+07	31	1,5E+07	33	8,3E+06	36	4,3E+06	40	2,1E+06	43	9,5E+05	48	4,4E+05	52
<b>5,18</b>	3,6E+07	29	2,2E+07	31	1,3E+07	34	6,8E+06	37	3,5E+06	40	1,7E+06	44	7,3E+05	49	3,3E+05	53
<b>3,16</b>	3,1E+07	29	1,9E+07	32	1,1E+07	35	5,6E+06	38	2,8E+06	41	1,3E+06	45	5,6E+05	50	2,5E+05	54
<b>1,93</b>	2,7E+07	30	1,6E+07	33	8,8E+06	35	4,6E+06	38	2,3E+06	42	1,0E+06	46	4,3E+05	51	1,9E+05	55
<b>1,18</b>	2,3E+07	31	1,3E+07	33	7,4E+06	36	3,8E+06	39	1,8E+06	43	8,1E+05	47	3,3E+05	52	1,4E+05	56
<b>0,72</b>	2,0E+07	31	1,1E+07	34	6,2E+06	37	3,1E+06	40	1,5E+06	43	6,3E+05	48	2,5E+05	53	1,0E+05	57
<b>0,44</b>	1,7E+07	32	9,6E+06	35	5,1E+06	38	2,5E+06	41	1,2E+06	44	5,0E+05	49	1,9E+05	54	7,5E+04	58
<b>0,27</b>	1,5E+07	33	8,2E+06	36	4,3E+06	38	2,1E+06	42	9,4E+05	45	3,9E+05	50	1,4E+05	55	5,5E+04	60
<b>0,16</b>	1,3E+07	33	7,0E+06	36	3,6E+06	39	1,7E+06	42	7,6E+05	46	3,0E+05	51	1,1E+05	56	4,0E+04	61
<b>0,1</b>	1,1E+07	34	6,0E+06	37	3,0E+06	40	1,4E+06	43	6,1E+05	48	2,3E+05	52	8,2E+04	57	2,9E+04	62

Tabla 7.1.39. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 5,3% PAV (M1).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	9,9E+07	22	6,9E+07	25	4,5E+07	28	2,9E+07	30	1,7E+07	33	1,0E+07	36	5,5E+06	39	3,1E+06	43
<b>61,1</b>	8,7E+07	23	6,0E+07	26	3,9E+07	28	2,4E+07	31	1,5E+07	34	8,3E+06	37	4,5E+06	40	2,4E+06	43
<b>37,3</b>	7,7E+07	24	5,2E+07	26	3,4E+07	29	2,1E+07	31	1,2E+07	34	6,8E+06	37	3,6E+06	41	1,9E+06	44
<b>22,8</b>	6,8E+07	24	4,5E+07	27	2,9E+07	29	1,8E+07	32	1,0E+07	35	5,6E+06	38	2,9E+06	41	1,5E+06	45
<b>13,9</b>	6,0E+07	25	4,0E+07	27	2,5E+07	30	1,5E+07	32	8,4E+06	35	4,5E+06	38	2,3E+06	42	1,2E+06	45
<b>8,48</b>	5,3E+07	25	3,4E+07	28	2,1E+07	30	1,3E+07	33	7,0E+06	36	3,7E+06	39	1,8E+06	43	9,3E+05	46
<b>5,18</b>	4,6E+07	26	3,0E+07	28	1,8E+07	31	1,1E+07	33	5,8E+06	36	3,0E+06	40	1,5E+06	43	7,3E+05	47
<b>3,16</b>	4,0E+07	27	2,6E+07	29	1,6E+07	31	8,9E+06	34	4,8E+06	37	2,4E+06	41	1,2E+06	44	5,7E+05	47
<b>1,93</b>	3,5E+07	27	2,2E+07	30	1,3E+07	32	7,4E+06	35	3,9E+06	38	2,0E+06	41	9,2E+05	45	4,4E+05	48
<b>1,18</b>	3,1E+07	28	1,9E+07	30	1,1E+07	33	6,2E+06	36	3,2E+06	39	1,6E+06	42	7,2E+05	46	3,4E+05	49

<b>0,72</b>	2,7E+07	28	1,7E+07	31	9,6E+06	33	5,2E+06	36	2,7E+06	40	1,3E+06	43	5,7E+05	47	2,6E+05	50
<b>0,44</b>	2,4E+07	29	1,4E+07	32	8,2E+06	34	4,4E+06	37	2,2E+06	40	1,0E+06	44	4,5E+05	47	2,0E+05	51
<b>0,27</b>	2,1E+07	30	1,2E+07	32	7,0E+06	35	3,7E+06	38	1,8E+06	41	8,2E+05	45	3,5E+05	48	1,5E+05	52
<b>0,16</b>	1,8E+07	30	1,1E+07	33	5,9E+06	36	3,1E+06	39	1,5E+06	42	6,6E+05	46	2,8E+05	49	1,2E+05	53
<b>0,1</b>	1,6E+07	31	9,3E+06	34	5,1E+06	36	2,6E+06	40	1,2E+06	43	5,3E+05	47	2,2E+05	50	8,9E+04	54

Tabla 7.1.40. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con LPO-M 5,3% PAV (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	1,0E+08	23	6,9E+07	25	4,6E+07	28	2,9E+07	30	1,8E+07	33	1,0E+07	36	5,7E+06	39	3,2E+06	42
<b>61,1</b>	8,8E+07	23	6,1E+07	26	4,0E+07	28	2,5E+07	31	1,5E+07	34	8,5E+06	37	4,6E+06	40	2,5E+06	43
<b>37,3</b>	7,8E+07	24	5,3E+07	26	3,4E+07	29	2,1E+07	31	1,2E+07	34	7,0E+06	37	3,7E+06	41	2,0E+06	44
<b>22,8</b>	6,9E+07	25	4,6E+07	27	2,9E+07	29	1,8E+07	32	1,0E+07	35	5,7E+06	38	3,0E+06	41	1,6E+06	44
<b>13,9</b>	6,1E+07	25	4,0E+07	27	2,5E+07	30	1,5E+07	32	8,7E+06	35	4,7E+06	38	2,4E+06	42	1,2E+06	45
<b>8,48</b>	5,3E+07	26	3,5E+07	28	2,2E+07	30	1,3E+07	33	7,2E+06	36	3,8E+06	39	1,9E+06	43	9,7E+05	46
<b>5,18</b>	4,7E+07	26	3,0E+07	29	1,8E+07	31	1,1E+07	33	5,9E+06	36	3,1E+06	40	1,5E+06	43	7,6E+05	47
<b>3,16</b>	4,1E+07	27	2,6E+07	29	1,6E+07	32	9,0E+06	34	4,9E+06	37	2,5E+06	41	1,2E+06	44	5,9E+05	47
<b>1,93</b>	3,6E+07	28	2,2E+07	30	1,3E+07	32	7,6E+06	35	4,0E+06	38	2,0E+06	41	9,5E+05	45	4,6E+05	48
<b>1,18</b>	3,1E+07	28	1,9E+07	30	1,1E+07	33	6,3E+06	36	3,3E+06	39	1,6E+06	42	7,5E+05	46	3,5E+05	49
<b>0,72</b>	2,7E+07	29	1,7E+07	31	9,7E+06	34	5,3E+06	36	2,7E+06	40	1,3E+06	43	5,9E+05	46	2,7E+05	50
<b>0,44</b>	2,4E+07	29	1,4E+07	32	8,2E+06	34	4,4E+06	37	2,2E+06	40	1,1E+06	44	4,7E+05	47	2,1E+05	51
<b>0,27</b>	2,1E+07	30	1,2E+07	32	7,0E+06	35	3,7E+06	38	1,8E+06	41	8,4E+05	45	3,6E+05	48	1,6E+05	52
<b>0,16</b>	1,8E+07	31	1,1E+07	33	6,0E+06	36	3,1E+06	39	1,5E+06	42	6,8E+05	46	2,9E+05	49	1,2E+05	53
<b>0,1</b>	1,6E+07	31	9,4E+06	34	5,1E+06	37	2,6E+06	40	1,2E+06	43	5,5E+05	46	2,3E+05	50	9,3E+04	54

## 7.1.6. RAP con LPO-M

## 7.1.6.1. Muestras de RAP con LPO-M en dosis 3, 6 y 9, 12, 15 y 18%

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5°C a 40°C para el ligante RAP en dosis de 3, 6, 9, 12, 15 y 18% de LPO-M se presentan desde Tabla 7.1.41 hasta la Tabla 7.1.52.

Tabla 7.1.41. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 3% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	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	5,1E+07	23	3,6E+07	25	2,5E+07	27,2	1,6E+07	30	1,1E+07	32,1	6,7E+06	35	4,2E+06	37,5	2,6E+06	40
61,1	4,5E+07	24	3,2E+07	26	2,1E+07	27,9	1,4E+07	30	8,9E+06	32,6	5,6E+06	35	3,4E+06	38,1	2,1E+06	41
37,3	4,0E+07	24	2,8E+07	26	1,8E+07	28,2	1,2E+07	31	7,5E+06	33,3	4,6E+06	36	2,8E+06	38,8	1,7E+06	42
22,8	3,5E+07	24	2,4E+07	26	1,6E+07	28,7	1,0E+07	31	6,3E+06	33,9	3,8E+06	37	2,3E+06	39,6	1,3E+06	43
13,9	3,1E+07	25	2,1E+07	27	1,4E+07	29,3	8,6E+06	32	5,2E+06	34,5	3,1E+06	37	1,8E+06	40,4	1,1E+06	43
8,48	2,7E+07	25	1,8E+07	27	1,2E+07	29,9	7,2E+06	33	4,3E+06	35,3	2,5E+06	38	1,5E+06	41,3	8,4E+05	44
5,18	2,4E+07	26	1,6E+07	28	1,0E+07	30,6	6,1E+06	33	3,6E+06	36,1	2,1E+06	39	1,2E+06	42,3	6,6E+05	46
3,16	2,1E+07	26	1,4E+07	29	8,5E+06	31,3	5,1E+06	34	3,0E+06	37,0	1,7E+06	40	9,4E+05	43,3	5,2E+05	47
1,93	1,8E+07	27	1,2E+07	29	7,2E+06	32,0	4,3E+06	35	2,4E+06	37,9	1,4E+06	41	7,4E+05	44,5	4,0E+05	48
1,18	1,6E+07	28	1,0E+07	30	6,1E+06	32,9	3,6E+06	36	2,0E+06	38,9	1,1E+06	42	5,8E+05	45,7	3,1E+05	49
0,72	1,4E+07	28	8,7E+06	31	5,2E+06	33,8	3,0E+06	37	1,6E+06	40,0	8,7E+05	43	4,6E+05	47,1	2,4E+05	51
0,44	1,2E+07	29	7,5E+06	32	4,4E+06	34,7	2,4E+06	38	1,3E+06	41,1	7,0E+05	45	3,6E+05	48,5	1,8E+05	52
0,27	1,1E+07	30	6,4E+06	33	3,7E+06	35,6	2,0E+06	39	1,1E+06	42,3	5,5E+05	46	2,8E+05	50,0	1,4E+05	54
0,16	9,2E+06	31	5,5E+06	34	3,1E+06	36,7	1,7E+06	40	8,7E+05	43,7	4,4E+05	47	2,1E+05	51,6	1,0E+05	55
0,1	8,1E+06	31	4,7E+06	35	2,6E+06	37,8	1,4E+06	41	7,0E+05	44,9	3,4E+05	49	1,6E+05	52,9	7,7E+04	57

Tabla 7.1.42. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 3% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	5,8E+07	23	4,1E+07	25	2,8E+07	27	1,8E+07	30	1,2E+07	32	7,5E+06	35	4,7E+06	38	2,9E+06	41
61,1	5,1E+07	23	3,6E+07	26	2,4E+07	28	1,6E+07	30	1,0E+07	33	6,2E+06	36	3,8E+06	38	2,3E+06	41
37,3	4,5E+07	24	3,1E+07	26	2,1E+07	28	1,3E+07	31	8,4E+06	33	5,1E+06	36	3,1E+06	39	1,9E+06	42
22,8	4,0E+07	24	2,7E+07	26	1,8E+07	29	1,1E+07	31	7,0E+06	34	4,2E+06	37	2,5E+06	40	1,5E+06	43
13,9	3,5E+07	25	2,4E+07	27	1,5E+07	29	9,6E+06	32	5,8E+06	35	3,5E+06	38	2,0E+06	41	1,2E+06	44
8,48	3,1E+07	25	2,1E+07	28	1,3E+07	30	8,1E+06	33	4,8E+06	36	2,8E+06	39	1,6E+06	42	9,2E+05	45
5,18	2,7E+07	26	1,8E+07	28	1,1E+07	31	6,8E+06	33	4,0E+06	36	2,3E+06	40	1,3E+06	43	7,2E+05	46
3,16	2,4E+07	26	1,5E+07	29	9,5E+06	31	5,7E+06	34	3,3E+06	37	1,9E+06	41	1,0E+06	44	5,6E+05	47
1,93	2,1E+07	27	1,3E+07	29	8,1E+06	32	4,8E+06	35	2,7E+06	38	1,5E+06	42	8,1E+05	45	4,4E+05	48
1,18	1,8E+07	27	1,1E+07	30	6,9E+06	33	4,0E+06	36	2,2E+06	39	1,2E+06	43	6,4E+05	46	3,4E+05	50
0,72	1,6E+07	28	9,8E+06	31	5,8E+06	34	3,3E+06	37	1,8E+06	40	9,6E+05	44	5,0E+05	47	2,6E+05	51
0,44	1,4E+07	29	8,5E+06	32	4,9E+06	35	2,7E+06	38	1,5E+06	42	7,6E+05	45	3,9E+05	49	2,0E+05	52
0,27	1,2E+07	30	7,3E+06	33	4,1E+06	36	2,3E+06	39	1,2E+06	43	6,0E+05	46	3,0E+05	50	1,5E+05	54
0,16	1,1E+07	30	6,2E+06	34	3,5E+06	37	1,9E+06	40	9,6E+05	44	4,8E+05	48	2,3E+05	51	1,1E+05	55
0,1	9,2E+06	31	5,3E+06	35	2,9E+06	38	1,5E+06	42	7,7E+05	45	3,8E+05	49	1,8E+05	53	8,4E+04	57

Tabla 7.1.43. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 6% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	2,8E+07	25	2,0E+07	27	1,4E+07	29,2	9,2E+06	32	6,0E+06	34,4	3,8E+06	37	2,4E+06	40,4	1,5E+06	44
61,1	2,5E+07	25	1,7E+07	28	1,2E+07	29,9	7,7E+06	32	4,9E+06	35,2	3,1E+06	38	1,9E+06	41,4	1,1E+06	45
37,3	2,1E+07	26	1,5E+07	28	1,0E+07	30,5	6,5E+06	33	4,1E+06	36,0	2,5E+06	39	1,5E+06	42,4	9,0E+05	46

<b>22,8</b>	1,9E+07	26	1,3E+07	29	8,6E+06	31,1	5,5E+06	34	3,4E+06	36,9	2,0E+06	40	1,2E+06	43,4	7,0E+05	47
<b>13,9</b>	1,6E+07	27	1,1E+07	29	7,3E+06	31,8	4,5E+06	35	2,8E+06	37,7	1,6E+06	41	9,5E+05	44,5	5,4E+05	48
<b>8,48</b>	1,4E+07	27	9,6E+06	30	6,1E+06	32,5	3,8E+06	36	2,3E+06	38,7	1,3E+06	42	7,4E+05	45,7	4,2E+05	49
<b>5,18</b>	1,2E+07	28	8,2E+06	31	5,2E+06	33,4	3,1E+06	36	1,8E+06	39,7	1,0E+06	43	5,8E+05	47,0	3,2E+05	51
<b>3,16</b>	1,1E+07	28	7,0E+06	31	4,4E+06	34,2	2,6E+06	37	1,5E+06	40,9	8,3E+05	44	4,5E+05	48,3	2,4E+05	52
<b>1,93</b>	9,2E+06	29	6,0E+06	32	3,7E+06	35,2	2,1E+06	38	1,2E+06	42,0	6,5E+05	46	3,5E+05	49,7	1,8E+05	54
<b>1,18</b>	8,0E+06	30	5,1E+06	33	3,1E+06	36,2	1,7E+06	40	9,6E+05	43,4	5,1E+05	47	2,7E+05	51,2	1,4E+05	55
<b>0,72</b>	6,9E+06	31	4,3E+06	34	2,5E+06	37,3	1,4E+06	41	7,7E+05	44,6	4,0E+05	49	2,0E+05	52,8	1,0E+05	57
<b>0,44</b>	5,9E+06	32	3,6E+06	35	2,1E+06	38,5	1,2E+06	42	6,1E+05	46,1	3,1E+05	50	1,5E+05	54,4	7,4E+04	59
<b>0,27</b>	5,1E+06	32	3,1E+06	36	1,7E+06	39,8	9,4E+05	43	4,8E+05	47,6	2,4E+05	52	1,1E+05	56,1	5,4E+04	60
<b>0,16</b>	4,4E+06	34	2,6E+06	37	1,4E+06	41,0	7,6E+05	45	3,8E+05	49,0	1,8E+05	53	8,6E+04	57,9	4,0E+04	62
<b>0,1</b>	3,8E+06	34	2,2E+06	38	1,2E+06	42,1	6,1E+05	46	3,0E+05	50,7	1,4E+05	55	6,4E+04	59,4	2,9E+04	64

Tabla 7.1.44. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 6% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	3,4E+07	24	2,4E+07	26	1,6E+07	29	1,1E+07	31	6,8E+06	34	4,3E+06	37	2,6E+06	40	1,6E+06	43
<b>61,1</b>	2,9E+07	25	2,1E+07	27	1,4E+07	29	8,9E+06	32	5,6E+06	35	3,5E+06	38	2,1E+06	41	1,3E+06	44
<b>37,3</b>	2,6E+07	25	1,8E+07	27	1,2E+07	30	7,5E+06	33	4,7E+06	36	2,8E+06	39	1,7E+06	42	1,0E+06	45
<b>22,8</b>	2,3E+07	26	1,5E+07	28	1,0E+07	30	6,3E+06	33	3,9E+06	36	2,3E+06	40	1,4E+06	43	7,9E+05	47
<b>13,9</b>	2,0E+07	26	1,3E+07	28	8,5E+06	31	5,3E+06	34	3,2E+06	37	1,9E+06	41	1,1E+06	44	6,1E+05	48
<b>8,48</b>	1,7E+07	27	1,1E+07	29	7,2E+06	32	4,4E+06	35	2,6E+06	38	1,5E+06	42	8,4E+05	45	4,7E+05	49
<b>5,18</b>	1,5E+07	27	9,9E+06	30	6,1E+06	33	3,7E+06	36	2,1E+06	39	1,2E+06	43	6,6E+05	46	3,6E+05	50
<b>3,16</b>	1,3E+07	28	8,4E+06	31	5,2E+06	34	3,0E+06	37	1,7E+06	40	9,5E+05	44	5,1E+05	48	2,7E+05	52
<b>1,93</b>	1,1E+07	28	7,2E+06	31	4,3E+06	35	2,5E+06	38	1,4E+06	42	7,5E+05	45	4,0E+05	49	2,1E+05	53
<b>1,18</b>	9,9E+06	29	6,2E+06	32	3,6E+06	36	2,1E+06	39	1,1E+06	43	5,9E+05	47	3,1E+05	51	1,6E+05	55

<b>0,72</b>	8,5E+06	30	5,2E+06	33	3,0E+06	37	1,7E+06	40	9,0E+05	44	4,6E+05	48	2,3E+05	52	1,2E+05	56
<b>0,44</b>	7,4E+06	31	4,4E+06	34	2,5E+06	38	1,4E+06	42	7,2E+05	46	3,6E+05	50	1,8E+05	54	8,5E+04	58
<b>0,27</b>	6,4E+06	32	3,8E+06	35	2,1E+06	39	1,1E+06	43	5,7E+05	47	2,8E+05	51	1,3E+05	55	6,3E+04	60
<b>0,16</b>	5,5E+06	33	3,2E+06	37	1,7E+06	40	9,1E+05	44	4,5E+05	48	2,1E+05	53	1,0E+05	57	4,6E+04	61
<b>0,1</b>	4,8E+06	34	2,7E+06	38	1,4E+06	42	7,3E+05	46	3,6E+05	50	1,7E+05	54	7,5E+04	59	3,3E+04	63

Tabla 7.1.45. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 9% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	2,3E+07	27	1,7E+07	29	1,1E+07	31,7	7,0E+06	34	4,4E+06	37,3	2,7E+06	40	1,6E+06	43,6	9,9E+05	47
<b>61,1</b>	2,0E+07	28	1,4E+07	30	9,2E+06	32,3	5,8E+06	35	3,6E+06	37,9	2,2E+06	41	1,3E+06	44,3	7,7E+05	48
<b>37,3</b>	1,7E+07	28	1,2E+07	30	7,8E+06	33,0	4,8E+06	36	2,9E+06	38,7	1,7E+06	42	1,0E+06	45,2	5,9E+05	49
<b>22,8</b>	1,5E+07	28	1,0E+07	31	6,5E+06	33,5	4,0E+06	36	2,4E+06	39,6	1,4E+06	43	8,0E+05	46,2	4,6E+05	50
<b>13,9</b>	1,3E+07	29	8,7E+06	31	5,4E+06	34,2	3,3E+06	37	1,9E+06	40,4	1,1E+06	44	6,2E+05	47,3	3,5E+05	51
<b>8,48</b>	1,1E+07	29	7,4E+06	32	4,5E+06	34,9	2,7E+06	38	1,5E+06	41,3	8,6E+05	45	4,8E+05	48,4	2,6E+05	52
<b>5,18</b>	9,6E+06	30	6,2E+06	33	3,8E+06	35,8	2,2E+06	39	1,2E+06	42,3	6,8E+05	46	3,7E+05	49,7	2,0E+05	53
<b>3,16</b>	8,2E+06	31	5,2E+06	34	3,1E+06	36,7	1,8E+06	40	9,9E+05	43,5	5,3E+05	47	2,8E+05	51,0	1,5E+05	55
<b>1,93</b>	7,0E+06	31	4,4E+06	34	2,6E+06	37,6	1,4E+06	41	7,8E+05	44,7	4,1E+05	48	2,1E+05	52,3	1,1E+05	56
<b>1,18</b>	6,0E+06	32	3,7E+06	35	2,1E+06	38,7	1,2E+06	42	6,2E+05	45,9	3,2E+05	50	1,6E+05	53,8	8,1E+04	58
<b>0,72</b>	5,1E+06	33	3,1E+06	36	1,7E+06	39,8	9,4E+05	43	4,9E+05	47,3	2,4E+05	51	1,2E+05	55,3	6,0E+04	59
<b>0,44</b>	4,3E+06	34	2,6E+06	37	1,4E+06	41,0	7,5E+05	45	3,8E+05	48,7	1,9E+05	53	9,0E+04	56,8	4,3E+04	61
<b>0,27</b>	3,7E+06	35	2,1E+06	39	1,2E+06	42,2	6,0E+05	46	2,9E+05	50,2	1,4E+05	54	6,7E+04	58,4	3,1E+04	63
<b>0,16</b>	3,1E+06	36	1,8E+06	40	9,4E+05	43,6	4,8E+05	47	2,3E+05	51,6	1,1E+05	56	4,9E+04	60,3	2,2E+04	65
<b>0,1</b>	2,7E+06	37	1,5E+06	41	7,7E+05	44,8	3,8E+05	49	1,8E+05	53,1	8,0E+04	58	3,6E+04	62,0	1,6E+04	67

Tabla 7.1.46. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 9% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	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	2,3E+07	27	1,6E+07	30	1,1E+07	32	6,8E+06	35	4,2E+06	38	2,6E+06	41	1,6E+06	44	9,4E+05	48
61,1	2,0E+07	28	1,4E+07	30	8,9E+06	33	5,6E+06	36	3,4E+06	39	2,1E+06	42	1,2E+06	45	7,2E+05	48
37,3	1,7E+07	28	1,2E+07	31	7,5E+06	33	4,6E+06	36	2,8E+06	39	1,6E+06	43	9,6E+05	46	5,6E+05	49
22,8	1,5E+07	29	9,9E+06	31	6,2E+06	34	3,8E+06	37	2,2E+06	40	1,3E+06	44	7,4E+05	47	4,3E+05	51
13,9	1,3E+07	29	8,4E+06	32	5,2E+06	35	3,1E+06	38	1,8E+06	41	1,0E+06	45	5,8E+05	48	3,2E+05	52
8,48	1,1E+07	30	7,1E+06	33	4,3E+06	36	2,5E+06	39	1,4E+06	42	8,1E+05	46	4,4E+05	49	2,4E+05	53
5,18	9,4E+06	30	6,0E+06	33	3,6E+06	37	2,1E+06	40	1,2E+06	43	6,3E+05	47	3,4E+05	51	1,8E+05	54
3,16	8,1E+06	31	5,0E+06	34	2,9E+06	38	1,7E+06	41	9,1E+05	44	4,9E+05	48	2,6E+05	52	1,4E+05	56
1,93	6,9E+06	32	4,2E+06	35	2,4E+06	39	1,3E+06	42	7,2E+05	46	3,8E+05	49	1,9E+05	53	1,0E+05	57
1,18	5,8E+06	33	3,5E+06	36	2,0E+06	40	1,1E+06	43	5,7E+05	47	2,9E+05	51	1,5E+05	55	7,3E+04	59
0,72	5,0E+06	34	2,9E+06	37	1,6E+06	41	8,6E+05	45	4,4E+05	48	2,2E+05	52	1,1E+05	56	5,3E+04	61
0,44	4,2E+06	35	2,4E+06	38	1,3E+06	42	6,8E+05	46	3,4E+05	50	1,7E+05	54	8,0E+04	58	3,8E+04	62
0,27	3,6E+06	36	2,0E+06	40	1,1E+06	43	5,4E+05	47	2,7E+05	51	1,3E+05	56	5,9E+04	60	2,8E+04	64
0,16	3,0E+06	37	1,7E+06	41	8,6E+05	45	4,3E+05	49	2,0E+05	53	9,5E+04	57	4,3E+04	62	2,0E+04	66
0,1	2,6E+06	38	1,4E+06	42	7,0E+05	46	3,4E+05	50	1,6E+05	54	7,1E+04	59	3,2E+04	63	1,4E+04	68

Tabla 7.1.47. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 12% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	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	8,7E+06	32	6,2E+06	35	4,0E+06	37,2	2,5E+06	40	1,5E+06	42,7	9,4E+05	46	5,7E+05	48,7	3,5E+05	52
61,1	7,3E+06	33	5,1E+06	35	3,3E+06	37,8	2,0E+06	41	1,2E+06	43,4	7,3E+05	47	4,3E+05	49,6	2,6E+05	53
37,3	6,2E+06	33	4,2E+06	36	2,7E+06	38,4	1,6E+06	41	9,7E+05	44,2	5,7E+05	47	3,3E+05	50,4	2,0E+05	54

<b>22,8</b>	5,2E+06	34	3,5E+06	36	2,2E+06	39,1	1,3E+06	42	7,6E+05	45,0	4,4E+05	48	2,5E+05	51,4	1,5E+05	55
<b>13,9</b>	4,3E+06	34	2,9E+06	37	1,8E+06	39,7	1,0E+06	43	6,0E+05	45,9	3,4E+05	49	1,9E+05	52,5	1,1E+05	56
<b>8,48</b>	3,6E+06	35	2,4E+06	37	1,4E+06	40,4	8,2E+05	43	4,6E+05	46,8	2,6E+05	50	1,4E+05	53,6	8,0E+04	57
<b>5,18</b>	3,0E+06	35	1,9E+06	38	1,1E+06	41,1	6,5E+05	44	3,6E+05	47,8	2,0E+05	51	1,1E+05	54,8	5,9E+04	58
<b>3,16</b>	2,5E+06	36	1,6E+06	39	9,2E+05	42,0	5,1E+05	45	2,8E+05	48,8	1,5E+05	52	7,9E+04	56,1	4,3E+04	60
<b>1,93</b>	2,1E+06	37	1,3E+06	40	7,4E+05	42,9	4,0E+05	46	2,1E+05	50,0	1,1E+05	54	5,8E+04	57,5	3,1E+04	61
<b>1,18</b>	1,7E+06	37	1,1E+06	41	5,9E+05	43,9	3,2E+05	48	1,6E+05	51,2	8,4E+04	55	4,3E+04	58,9	2,2E+04	63
<b>0,72</b>	1,4E+06	38	8,6E+05	41	4,7E+05	44,9	2,5E+05	49	1,3E+05	52,6	6,3E+04	56	3,1E+04	60,5	1,6E+04	64
<b>0,44</b>	1,2E+06	39	7,0E+05	42	3,7E+05	46,1	1,9E+05	50	9,5E+04	54,0	4,6E+04	58	2,2E+04	62,2	1,1E+04	66
<b>0,27</b>	9,8E+05	40	5,7E+05	43	2,9E+05	47,3	1,5E+05	51	7,1E+04	55,5	3,4E+04	60	1,6E+04	63,8	7,7E+03	68
<b>0,16</b>	8,1E+05	41	4,6E+05	45	2,3E+05	48,5	1,1E+05	53	5,4E+04	57,0	2,5E+04	61	1,2E+04	65,7	5,4E+03	70
<b>0,1</b>	6,7E+05	41	3,7E+05	46	1,8E+05	49,8	8,7E+04	54	4,0E+04	58,2	1,8E+04	63	8,2E+03	67,1	3,7E+03	71

Tabla 7.1.48. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 12% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	1,3E+07	33	8,5E+06	35	5,4E+06	37	3,4E+06	40	2,1E+06	42	1,3E+06	44	8,0E+05	47	5,0E+05	50
<b>61,1</b>	1,1E+07	34	7,0E+06	36	4,4E+06	38	2,7E+06	40	1,7E+06	42	1,0E+06	45	6,2E+05	47	3,8E+05	50
<b>37,3</b>	8,9E+06	34	5,8E+06	37	3,6E+06	38	2,2E+06	40	1,3E+06	43	8,0E+05	45	4,8E+05	48	2,9E+05	51
<b>22,8</b>	7,4E+06	35	4,8E+06	37	3,0E+06	39	1,8E+06	41	1,1E+06	43	6,3E+05	46	3,7E+05	49	2,2E+05	52
<b>13,9</b>	6,2E+06	35	3,9E+06	37	2,4E+06	39	1,4E+06	41	8,4E+05	44	4,9E+05	47	2,8E+05	50	1,7E+05	53
<b>8,48</b>	5,2E+06	36	3,2E+06	38	2,0E+06	40	1,2E+06	42	6,7E+05	45	3,8E+05	48	2,2E+05	51	1,2E+05	54
<b>5,18</b>	4,3E+06	36	2,7E+06	38	1,6E+06	40	9,2E+05	42	5,3E+05	45	3,0E+05	49	1,6E+05	52	9,2E+04	56
<b>3,16</b>	3,6E+06	36	2,2E+06	39	1,3E+06	41	7,4E+05	43	4,1E+05	46	2,3E+05	50	1,2E+05	54	6,8E+04	57
<b>1,93</b>	3,0E+06	37	1,8E+06	39	1,0E+06	41	5,9E+05	44	3,2E+05	48	1,7E+05	51	9,3E+04	55	5,0E+04	58
<b>1,18</b>	2,5E+06	37	1,5E+06	40	8,5E+05	42	4,7E+05	45	2,5E+05	49	1,3E+05	53	6,9E+04	56	3,6E+04	60

<b>0,72</b>	2,1E+06	38	1,2E+06	40	6,9E+05	43	3,7E+05	46	1,9E+05	50	1,0E+05	54	5,1E+04	58	2,6E+04	61
<b>0,44</b>	1,7E+06	38	1,0E+06	41	5,5E+05	44	2,9E+05	48	1,5E+05	51	7,5E+04	55	3,8E+04	59	1,9E+04	63
<b>0,27</b>	1,5E+06	39	8,3E+05	42	4,5E+05	45	2,3E+05	49	1,2E+05	53	5,6E+04	57	2,7E+04	61	1,4E+04	65
<b>0,16</b>	1,2E+06	39	6,8E+05	42	3,6E+05	46	1,8E+05	50	8,8E+04	54	4,2E+04	58	2,0E+04	62	9,6E+03	66
<b>0,1</b>	1,0E+06	40	5,7E+05	43	2,9E+05	47	1,4E+05	51	6,8E+04	56	3,1E+04	60	1,4E+04	64	6,8E+03	68

Tabla 7.1.49. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 15% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	4,7E+06	38	3,1E+06	41	1,9E+06	44,3	1,1E+06	47	6,4E+05	50,6	3,8E+05	54	2,2E+05	57,2	1,4E+05	60
<b>61,1</b>	3,8E+06	39	2,5E+06	42	1,5E+06	45,1	8,5E+05	48	4,9E+05	51,3	2,8E+05	54	1,7E+05	57,7	9,9E+04	61
<b>37,3</b>	3,1E+06	40	2,0E+06	43	1,2E+06	45,9	6,6E+05	49	3,7E+05	52,1	2,1E+05	55	1,2E+05	58,5	7,1E+04	61
<b>22,8</b>	2,5E+06	41	1,6E+06	44	9,0E+05	46,8	5,1E+05	50	2,8E+05	53,0	1,6E+05	56	8,9E+04	59,4	5,1E+04	62
<b>13,9</b>	2,0E+06	41	1,2E+06	45	7,0E+05	47,8	3,9E+05	51	2,1E+05	54,1	1,2E+05	57	6,4E+04	60,5	3,6E+04	64
<b>8,48</b>	1,6E+06	42	9,7E+05	46	5,4E+05	48,7	2,9E+05	52	1,6E+05	55,2	8,5E+04	58	4,6E+04	61,7	2,6E+04	65
<b>5,18</b>	1,3E+06	43	7,6E+05	47	4,2E+05	49,8	2,2E+05	53	1,2E+05	56,4	6,2E+04	60	3,3E+04	63,0	1,8E+04	66
<b>3,16</b>	1,0E+06	44	5,9E+05	48	3,2E+05	51,0	1,7E+05	54	8,6E+04	57,6	4,5E+04	61	2,3E+04	64,3	1,3E+04	68
<b>1,93</b>	8,1E+05	45	4,6E+05	49	2,4E+05	52,1	1,2E+05	56	6,3E+04	58,9	3,2E+04	62	1,6E+04	65,7	8,7E+03	69
<b>1,18</b>	6,4E+05	47	3,6E+05	50	1,8E+05	53,4	9,3E+04	57	4,6E+04	60,3	2,3E+04	64	1,2E+04	67,0	6,0E+03	70
<b>0,72</b>	5,0E+05	48	2,8E+05	51	1,4E+05	54,7	6,9E+04	58	3,3E+04	61,7	1,6E+04	65	8,0E+03	68,4	4,1E+03	72
<b>0,44</b>	4,0E+05	49	2,1E+05	53	1,1E+05	56,0	5,1E+04	60	2,4E+04	63,0	1,1E+04	66	5,6E+03	69,8	2,8E+03	73
<b>0,27</b>	3,1E+05	50	1,6E+05	54	7,9E+04	57,3	3,7E+04	61	1,7E+04	64,3	8,1E+03	68	3,8E+03	71,2	1,9E+03	74
<b>0,16</b>	2,4E+05	52	1,3E+05	55	6,0E+04	58,8	2,7E+04	62	1,2E+04	65,8	5,7E+03	69	2,7E+03	72,4	1,3E+03	75
<b>0,1</b>	1,9E+05	53	9,6E+04	57	4,5E+04	60,2	2,0E+04	63	8,9E+03	67,1	4,0E+03	70	1,8E+03	73,3	8,6E+02	77

Tabla 7.1.50. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 15% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	5,2E+06	37	3,4E+06	40	2,0E+06	43	1,2E+06	46	6,6E+05	49	3,8E+05	53	2,2E+05	56	1,3E+05	59
61,1	4,2E+06	38	2,8E+06	40	1,6E+06	43	9,1E+05	47	5,1E+05	50	2,9E+05	53	1,6E+05	56	9,2E+04	59
37,3	3,5E+06	38	2,2E+06	41	1,3E+06	44	7,1E+05	47	3,9E+05	51	2,1E+05	54	1,2E+05	57	6,6E+04	60
22,8	2,8E+06	39	1,8E+06	42	1,0E+06	45	5,5E+05	48	3,0E+05	51	1,6E+05	55	8,7E+04	58	4,8E+04	61
13,9	2,3E+06	40	1,4E+06	43	7,9E+05	46	4,2E+05	49	2,2E+05	52	1,2E+05	56	6,4E+04	59	3,5E+04	62
8,48	1,9E+06	41	1,1E+06	43	6,2E+05	47	3,3E+05	50	1,7E+05	53	8,8E+04	57	4,6E+04	60	2,5E+04	63
5,18	1,5E+06	41	9,1E+05	44	4,8E+05	48	2,5E+05	51	1,3E+05	55	6,5E+04	58	3,3E+04	61	1,7E+04	64
3,16	1,2E+06	42	7,2E+05	45	3,7E+05	49	1,9E+05	52	9,4E+04	56	4,7E+04	59	2,4E+04	62	1,2E+04	66
1,93	9,7E+05	43	5,7E+05	46	2,9E+05	50	1,4E+05	53	7,0E+04	57	3,4E+04	60	1,7E+04	64	8,6E+03	67
1,18	7,8E+05	44	4,4E+05	47	2,2E+05	51	1,1E+05	55	5,2E+04	58	2,5E+04	62	1,2E+04	65	6,0E+03	68
0,72	6,2E+05	45	3,5E+05	49	1,7E+05	52	8,1E+04	56	3,8E+04	59	1,8E+04	63	8,5E+03	66	4,1E+03	69
0,44	4,9E+05	46	2,7E+05	50	1,3E+05	53	6,0E+04	57	2,8E+04	61	1,3E+04	64	5,9E+03	68	2,8E+03	71
0,27	4,0E+05	48	2,1E+05	51	9,9E+04	55	4,5E+04	58	2,0E+04	62	9,1E+03	66	4,1E+03	69	1,9E+03	72
0,16	3,2E+05	49	1,7E+05	52	7,5E+04	56	3,3E+04	60	1,5E+04	63	6,5E+03	67	2,9E+03	70	1,3E+03	73
0,1	2,5E+05	49	1,3E+05	53	5,7E+04	57	2,5E+04	61	1,1E+04	64	4,6E+03	68	2,0E+03	71	9,0E+02	75

Tabla 7.1.51. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 18% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	1,8E+06	37	1,3E+06	40	8,1E+05	42,3	5,0E+05	45	3,0E+05	49,1	1,8E+05	53	1,1E+05	58,1	6,6E+04	63
61,1	1,5E+06	38	1,0E+06	40	6,4E+05	43,0	3,8E+05	46	2,3E+05	50,0	1,3E+05	54	7,9E+04	58,4	4,7E+04	63
37,3	1,2E+06	38	8,2E+05	41	5,0E+05	43,6	3,0E+05	47	1,7E+05	51,0	9,9E+04	55	5,7E+04	59,2	3,4E+04	63

<b>22,8</b>	9,8E+05	39	6,6E+05	41	4,0E+05	44,3	2,3E+05	48	1,3E+05	52,1	7,4E+04	56	4,2E+04	60,3	2,4E+04	64
<b>13,9</b>	7,9E+05	39	5,3E+05	42	3,1E+05	45,2	1,8E+05	49	9,9E+04	53,2	5,4E+04	57	3,0E+04	61,4	1,7E+04	65
<b>8,48</b>	6,5E+05	40	4,2E+05	43	2,5E+05	46,1	1,4E+05	50	7,4E+04	54,5	4,0E+04	59	2,1E+04	62,8	1,2E+04	66
<b>5,18</b>	5,2E+05	40	3,4E+05	43	1,9E+05	47,2	1,0E+05	51	5,5E+04	55,9	2,9E+04	60	1,5E+04	64,3	8,3E+03	68
<b>3,16</b>	4,2E+05	41	2,7E+05	44	1,5E+05	48,4	7,9E+04	53	4,1E+04	57,3	2,1E+04	62	1,1E+04	65,8	5,7E+03	69
<b>1,93</b>	3,4E+05	42	2,1E+05	46	1,2E+05	49,8	6,0E+04	54	3,0E+04	58,9	1,5E+04	63	7,5E+03	67,4	3,9E+03	71
<b>1,18</b>	2,7E+05	43	1,7E+05	47	8,9E+04	51,2	4,5E+04	56	2,2E+04	60,3	1,1E+04	65	5,2E+03	68,9	2,7E+03	73
<b>0,72</b>	2,2E+05	44	1,3E+05	48	6,8E+04	52,8	3,3E+04	57	1,6E+04	62,0	7,4E+03	66	3,6E+03	70,6	1,8E+03	74
<b>0,44</b>	1,8E+05	46	1,0E+05	50	5,1E+04	54,4	2,5E+04	59	1,1E+04	63,7	5,2E+03	68	2,4E+03	72,1	1,2E+03	75
<b>0,27</b>	1,4E+05	47	7,9E+04	51	3,9E+04	56,1	1,8E+04	61	8,1E+03	65,5	3,6E+03	70	1,7E+03	73,8	8,0E+02	77
<b>0,16</b>	1,1E+05	48	6,1E+04	53	2,9E+04	57,9	1,3E+04	63	5,7E+03	67,1	2,5E+03	71	1,1E+03	75,1	5,3E+02	78
<b>0,1</b>	8,9E+04	50	4,7E+04	54	2,2E+04	59,3	9,5E+03	64	4,0E+03	68,5	1,7E+03	73	7,6E+02	76,4	3,5E+02	79

Tabla 7.1.52. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 18% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	5,0E+05	46	3,9E+05	48	2,6E+05	50	1,7E+05	53	1,0E+05	57	6,4E+04	60	4,0E+04	65	2,5E+04	71
<b>61,1</b>	3,9E+05	46	3,1E+05	48	2,0E+05	51	1,3E+05	53	7,8E+04	57	4,8E+04	60	3,0E+04	63	1,8E+04	68
<b>37,3</b>	3,1E+05	47	2,4E+05	49	1,6E+05	51	9,6E+04	54	5,8E+04	57	3,5E+04	60	2,1E+04	63	1,3E+04	67
<b>22,8</b>	2,4E+05	47	1,8E+05	49	1,2E+05	52	7,2E+04	55	4,3E+04	58	2,6E+04	61	1,5E+04	64	9,4E+03	67
<b>13,9</b>	1,9E+05	48	1,4E+05	50	9,0E+04	53	5,4E+04	56	3,2E+04	59	1,8E+04	61	1,1E+04	64	6,6E+03	67
<b>8,48</b>	1,5E+05	49	1,1E+05	51	6,8E+04	54	4,0E+04	57	2,3E+04	60	1,3E+04	63	7,8E+03	65	4,6E+03	68
<b>5,18</b>	1,1E+05	50	8,3E+04	52	5,1E+04	55	2,9E+04	58	1,7E+04	61	9,4E+03	64	5,4E+03	67	3,2E+03	69
<b>3,16</b>	8,6E+04	51	6,3E+04	53	3,8E+04	56	2,1E+04	59	1,2E+04	62	6,7E+03	65	3,8E+03	68	2,2E+03	71
<b>1,93</b>	6,6E+04	52	4,7E+04	55	2,8E+04	57	1,6E+04	60	8,5E+03	63	4,7E+03	67	2,6E+03	69	1,5E+03	73
<b>1,18</b>	5,0E+04	53	3,5E+04	56	2,1E+04	59	1,1E+04	62	6,1E+03	65	3,3E+03	68	1,8E+03	71	1,0E+03	74

<b>0,72</b>	3,8E+04	55	2,7E+04	57	1,5E+04	60	8,2E+03	63	4,3E+03	66	2,3E+03	69	1,2E+03	72	6,7E+02	75
<b>0,44</b>	2,9E+04	56	2,0E+04	58	1,1E+04	61	5,8E+03	64	3,0E+03	67	1,6E+03	71	8,3E+02	74	4,5E+02	76
<b>0,27</b>	2,2E+04	57	1,5E+04	60	8,1E+03	62	4,2E+03	66	2,1E+03	69	1,1E+03	72	5,6E+02	75	3,0E+02	78
<b>0,16</b>	1,7E+04	59	1,1E+04	61	5,9E+03	64	3,0E+03	67	1,5E+03	70	7,4E+02	73	3,8E+02	76	1,9E+02	79
<b>0,1</b>	1,3E+04	60	8,2E+03	63	4,3E+03	65	2,1E+03	68	1,0E+03	71	5,1E+02	75	2,6E+02	77	1,3E+02	80

7.1.6.2. Muestras de RAP con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5°C a 75°C para el ligante RAP en las dosis óptimas de LPO-M en estado sin envejecer, con envejecimiento RTFO y PAV se presentan desde Tabla 7.1.53 hasta la Tabla 7.1.58.

Tabla 7.1.53. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 13,4% SE (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	1,3E+07	32	8,4E+06	35	5,1E+06	38	3,1E+06	42	1,8E+06	45	1,0E+06	48	6,2E+05	51	3,7E+05	55	2,0E+05	60	1,2E+05	63	6,6E+04	66	3,8E+04	69	2,2E+04	73	1,3E+04	75	7,4E+03	79
<b>61,1</b>	1,1E+07	33	6,9E+06	36	4,2E+06	39	2,4E+06	42	1,4E+06	46	8,0E+05	49	4,6E+05	52	2,7E+05	56	1,4E+05	61	8,1E+04	64	4,6E+04	68	2,6E+04	71	1,5E+04	74	8,2E+03	77	4,8E+03	80
<b>37,3</b>	9,0E+06	34	5,7E+06	37	3,4E+06	40	1,9E+06	43	1,1E+06	47	6,2E+05	50	3,5E+05	53	2,0E+05	57	1,0E+05	62	5,7E+04	66	3,2E+04	69	1,8E+04	73	9,7E+03	76	5,4E+03	78	3,1E+03	81
<b>22,8</b>	7,5E+06	34	4,7E+06	38	2,7E+06	41	1,5E+06	44	8,5E+05	48	4,7E+05	51	2,6E+05	55	1,5E+05	58	7,3E+04	64	4,0E+04	67	2,2E+04	71	1,2E+04	74	6,4E+03	77	3,5E+03	80	2,0E+03	82
<b>13,9</b>	6,2E+06	35	3,8E+06	38	2,2E+06	42	1,2E+06	45	6,6E+05	49	3,6E+05	52	1,9E+05	56	1,1E+05	59	5,2E+04	65	2,7E+04	69	1,5E+04	72	7,8E+03	76	4,1E+03	79	2,2E+03	81	1,2E+03	83
<b>8,48</b>	5,2E+06	36	3,1E+06	39	1,7E+06	43	9,5E+05	46	5,1E+05	50	2,7E+05	53	1,4E+05	57	7,8E+04	60	3,6E+04	67	1,9E+04	71	9,8E+03	74	5,1E+03	77	2,7E+03	80	1,4E+03	83	7,9E+02	85
<b>5,18</b>	4,3E+06	36	2,5E+06	40	1,4E+06	44	7,4E+05	47	3,9E+05	51	2,0E+05	55	1,1E+05	58	5,6E+04	62	2,5E+04	69	1,3E+04	72	6,5E+03	76	3,3E+03	79	1,7E+03	82	9,0E+02	84	4,9E+02	86
<b>3,16</b>	3,5E+06	37	2,0E+06	41	1,1E+06	45	5,7E+05	48	2,9E+05	52	1,5E+05	56	7,7E+04	60	4,0E+04	63	1,7E+04	70	8,5E+03	74	4,3E+03	77	2,1E+03	80	1,1E+03	83	5,7E+02	85	3,1E+02	86
<b>1,93</b>	2,9E+06	38	1,6E+06	42	8,7E+05	46	4,4E+05	50	2,2E+05	53	1,1E+05	57	5,5E+04	61	2,8E+04	65	1,2E+04	72	5,6E+03	76	2,8E+03	79	1,4E+03	82	6,9E+02	84	3,5E+02	86	1,9E+02	87
<b>1,18</b>	2,4E+06	39	1,3E+06	43	6,8E+05	47	3,4E+05	51	1,7E+05	55	8,1E+04	59	4,0E+04	63	2,0E+04	66	7,8E+03	74	3,7E+03	77	1,8E+03	80	8,8E+02	83	4,3E+02	85	2,2E+02	87	1,2E+02	88
<b>0,72</b>	2,0E+06	41	1,1E+06	45	5,3E+05	48	2,6E+05	52	1,3E+05	56	6,0E+04	60	2,8E+04	64	1,4E+04	68	5,2E+03	76	2,4E+03	79	1,2E+03	82	5,5E+02	84	2,7E+02	86	1,4E+02	88	7,3E+01	88
<b>0,44</b>	1,6E+06	42	8,4E+05	46	4,2E+05	50	2,0E+05	54	9,3E+04	57	4,3E+04	62	2,0E+04	66	9,6E+03	70	3,4E+03	77	1,6E+03	80	7,3E+02	83	3,5E+02	85	1,7E+02	87	8,4E+01	88	4,5E+01	89
<b>0,27</b>	1,3E+06	43	6,7E+05	47	3,2E+05	51	1,5E+05	55	6,9E+04	59	3,1E+04	63	1,4E+04	67	6,6E+03	71	2,2E+03	79	1,0E+03	82	4,6E+02	84	2,2E+02	86	1,0E+02	87	5,2E+01	88	2,7E+01	89

<b>0,16</b>	1,1E+06	44	5,3E+05	48	2,5E+05	52	1,1E+05	56	5,1E+04	61	2,3E+04	65	1,0E+04	69	4,5E+03	73	1,5E+03	80	6,4E+02	83	2,9E+02	85	1,3E+02	87	6,4E+01	88	3,2E+01	89	1,7E+01	89
<b>0,1</b>	8,7E+05	45	4,2E+05	50	1,9E+05	54	8,7E+04	58	3,8E+04	62	1,6E+04	66	7,0E+03	70	3,1E+03	74	9,4E+02	82	4,1E+02	84	1,8E+02	86	8,4E+01	88	4,0E+01	89	2,0E+01	89	1,0E+01	90

Tabla 7.1.54. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 13,4% SE (M2).  
(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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ		
[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	
<b>100</b>	1,2E+07	32	8,0E+06	35	4,9E+06	38	2,9E+06	41	1,7E+06	44	9,9E+05	48	5,8E+05	51	3,4E+05	55	1,5E+05	61	8,9E+04	65	5,2E+04	68	3,0E+04	71	1,8E+04	74	1,0E+04	76	6,1E+03	79		
<b>61,1</b>	1,0E+07	33	6,6E+06	35	4,0E+06	39	2,3E+06	42	1,3E+06	45	7,6E+05	49	4,4E+05	52	2,6E+05	55	1,1E+05	63	6,3E+04	66	3,6E+04	69	2,1E+04	72	1,2E+04	76	6,7E+03	78	3,9E+03	80		
<b>37,3</b>	8,8E+06	33	5,5E+06	36	3,2E+06	39	1,9E+06	43	1,1E+06	46	5,9E+05	49	3,3E+05	53	1,9E+05	56	7,8E+04	64	4,4E+04	67	2,5E+04	71	1,4E+04	74	7,7E+03	77	4,3E+03	79	2,5E+03	82		
<b>22,8</b>	7,4E+06	34	4,5E+06	37	2,6E+06	40	1,5E+06	43	8,2E+05	47	4,5E+05	51	2,5E+05	54	1,4E+05	57	5,5E+04	66	3,0E+04	69	1,7E+04	72	9,2E+03	75	5,0E+03	78	2,8E+03	81	1,6E+03	83		
<b>13,9</b>	6,2E+06	34	3,7E+06	38	2,1E+06	41	1,2E+06	44	6,4E+05	48	3,4E+05	52	1,8E+05	55	1,0E+05	59	3,8E+04	67	2,1E+04	71	1,1E+04	74	6,0E+03	77	3,3E+03	80	1,8E+03	82	1,0E+03	84		
<b>8,48</b>	5,1E+06	35	3,0E+06	39	1,7E+06	42	9,2E+05	45	4,9E+05	49	2,6E+05	53	1,4E+05	56	7,4E+04	60	2,6E+04	69	1,4E+04	72	7,4E+03	75	3,9E+03	78	2,1E+03	81	1,1E+03	83	6,4E+02	85		
<b>5,18</b>	4,3E+06	36	2,5E+06	39	1,4E+06	43	7,2E+05	46	3,8E+05	50	1,9E+05	54	1,0E+05	58	5,3E+04	61	1,8E+04	70	9,3E+03	74	4,9E+03	77	2,5E+03	80	1,3E+03	82	7,1E+02	84	4,0E+02	86		
<b>3,16</b>	3,5E+06	37	2,0E+06	40	1,1E+06	44	5,6E+05	48	2,9E+05	51	1,4E+05	55	7,3E+04	59	3,8E+04	63	1,2E+04	72	6,2E+03	76	3,2E+03	79	1,6E+03	81	8,5E+02	84	4,5E+02	85	2,5E+02	87		
<b>1,93</b>	2,9E+06	38	1,6E+06	41	8,6E+05	45	4,4E+05	49	2,2E+05	53	1,1E+05	57	5,3E+04	60	2,7E+04	64	8,2E+03	74	4,1E+03	77	2,1E+03	80	1,0E+03	82	5,4E+02	85	2,8E+02	86	1,5E+02	87		
<b>1,18</b>	2,4E+06	39	1,3E+06	43	6,8E+05	46	3,4E+05	50	1,6E+05	54	7,9E+04	58	3,9E+04	62	1,9E+04	66	5,5E+03	76	2,7E+03	79	1,3E+03	81	6,6E+02	84	3,4E+02	86	1,7E+02	87	9,6E+01	88		
<b>0,72</b>	2,0E+06	40	1,1E+06	44	5,3E+05	48	2,6E+05	51	1,2E+05	55	5,8E+04	59	2,8E+04	63	1,3E+04	67	3,6E+03	77	1,7E+03	80	8,4E+02	83	4,2E+02	85	2,1E+02	86	1,1E+02	88	5,9E+01	88		
<b>0,44</b>	1,6E+06	41	8,5E+05	45	4,2E+05	49	2,0E+05	53	9,2E+04	57	4,2E+04	61	2,0E+04	65	9,3E+03	69	2,4E+03	79	1,1E+03	82	5,3E+02	84	2,6E+02	86	1,3E+02	87	6,6E+01	88	3,6E+01	89		
<b>0,27</b>	1,3E+06	42	6,8E+05	46	3,3E+05	50	1,5E+05	54	6,9E+04	58	3,1E+04	62	1,4E+04	67	6,4E+03	70	1,5E+03	80	7,1E+02	83	3,4E+02	85	1,6E+02	87	8,0E+01	88	4,1E+01	89	2,2E+01	89		
<b>0,16</b>	1,1E+06	43	5,4E+05	47	2,6E+05	51	1,2E+05	56	5,1E+04	60	2,2E+04	64	9,8E+03	68	4,4E+03	72	9,9E+02	82	4,5E+02	84	2,1E+02	86	1,0E+02	87	5,0E+01	88	2,5E+01	89	1,4E+01	89		
<b>0,1</b>	9,1E+05	44	4,4E+05	49	2,0E+05	53	8,8E+04	57	3,8E+04	61	1,6E+04	66	6,9E+03	69	3,0E+03	73	6,4E+02	83	2,9E+02	85	1,3E+02	87	6,3E+01	88	3,1E+01	89	1,6E+01	89	8,5E+00	89		

Tabla 7.1.55. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 13,4% RTFO (M1).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ

[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	5,1E+07	21	3,8E+07	23	2,7E+07	24	1,9E+07	26	1,3E+07	29	8,5E+06	31	5,6E+06	34	3,6E+06	37
61,1	4,5E+07	21	3,3E+07	23	2,4E+07	25	1,6E+07	27	1,1E+07	30	7,2E+06	32	4,6E+06	35	2,9E+06	38
37,3	4,0E+07	22	3,0E+07	24	2,1E+07	26	1,4E+07	28	9,4E+06	30	6,0E+06	33	3,8E+06	36	2,4E+06	39
22,8	3,6E+07	22	2,6E+07	24	1,8E+07	26	1,2E+07	28	8,0E+06	31	5,1E+06	34	3,2E+06	37	1,9E+06	40
13,9	3,2E+07	22	2,3E+07	25	1,6E+07	27	1,1E+07	29	6,8E+06	32	4,2E+06	35	2,6E+06	37	1,6E+06	41
8,48	2,9E+07	23	2,0E+07	25	1,4E+07	27	9,0E+06	30	5,7E+06	33	3,5E+06	35	2,1E+06	39	1,3E+06	42
5,18	2,5E+07	23	1,8E+07	26	1,2E+07	28	7,7E+06	31	4,8E+06	33	2,9E+06	36	1,7E+06	40	1,0E+06	43
3,16	2,3E+07	24	1,6E+07	26	1,0E+07	29	6,6E+06	32	4,0E+06	34	2,4E+06	38	1,4E+06	41	8,0E+05	44
1,93	2,0E+07	25	1,4E+07	27	8,9E+06	30	5,6E+06	32	3,4E+06	35	2,0E+06	39	1,1E+06	42	6,3E+05	46
1,18	1,8E+07	25	1,2E+07	28	7,7E+06	31	4,7E+06	33	2,8E+06	37	1,6E+06	40	9,0E+05	43	4,9E+05	47
0,72	1,6E+07	26	1,0E+07	29	6,6E+06	31	4,0E+06	35	2,3E+06	38	1,3E+06	41	7,2E+05	45	3,8E+05	49
0,44	1,4E+07	27	9,1E+06	30	5,7E+06	33	3,4E+06	36	1,9E+06	39	1,1E+06	42	5,7E+05	46	2,9E+05	51
0,27	1,2E+07	27	8,0E+06	30	4,9E+06	34	2,8E+06	37	1,6E+06	40	8,6E+05	44	4,4E+05	48	2,2E+05	52
0,16	1,1E+07	28	7,0E+06	31	4,2E+06	35	2,4E+06	38	1,3E+06	42	6,9E+05	45	3,5E+05	50	1,7E+05	54
0,1	9,6E+06	29	6,1E+06	33	3,6E+06	36	2,0E+06	39	1,1E+06	43	5,5E+05	47	2,7E+05	51	1,3E+05	55

Tabla 7.1.56. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 13,4% RTFO (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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		
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	
[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	8,7E+07	20	6,4E+07	22	4,5E+07	24	3,1E+07	27	2,0E+07	29	1,3E+07	32	8,5E+06	35	5,4E+06	38	
61,1	7,8E+07	21	5,6E+07	23	3,9E+07	25	2,7E+07	27	1,8E+07	30	1,1E+07	33	7,1E+06	35	4,4E+06	39	
37,3	7,0E+07	21	5,0E+07	23	3,4E+07	25	2,3E+07	28	1,5E+07	30	9,5E+06	33	5,8E+06	37	3,5E+06	40	
22,8	6,2E+07	22	4,4E+07	24	3,0E+07	26	2,0E+07	29	1,3E+07	31	7,9E+06	34	4,8E+06	37	2,9E+06	41	
13,9	5,6E+07	22	3,9E+07	24	2,6E+07	27	1,7E+07	29	1,1E+07	32	6,6E+06	35	3,9E+06	38	2,3E+06	42	
8,48	4,9E+07	23	3,4E+07	25	2,3E+07	27	1,5E+07	30	9,0E+06	33	5,4E+06	36	3,2E+06	39	1,8E+06	43	
5,18	4,4E+07	23	3,0E+07	26	2,0E+07	28	1,2E+07	31	7,6E+06	34	4,5E+06	37	2,6E+06	41	1,4E+06	44	

<b>3,16</b>	3,9E+07	24	2,6E+07	26	1,7E+07	29	1,1E+07	32	6,3E+06	35	3,7E+06	38	2,1E+06	42	1,1E+06	45
<b>1,93</b>	3,5E+07	24	2,3E+07	27	1,5E+07	30	8,9E+06	33	5,3E+06	36	3,0E+06	39	1,6E+06	43	8,9E+05	47
<b>1,18</b>	3,1E+07	25	2,0E+07	28	1,3E+07	31	7,6E+06	34	4,4E+06	37	2,4E+06	41	1,3E+06	44	6,9E+05	48
<b>0,72</b>	2,7E+07	26	1,7E+07	29	1,1E+07	32	6,4E+06	35	3,6E+06	38	2,0E+06	42	1,0E+06	46	5,3E+05	50
<b>0,44</b>	2,4E+07	27	1,5E+07	30	9,2E+06	33	5,3E+06	36	2,9E+06	40	1,6E+06	43	8,1E+05	47	4,1E+05	51
<b>0,27</b>	2,1E+07	27	1,3E+07	31	7,8E+06	34	4,4E+06	37	2,4E+06	41	1,3E+06	45	6,3E+05	49	3,1E+05	53
<b>0,16</b>	1,9E+07	28	1,1E+07	32	6,7E+06	35	3,7E+06	39	2,0E+06	42	1,0E+06	46	4,9E+05	50	2,3E+05	54
<b>0,1</b>	1,6E+07	29	9,9E+06	33	5,7E+06	36	3,1E+06	40	1,6E+06	44	7,9E+05	48	3,8E+05	52	1,8E+05	56

Tabla 7.1.57. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 13,4% PAV (M1).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	6,6E+07	19	4,8E+07	21	3,8E+07	22	2,8E+07	23	2,0E+07	25	1,4E+07	27	9,6E+06	29	6,5E+06	31
<b>61,1</b>	5,7E+07	20	4,3E+07	21	3,4E+07	22	2,5E+07	24	1,7E+07	26	1,2E+07	28	8,1E+06	30	5,5E+06	32
<b>37,3</b>	5,1E+07	20	3,8E+07	22	3,0E+07	23	2,2E+07	25	1,5E+07	26	1,0E+07	28	7,0E+06	31	4,6E+06	33
<b>22,8</b>	4,5E+07	20	3,4E+07	22	2,7E+07	23	1,9E+07	25	1,3E+07	27	8,9E+06	29	5,9E+06	31	3,9E+06	33
<b>13,9</b>	4,0E+07	21	3,0E+07	23	2,4E+07	24	1,7E+07	26	1,1E+07	28	7,6E+06	30	5,0E+06	32	3,2E+06	34
<b>8,48</b>	3,6E+07	21	2,7E+07	23	2,1E+07	25	1,5E+07	27	9,9E+06	29	6,5E+06	31	4,2E+06	33	2,7E+06	35
<b>5,18</b>	3,2E+07	22	2,4E+07	24	1,8E+07	25	1,3E+07	27	8,5E+06	29	5,6E+06	31	3,6E+06	34	2,2E+06	36
<b>3,16</b>	2,8E+07	22	2,1E+07	24	1,6E+07	26	1,1E+07	28	7,3E+06	30	4,7E+06	32	3,0E+06	35	1,9E+06	37
<b>1,93</b>	2,4E+07	23	1,9E+07	25	1,4E+07	27	9,6E+06	29	6,3E+06	31	4,0E+06	33	2,5E+06	36	1,5E+06	38
<b>1,18</b>	2,1E+07	24	1,7E+07	26	1,2E+07	28	8,4E+06	30	5,4E+06	32	3,4E+06	34	2,1E+06	37	1,2E+06	39
<b>0,72</b>	1,8E+07	25	1,5E+07	27	1,1E+07	29	7,2E+06	31	4,6E+06	33	2,8E+06	36	1,7E+06	38	1,0E+06	41
<b>0,44</b>	1,5E+07	26	1,3E+07	28	9,5E+06	30	6,2E+06	32	3,9E+06	34	2,4E+06	37	1,4E+06	39	8,2E+05	42
<b>0,27</b>	1,1E+07	28	1,1E+07	29	8,2E+06	31	5,3E+06	33	3,3E+06	36	2,0E+06	38	1,2E+06	40	6,6E+05	43
<b>0,16</b>	6,3E+06	28	9,9E+06	30	7,1E+06	33	4,6E+06	35	2,8E+06	37	1,7E+06	39	9,5E+05	42	5,3E+05	45

<b>0,1</b>	4,1E+06	27	8,6E+06	32	6,1E+06	34	3,9E+06	36	2,4E+06	38	1,4E+06	40	7,8E+05	43	4,2E+05	47
------------	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----

Tabla 7.1.58. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con LPO-M 13,4% PAV (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	6,6E+07	19	5,0E+07	20	3,7E+07	22	2,7E+07	23	1,9E+07	25	1,3E+07	27	9,2E+06	29	6,2E+06	31
<b>61,1</b>	5,9E+07	19	4,5E+07	20	3,3E+07	22	2,4E+07	24	1,7E+07	25	1,2E+07	27	7,8E+06	29	5,3E+06	32
<b>37,3</b>	5,3E+07	19	4,0E+07	21	2,9E+07	22	2,1E+07	24	1,5E+07	26	1,0E+07	28	6,7E+06	30	4,4E+06	32
<b>22,8</b>	4,8E+07	20	3,6E+07	21	2,6E+07	23	1,8E+07	24	1,3E+07	26	8,6E+06	28	5,7E+06	31	3,7E+06	33
<b>13,9</b>	4,4E+07	20	3,2E+07	21	2,3E+07	23	1,6E+07	25	1,1E+07	27	7,4E+06	29	4,8E+06	31	3,1E+06	34
<b>8,48</b>	3,9E+07	20	2,9E+07	22	2,0E+07	24	1,4E+07	26	9,5E+06	28	6,3E+06	30	4,1E+06	32	2,6E+06	35
<b>5,18</b>	3,5E+07	21	2,6E+07	22	1,8E+07	24	1,2E+07	26	8,2E+06	28	5,4E+06	31	3,4E+06	33	2,2E+06	36
<b>3,16</b>	3,2E+07	21	2,3E+07	23	1,6E+07	25	1,1E+07	27	7,1E+06	29	4,6E+06	32	2,9E+06	34	1,8E+06	37
<b>1,93</b>	2,9E+07	22	2,0E+07	24	1,4E+07	25	9,3E+06	28	6,1E+06	30	3,9E+06	33	2,4E+06	35	1,5E+06	38
<b>1,18</b>	2,6E+07	22	1,8E+07	24	1,2E+07	26	8,1E+06	29	5,2E+06	31	3,3E+06	34	2,0E+06	36	1,2E+06	39
<b>0,72</b>	2,3E+07	23	1,6E+07	25	1,1E+07	27	7,0E+06	29	4,5E+06	32	2,7E+06	35	1,6E+06	37	9,7E+05	40
<b>0,44</b>	2,1E+07	23	1,4E+07	26	9,4E+06	28	6,1E+06	30	3,8E+06	33	2,3E+06	36	1,4E+06	39	7,8E+05	42
<b>0,27</b>	1,8E+07	24	1,3E+07	27	8,2E+06	29	5,2E+06	31	3,2E+06	34	1,9E+06	37	1,1E+06	40	6,3E+05	43
<b>0,16</b>	1,6E+07	25	1,1E+07	27	7,2E+06	30	4,5E+06	33	2,7E+06	35	1,6E+06	38	9,0E+05	41	5,0E+05	45
<b>0,1</b>	1,5E+07	26	9,8E+06	28	6,2E+06	31	3,9E+06	34	2,3E+06	37	1,3E+06	39	7,4E+05	43	4,0E+05	46

## 7.1.7. CA-24 con RC

### 7.1.7.1. Muestras de CA-24 con RC en dosis 3, 6 y 9%

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5°C a 40°C para el ligante CA-24 en dosis 3, 6 y 9% de RC se presentan desde Tabla 7.1.59 hasta la Tabla 7.1.64.

Tabla 7.1.59. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 3% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	6,5E+07	29	4,1E+07	33	2,4E+07	37,0	1,4E+07	41	7,4E+06	45,5	3,9E+06	50	2,0E+06	53,7	1,1E+06	58
61,1	5,5E+07	30	3,4E+07	34	2,0E+07	38,2	1,1E+07	43	5,7E+06	46,8	2,9E+06	51	1,5E+06	55,1	7,7E+05	59
37,3	4,7E+07	31	2,9E+07	35	1,6E+07	39,4	8,6E+06	44	4,4E+06	48,2	2,2E+06	52	1,1E+06	56,4	5,6E+05	60
22,8	4,0E+07	32	2,4E+07	36	1,3E+07	40,7	6,8E+06	45	3,4E+06	49,4	1,7E+06	54	8,2E+05	57,7	4,0E+05	62
13,9	3,4E+07	33	2,0E+07	38	1,0E+07	41,9	5,3E+06	46	2,6E+06	50,6	1,2E+06	55	5,9E+05	59,0	2,9E+05	63
8,48	2,8E+07	34	1,6E+07	39	8,3E+06	43,1	4,1E+06	48	2,0E+06	51,9	9,3E+05	56	4,3E+05	60,3	2,0E+05	64
5,18	2,4E+07	36	1,3E+07	40	6,6E+06	44,4	3,2E+06	49	1,5E+06	53,2	6,8E+05	58	3,1E+05	61,6	1,4E+05	65
3,16	2,0E+07	37	1,1E+07	41	5,2E+06	45,7	2,5E+06	50	1,1E+06	54,5	5,0E+05	59	2,2E+05	62,8	1,0E+05	66
1,93	1,6E+07	38	8,5E+06	42	4,1E+06	47,0	1,9E+06	51	8,4E+05	55,9	3,6E+05	60	1,6E+05	64,1	6,9E+04	68
1,18	1,3E+07	39	6,8E+06	44	3,2E+06	48,2	1,4E+06	53	6,2E+05	57,3	2,6E+05	62	1,1E+05	65,4	4,8E+04	69
0,72	1,1E+07	40	5,5E+06	45	2,5E+06	49,6	1,1E+06	54	4,6E+05	58,6	1,9E+05	63	7,8E+04	66,7	3,3E+04	70
0,44	9,0E+06	41	4,4E+06	46	1,9E+06	51,0	8,2E+05	56	3,4E+05	60,0	1,3E+05	64	5,4E+04	68,1	2,3E+04	72
0,27	7,4E+06	43	3,5E+06	48	1,5E+06	52,4	6,2E+05	57	2,5E+05	61,4	9,6E+04	66	3,8E+04	69,5	1,5E+04	73
0,16	6,1E+06	44	2,8E+06	49	1,2E+06	53,7	4,6E+05	58	1,8E+05	62,5	6,8E+04	67	2,6E+04	70,9	1,0E+04	75
0,1	5,0E+06	45	2,2E+06	50	9,0E+05	54,8	3,5E+05	60	1,3E+05	64,0	4,8E+04	68	1,8E+04	72,1	6,9E+03	76

Tabla 7.1.60. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 3% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	7,6E+07	30	4,6E+07	34	2,7E+07	39	1,5E+07	43	8,0E+06	47	4,2E+06	52	2,2E+06	56	1,2E+06	59
61,1	6,4E+07	31	3,9E+07	35	2,2E+07	40	1,2E+07	45	6,2E+06	49	3,2E+06	53	1,6E+06	57	8,3E+05	61
37,3	5,5E+07	32	3,2E+07	37	1,8E+07	41	9,3E+06	46	4,7E+06	50	2,4E+06	54	1,2E+06	58	6,0E+05	62

<b>22,8</b>	4,6E+07	33	2,6E+07	38	1,4E+07	42	7,2E+06	47	3,6E+06	52	1,8E+06	56	8,6E+05	59	4,3E+05	63
<b>13,9</b>	3,9E+07	35	2,2E+07	39	1,1E+07	44	5,6E+06	48	2,7E+06	53	1,3E+06	57	6,2E+05	61	3,0E+05	64
<b>8,48</b>	3,2E+07	36	1,7E+07	40	8,8E+06	45	4,3E+06	50	2,0E+06	54	9,5E+05	58	4,5E+05	62	2,1E+05	65
<b>5,18</b>	2,7E+07	37	1,4E+07	42	6,9E+06	47	3,3E+06	51	1,5E+06	55	6,9E+05	59	3,2E+05	63	1,5E+05	66
<b>3,16</b>	2,2E+07	38	1,1E+07	43	5,4E+06	48	2,5E+06	53	1,1E+06	57	5,0E+05	61	2,2E+05	64	1,0E+05	68
<b>1,93</b>	1,8E+07	39	9,0E+06	44	4,2E+06	49	1,9E+06	54	8,3E+05	58	3,6E+05	62	1,6E+05	65	7,2E+04	69
<b>1,18</b>	1,5E+07	41	7,2E+06	46	3,3E+06	51	1,4E+06	55	6,1E+05	59	2,6E+05	63	1,1E+05	67	4,9E+04	70
<b>0,72</b>	1,2E+07	42	5,7E+06	47	2,5E+06	52	1,1E+06	57	4,4E+05	61	1,9E+05	64	7,8E+04	68	3,4E+04	71
<b>0,44</b>	9,8E+06	43	4,5E+06	49	1,9E+06	54	7,9E+05	58	3,2E+05	62	1,3E+05	66	5,4E+04	69	2,3E+04	73
<b>0,27</b>	7,9E+06	45	3,5E+06	50	1,5E+06	55	5,9E+05	59	2,3E+05	63	9,3E+04	67	3,7E+04	71	1,5E+04	74
<b>0,16</b>	6,5E+06	46	2,8E+06	51	1,1E+06	56	4,4E+05	61	1,7E+05	65	6,5E+04	68	2,6E+04	72	1,0E+04	76
<b>0,1</b>	5,2E+06	47	2,2E+06	53	8,5E+05	57	3,2E+05	62	1,2E+05	66	4,6E+04	70	1,8E+04	74	6,9E+03	78

Tabla 7.1.61. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 6% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	5,7E+07	34	3,5E+07	37	1,9E+07	42,2	1,0E+07	47	5,1E+06	52,1	2,6E+06	57	1,3E+06	60,6	6,5E+05	65
<b>61,1</b>	4,9E+07	34	2,8E+07	39	1,5E+07	43,8	7,8E+06	49	3,9E+06	53,6	1,9E+06	58	9,2E+05	62,1	4,6E+05	66
<b>37,3</b>	4,1E+07	35	2,3E+07	40	1,2E+07	45,2	6,0E+06	50	2,9E+06	55,0	1,4E+06	59	6,6E+05	63,1	3,2E+05	67
<b>22,8</b>	3,4E+07	37	1,9E+07	42	9,3E+06	46,7	4,5E+06	52	2,1E+06	56,4	9,9E+05	61	4,6E+05	64,2	2,2E+05	68
<b>13,9</b>	2,8E+07	38	1,5E+07	43	7,3E+06	48,2	3,4E+06	53	1,6E+06	57,7	7,1E+05	62	3,3E+05	65,4	1,5E+05	69
<b>8,48</b>	2,3E+07	39	1,2E+07	44	5,6E+06	49,7	2,5E+06	55	1,1E+06	59,1	5,1E+05	63	2,3E+05	66,6	1,1E+05	70
<b>5,18</b>	1,9E+07	41	9,3E+06	46	4,3E+06	51,2	1,9E+06	56	8,3E+05	60,4	3,6E+05	64	1,6E+05	67,8	7,2E+04	71
<b>3,16</b>	1,5E+07	42	7,3E+06	47	3,2E+06	52,7	1,4E+06	57	6,0E+05	61,7	2,5E+05	66	1,1E+05	69,1	4,9E+04	72
<b>1,93</b>	1,2E+07	44	5,7E+06	49	2,5E+06	54,2	1,0E+06	59	4,3E+05	63,0	1,8E+05	67	7,5E+04	70,4	3,3E+04	74
<b>1,18</b>	9,6E+06	45	4,4E+06	50	1,8E+06	55,6	7,5E+05	60	3,1E+05	64,2	1,2E+05	68	5,1E+04	71,6	2,2E+04	75

<b>0,72</b>	7,6E+06	47	3,4E+06	52	1,4E+06	57,1	5,5E+05	61	2,2E+05	65,5	8,7E+04	69	3,5E+04	73,1	1,5E+04	77
<b>0,44</b>	6,0E+06	48	2,6E+06	54	1,0E+06	58,4	4,0E+05	63	1,5E+05	66,8	6,0E+04	71	2,4E+04	74,5	9,6E+03	78
<b>0,27</b>	4,8E+06	50	2,0E+06	55	7,7E+05	59,7	2,9E+05	64	1,1E+05	68,1	4,1E+04	72	1,6E+04	76,1	6,3E+03	79
<b>0,16</b>	3,8E+06	51	1,5E+06	56	5,7E+05	61,1	2,1E+05	65	7,6E+04	69,3	2,8E+04	73	1,1E+04	77,4	4,1E+03	81
<b>0,1</b>	3,0E+06	52	1,2E+06	58	4,2E+05	62,4	1,5E+05	66	5,3E+04	70,5	1,9E+04	75	7,0E+03	78,5	2,6E+03	82

Tabla 7.1.62. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 6% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	4,9E+07	34	2,9E+07	38	1,6E+07	43	8,4E+06	48	4,3E+06	53	2,2E+06	57	1,1E+06	61	5,6E+05	65
<b>61,1</b>	4,1E+07	35	2,3E+07	40	1,3E+07	45	6,5E+06	49	3,2E+06	54	1,6E+06	58	7,8E+05	62	3,9E+05	66
<b>37,3</b>	3,4E+07	36	1,9E+07	41	9,8E+06	46	5,0E+06	51	2,4E+06	55	1,2E+06	60	5,6E+05	63	2,7E+05	67
<b>22,8</b>	2,8E+07	38	1,5E+07	42	7,7E+06	47	3,8E+06	52	1,8E+06	57	8,3E+05	61	3,9E+05	65	1,9E+05	68
<b>13,9</b>	2,3E+07	39	1,2E+07	44	5,9E+06	49	2,8E+06	54	1,3E+06	58	6,0E+05	62	2,8E+05	66	1,3E+05	69
<b>8,48</b>	1,9E+07	40	9,6E+06	45	4,6E+06	50	2,1E+06	55	9,5E+05	59	4,3E+05	63	1,9E+05	67	9,0E+04	70
<b>5,18</b>	1,5E+07	42	7,5E+06	47	3,5E+06	52	1,6E+06	56	6,9E+05	61	3,0E+05	65	1,3E+05	68	6,1E+04	71
<b>3,16</b>	1,2E+07	43	5,9E+06	48	2,6E+06	53	1,1E+06	58	4,9E+05	62	2,1E+05	66	9,2E+04	69	4,1E+04	73
<b>1,93</b>	9,6E+06	44	4,6E+06	50	2,0E+06	55	8,4E+05	59	3,5E+05	63	1,5E+05	67	6,3E+04	70	2,8E+04	74
<b>1,18</b>	7,7E+06	46	3,5E+06	51	1,5E+06	56	6,2E+05	60	2,5E+05	64	1,0E+05	68	4,3E+04	72	1,9E+04	75
<b>0,72</b>	6,1E+06	47	2,7E+06	53	1,1E+06	57	4,5E+05	62	1,8E+05	66	7,2E+04	69	2,9E+04	73	1,2E+04	77
<b>0,44</b>	4,8E+06	49	2,1E+06	54	8,3E+05	59	3,2E+05	63	1,3E+05	67	5,0E+04	71	2,0E+04	74	8,1E+03	78
<b>0,27</b>	3,8E+06	50	1,6E+06	55	6,2E+05	60	2,3E+05	64	8,9E+04	68	3,4E+04	72	1,3E+04	76	5,3E+03	79
<b>0,16</b>	3,0E+06	52	1,2E+06	57	4,6E+05	61	1,7E+05	66	6,2E+04	70	2,3E+04	73	8,9E+03	77	3,5E+03	81
<b>0,1</b>	2,4E+06	53	9,2E+05	58	3,4E+05	63	1,2E+05	67	4,4E+04	71	1,6E+04	75	5,9E+03	79	2,2E+03	82

Tabla 7.1.63. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 9% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	2,2E+07	39	1,2E+07	44	6,6E+06	48,8	3,3E+06	54	1,7E+06	58,3	8,2E+05	62	4,0E+05	65,8	2,1E+05	70
61,1	1,8E+07	40	9,7E+06	46	5,0E+06	50,2	2,5E+06	55	1,2E+06	59,5	5,8E+05	63	2,8E+05	66,8	1,4E+05	70
37,3	1,4E+07	42	7,6E+06	47	3,8E+06	51,6	1,9E+06	56	8,8E+05	60,7	4,1E+05	65	2,0E+05	67,9	9,6E+04	71
22,8	1,1E+07	43	5,9E+06	48	2,9E+06	53,1	1,4E+06	58	6,3E+05	62,0	2,9E+05	66	1,4E+05	68,9	6,6E+04	72
13,9	9,1E+06	44	4,5E+06	49	2,2E+06	54,4	1,0E+06	59	4,5E+05	63,2	2,0E+05	67	9,3E+04	70,0	4,4E+04	73
8,48	7,1E+06	46	3,5E+06	51	1,6E+06	55,8	7,2E+05	60	3,2E+05	64,4	1,4E+05	68	6,3E+04	71,2	3,0E+04	74
5,18	5,6E+06	47	2,6E+06	52	1,2E+06	57,2	5,2E+05	62	2,2E+05	65,6	9,7E+04	69	4,3E+04	72,4	2,0E+04	75
3,16	4,4E+06	48	2,0E+06	54	8,8E+05	58,6	3,7E+05	63	1,6E+05	66,8	6,7E+04	70	2,9E+04	73,6	1,3E+04	77
1,93	3,4E+06	50	1,5E+06	55	6,4E+05	59,9	2,7E+05	64	1,1E+05	68,0	4,6E+04	72	1,9E+04	74,9	8,6E+03	78
1,18	2,6E+06	51	1,1E+06	57	4,7E+05	61,3	1,9E+05	65	7,6E+04	69,3	3,1E+04	73	1,3E+04	76,3	5,6E+03	79
0,72	2,0E+06	53	8,4E+05	58	3,4E+05	62,6	1,3E+05	67	5,3E+04	70,5	2,1E+04	74	8,6E+03	77,5	3,6E+03	81
0,44	1,6E+06	54	6,3E+05	59	2,5E+05	63,8	9,4E+04	68	3,6E+04	71,8	1,4E+04	75	5,6E+03	78,9	2,3E+03	82
0,27	1,2E+06	55	4,7E+05	61	1,8E+05	65,1	6,6E+04	69	2,5E+04	73,1	9,4E+03	77	3,7E+03	80,2	1,5E+03	83
0,16	9,3E+05	57	3,5E+05	62	1,3E+05	66,4	4,6E+04	70	1,7E+04	74,5	6,2E+03	78	2,4E+03	81,2	9,5E+02	84
0,1	7,1E+05	58	2,6E+05	63	9,2E+04	67,5	3,2E+04	72	1,1E+04	75,7	4,1E+03	80	1,5E+03	82,5	6,0E+02	85

Tabla 7.1.64. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 9% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	2,8E+07	38	1,5E+07	43	8,1E+06	48	4,2E+06	53	2,1E+06	57	1,0E+06	61	5,1E+05	65	2,6E+05	68
61,1	2,2E+07	40	1,2E+07	45	6,2E+06	49	3,1E+06	54	1,5E+06	59	7,3E+05	63	3,5E+05	66	1,8E+05	69
37,3	1,8E+07	41	9,5E+06	46	4,8E+06	51	2,3E+06	56	1,1E+06	60	5,2E+05	64	2,5E+05	67	1,2E+05	70

22,8	1,5E+07	42	7,5E+06	47	3,6E+06	52	1,7E+06	57	8,0E+05	61	3,7E+05	65	1,7E+05	68	8,2E+04	71
13,9	1,2E+07	44	5,8E+06	49	2,7E+06	54	1,3E+06	58	5,7E+05	62	2,6E+05	66	1,2E+05	69	5,6E+04	72
8,48	9,2E+06	45	4,4E+06	50	2,0E+06	55	9,2E+05	60	4,1E+05	63	1,8E+05	67	8,1E+04	70	3,8E+04	73
5,18	7,2E+06	47	3,4E+06	52	1,5E+06	56	6,6E+05	61	2,9E+05	65	1,3E+05	68	5,5E+04	71	2,5E+04	75
3,16	5,7E+06	48	2,6E+06	53	1,1E+06	58	4,8E+05	62	2,0E+05	66	8,6E+04	69	3,7E+04	73	1,7E+04	76
1,93	4,4E+06	49	1,9E+06	55	8,2E+05	59	3,4E+05	63	1,4E+05	67	5,9E+04	71	2,5E+04	74	1,1E+04	77
1,18	3,4E+06	51	1,5E+06	56	6,0E+05	60	2,4E+05	64	9,9E+04	68	4,1E+04	72	1,7E+04	75	7,2E+03	78
0,72	2,6E+06	52	1,1E+06	57	4,4E+05	62	1,7E+05	66	6,9E+04	69	2,8E+04	73	1,1E+04	77	4,7E+03	80
0,44	2,0E+06	54	8,1E+05	59	3,2E+05	63	1,2E+05	67	4,8E+04	71	1,9E+04	75	7,4E+03	78	3,0E+03	81
0,27	1,6E+06	55	6,1E+05	60	2,3E+05	64	8,7E+04	68	3,3E+04	72	1,2E+04	76	4,8E+03	79	2,0E+03	82
0,16	1,2E+06	56	4,6E+05	61	1,7E+05	65	6,1E+04	69	2,3E+04	73	8,4E+03	77	3,2E+03	81	1,3E+03	83
0,1	9,4E+05	57	3,4E+05	62	1,2E+05	66	4,3E+04	71	1,5E+04	74	5,6E+03	78	2,1E+03	82	8,0E+02	84

7.1.7.2. Muestras de CA-24 con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5°C a 75°C para el ligante CA-24 en las dosis óptimas de RC en estado sin envejecer, con envejecimiento RTFO y PAV se presentan desde Tabla 7.1.65 hasta la Tabla 7.1.70.

Tabla 7.1.65. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 5,9 SE (M1). (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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ		
100	4,2E+07	35	2,4E+07	40	1,3E+07	45	6,8E+06	50	3,5E+06	54	1,7E+06	59	8,8E+05	63	4,5E+05	66	1,9E+05	69	1,0E+05	72	5,4E+04	74	3,0E+04	76	1,6E+04	79	8,9E+03	81	5,1E+03	83		
61,1	3,5E+07	36	1,9E+07	41	1,0E+07	47	5,2E+06	51	2,6E+06	56	1,3E+06	60	6,2E+05	64	3,1E+05	67	1,3E+05	70	6,7E+04	73	3,6E+04	75	2,0E+04	78	1,0E+04	80	5,7E+03	82	3,2E+03	84		
37,3	2,8E+07	38	1,5E+07	43	7,9E+06	48	3,9E+06	52	1,9E+06	57	9,1E+05	61	4,4E+05	65	2,2E+05	68	8,8E+04	71	4,5E+04	74	2,4E+04	76	1,3E+04	79	6,7E+03	81	3,6E+03	83	2,0E+03	85		
22,8	2,3E+07	39	1,2E+07	44	6,1E+06	49	2,9E+06	54	1,4E+06	58	6,6E+05	62	3,1E+05	66	1,5E+05	69	5,9E+04	72	3,0E+04	75	1,5E+04	77	8,3E+03	80	4,3E+03	82	2,3E+03	84	1,3E+03	85		
13,9	1,9E+07	40	9,6E+06	45	4,6E+06	50	2,2E+06	55	1,0E+06	59	4,7E+05	63	2,2E+05	67	1,0E+05	70	4,0E+04	73	2,0E+04	76	1,0E+04	79	5,3E+03	81	2,7E+03	83	1,4E+03	85	8,0E+02	86		
8,48	1,5E+07	42	7,5E+06	47	3,5E+06	52	1,6E+06	57	7,3E+05	61	3,3E+05	65	1,5E+05	68	7,0E+04	71	2,7E+04	75	1,3E+04	77	6,5E+03	80	3,4E+03	82	1,7E+03	84	9,0E+02	86	5,0E+02	87		

<b>5,18</b>	1,2E+07	43	5,9E+06	48	2,7E+06	53	1,2E+06	58	5,3E+05	62	2,3E+05	66	1,0E+05	69	4,8E+04	72	1,8E+04	76	8,5E+03	79	4,2E+03	81	2,2E+03	83	1,1E+03	85	5,6E+02	87	3,1E+02	88
<b>3,16</b>	9,8E+06	44	4,5E+06	50	2,0E+06	55	8,7E+05	59	3,8E+05	63	1,6E+05	67	7,1E+04	70	3,2E+04	73	1,2E+04	77	5,5E+03	80	2,7E+03	82	1,4E+03	84	6,8E+02	86	3,5E+02	87	1,9E+02	88
<b>1,93</b>	7,8E+06	46	3,5E+06	51	1,5E+06	56	6,3E+05	60	2,7E+05	64	1,1E+05	68	4,9E+04	71	2,1E+04	75	7,6E+03	79	3,5E+03	81	1,7E+03	84	8,5E+02	85	4,2E+02	87	2,2E+02	88	1,2E+02	89
<b>1,18</b>	6,1E+06	47	2,7E+06	52	1,1E+06	57	4,6E+05	62	1,9E+05	65	7,8E+04	69	3,3E+04	73	1,4E+04	76	4,9E+03	80	2,3E+03	83	1,1E+03	85	5,3E+02	86	2,6E+02	88	1,3E+02	89	7,1E+01	89
<b>0,72</b>	4,8E+06	49	2,0E+06	54	8,2E+05	59	3,3E+05	63	1,3E+05	67	5,4E+04	71	2,2E+04	74	9,4E+03	78	3,2E+03	81	1,4E+03	84	6,7E+02	86	3,3E+02	87	1,6E+02	88	8,1E+01	89	4,4E+01	89
<b>0,44</b>	3,8E+06	50	1,5E+06	55	6,1E+05	60	2,4E+05	64	9,4E+04	68	3,7E+04	72	1,5E+04	76	6,2E+03	79	2,0E+03	82	9,0E+02	85	4,2E+02	87	2,0E+02	88	9,8E+01	89	5,0E+01	89	2,7E+01	90
<b>0,27</b>	3,0E+06	51	1,2E+06	57	4,5E+05	61	1,7E+05	65	6,5E+04	69	2,5E+04	73	9,9E+03	77	4,0E+03	80	1,3E+03	84	5,6E+02	86	2,6E+02	87	1,2E+02	88	6,0E+01	89	3,0E+01	89	1,6E+01	90
<b>0,16</b>	2,3E+06	53	8,9E+05	58	3,3E+05	62	1,2E+05	66	4,6E+04	70	1,7E+04	75	6,5E+03	78	2,6E+03	82	8,1E+02	85	3,5E+02	87	1,6E+02	88	7,6E+01	89	3,6E+01	89	1,8E+01	89	9,9E+00	90
<b>0,1</b>	1,8E+06	54	6,7E+05	59	2,4E+05	64	8,7E+04	68	3,2E+04	72	1,2E+04	76	4,3E+03	80	1,7E+03	83	5,1E+02	86	2,2E+02	87	9,8E+01	88	4,6E+01	89	2,2E+01	89	1,1E+01	89	6,0E+00	89

Tabla 7.1.66. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 5,9% SE (M2). (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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ		
<b>100</b>	3,8E+07	35	2,2E+07	40	1,2E+07	45	6,5E+06	50	3,3E+06	54	1,7E+06	59	8,6E+05	63	4,4E+05	66	1,8E+05	69	9,7E+04	72	5,3E+04	74	1,6E+04	79	2,9E+04	76	8,8E+03	81	5,0E+03	83		
<b>61,1</b>	3,1E+07	37	1,8E+07	41	9,6E+06	47	4,9E+06	51	2,5E+06	56	1,2E+06	60	6,1E+05	64	3,1E+05	67	1,3E+05	70	6,6E+04	73	3,5E+04	75	1,0E+04	80	1,9E+04	77	5,6E+03	82	3,1E+03	83		
<b>37,3</b>	2,6E+07	38	1,4E+07	43	7,4E+06	48	3,7E+06	53	1,8E+06	57	8,9E+05	61	4,3E+05	65	2,1E+05	68	8,5E+04	71	4,4E+04	74	2,3E+04	76	6,6E+03	81	1,3E+04	79	3,6E+03	83	2,0E+03	84		
<b>22,8</b>	2,1E+07	39	1,1E+07	44	5,7E+06	49	2,8E+06	54	1,3E+06	58	6,4E+05	62	3,0E+05	66	1,5E+05	69	5,8E+04	72	2,9E+04	75	1,5E+04	77	4,2E+03	82	8,1E+03	80	2,3E+03	84	1,2E+03	85		
<b>13,9</b>	1,7E+07	41	9,0E+06	46	4,4E+06	51	2,1E+06	55	9,8E+05	60	4,5E+05	63	2,1E+05	67	1,0E+05	70	3,9E+04	73	1,9E+04	76	9,9E+03	79	2,7E+03	83	5,2E+03	81	1,4E+03	85	7,8E+02	86		
<b>8,48</b>	1,4E+07	42	7,0E+06	47	3,3E+06	52	1,5E+06	57	7,0E+05	61	3,2E+05	65	1,5E+05	68	6,9E+04	71	2,6E+04	75	1,3E+04	77	6,4E+03	80	1,7E+03	84	3,3E+03	82	8,9E+02	86	4,8E+02	87		
<b>5,18</b>	1,1E+07	43	5,4E+06	48	2,5E+06	53	1,1E+06	58	5,1E+05	62	2,3E+05	66	1,0E+05	69	4,6E+04	72	1,7E+04	76	8,3E+03	79	4,1E+03	81	1,1E+03	85	2,1E+03	83	5,6E+02	86	3,0E+02	87		
<b>3,16</b>	8,8E+06	45	4,2E+06	50	1,9E+06	55	8,3E+05	59	3,6E+05	63	1,6E+05	67	6,9E+04	70	3,1E+04	74	1,1E+04	77	5,4E+03	80	2,6E+03	82	6,7E+02	86	1,3E+03	84	3,4E+02	87	1,8E+02	88		
<b>1,93</b>	7,0E+06	46	3,2E+06	51	1,4E+06	56	6,0E+05	61	2,6E+05	65	1,1E+05	68	4,7E+04	72	2,1E+04	75	7,4E+03	79	3,5E+03	81	1,7E+03	83	4,1E+02	87	8,3E+02	85	2,1E+02	88	1,1E+02	88		
<b>1,18</b>	5,5E+06	47	2,5E+06	53	1,0E+06	58	4,4E+05	62	1,8E+05	66	7,6E+04	69	3,2E+04	73	1,4E+04	76	4,8E+03	80	2,2E+03	82	1,1E+03	85	2,6E+02	87	5,2E+02	86	1,3E+02	88	6,9E+01	89		
<b>0,72</b>	4,3E+06	49	1,9E+06	54	7,7E+05	59	3,2E+05	63	1,3E+05	67	5,2E+04	71	2,2E+04	74	9,2E+03	78	3,1E+03	81	1,4E+03	84	6,6E+02	85	1,6E+02	88	3,2E+02	87	8,1E+01	88	4,3E+01	89		
<b>0,44</b>	3,4E+06	50	1,4E+06	56	5,7E+05	60	2,3E+05	64	9,0E+04	68	3,6E+04	72	1,4E+04	76	6,0E+03	79	2,0E+03	82	8,8E+02	85	4,1E+02	86	9,7E+01	88	2,0E+02	88	4,9E+01	89	2,6E+01	89		
<b>0,27</b>	2,7E+06	52	1,1E+06	57	4,2E+05	61	1,6E+05	66	6,3E+04	69	2,4E+04	73	9,6E+03	77	3,9E+03	80	1,3E+03	84	5,5E+02	86	2,5E+02	87	5,9E+01	88	1,2E+02	88	3,0E+01	89	1,6E+01	88		

<b>0,16</b>	2,1E+06	53	8,2E+05	58	3,1E+05	63	1,2E+05	67	4,4E+04	71	1,7E+04	75	6,4E+03	78	2,5E+03	82	7,9E+02	85	3,4E+02	87	1,6E+02	87	3,6E+01	89	7,5E+01	88	1,8E+01	88	9,8E+00	88
<b>0,1</b>	1,6E+06	54	6,2E+05	59	2,3E+05	64	8,3E+04	68	3,0E+04	72	1,1E+04	76	4,2E+03	80	1,6E+03	83	5,0E+02	86	2,1E+02	87	9,7E+01	88	2,2E+01	89	4,6E+01	88	1,1E+01	88	6,0E+00	88

Tabla 7.1.67. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 5,9% RTFO (M1).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	5,0E+07	32	3,0E+07	36	1,7E+07	41	9,1E+06	45	4,8E+06	50	2,5E+06	54	1,3E+06	58	6,9E+05	62
<b>61,1</b>	4,2E+07	33	2,4E+07	38	1,3E+07	42	7,1E+06	47	3,7E+06	51	1,9E+06	55	9,5E+05	59	5,0E+05	63
<b>37,3</b>	3,5E+07	34	2,0E+07	39	1,1E+07	43	5,5E+06	48	2,8E+06	52	1,4E+06	56	6,9E+05	60	3,5E+05	64
<b>22,8</b>	2,9E+07	36	1,6E+07	40	8,5E+06	45	4,3E+06	49	2,1E+06	54	1,0E+06	58	5,0E+05	61	2,5E+05	65
<b>13,9</b>	2,4E+07	37	1,3E+07	41	6,6E+06	46	3,2E+06	51	1,6E+06	55	7,4E+05	59	3,6E+05	62	1,8E+05	66
<b>8,48</b>	2,0E+07	38	1,0E+07	43	5,2E+06	47	2,5E+06	52	1,2E+06	56	5,4E+05	60	2,5E+05	63	1,2E+05	67
<b>5,18</b>	1,6E+07	39	8,4E+06	44	4,0E+06	49	1,9E+06	53	8,5E+05	57	3,9E+05	61	1,8E+05	65	8,5E+04	68
<b>3,16</b>	1,3E+07	40	6,6E+06	45	3,1E+06	50	1,4E+06	55	6,2E+05	59	2,8E+05	62	1,3E+05	66	5,9E+04	69
<b>1,93</b>	1,1E+07	42	5,2E+06	47	2,4E+06	51	1,0E+06	56	4,6E+05	60	2,0E+05	63	8,8E+04	67	4,0E+04	70
<b>1,18</b>	8,7E+06	43	4,1E+06	48	1,8E+06	53	7,7E+05	57	3,3E+05	61	1,4E+05	65	6,1E+04	68	2,8E+04	72
<b>0,72</b>	7,0E+06	44	3,2E+06	49	1,4E+06	54	5,7E+05	58	2,4E+05	62	1,0E+05	66	4,3E+04	69	1,9E+04	73
<b>0,44</b>	5,6E+06	46	2,5E+06	51	1,0E+06	55	4,2E+05	59	1,7E+05	63	7,0E+04	67	2,9E+04	71	1,3E+04	75
<b>0,27</b>	4,5E+06	47	1,9E+06	52	7,8E+05	57	3,1E+05	61	1,2E+05	64	4,9E+04	68	2,0E+04	72	8,4E+03	76
<b>0,16</b>	3,6E+06	48	1,5E+06	53	5,9E+05	58	2,3E+05	62	8,9E+04	65	3,5E+04	69	1,4E+04	74	5,5E+03	78
<b>0,1</b>	2,9E+06	50	1,2E+06	55	4,5E+05	59	1,7E+05	63	6,3E+04	67	2,4E+04	71	9,2E+03	75	3,7E+03	79

Tabla 7.1.68. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 5,9% RTFO (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ

[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	4,4E+07	32	2,7E+07	36	1,6E+07	41	8,5E+06	45	4,5E+06	50	2,4E+06	54	1,2E+06	58	6,5E+05	62
61,1	3,7E+07	33	2,2E+07	38	1,2E+07	42	6,6E+06	47	3,4E+06	51	1,8E+06	55	9,0E+05	59	4,7E+05	63
37,3	3,1E+07	34	1,8E+07	39	9,9E+06	43	5,2E+06	48	2,6E+06	52	1,3E+06	56	6,5E+05	60	3,3E+05	64
22,8	2,6E+07	36	1,5E+07	40	7,9E+06	45	4,0E+06	49	2,0E+06	53	9,6E+05	57	4,7E+05	61	2,3E+05	65
13,9	2,2E+07	37	1,2E+07	41	6,2E+06	46	3,0E+06	50	1,5E+06	55	7,0E+05	59	3,4E+05	62	1,7E+05	66
8,48	1,8E+07	38	9,6E+06	43	4,8E+06	47	2,3E+06	52	1,1E+06	56	5,1E+05	60	2,4E+05	63	1,2E+05	67
5,18	1,4E+07	39	7,7E+06	44	3,7E+06	48	1,7E+06	53	8,0E+05	57	3,7E+05	61	1,7E+05	65	8,0E+04	68
3,16	1,2E+07	40	6,1E+06	45	2,9E+06	50	1,3E+06	54	5,9E+05	58	2,6E+05	62	1,2E+05	66	5,5E+04	69
1,93	9,6E+06	42	4,8E+06	46	2,2E+06	51	9,8E+05	56	4,3E+05	60	1,9E+05	63	8,3E+04	67	3,8E+04	70
1,18	7,7E+06	43	3,8E+06	48	1,7E+06	52	7,3E+05	57	3,1E+05	61	1,3E+05	65	5,8E+04	68	2,6E+04	72
0,72	6,2E+06	44	3,0E+06	49	1,3E+06	54	5,4E+05	58	2,3E+05	62	9,5E+04	66	4,0E+04	70	1,7E+04	73
0,44	5,0E+06	46	2,3E+06	51	9,8E+05	55	4,0E+05	59	1,6E+05	63	6,7E+04	67	2,8E+04	71	1,2E+04	75
0,27	4,0E+06	47	1,8E+06	52	7,4E+05	56	3,0E+05	61	1,2E+05	65	4,7E+04	68	1,9E+04	73	7,8E+03	76
0,16	3,2E+06	48	1,4E+06	53	5,6E+05	58	2,2E+05	62	8,4E+04	66	3,3E+04	70	1,3E+04	74	5,2E+03	78
0,1	2,6E+06	49	1,1E+06	54	4,2E+05	59	1,6E+05	63	6,0E+04	67	2,3E+04	71	8,7E+03	75	3,4E+03	79

Tabla 7.1.69. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 5,9% PAV (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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		
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	
[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	4,9E+07	30	3,1E+07	33	1,9E+07	37	1,1E+07	40	6,0E+06	44	3,3E+06	48	1,8E+06	52	9,8E+05	55	
61,1	4,2E+07	30	2,6E+07	34	1,5E+07	38	8,6E+06	42	4,7E+06	45	2,5E+06	49	1,3E+06	53	7,2E+05	56	
37,3	3,5E+07	31	2,2E+07	35	1,2E+07	39	6,9E+06	43	3,7E+06	46	1,9E+06	50	1,0E+06	54	5,3E+05	57	
22,8	3,0E+07	32	1,8E+07	36	1,0E+07	40	5,4E+06	44	2,9E+06	47	1,5E+06	51	7,6E+05	55	3,9E+05	58	
13,9	2,5E+07	33	1,5E+07	37	8,2E+06	41	4,3E+06	45	2,2E+06	48	1,1E+06	52	5,6E+05	56	2,9E+05	59	
8,48	2,1E+07	34	1,2E+07	38	6,5E+06	42	3,4E+06	46	1,7E+06	49	8,4E+05	53	4,1E+05	57	2,1E+05	60	
5,18	1,8E+07	35	1,0E+07	39	5,2E+06	43	2,6E+06	47	1,3E+06	51	6,3E+05	54	3,0E+05	58	1,5E+05	61	

<b>3,16</b>	1,5E+07	36	8,1E+06	40	4,2E+06	44	2,1E+06	48	9,9E+05	52	4,7E+05	55	2,2E+05	59	1,1E+05	62
<b>1,93</b>	1,2E+07	37	6,6E+06	41	3,3E+06	45	1,6E+06	49	7,5E+05	53	3,5E+05	56	1,6E+05	60	7,6E+04	64
<b>1,18</b>	1,0E+07	38	5,3E+06	42	2,6E+06	46	1,2E+06	50	5,6E+05	54	2,6E+05	58	1,2E+05	61	5,4E+04	65
<b>0,72</b>	8,3E+06	39	4,3E+06	43	2,0E+06	47	9,4E+05	51	4,2E+05	55	1,9E+05	59	8,4E+04	63	3,8E+04	66
<b>0,44</b>	6,9E+06	40	3,4E+06	44	1,6E+06	49	7,2E+05	52	3,2E+05	56	1,4E+05	60	6,0E+04	64	2,6E+04	68
<b>0,27</b>	5,7E+06	41	2,8E+06	46	1,3E+06	50	5,5E+05	54	2,4E+05	58	1,0E+05	61	4,3E+04	66	1,8E+04	70
<b>0,16</b>	4,6E+06	43	2,2E+06	47	9,8E+05	51	4,2E+05	55	1,8E+05	59	7,3E+04	63	3,0E+04	67	1,3E+04	71
<b>0,1</b>	3,8E+06	44	1,8E+06	48	7,7E+05	52	3,2E+05	56	1,3E+05	60	5,3E+04	64	2,1E+04	68	8,6E+03	73

Tabla 7.1.70. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-24 con RC 5,9% PAV (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	5,1E+07	30	3,2E+07	34	1,9E+07	37	1,1E+07	41	6,2E+06	45	3,4E+06	49	1,9E+06	52	1,0E+06	56
<b>61,1</b>	4,4E+07	31	2,7E+07	35	1,6E+07	38	8,8E+06	42	4,8E+06	46	2,6E+06	50	1,4E+06	53	7,5E+05	57
<b>37,3</b>	3,7E+07	32	2,2E+07	36	1,3E+07	39	7,1E+06	43	3,8E+06	47	2,0E+06	51	1,0E+06	54	5,5E+05	58
<b>22,8</b>	3,1E+07	33	1,9E+07	37	1,0E+07	40	5,6E+06	44	2,9E+06	48	1,5E+06	52	7,7E+05	55	4,0E+05	59
<b>13,9</b>	2,6E+07	34	1,5E+07	38	8,3E+06	41	4,4E+06	45	2,2E+06	49	1,1E+06	53	5,7E+05	56	2,9E+05	60
<b>8,48</b>	2,2E+07	35	1,3E+07	39	6,6E+06	43	3,4E+06	47	1,7E+06	50	8,5E+05	54	4,2E+05	57	2,1E+05	61
<b>5,18</b>	1,8E+07	36	1,0E+07	40	5,3E+06	44	2,6E+06	48	1,3E+06	52	6,3E+05	55	3,1E+05	58	1,5E+05	62
<b>3,16</b>	1,5E+07	37	8,3E+06	41	4,2E+06	45	2,1E+06	49	9,8E+05	53	4,7E+05	56	2,2E+05	60	1,1E+05	63
<b>1,93</b>	1,3E+07	38	6,7E+06	42	3,3E+06	46	1,6E+06	50	7,4E+05	54	3,5E+05	57	1,6E+05	61	7,7E+04	64
<b>1,18</b>	1,0E+07	39	5,4E+06	43	2,6E+06	47	1,2E+06	51	5,6E+05	55	2,5E+05	58	1,2E+05	62	5,5E+04	66
<b>0,72</b>	8,5E+06	40	4,3E+06	44	2,0E+06	48	9,3E+05	52	4,2E+05	56	1,9E+05	60	8,4E+04	63	3,8E+04	67
<b>0,44</b>	7,0E+06	41	3,4E+06	46	1,6E+06	50	7,1E+05	54	3,1E+05	57	1,4E+05	61	6,0E+04	65	2,7E+04	68
<b>0,27</b>	5,7E+06	42	2,7E+06	47	1,2E+06	51	5,4E+05	55	2,3E+05	58	9,8E+04	62	4,2E+04	66	1,8E+04	70
<b>0,16</b>	4,7E+06	43	2,2E+06	48	9,6E+05	52	4,1E+05	56	1,7E+05	60	7,1E+04	64	3,0E+04	67	1,3E+04	72

<b>0,1</b>	3,9E+06	45	1,7E+06	49	7,4E+05	53	3,1E+05	57	1,3E+05	61	5,1E+04	65	2,1E+04	69	8,6E+03	74
------------	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----

## 7.1.8. CA-14 con RC

### 7.1.8.1. Muestras de CA-14 con RC en dosis 3, 6 y 9%

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5°C a 40°C para el ligante CA-14 en dosis de 3, 6 y 9% de RC se presentan desde Tabla 7.1.71 hasta la Tabla 7.1.76.

Tabla 7.1.71. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 3% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	8,1E+07	27	5,2E+07	30	3,1E+07	34,0	1,7E+07	38	9,1E+06	42,3	4,4E+06	48	2,0E+06	53,1	1,0E+06	57
<b>61,1</b>	7,0E+07	28	4,4E+07	31	2,6E+07	34,9	1,4E+07	39	7,2E+06	43,4	3,4E+06	49	1,5E+06	54,1	7,3E+05	59
<b>37,3</b>	6,1E+07	29	3,7E+07	32	2,1E+07	35,8	1,1E+07	40	5,7E+06	44,6	2,6E+06	50	1,1E+06	55,1	5,3E+05	59
<b>22,8</b>	5,2E+07	29	3,2E+07	33	1,8E+07	36,6	9,2E+06	41	4,5E+06	45,5	2,0E+06	51	8,4E+05	56,0	3,9E+05	60
<b>13,9</b>	4,5E+07	30	2,7E+07	34	1,5E+07	37,5	7,4E+06	42	3,5E+06	46,5	1,5E+06	52	6,2E+05	56,9	2,8E+05	61
<b>8,48</b>	3,8E+07	31	2,2E+07	35	1,2E+07	38,4	6,0E+06	43	2,7E+06	47,6	1,2E+06	53	4,6E+05	57,9	2,0E+05	62
<b>5,18</b>	3,3E+07	32	1,9E+07	36	9,8E+06	39,4	4,7E+06	44	2,1E+06	48,6	8,7E+05	54	3,3E+05	58,8	1,4E+05	63
<b>3,16</b>	2,8E+07	33	1,5E+07	36	8,0E+06	40,3	3,8E+06	45	1,6E+06	49,7	6,5E+05	55	2,4E+05	59,7	1,0E+05	64
<b>1,93</b>	2,3E+07	34	1,3E+07	37	6,5E+06	41,4	3,0E+06	46	1,3E+06	50,7	4,9E+05	56	1,8E+05	60,5	7,1E+04	65
<b>1,18</b>	2,0E+07	35	1,1E+07	38	5,2E+06	42,4	2,4E+06	47	9,7E+05	51,8	3,6E+05	57	1,3E+05	61,5	5,0E+04	66
<b>0,72</b>	1,7E+07	36	8,8E+06	39	4,2E+06	43,5	1,9E+06	48	7,4E+05	52,8	2,7E+05	57	9,3E+04	62,3	3,5E+04	67
<b>0,44</b>	1,4E+07	37	7,3E+06	40	3,4E+06	44,7	1,5E+06	49	5,7E+05	53,7	2,0E+05	58	6,7E+04	63,2	2,5E+04	68
<b>0,27</b>	1,2E+07	37	6,0E+06	41	2,8E+06	45,8	1,1E+06	50	4,3E+05	54,5	1,5E+05	59	4,8E+04	63,9	1,7E+04	69
<b>0,16</b>	1,0E+07	38	5,0E+06	42	2,2E+06	46,8	9,1E+05	51	3,3E+05	55,5	1,1E+05	60	3,5E+04	64,8	1,2E+04	70
<b>0,1</b>	8,6E+06	39	4,2E+06	43	1,8E+06	47,6	7,1E+05	52	2,6E+05	56,3	8,4E+04	61	2,5E+04	65,7	8,4E+03	71

Tabla 7.1.72. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 3% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	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	9,6E+07	26	6,0E+07	30	3,6E+07	34	2,0E+07	38	1,0E+07	42	5,0E+06	47	2,2E+06	53	1,1E+06	57
61,1	8,4E+07	27	5,1E+07	31	3,0E+07	35	1,6E+07	39	8,2E+06	43	3,9E+06	48	1,7E+06	54	7,8E+05	59
37,3	7,2E+07	28	4,4E+07	32	2,5E+07	36	1,3E+07	40	6,5E+06	44	3,0E+06	50	1,3E+06	55	5,7E+05	59
22,8	6,2E+07	29	3,7E+07	33	2,0E+07	36	1,1E+07	41	5,1E+06	45	2,3E+06	51	9,3E+05	56	4,1E+05	60
13,9	5,4E+07	30	3,1E+07	34	1,7E+07	37	8,6E+06	42	4,0E+06	46	1,7E+06	52	6,8E+05	57	3,0E+05	61
8,48	4,6E+07	31	2,6E+07	35	1,4E+07	38	6,9E+06	43	3,1E+06	47	1,3E+06	53	5,0E+05	58	2,1E+05	62
5,18	3,9E+07	32	2,2E+07	35	1,1E+07	39	5,5E+06	44	2,4E+06	49	9,8E+05	54	3,7E+05	59	1,5E+05	63
3,16	3,3E+07	33	1,8E+07	36	9,2E+06	40	4,3E+06	45	1,9E+06	50	7,4E+05	55	2,7E+05	60	1,1E+05	64
1,93	2,8E+07	34	1,5E+07	37	7,5E+06	41	3,4E+06	46	1,4E+06	51	5,5E+05	56	1,9E+05	61	7,6E+04	65
1,18	2,4E+07	35	1,2E+07	38	6,1E+06	42	2,7E+06	47	1,1E+06	52	4,1E+05	57	1,4E+05	62	5,3E+04	66
0,72	2,0E+07	36	1,0E+07	39	4,9E+06	43	2,1E+06	48	8,4E+05	53	3,0E+05	58	1,0E+05	63	3,7E+04	67
0,44	1,7E+07	37	8,5E+06	40	3,9E+06	45	1,7E+06	49	6,4E+05	54	2,3E+05	59	7,2E+04	64	2,6E+04	69
0,27	1,4E+07	37	7,0E+06	41	3,2E+06	46	1,3E+06	50	4,9E+05	55	1,7E+05	60	5,2E+04	65	1,8E+04	70
0,16	1,2E+07	38	5,8E+06	42	2,6E+06	47	1,0E+06	51	3,8E+05	56	1,2E+05	60	3,8E+04	66	1,2E+04	72
0,1	1,0E+07	39	4,8E+06	43	2,1E+06	48	8,2E+05	52	2,9E+05	56	9,3E+04	61	2,7E+04	66	8,6E+03	73

Tabla 7.1.73. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 6% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	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	29	4,7E+07	33	2,7E+07	36,6	1,4E+07	41	7,2E+06	45,8	3,3E+06	51	1,4E+06	57,1	6,6E+05	61
61,1	6,6E+07	30	4,0E+07	34	2,2E+07	37,5	1,2E+07	42	5,6E+06	47,0	2,5E+06	52	1,1E+06	58,1	4,7E+05	62
37,3	5,7E+07	31	3,3E+07	35	1,8E+07	38,5	9,2E+06	43	4,4E+06	48,1	1,9E+06	54	7,7E+05	59,0	3,4E+05	63

<b>22,8</b>	4,8E+07	32	2,8E+07	36	1,5E+07	39,4	7,3E+06	44	3,4E+06	49,2	1,4E+06	55	5,6E+05	59,9	2,4E+05	64
<b>13,9</b>	4,1E+07	33	2,3E+07	36	1,2E+07	40,4	5,8E+06	45	2,6E+06	50,3	1,1E+06	56	4,0E+05	60,9	1,7E+05	65
<b>8,48</b>	3,4E+07	34	1,9E+07	37	9,6E+06	41,4	4,5E+06	46	2,0E+06	51,4	7,9E+05	57	2,9E+05	61,8	1,2E+05	66
<b>5,18</b>	2,9E+07	35	1,6E+07	38	7,7E+06	42,5	3,5E+06	47	1,5E+06	52,5	5,8E+05	58	2,1E+05	62,7	8,3E+04	67
<b>3,16</b>	2,4E+07	35	1,3E+07	39	6,2E+06	43,6	2,8E+06	48	1,1E+06	53,5	4,3E+05	59	1,5E+05	63,6	5,7E+04	68
<b>1,93</b>	2,0E+07	36	1,0E+07	40	4,9E+06	44,7	2,1E+06	50	8,5E+05	54,5	3,1E+05	59	1,0E+05	64,6	4,0E+04	69
<b>1,18</b>	1,7E+07	37	8,5E+06	41	3,9E+06	45,8	1,7E+06	51	6,4E+05	55,5	2,3E+05	60	7,4E+04	65,6	2,7E+04	70
<b>0,72</b>	1,4E+07	38	6,9E+06	42	3,1E+06	46,9	1,3E+06	52	4,8E+05	56,5	1,7E+05	61	5,3E+04	66,7	1,9E+04	71
<b>0,44</b>	1,2E+07	39	5,6E+06	44	2,5E+06	48,1	9,8E+05	53	3,6E+05	57,4	1,2E+05	62	3,7E+04	67,8	1,3E+04	73
<b>0,27</b>	9,6E+06	40	4,6E+06	45	1,9E+06	49,2	7,5E+05	54	2,7E+05	58,2	8,8E+04	63	2,6E+04	69,0	8,6E+03	74
<b>0,16</b>	8,1E+06	41	3,7E+06	46	1,6E+06	50,1	5,9E+05	55	2,0E+05	59,2	6,4E+04	64	1,8E+04	70,0	5,8E+03	75
<b>0,1</b>	6,8E+06	42	3,0E+06	47	1,2E+06	51,1	4,5E+05	55	1,5E+05	59,9	4,7E+04	65	1,3E+04	70,8	3,9E+03	77

Tabla 7.1.74. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 6% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	6,2E+07	29	3,8E+07	33	2,1E+07	37	1,2E+07	41	6,0E+06	46	2,8E+06	52	1,3E+06	57	6,0E+05	62
<b>61,1</b>	5,3E+07	30	3,1E+07	34	1,8E+07	38	9,3E+06	42	4,6E+06	47	2,1E+06	53	9,2E+05	58	4,3E+05	62
<b>37,3</b>	4,5E+07	31	2,6E+07	35	1,4E+07	39	7,5E+06	44	3,6E+06	49	1,6E+06	54	6,7E+05	59	3,0E+05	63
<b>22,8</b>	3,8E+07	32	2,2E+07	36	1,2E+07	40	5,9E+06	45	2,8E+06	50	1,2E+06	55	4,9E+05	60	2,2E+05	64
<b>13,9</b>	3,2E+07	33	1,8E+07	37	9,5E+06	41	4,6E+06	46	2,1E+06	51	8,9E+05	56	3,5E+05	61	1,5E+05	65
<b>8,48</b>	2,7E+07	34	1,5E+07	38	7,6E+06	42	3,6E+06	47	1,6E+06	52	6,6E+05	57	2,5E+05	62	1,1E+05	66
<b>5,18</b>	2,3E+07	35	1,2E+07	39	6,1E+06	43	2,8E+06	48	1,2E+06	53	4,9E+05	58	1,8E+05	63	7,4E+04	67
<b>3,16</b>	1,9E+07	36	1,0E+07	40	4,9E+06	44	2,2E+06	49	9,2E+05	54	3,6E+05	59	1,3E+05	64	5,2E+04	68
<b>1,93</b>	1,6E+07	37	8,2E+06	41	3,9E+06	45	1,7E+06	50	6,9E+05	55	2,6E+05	60	9,1E+04	65	3,6E+04	69
<b>1,18</b>	1,3E+07	38	6,6E+06	42	3,1E+06	46	1,3E+06	51	5,2E+05	56	1,9E+05	61	6,5E+04	66	2,5E+04	70

<b>0,72</b>	1,1E+07	39	5,4E+06	43	2,4E+06	48	1,0E+06	52	3,9E+05	57	1,4E+05	61	4,6E+04	67	1,7E+04	71
<b>0,44</b>	9,1E+06	40	4,4E+06	44	1,9E+06	49	7,8E+05	53	2,9E+05	58	1,0E+05	62	3,2E+04	67	1,1E+04	73
<b>0,27</b>	7,6E+06	41	3,6E+06	45	1,5E+06	50	6,0E+05	54	2,2E+05	59	7,4E+04	63	2,3E+04	68	7,8E+03	74
<b>0,16</b>	6,4E+06	42	2,9E+06	46	1,2E+06	51	4,6E+05	55	1,6E+05	59	5,4E+04	64	1,6E+04	69	5,3E+03	75
<b>0,1</b>	5,3E+06	43	2,4E+06	47	9,7E+05	52	3,6E+05	56	1,2E+05	60	4,0E+04	64	1,2E+04	70	3,6E+03	76

Tabla 7.1.75. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 9% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	4,4E+07	33	2,5E+07	37	1,3E+07	41,4	6,8E+06	46	3,1E+06	51,8	1,3E+06	58	5,2E+05	63,2	2,3E+05	67
<b>61,1</b>	3,7E+07	34	2,1E+07	38	1,1E+07	43,0	5,2E+06	48	2,3E+06	53,0	9,6E+05	59	3,7E+05	64,1	1,6E+05	68
<b>37,3</b>	3,1E+07	35	1,7E+07	39	8,6E+06	43,7	4,1E+06	49	1,8E+06	54,1	7,0E+05	60	2,6E+05	65,0	1,1E+05	69
<b>22,8</b>	2,6E+07	36	1,4E+07	40	6,8E+06	44,7	3,1E+06	50	1,3E+06	55,1	5,1E+05	61	1,8E+05	65,9	7,5E+04	70
<b>13,9</b>	2,1E+07	37	1,1E+07	41	5,3E+06	45,8	2,4E+06	51	9,8E+05	56,2	3,7E+05	62	1,3E+05	66,8	5,2E+04	71
<b>8,48</b>	1,7E+07	38	8,8E+06	42	4,1E+06	46,8	1,8E+06	52	7,2E+05	57,1	2,6E+05	63	8,9E+04	67,7	3,5E+04	72
<b>5,18</b>	1,4E+07	39	7,1E+06	43	3,2E+06	47,9	1,4E+06	53	5,3E+05	58,1	1,9E+05	63	6,2E+04	68,7	2,4E+04	73
<b>3,16</b>	1,2E+07	40	5,6E+06	44	2,5E+06	49,0	1,0E+06	54	3,9E+05	59,0	1,3E+05	64	4,2E+04	69,7	1,6E+04	74
<b>1,93</b>	9,5E+06	41	4,5E+06	45	1,9E+06	50,0	7,8E+05	55	2,8E+05	59,9	9,4E+04	65	2,9E+04	70,8	1,1E+04	75
<b>1,18</b>	7,7E+06	42	3,6E+06	46	1,5E+06	51,0	5,9E+05	56	2,1E+05	60,8	6,7E+04	66	2,0E+04	71,9	7,1E+03	76
<b>0,72</b>	6,3E+06	43	2,8E+06	47	1,2E+06	51,9	4,4E+05	57	1,5E+05	61,6	4,7E+04	67	1,4E+04	73,2	4,7E+03	78
<b>0,44</b>	5,1E+06	44	2,2E+06	48	8,9E+05	52,9	3,3E+05	57	1,1E+05	62,3	3,3E+04	68	9,2E+03	74,4	3,1E+03	79
<b>0,27</b>	4,2E+06	45	1,8E+06	49	6,9E+05	53,7	2,5E+05	58	8,1E+04	63,0	2,3E+04	69	6,2E+03	75,7	2,0E+03	80
<b>0,16</b>	3,4E+06	46	1,4E+06	50	5,4E+05	54,4	1,9E+05	59	5,9E+04	63,8	1,7E+04	70	4,2E+03	76,8	1,3E+03	81
<b>0,1</b>	2,8E+06	46	1,1E+06	51	4,2E+05	54,8	1,4E+05	59	4,4E+04	64,5	1,2E+04	71	2,9E+03	77,6	8,3E+02	82

Tabla 7.1.76. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 9% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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		
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	
[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	3,7E+07	33	2,1E+07	37	1,1E+07	41	5,8E+06	46	2,7E+06	52	1,2E+06	58	4,6E+05	63	2,0E+05	68	
61,1	3,1E+07	34	1,7E+07	38	9,1E+06	42	4,5E+06	47	2,1E+06	53	8,4E+05	59	3,3E+05	64	1,4E+05	68	
37,3	2,6E+07	35	1,4E+07	39	7,3E+06	43	3,5E+06	48	1,6E+06	54	6,2E+05	60	2,3E+05	65	9,8E+04	69	
22,8	2,1E+07	36	1,2E+07	39	5,8E+06	44	2,7E+06	49	1,2E+06	55	4,5E+05	61	1,6E+05	66	6,7E+04	70	
13,9	1,8E+07	36	9,3E+06	40	4,6E+06	45	2,1E+06	51	8,6E+05	56	3,2E+05	62	1,1E+05	67	4,6E+04	71	
8,48	1,5E+07	37	7,5E+06	41	3,6E+06	46	1,6E+06	52	6,4E+05	57	2,3E+05	62	7,9E+04	68	3,1E+04	72	
5,18	1,2E+07	38	6,0E+06	43	2,8E+06	48	1,2E+06	53	4,7E+05	58	1,7E+05	63	5,5E+04	69	2,1E+04	73	
3,16	9,9E+06	39	4,8E+06	44	2,2E+06	49	9,0E+05	54	3,4E+05	59	1,2E+05	64	3,8E+04	70	1,4E+04	74	
1,93	8,2E+06	40	3,9E+06	45	1,7E+06	50	6,8E+05	55	2,5E+05	60	8,3E+04	65	2,6E+04	71	9,5E+03	75	
1,18	6,7E+06	41	3,1E+06	46	1,3E+06	51	5,1E+05	56	1,8E+05	61	5,9E+04	66	1,8E+04	72	6,3E+03	76	
0,72	5,4E+06	42	2,4E+06	47	1,0E+06	52	3,9E+05	56	1,3E+05	61	4,2E+04	67	1,2E+04	73	4,2E+03	78	
0,44	4,4E+06	43	1,9E+06	48	7,8E+05	53	2,9E+05	57	9,8E+04	62	3,0E+04	68	8,2E+03	74	2,7E+03	79	
0,27	3,6E+06	44	1,5E+06	49	6,1E+05	54	2,2E+05	58	7,2E+04	63	2,1E+04	68	5,6E+03	75	1,8E+03	80	
0,16	3,0E+06	45	1,2E+06	50	4,7E+05	54	1,7E+05	58	5,3E+04	63	1,5E+04	69	3,8E+03	76	1,2E+03	81	
0,1	2,5E+06	46	9,9E+05	51	3,7E+05	55	1,3E+05	59	4,0E+04	64	1,1E+04	70	2,6E+03	76	7,5E+02	82	

### 7.1.8.2. Muestras de CA-14 con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5°C a 75°C para el ligante CA-14 en las dosis óptimas de RC en estado sin envejecer, con envejecimiento RTFO y PAV se presentan desde Tabla 7.1.77 hasta la Tabla 7.1.82.

Tabla 7.1.77. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% SE (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ

[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	4,9E+07	33	2,8E+07	36	1,6E+07	40	8,0E+06	45	3,8E+06	51	1,6E+06	57	6,5E+05	63	2,9E+05	67	1,3E+05	70	6,7E+04	72	3,7E+04	74	2,1E+04	76	1,1E+04	79	6,2E+03	81	3,6E+03	83						
61,1	4,1E+07	33	2,3E+07	37	1,3E+07	42	6,2E+06	46	2,9E+06	52	1,2E+06	58	4,6E+05	63	2,0E+05	68	8,7E+04	71	4,5E+04	73	2,5E+04	75	1,4E+04	78	7,4E+03	80	4,0E+03	82	2,3E+03	83						
37,3	3,5E+07	34	1,9E+07	38	1,0E+07	43	4,9E+06	48	2,2E+06	53	8,8E+05	59	3,3E+05	64	1,4E+05	69	5,9E+04	72	3,0E+04	74	1,6E+04	77	8,9E+03	79	4,8E+03	81	2,5E+03	83	1,4E+03	84						
22,8	2,9E+07	35	1,6E+07	39	8,0E+06	44	3,8E+06	49	1,6E+06	54	6,4E+05	60	2,3E+05	65	9,6E+04	69	4,0E+04	73	2,0E+04	75	1,1E+04	78	5,8E+03	80	3,0E+03	82	1,6E+03	84	8,9E+02	85						
13,9	2,4E+07	36	1,3E+07	40	6,3E+06	45	2,9E+06	50	1,2E+06	55	4,6E+05	61	1,6E+05	66	6,6E+04	70	2,7E+04	74	1,3E+04	76	6,9E+03	79	3,7E+03	81	1,9E+03	83	1,0E+03	85	5,6E+02	86						
8,48	2,0E+07	37	1,0E+07	41	4,9E+06	46	2,2E+06	51	9,0E+05	56	3,3E+05	62	1,1E+05	67	4,5E+04	71	1,8E+04	75	8,7E+03	77	4,5E+03	80	2,4E+03	82	1,2E+03	84	6,3E+02	85	3,5E+02	87						
5,18	1,6E+07	38	8,3E+06	42	3,9E+06	47	1,7E+06	52	6,6E+05	57	2,4E+05	63	7,8E+04	68	3,0E+04	72	1,2E+04	76	5,7E+03	79	2,9E+03	81	1,5E+03	83	7,7E+02	85	3,9E+02	86	2,1E+02	87						
3,16	1,3E+07	39	6,6E+06	43	3,0E+06	48	1,3E+06	53	4,9E+05	58	1,7E+05	64	5,4E+04	69	2,1E+04	73	7,8E+03	77	3,7E+03	80	1,8E+03	82	9,5E+02	84	4,8E+02	86	2,4E+02	87	1,3E+02	88						
1,93	1,1E+07	40	5,3E+06	44	2,3E+06	49	9,6E+05	54	3,6E+05	59	1,2E+05	64	3,7E+04	70	1,4E+04	75	5,1E+03	78	2,4E+03	81	1,2E+03	83	6,0E+02	85	3,0E+02	86	1,5E+02	87	8,2E+01	88						
1,18	9,0E+06	41	4,2E+06	46	1,8E+06	50	7,2E+05	55	2,6E+05	60	8,6E+04	65	2,6E+04	71	9,2E+03	76	3,3E+03	80	1,5E+03	82	7,4E+02	84	3,8E+02	86	1,9E+02	87	9,3E+01	88	5,0E+01	88						
0,72	7,4E+06	42	3,4E+06	47	1,4E+06	51	5,4E+05	56	1,9E+05	61	6,1E+04	66	1,8E+04	72	6,1E+03	77	2,1E+03	81	9,7E+02	83	4,7E+02	85	2,3E+02	86	1,1E+02	88	5,7E+01	88	3,1E+01	88						
0,44	6,0E+06	43	2,7E+06	48	1,1E+06	52	4,1E+05	57	1,4E+05	62	4,3E+04	67	1,2E+04	74	4,0E+03	79	1,4E+03	82	6,1E+02	84	2,9E+02	86	1,4E+02	87	7,1E+01	88	3,5E+01	88	1,9E+01	88						
0,27	4,9E+06	44	2,1E+06	49	8,5E+05	53	3,1E+05	58	1,0E+05	63	3,1E+04	68	8,1E+03	75	2,6E+03	80	8,7E+02	83	3,8E+02	85	1,8E+02	86	8,9E+01	88	4,3E+01	88	2,1E+01	88	1,2E+01	88						
0,16	4,1E+06	45	1,7E+06	50	6,6E+05	54	2,4E+05	58	7,6E+04	63	2,2E+04	69	5,6E+03	76	1,7E+03	81	5,6E+02	84	2,4E+02	86	1,1E+02	87	5,5E+01	88	2,6E+01	88	1,3E+01	88	7,2E+00	88						
0,1	3,4E+06	46	1,4E+06	50	5,2E+05	54	1,8E+05	59	5,7E+04	64	1,5E+04	70	3,8E+03	77	1,1E+03	82	3,5E+02	85	1,5E+02	87	6,9E+01	88	3,3E+01	88	1,6E+01	88	8,1E+00	88	4,4E+00	87						

Tabla 7.1.78. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% SE (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ		
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	4,9E+07	33	2,8E+07	36	1,6E+07	40	8,2E+06	45	3,9E+06	51	1,7E+06	57	6,9E+05	63	3,1E+05	67	1,3E+05	70	6,8E+04	72	3,7E+04	74	2,1E+04	76	1,1E+04	79	6,4E+03	81	3,6E+03	83				
61,1	4,1E+07	33	2,3E+07	37	1,3E+07	42	6,4E+06	46	3,0E+06	52	1,3E+06	58	4,9E+05	64	2,2E+05	67	8,7E+04	71	4,6E+04	73	2,5E+04	75	1,4E+04	77	7,5E+03	80	4,1E+03	82	2,3E+03	83				
37,3	3,5E+07	34	1,9E+07	38	1,0E+07	43	5,0E+06	48	2,2E+06	53	9,2E+05	59	3,5E+05	64	1,5E+05	68	5,9E+04	72	3,1E+04	74	1,7E+04	77	4,8E+03	81	9,0E+03	79	2,6E+03	83	1,5E+03	84				
22,8	2,9E+07	35	1,6E+07	39	8,1E+06	44	3,9E+06	49	1,7E+06	54	6,7E+05	60	2,5E+05	65	1,0E+05	69	4,0E+04	72	2,0E+04	75	1,1E+04	77	3,1E+03	82	5,9E+03	80	1,6E+03	84	9,2E+02	85				
13,9	2,4E+07	36	1,3E+07	40	6,4E+06	45	3,0E+06	50	1,3E+06	55	4,8E+05	61	1,7E+05	66	7,0E+04	70	2,7E+04	74	1,4E+04	76	7,0E+03	79	2,0E+03	83	3,8E+03	81	1,0E+03	84	5,7E+02	86				
8,48	2,0E+07	37	1,0E+07	41	5,0E+06	46	2,3E+06	51	9,3E+05	56	3,5E+05	62	1,2E+05	67	4,8E+04	71	1,8E+04	75	8,9E+03	77	4,5E+03	80	1,2E+03	84	2,4E+03	82	6,5E+02	85	3,6E+02	87				
5,18	1,6E+07	38	8,3E+06	42	3,9E+06	47	1,7E+06	52	6,9E+05	57	2,5E+05	63	8,4E+04	68	3,3E+04	72	1,2E+04	76	5,8E+03	79	2,9E+03	81	7,8E+02	85	1,5E+03	83	4,1E+02	86	2,2E+02	87				

<b>3,16</b>	1,3E+07	39	6,7E+06	43	3,1E+06	48	1,3E+06	53	5,1E+05	58	1,8E+05	64	5,8E+04	69	2,2E+04	73	7,9E+03	77	3,8E+03	80	1,9E+03	82	4,9E+02	86	9,7E+02	84	2,5E+02	87	1,4E+02	88
<b>1,93</b>	1,1E+07	40	5,3E+06	44	2,4E+06	49	9,8E+05	54	3,7E+05	59	1,3E+05	64	4,0E+04	70	1,5E+04	74	5,2E+03	78	2,4E+03	81	1,2E+03	83	3,1E+02	86	6,1E+02	85	1,6E+02	87	8,4E+01	88
<b>1,18</b>	9,1E+06	41	4,3E+06	45	1,9E+06	50	7,4E+05	55	2,7E+05	60	9,0E+04	65	2,8E+04	71	9,8E+03	76	3,4E+03	80	1,6E+03	82	7,5E+02	84	1,9E+02	87	3,8E+02	86	9,6E+01	88	5,2E+01	89
<b>0,72</b>	7,4E+06	42	3,4E+06	47	1,4E+06	51	5,6E+05	56	2,0E+05	61	6,4E+04	66	1,9E+04	72	6,5E+03	77	2,2E+03	81	9,9E+02	83	4,7E+02	85	1,2E+02	88	2,4E+02	86	5,9E+01	88	3,2E+01	89
<b>0,44</b>	6,0E+06	43	2,7E+06	48	1,1E+06	52	4,2E+05	57	1,5E+05	61	4,5E+04	67	1,3E+04	74	4,3E+03	78	1,4E+03	82	6,2E+02	84	3,0E+02	86	7,2E+01	88	1,5E+02	87	3,6E+01	89	1,9E+01	89
<b>0,27</b>	5,0E+06	44	2,1E+06	49	8,7E+05	53	3,2E+05	57	1,1E+05	62	3,2E+04	68	8,7E+03	75	2,8E+03	80	8,8E+02	83	3,9E+02	85	1,8E+02	87	4,4E+01	89	9,1E+01	88	2,2E+01	89	1,2E+01	89
<b>0,16</b>	4,1E+06	45	1,7E+06	49	6,8E+05	54	2,5E+05	58	8,0E+04	63	2,3E+04	69	5,9E+03	76	1,8E+03	81	5,6E+02	84	2,4E+02	86	1,1E+02	87	2,7E+01	89	5,6E+01	88	1,4E+01	88	7,3E+00	88
<b>0,1</b>	3,4E+06	45	1,4E+06	50	5,3E+05	54	1,9E+05	59	5,9E+04	64	1,6E+04	70	4,1E+03	77	1,2E+03	82	3,6E+02	85	1,5E+02	87	7,0E+01	88	1,7E+01	89	3,4E+01	88	8,2E+00	88	4,5E+00	88

Tabla 7.1.79. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% RTFO (M1).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	5,3E+07	32	3,1E+07	36	1,7E+07	40	8,9E+06	44	4,3E+06	49	1,9E+06	55	8,0E+05	61	3,7E+05	65
<b>61,1</b>	4,5E+07	33	2,6E+07	37	1,4E+07	41	7,0E+06	45	3,3E+06	50	1,4E+06	56	5,8E+05	62	2,6E+05	66
<b>37,3</b>	3,8E+07	34	2,1E+07	37	1,1E+07	42	5,5E+06	47	2,5E+06	51	1,1E+06	57	4,2E+05	62	1,8E+05	66
<b>22,8</b>	3,2E+07	34	1,7E+07	38	8,9E+06	43	4,3E+06	47	1,9E+06	52	7,8E+05	58	3,0E+05	63	1,3E+05	67
<b>13,9</b>	2,7E+07	35	1,4E+07	39	7,1E+06	44	3,3E+06	48	1,4E+06	53	5,7E+05	59	2,1E+05	64	8,8E+04	68
<b>8,48</b>	2,2E+07	36	1,1E+07	40	5,6E+06	45	2,6E+06	49	1,1E+06	54	4,2E+05	59	1,5E+05	65	6,1E+04	69
<b>5,18</b>	1,8E+07	37	9,3E+06	41	4,4E+06	46	2,0E+06	50	8,1E+05	55	3,0E+05	60	1,1E+05	66	4,2E+04	70
<b>3,16</b>	1,5E+07	38	7,5E+06	42	3,5E+06	47	1,5E+06	51	6,0E+05	56	2,2E+05	61	7,4E+04	67	2,9E+04	71
<b>1,93</b>	1,2E+07	39	6,0E+06	43	2,7E+06	48	1,1E+06	52	4,5E+05	57	1,6E+05	62	5,2E+04	68	2,0E+04	72
<b>1,18</b>	1,0E+07	40	4,8E+06	44	2,1E+06	49	8,8E+05	53	3,3E+05	58	1,1E+05	63	3,6E+04	69	1,3E+04	74
<b>0,72</b>	8,3E+06	41	3,9E+06	45	1,7E+06	50	6,7E+05	54	2,5E+05	58	8,2E+04	64	2,5E+04	70	8,9E+03	75
<b>0,44</b>	6,8E+06	42	3,1E+06	46	1,3E+06	51	5,1E+05	55	1,8E+05	59	5,9E+04	65	1,7E+04	71	5,9E+03	76
<b>0,27</b>	5,6E+06	43	2,5E+06	47	1,0E+06	51	3,9E+05	55	1,4E+05	60	4,2E+04	66	1,2E+04	72	3,9E+03	78
<b>0,16</b>	4,6E+06	44	2,0E+06	48	8,0E+05	52	3,0E+05	56	1,0E+05	61	3,1E+04	66	8,3E+03	73	2,6E+03	79

<b>0,1</b>	3,8E+06	45	1,6E+06	49	6,3E+05	53	2,3E+05	57	7,7E+04	61	2,2E+04	67	5,8E+03	74	1,7E+03	80
------------	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----	---------	----

Tabla 7.1.80. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% RTFO (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	4,8E+07	32	2,8E+07	36	1,6E+07	39	8,2E+06	44	4,0E+06	49	1,8E+06	55	7,4E+05	61	3,4E+05	65
<b>61,1</b>	4,0E+07	33	2,3E+07	36	1,3E+07	41	6,5E+06	45	3,1E+06	50	1,3E+06	56	5,4E+05	62	2,4E+05	66
<b>37,3</b>	3,4E+07	34	1,9E+07	37	1,0E+07	41	5,1E+06	46	2,3E+06	51	9,8E+05	57	3,9E+05	62	1,7E+05	66
<b>22,8</b>	2,8E+07	34	1,6E+07	38	8,2E+06	42	4,0E+06	47	1,8E+06	52	7,2E+05	58	2,8E+05	63	1,2E+05	67
<b>13,9</b>	2,4E+07	35	1,3E+07	39	6,5E+06	43	3,1E+06	48	1,3E+06	53	5,3E+05	59	2,0E+05	64	8,3E+04	68
<b>8,48</b>	2,0E+07	36	1,1E+07	40	5,2E+06	44	2,4E+06	49	1,0E+06	54	3,8E+05	60	1,4E+05	65	5,7E+04	69
<b>5,18</b>	1,6E+07	37	8,5E+06	41	4,1E+06	45	1,8E+06	50	7,4E+05	55	2,8E+05	60	9,8E+04	66	3,9E+04	70
<b>3,16</b>	1,3E+07	38	6,9E+06	42	3,2E+06	46	1,4E+06	51	5,5E+05	56	2,0E+05	61	6,9E+04	67	2,7E+04	71
<b>1,93</b>	1,1E+07	39	5,5E+06	43	2,5E+06	48	1,1E+06	52	4,1E+05	57	1,5E+05	62	4,8E+04	68	1,8E+04	72
<b>1,18</b>	9,1E+06	40	4,4E+06	44	2,0E+06	49	8,1E+05	53	3,1E+05	58	1,0E+05	63	3,4E+04	69	1,2E+04	74
<b>0,72</b>	7,4E+06	41	3,6E+06	45	1,5E+06	49	6,2E+05	54	2,3E+05	59	7,5E+04	64	2,3E+04	70	8,3E+03	75
<b>0,44</b>	6,1E+06	42	2,8E+06	46	1,2E+06	50	4,7E+05	55	1,7E+05	59	5,4E+04	65	1,6E+04	71	5,5E+03	76
<b>0,27</b>	5,0E+06	43	2,3E+06	47	9,4E+05	51	3,6E+05	55	1,3E+05	60	3,9E+04	66	1,1E+04	72	3,7E+03	78
<b>0,16</b>	4,1E+06	43	1,8E+06	48	7,4E+05	52	2,8E+05	56	9,4E+04	61	2,8E+04	67	7,6E+03	73	2,4E+03	79
<b>0,1</b>	3,4E+06	44	1,5E+06	49	5,9E+05	53	2,1E+05	57	7,0E+04	62	2,0E+04	68	5,3E+03	75	1,6E+03	80

Tabla 7.1.81. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% PAV (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]

<b>100</b>	6,1E+07	30	3,7E+07	33	2,1E+07	36	1,2E+07	40	6,0E+06	44	2,9E+06	49	1,3E+06	54	6,4E+05	58
<b>61,1</b>	5,2E+07	30	3,1E+07	34	1,8E+07	37	9,4E+06	41	4,7E+06	45	2,2E+06	50	9,8E+05	55	4,7E+05	59
<b>37,3</b>	4,4E+07	31	2,6E+07	34	1,4E+07	38	7,6E+06	42	3,7E+06	46	1,7E+06	51	7,3E+05	56	3,4E+05	59
<b>22,8</b>	3,7E+07	32	2,2E+07	35	1,2E+07	39	6,0E+06	43	2,9E+06	47	1,3E+06	52	5,4E+05	56	2,5E+05	60
<b>13,9</b>	3,2E+07	33	1,8E+07	36	9,6E+06	39	4,8E+06	44	2,2E+06	48	9,7E+05	53	4,0E+05	57	1,8E+05	61
<b>8,48</b>	2,7E+07	33	1,5E+07	37	7,8E+06	40	3,8E+06	44	1,7E+06	49	7,3E+05	53	2,9E+05	58	1,3E+05	62
<b>5,18</b>	2,2E+07	34	1,2E+07	37	6,3E+06	41	3,0E+06	45	1,3E+06	50	5,5E+05	54	2,1E+05	59	9,2E+04	62
<b>3,16</b>	1,9E+07	35	1,0E+07	38	5,0E+06	42	2,3E+06	46	1,0E+06	51	4,1E+05	55	1,6E+05	60	6,6E+04	64
<b>1,93</b>	1,6E+07	36	8,3E+06	39	4,0E+06	43	1,8E+06	47	7,8E+05	51	3,1E+05	56	1,1E+05	61	4,6E+04	65
<b>1,18</b>	1,3E+07	36	6,8E+06	40	3,2E+06	44	1,4E+06	48	6,0E+05	52	2,3E+05	57	8,2E+04	62	3,3E+04	66
<b>0,72</b>	1,1E+07	37	5,5E+06	41	2,6E+06	45	1,1E+06	49	4,6E+05	53	1,7E+05	58	5,9E+04	63	2,3E+04	67
<b>0,44</b>	9,1E+06	38	4,5E+06	42	2,1E+06	46	8,8E+05	50	3,5E+05	54	1,3E+05	59	4,3E+04	64	1,6E+04	69
<b>0,27</b>	7,7E+06	39	3,7E+06	43	1,7E+06	47	6,9E+05	51	2,6E+05	55	9,3E+04	60	3,1E+04	65	1,1E+04	71
<b>0,16</b>	6,4E+06	40	3,0E+06	44	1,3E+06	48	5,4E+05	51	2,0E+05	56	6,9E+04	61	2,2E+04	67	7,5E+03	72
<b>0,1</b>	5,4E+06	41	2,5E+06	45	1,1E+06	49	4,2E+05	52	1,6E+05	56	5,1E+04	62	1,6E+04	68	5,2E+03	74

Tabla 7.1.82. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para CA-14 con RC 7,6% PAV (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	5,3E+07	30	3,3E+07	33	2,1E+07	36	1,1E+07	40	5,8E+06	44	2,8E+06	49	1,3E+06	54	6,0E+05	58
<b>61,1</b>	4,5E+07	31	2,8E+07	34	1,7E+07	37	9,1E+06	41	4,6E+06	45	2,1E+06	50	9,4E+05	55	4,4E+05	59
<b>37,3</b>	3,8E+07	31	2,3E+07	35	1,4E+07	38	7,3E+06	42	3,6E+06	46	1,6E+06	51	7,0E+05	55	3,2E+05	59
<b>22,8</b>	3,3E+07	32	1,9E+07	36	1,1E+07	38	5,8E+06	42	2,8E+06	47	1,2E+06	52	5,2E+05	56	2,3E+05	60
<b>13,9</b>	2,8E+07	33	1,6E+07	36	9,3E+06	39	4,6E+06	43	2,2E+06	48	9,4E+05	52	3,8E+05	57	1,7E+05	61
<b>8,48</b>	2,3E+07	34	1,3E+07	37	7,5E+06	40	3,7E+06	44	1,7E+06	49	7,1E+05	53	2,8E+05	58	1,2E+05	62
<b>5,18</b>	1,9E+07	34	1,1E+07	38	6,1E+06	41	2,9E+06	45	1,3E+06	49	5,3E+05	54	2,1E+05	58	8,6E+04	62

<b>3,16</b>	1,6E+07	35	9,0E+06	39	4,9E+06	42	2,3E+06	46	1,0E+06	50	4,0E+05	55	1,5E+05	59	6,1E+04	63
<b>1,93</b>	1,4E+07	36	7,4E+06	40	3,9E+06	43	1,8E+06	47	7,6E+05	51	3,0E+05	55	1,1E+05	60	4,4E+04	65
<b>1,18</b>	1,1E+07	37	6,1E+06	41	3,2E+06	44	1,4E+06	48	5,8E+05	52	2,2E+05	56	8,0E+04	61	3,1E+04	66
<b>0,72</b>	9,4E+06	38	5,0E+06	41	2,5E+06	45	1,1E+06	49	4,5E+05	53	1,7E+05	57	5,8E+04	62	2,2E+04	67
<b>0,44</b>	7,8E+06	39	4,1E+06	42	2,0E+06	46	8,6E+05	50	3,4E+05	54	1,2E+05	58	4,2E+04	63	1,5E+04	69
<b>0,27</b>	6,5E+06	39	3,4E+06	43	1,6E+06	47	6,7E+05	50	2,6E+05	54	9,2E+04	59	3,0E+04	65	1,0E+04	70
<b>0,16</b>	5,5E+06	40	2,8E+06	44	1,3E+06	47	5,3E+05	51	2,0E+05	55	6,9E+04	60	2,2E+04	66	7,1E+03	72
<b>0,1</b>	4,6E+06	41	2,3E+06	45	1,0E+06	48	4,2E+05	52	1,5E+05	56	5,1E+04	61	1,6E+04	67	4,9E+03	73

## 7.1.9. RAP con RC

### 7.1.9.1. Muestras de RAP con RC en dosis 3, 6, 9 y 12%

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5 a 40°C para el ligante CA-24 en dosis de 3, 6, 9 y 12% de RC se presentan desde Tabla 7.1.83 hasta la Tabla 7.1.90.

*Tabla 7.1.83. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 3% (M1). (Elaboración propia)*

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	7,3E+07	22	5,1E+07	24	3,5E+07	26,9	2,3E+07	30	1,5E+07	32,7	9,0E+06	36	5,5E+06	39,6	3,3E+06	43
<b>61,1</b>	6,5E+07	23	4,5E+07	25	3,0E+07	27,5	1,9E+07	31	1,2E+07	33,7	7,4E+06	37	4,4E+06	40,7	2,6E+06	44
<b>37,3</b>	5,7E+07	23	3,9E+07	26	2,6E+07	28,2	1,7E+07	31	1,0E+07	34,5	6,1E+06	38	3,5E+06	41,8	2,0E+06	46
<b>22,8</b>	5,1E+07	24	3,4E+07	26	2,2E+07	28,9	1,4E+07	32	8,5E+06	35,5	4,9E+06	39	2,8E+06	43,0	1,6E+06	47
<b>13,9</b>	4,5E+07	24	3,0E+07	27	1,9E+07	29,7	1,2E+07	33	7,0E+06	36,5	4,0E+06	40	2,2E+06	44,2	1,2E+06	48
<b>8,48</b>	4,0E+07	25	2,6E+07	27	1,6E+07	30,5	9,9E+06	34	5,7E+06	37,6	3,2E+06	41	1,8E+06	45,5	9,4E+05	50
<b>5,18</b>	3,5E+07	25	2,3E+07	28	1,4E+07	31,4	8,2E+06	35	4,7E+06	38,8	2,6E+06	43	1,4E+06	46,9	7,2E+05	51
<b>3,16</b>	3,1E+07	26	2,0E+07	29	1,2E+07	32,4	6,8E+06	36	3,8E+06	40,1	2,0E+06	44	1,1E+06	48,3	5,4E+05	52
<b>1,93</b>	2,7E+07	27	1,7E+07	30	1,0E+07	33,5	5,7E+06	37	3,1E+06	41,4	1,6E+06	46	8,2E+05	49,8	4,1E+05	54

<b>1,18</b>	2,3E+07	28	1,4E+07	31	8,4E+06	34,7	4,7E+06	39	2,5E+06	42,8	1,3E+06	47	6,3E+05	51,4	3,1E+05	56
<b>0,72</b>	2,0E+07	28	1,2E+07	32	7,0E+06	35,9	3,8E+06	40	2,0E+06	44,3	9,8E+05	49	4,8E+05	53,0	2,3E+05	57
<b>0,44</b>	1,8E+07	29	1,1E+07	33	5,9E+06	37,2	3,1E+06	41	1,6E+06	45,8	7,6E+05	50	3,6E+05	54,7	1,7E+05	59
<b>0,27</b>	1,5E+07	30	8,9E+06	34	4,9E+06	38,5	2,5E+06	43	1,2E+06	47,3	5,8E+05	52	2,7E+05	56,4	1,2E+05	61
<b>0,16</b>	1,3E+07	31	7,6E+06	36	4,1E+06	40,0	2,0E+06	44	9,8E+05	49,0	4,5E+05	54	2,0E+05	58,0	8,7E+04	63
<b>0,1</b>	1,2E+07	32	6,5E+06	37	3,4E+06	41,3	1,6E+06	46	7,6E+05	50,6	3,4E+05	55	1,5E+05	59,9	6,3E+04	65

Tabla 7.1.84. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 3% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]	G*  [Pa]	δ [°]
<b>100</b>	3,7E+07	33	2,1E+07	37	1,1E+07	41	5,8E+06	46	2,7E+06	52	1,2E+06	58	4,6E+05	63	2,0E+05	68
<b>61,1</b>	3,1E+07	34	1,7E+07	38	9,1E+06	42	4,5E+06	47	2,1E+06	53	8,4E+05	59	3,3E+05	64	1,4E+05	68
<b>37,3</b>	2,6E+07	35	1,4E+07	39	7,3E+06	43	3,5E+06	48	1,6E+06	54	6,2E+05	60	2,3E+05	65	9,8E+04	69
<b>22,8</b>	2,1E+07	36	1,2E+07	39	5,8E+06	44	2,7E+06	49	1,2E+06	55	4,5E+05	61	1,6E+05	66	6,7E+04	70
<b>13,9</b>	1,8E+07	36	9,3E+06	40	4,6E+06	45	2,1E+06	51	8,6E+05	56	3,2E+05	62	1,1E+05	67	4,6E+04	71
<b>8,48</b>	1,5E+07	37	7,5E+06	41	3,6E+06	46	1,6E+06	52	6,4E+05	57	2,3E+05	62	7,9E+04	68	3,1E+04	72
<b>5,18</b>	1,2E+07	38	6,0E+06	43	2,8E+06	48	1,2E+06	53	4,7E+05	58	1,7E+05	63	5,5E+04	69	2,1E+04	73
<b>3,16</b>	9,9E+06	39	4,8E+06	44	2,2E+06	49	9,0E+05	54	3,4E+05	59	1,2E+05	64	3,8E+04	70	1,4E+04	74
<b>1,93</b>	8,2E+06	40	3,9E+06	45	1,7E+06	50	6,8E+05	55	2,5E+05	60	8,3E+04	65	2,6E+04	71	9,5E+03	75
<b>1,18</b>	6,7E+06	41	3,1E+06	46	1,3E+06	51	5,1E+05	56	1,8E+05	61	5,9E+04	66	1,8E+04	72	6,3E+03	76
<b>0,72</b>	5,4E+06	42	2,4E+06	47	1,0E+06	52	3,9E+05	56	1,3E+05	61	4,2E+04	67	1,2E+04	73	4,2E+03	78
<b>0,44</b>	4,4E+06	43	1,9E+06	48	7,8E+05	53	2,9E+05	57	9,8E+04	62	3,0E+04	68	8,2E+03	74	2,7E+03	79
<b>0,27</b>	3,6E+06	44	1,5E+06	49	6,1E+05	54	2,2E+05	58	7,2E+04	63	2,1E+04	68	5,6E+03	75	1,8E+03	80
<b>0,16</b>	3,0E+06	45	1,2E+06	50	4,7E+05	54	1,7E+05	58	5,3E+04	63	1,5E+04	69	3,8E+03	76	1,2E+03	81
<b>0,1</b>	2,5E+06	46	9,9E+05	51	3,7E+05	55	1,3E+05	59	4,0E+04	64	1,1E+04	70	2,6E+03	76	7,5E+02	82

Tabla 7.1.85. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 6% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	5,5E+07	24	3,9E+07	27	2,6E+07	29,2	1,6E+07	32	1,0E+07	35,5	6,2E+06	39	3,7E+06	42,7	2,2E+06	46
61,1	4,8E+07	25	3,3E+07	27	2,2E+07	30,0	1,4E+07	33	8,4E+06	36,5	5,0E+06	40	2,9E+06	43,8	1,7E+06	48
37,3	4,3E+07	25	2,9E+07	28	1,9E+07	30,7	1,1E+07	34	6,9E+06	37,6	4,0E+06	41	2,3E+06	45,0	1,3E+06	49
22,8	3,7E+07	26	2,5E+07	29	1,6E+07	31,6	9,6E+06	35	5,6E+06	38,6	3,2E+06	42	1,8E+06	46,3	1,0E+06	50
13,9	3,3E+07	26	2,1E+07	29	1,3E+07	32,4	7,9E+06	36	4,6E+06	39,7	2,6E+06	44	1,4E+06	47,5	7,6E+05	52
8,48	2,8E+07	27	1,8E+07	30	1,1E+07	33,4	6,6E+06	37	3,7E+06	40,8	2,0E+06	45	1,1E+06	48,9	5,7E+05	53
5,18	2,5E+07	28	1,6E+07	31	9,4E+06	34,4	5,4E+06	38	3,0E+06	42,1	1,6E+06	46	8,3E+05	50,3	4,3E+05	54
3,16	2,1E+07	29	1,3E+07	32	7,8E+06	35,5	4,4E+06	39	2,4E+06	43,4	1,2E+06	48	6,3E+05	51,8	3,2E+05	56
1,93	1,9E+07	29	1,1E+07	33	6,5E+06	36,7	3,6E+06	41	1,9E+06	44,8	9,6E+05	49	4,7E+05	53,3	2,4E+05	58
1,18	1,6E+07	30	9,6E+06	34	5,4E+06	37,9	2,9E+06	42	1,5E+06	46,3	7,4E+05	51	3,6E+05	54,9	1,7E+05	59
0,72	1,4E+07	31	8,1E+06	35	4,4E+06	39,2	2,3E+06	43	1,2E+06	47,7	5,6E+05	52	2,7E+05	56,5	1,3E+05	61
0,44	1,2E+07	32	6,8E+06	36	3,6E+06	40,6	1,9E+06	45	9,0E+05	49,4	4,3E+05	54	2,0E+05	58,3	9,0E+04	63
0,27	1,0E+07	34	5,7E+06	38	3,0E+06	42,0	1,5E+06	47	7,0E+05	51,0	3,2E+05	56	1,4E+05	60,0	6,4E+04	65
0,16	8,7E+06	35	4,8E+06	39	2,4E+06	43,5	1,2E+06	48	5,4E+05	52,4	2,4E+05	57	1,1E+05	61,7	4,6E+04	67
0,1	7,4E+06	36	4,0E+06	40	2,0E+06	44,9	9,3E+05	50	4,2E+05	54,3	1,8E+05	59	7,6E+04	63,6	3,2E+04	68

Tabla 7.1.86. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 6% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	5,1E+07	24	3,6E+07	27	2,4E+07	29	1,5E+07	32	9,4E+06	36	5,7E+06	39	3,4E+06	43	2,0E+06	47
61,1	4,5E+07	25	3,1E+07	27	2,0E+07	30	1,3E+07	34	7,7E+06	37	4,6E+06	40	2,7E+06	44	1,5E+06	48
37,3	4,0E+07	25	2,7E+07	28	1,7E+07	31	1,1E+07	34	6,4E+06	38	3,7E+06	41	2,1E+06	45	1,2E+06	49
22,8	3,5E+07	26	2,3E+07	29	1,5E+07	32	8,8E+06	35	5,2E+06	39	3,0E+06	43	1,6E+06	46	9,1E+05	50

<b>13,9</b>	3,0E+07	27	2,0E+07	29	1,2E+07	33	7,3E+06	36	4,2E+06	40	2,3E+06	44	1,3E+06	48	6,9E+05	52
<b>8,48</b>	2,6E+07	27	1,7E+07	30	1,0E+07	34	6,0E+06	37	3,4E+06	41	1,8E+06	45	9,9E+05	49	5,2E+05	53
<b>5,18</b>	2,3E+07	28	1,4E+07	31	8,6E+06	35	4,9E+06	38	2,7E+06	42	1,4E+06	46	7,5E+05	50	3,9E+05	55
<b>3,16</b>	2,0E+07	29	1,2E+07	32	7,2E+06	36	4,0E+06	39	2,2E+06	44	1,1E+06	48	5,7E+05	52	2,9E+05	56
<b>1,93</b>	1,7E+07	30	1,0E+07	33	6,0E+06	37	3,3E+06	41	1,7E+06	45	8,7E+05	49	4,3E+05	53	2,1E+05	58
<b>1,18</b>	1,5E+07	31	8,8E+06	34	4,9E+06	38	2,6E+06	42	1,4E+06	46	6,7E+05	51	3,2E+05	55	1,6E+05	59
<b>0,72</b>	1,3E+07	32	7,4E+06	35	4,1E+06	39	2,1E+06	44	1,1E+06	48	5,1E+05	52	2,4E+05	57	1,1E+05	61
<b>0,44</b>	1,1E+07	33	6,2E+06	37	3,3E+06	41	1,7E+06	45	8,2E+05	50	3,9E+05	54	1,8E+05	58	8,1E+04	63
<b>0,27</b>	9,3E+06	34	5,2E+06	38	2,7E+06	42	1,4E+06	47	6,4E+05	51	2,9E+05	56	1,3E+05	60	5,8E+04	65
<b>0,16</b>	8,0E+06	35	4,3E+06	39	2,2E+06	44	1,1E+06	48	4,9E+05	53	2,2E+05	57	9,5E+04	62	4,1E+04	67
<b>0,1</b>	6,8E+06	36	3,6E+06	41	1,8E+06	45	8,5E+05	50	3,8E+05	54	1,6E+05	59	6,9E+04	64	2,9E+04	69

Tabla 7.1.87. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 9% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	3,4E+07	29	2,2E+07	32	1,4E+07	35,5	8,5E+06	39	5,1E+06	42,6	3,0E+06	46	1,7E+06	50,0	1,0E+06	54
<b>61,1</b>	2,9E+07	30	1,9E+07	33	1,2E+07	36,6	6,9E+06	40	4,0E+06	43,7	2,3E+06	47	1,3E+06	51,1	7,5E+05	55
<b>37,3</b>	2,5E+07	30	1,6E+07	34	9,5E+06	37,4	5,5E+06	41	3,2E+06	44,7	1,8E+06	49	1,0E+06	52,3	5,6E+05	56
<b>22,8</b>	2,1E+07	31	1,3E+07	35	7,8E+06	38,3	4,4E+06	42	2,5E+06	45,9	1,4E+06	50	7,5E+05	53,5	4,1E+05	57
<b>13,9</b>	1,8E+07	32	1,1E+07	36	6,3E+06	39,3	3,5E+06	43	1,9E+06	47,0	1,0E+06	51	5,6E+05	54,9	3,0E+05	59
<b>8,48</b>	1,5E+07	33	9,1E+06	37	5,1E+06	40,3	2,8E+06	44	1,5E+06	48,2	7,9E+05	52	4,1E+05	56,2	2,2E+05	60
<b>5,18</b>	1,3E+07	34	7,5E+06	38	4,1E+06	41,4	2,2E+06	45	1,2E+06	49,5	6,0E+05	54	3,1E+05	57,7	1,6E+05	62
<b>3,16</b>	1,1E+07	35	6,1E+06	39	3,3E+06	42,6	1,7E+06	47	8,9E+05	50,8	4,5E+05	55	2,2E+05	59,2	1,1E+05	63
<b>1,93</b>	9,1E+06	36	5,0E+06	40	2,7E+06	43,8	1,4E+06	48	6,8E+05	52,2	3,3E+05	57	1,6E+05	60,8	7,9E+04	65
<b>1,18</b>	7,6E+06	37	4,1E+06	41	2,1E+06	45,0	1,1E+06	49	5,1E+05	53,7	2,4E+05	58	1,2E+05	62,4	5,6E+04	67
<b>0,72</b>	6,4E+06	38	3,3E+06	42	1,7E+06	46,4	8,2E+05	51	3,9E+05	55,3	1,8E+05	60	8,3E+04	64,1	3,9E+04	68
<b>0,44</b>	5,3E+06	39	2,7E+06	43	1,3E+06	47,8	6,3E+05	52	2,9E+05	56,8	1,3E+05	62	5,9E+04	65,9	2,7E+04	70

<b>0,27</b>	4,4E+06	40	2,2E+06	45	1,1E+06	49,3	4,8E+05	54	2,2E+05	58,4	9,4E+04	63	4,1E+04	67,7	1,8E+04	72
<b>0,16</b>	3,7E+06	41	1,8E+06	46	8,3E+05	50,7	3,7E+05	55	1,6E+05	60,1	6,8E+04	65	2,9E+04	69,3	1,3E+04	74
<b>0,1</b>	3,1E+06	43	1,4E+06	47	6,5E+05	52,0	2,8E+05	57	1,2E+05	61,9	4,9E+04	66	2,0E+04	71,0	8,5E+03	75

Tabla 7.1.88. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 9% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	3,1E+07	30	2,1E+07	33	1,3E+07	36	8,1E+06	39	4,9E+06	42	2,9E+06	45	1,7E+06	49	9,9E+05	52
<b>61,1</b>	2,7E+07	31	1,7E+07	34	1,1E+07	37	6,6E+06	40	3,9E+06	43	2,3E+06	46	1,3E+06	50	7,5E+05	53
<b>37,3</b>	2,3E+07	32	1,5E+07	34	9,0E+06	38	5,3E+06	41	3,1E+06	44	1,8E+06	48	9,9E+05	51	5,6E+05	54
<b>22,8</b>	1,9E+07	32	1,2E+07	35	7,3E+06	38	4,3E+06	42	2,4E+06	45	1,4E+06	49	7,5E+05	52	4,1E+05	56
<b>13,9</b>	1,6E+07	33	1,0E+07	36	6,0E+06	39	3,4E+06	43	1,9E+06	46	1,0E+06	50	5,6E+05	53	3,1E+05	57
<b>8,48</b>	1,4E+07	34	8,3E+06	37	4,8E+06	41	2,7E+06	44	1,5E+06	47	8,0E+05	51	4,2E+05	55	2,2E+05	59
<b>5,18</b>	1,2E+07	35	6,9E+06	38	3,9E+06	42	2,1E+06	45	1,2E+06	49	6,0E+05	52	3,1E+05	56	1,6E+05	60
<b>3,16</b>	9,6E+06	36	5,6E+06	39	3,1E+06	43	1,7E+06	46	8,9E+05	50	4,5E+05	54	2,3E+05	58	1,2E+05	62
<b>1,93</b>	8,0E+06	37	4,6E+06	41	2,5E+06	44	1,3E+06	48	6,8E+05	51	3,4E+05	55	1,7E+05	59	8,3E+04	63
<b>1,18</b>	6,7E+06	38	3,8E+06	42	2,0E+06	45	1,0E+06	49	5,2E+05	53	2,5E+05	57	1,2E+05	61	5,9E+04	65
<b>0,72</b>	5,6E+06	39	3,1E+06	43	1,6E+06	47	8,0E+05	50	3,9E+05	54	1,9E+05	58	8,8E+04	62	4,2E+04	67
<b>0,44</b>	4,6E+06	40	2,5E+06	44	1,3E+06	48	6,2E+05	52	2,9E+05	56	1,4E+05	60	6,3E+04	64	2,9E+04	68
<b>0,27</b>	3,8E+06	41	2,0E+06	45	1,0E+06	49	4,8E+05	53	2,2E+05	57	1,0E+05	62	4,5E+04	66	2,0E+04	70
<b>0,16</b>	3,2E+06	42	1,6E+06	47	7,9E+05	50	3,7E+05	55	1,7E+05	59	7,3E+04	63	3,2E+04	68	1,4E+04	72
<b>0,1</b>	2,7E+06	44	1,3E+06	48	6,3E+05	52	2,8E+05	56	1,2E+05	60	5,3E+04	65	2,2E+04	69	9,4E+03	74

Tabla 7.1.89. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 12% (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]

<b>100</b>	2,2E+07	32	1,4E+07	36	8,1E+06	39,6	4,7E+06	44	2,7E+06	47,6	1,5E+06	52	8,3E+05	55,5	4,7E+05	59
<b>61,1</b>	1,9E+07	33	1,1E+07	37	6,6E+06	40,6	3,7E+06	45	2,0E+06	48,7	1,1E+06	53	6,1E+05	56,7	3,4E+05	60
<b>37,3</b>	1,6E+07	34	9,3E+06	38	5,3E+06	41,9	2,9E+06	46	1,6E+06	49,9	8,4E+05	54	4,5E+05	57,7	2,4E+05	61
<b>22,8</b>	1,3E+07	35	7,6E+06	39	4,2E+06	42,8	2,3E+06	47	1,2E+06	51,1	6,3E+05	55	3,3E+05	59,0	1,7E+05	63
<b>13,9</b>	1,1E+07	36	6,1E+06	40	3,3E+06	43,9	1,8E+06	48	9,1E+05	52,4	4,7E+05	56	2,4E+05	60,3	1,2E+05	64
<b>8,48</b>	8,9E+06	37	5,0E+06	41	2,6E+06	45,1	1,4E+06	49	6,8E+05	53,6	3,4E+05	58	1,7E+05	61,8	8,7E+04	66
<b>5,18</b>	7,4E+06	38	4,0E+06	42	2,1E+06	46,3	1,0E+06	51	5,1E+05	55,0	2,5E+05	59	1,2E+05	63,3	6,1E+04	67
<b>3,16</b>	6,1E+06	39	3,2E+06	43	1,6E+06	47,6	7,9E+05	52	3,8E+05	56,4	1,8E+05	61	8,7E+04	64,9	4,2E+04	69
<b>1,93</b>	5,0E+06	40	2,5E+06	45	1,3E+06	49,0	6,0E+05	53	2,8E+05	57,9	1,3E+05	62	6,1E+04	66,7	2,9E+04	71
<b>1,18</b>	4,0E+06	41	2,0E+06	46	9,7E+05	50,4	4,5E+05	55	2,1E+05	59,4	9,3E+04	64	4,2E+04	68,4	1,9E+04	73
<b>0,72</b>	3,3E+06	42	1,6E+06	47	7,5E+05	51,9	3,4E+05	56	1,5E+05	61,0	6,6E+04	66	2,9E+04	70,3	1,3E+04	75
<b>0,44</b>	2,7E+06	44	1,3E+06	49	5,7E+05	53,4	2,5E+05	58	1,1E+05	62,8	4,6E+04	68	2,0E+04	72,3	8,7E+03	76
<b>0,27</b>	2,2E+06	45	9,9E+05	50	4,4E+05	55,0	1,9E+05	60	7,8E+04	64,6	3,2E+04	69	1,4E+04	74,2	5,7E+03	78
<b>0,16</b>	1,8E+06	46	7,8E+05	51	3,3E+05	56,5	1,4E+05	61	5,6E+04	66,2	2,2E+04	71	9,1E+03	76,0	3,7E+03	80
<b>0,1</b>	1,4E+06	48	6,1E+05	53	2,5E+05	57,8	1,0E+05	63	4,0E+04	67,9	1,5E+04	73	6,1E+03	77,5	2,4E+03	81

Tabla 7.1.90. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 12% (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	2,9E+07	31	1,8E+07	35	1,0E+07	39	5,9E+06	43	3,3E+06	47	1,8E+06	51	1,0E+06	55	5,5E+05	59
<b>61,1</b>	2,4E+07	32	1,5E+07	36	8,4E+06	40	4,7E+06	44	2,5E+06	48	1,4E+06	52	7,4E+05	56	4,0E+05	60
<b>37,3</b>	2,0E+07	33	1,2E+07	37	6,8E+06	41	3,7E+06	45	2,0E+06	49	1,0E+06	53	5,5E+05	57	2,9E+05	61
<b>22,8</b>	1,7E+07	34	9,9E+06	38	5,4E+06	42	2,9E+06	46	1,5E+06	50	7,8E+05	54	4,0E+05	58	2,1E+05	62
<b>13,9</b>	1,4E+07	34	8,1E+06	39	4,3E+06	43	2,3E+06	47	1,1E+06	52	5,8E+05	56	2,9E+05	60	1,5E+05	64
<b>8,48</b>	1,2E+07	35	6,6E+06	40	3,4E+06	44	1,7E+06	49	8,6E+05	53	4,3E+05	57	2,1E+05	61	1,0E+05	65
<b>5,18</b>	1,0E+07	36	5,3E+06	41	2,7E+06	45	1,3E+06	50	6,5E+05	54	3,1E+05	58	1,5E+05	63	7,3E+04	67
<b>3,16</b>	8,2E+06	37	4,3E+06	42	2,1E+06	47	1,0E+06	51	4,8E+05	56	2,3E+05	60	1,1E+05	64	5,1E+04	68

<b>1,93</b>	6,8E+06	39	3,4E+06	43	1,7E+06	48	7,8E+05	53	3,6E+05	57	1,6E+05	62	7,5E+04	66	3,5E+04	70
<b>1,18</b>	5,6E+06	40	2,7E+06	45	1,3E+06	49	5,9E+05	54	2,6E+05	59	1,2E+05	63	5,3E+04	68	2,4E+04	72
<b>0,72</b>	4,5E+06	41	2,2E+06	46	1,0E+06	51	4,4E+05	55	1,9E+05	60	8,4E+04	65	3,6E+04	70	1,6E+04	74
<b>0,44</b>	3,7E+06	42	1,7E+06	48	7,6E+05	52	3,3E+05	57	1,4E+05	62	5,9E+04	67	2,5E+04	71	1,1E+04	76
<b>0,27</b>	3,0E+06	44	1,4E+06	49	5,9E+05	54	2,5E+05	59	1,0E+05	63	4,1E+04	69	1,7E+04	73	7,0E+03	78
<b>0,16</b>	2,5E+06	45	1,1E+06	50	4,5E+05	55	1,8E+05	60	7,3E+04	65	2,9E+04	71	1,1E+04	75	4,6E+03	79
<b>0,1</b>	2,0E+06	46	8,4E+05	52	3,4E+05	57	1,4E+05	62	5,2E+04	67	2,0E+04	72	7,7E+03	77	3,0E+03	81

7.1.9.2. Muestras de RAP con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Las mediciones del barrido frecuencia-temperatura en un rango de 5°C a 75°C para el ligante CA-24 en las dosis óptimas de RC en estado sin envejecer, con envejecimiento RTFO y PAV se presentan desde Tabla 7.1.91 hasta la Tabla 7.1.96.

Tabla 7.1.91. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% SE (MI). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ		
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]		
<b>100</b>	2,1E+07	34	1,2E+07	38	7,0E+06	43	3,8E+06	47	2,1E+06	52	1,1E+06	56	5,8E+05	60	3,1E+05	63	1,4E+05	67	7,9E+04	70	4,4E+04	73	2,5E+04	76	1,4E+04	78	7,8E+03	81	4,6E+03	84		
<b>61,1</b>	1,8E+07	35	1,0E+07	40	5,6E+06	44	3,0E+06	48	1,6E+06	53	8,1E+05	57	4,2E+05	61	2,2E+05	65	1,0E+05	68	5,4E+04	71	2,9E+04	74	1,6E+04	77	8,9E+03	80	5,0E+03	82	2,9E+03	85		
<b>37,3</b>	1,5E+07	36	8,2E+06	41	4,4E+06	45	2,3E+06	50	1,2E+06	54	5,9E+05	58	3,0E+05	62	1,6E+05	66	6,8E+04	70	3,6E+04	73	1,9E+04	76	1,1E+04	79	5,7E+03	81	3,2E+03	84	1,8E+03	85		
<b>22,8</b>	1,2E+07	37	6,6E+06	42	3,4E+06	46	1,7E+06	51	8,7E+05	55	4,3E+05	60	2,1E+05	63	1,1E+05	67	4,7E+04	71	2,4E+04	74	1,3E+04	78	6,9E+03	80	3,6E+03	83	2,0E+03	84	1,1E+03	86		
<b>13,9</b>	1,0E+07	38	5,2E+06	43	2,7E+06	48	1,3E+06	52	6,5E+05	57	3,1E+05	61	1,5E+05	65	7,6E+04	69	3,1E+04	73	1,6E+04	76	8,3E+03	79	4,4E+03	82	2,3E+03	84	1,2E+03	85	7,0E+02	87		
<b>8,48</b>	8,1E+06	39	4,2E+06	44	2,1E+06	49	1,0E+06	54	4,7E+05	58	2,2E+05	62	1,1E+05	66	5,2E+04	70	2,1E+04	74	1,0E+04	78	5,4E+03	81	2,8E+03	83	1,4E+03	85	7,7E+02	86	4,3E+02	88		
<b>5,18</b>	6,6E+06	40	3,3E+06	45	1,6E+06	50	7,5E+05	55	3,5E+05	59	1,6E+05	64	7,4E+04	68	3,5E+04	72	1,4E+04	76	6,8E+03	79	3,4E+03	82	1,8E+03	84	9,0E+02	86	4,8E+02	87	2,7E+02	88		
<b>3,16</b>	5,4E+06	41	2,6E+06	47	1,2E+06	52	5,6E+05	56	2,5E+05	61	1,1E+05	65	5,1E+04	70	2,4E+04	74	9,2E+03	78	4,4E+03	81	2,2E+03	83	1,1E+03	85	5,6E+02	87	3,0E+02	88	1,6E+02	89		
<b>1,93</b>	4,3E+06	43	2,0E+06	48	9,2E+05	53	4,1E+05	58	1,8E+05	62	7,9E+04	67	3,5E+04	71	1,6E+04	75	6,0E+03	79	2,8E+03	82	1,4E+03	85	6,9E+02	86	3,5E+02	87	1,8E+02	88	1,0E+02	89		
<b>1,18</b>	3,5E+06	44	1,6E+06	49	7,0E+05	54	3,0E+05	59	1,3E+05	64	5,5E+04	69	2,4E+04	73	1,0E+04	77	3,8E+03	81	1,8E+03	84	8,6E+02	85	4,3E+02	87	2,1E+02	88	1,1E+02	89	6,2E+01	89		
<b>0,72</b>	2,8E+06	45	1,2E+06	51	5,3E+05	56	2,2E+05	61	9,2E+04	66	3,8E+04	70	1,6E+04	75	6,9E+03	79	2,5E+03	82	1,1E+03	85	5,4E+02	86	2,7E+02	88	1,3E+02	88	6,9E+01	89	3,8E+01	89		

<b>0,44</b>	2,2E+06	47	9,4E+05	52	3,9E+05	57	1,6E+05	62	6,5E+04	67	2,6E+04	72	1,1E+04	77	4,5E+03	80	1,6E+03	84	7,0E+02	86	3,3E+02	87	1,6E+02	88	8,0E+01	89	4,2E+01	89	2,3E+01	89
<b>0,27</b>	1,8E+06	48	7,3E+05	54	2,9E+05	59	1,2E+05	64	4,5E+04	69	1,8E+04	74	7,0E+03	78	2,9E+03	82	9,8E+02	85	4,4E+02	87	2,0E+02	88	1,0E+02	89	4,9E+01	89	2,6E+01	89	1,4E+01	89
<b>0,16</b>	1,4E+06	50	5,6E+05	55	2,2E+05	61	8,4E+04	66	3,2E+04	71	1,2E+04	76	4,6E+03	80	1,8E+03	83	6,1E+02	86	2,7E+02	87	1,3E+02	88	6,1E+01	89	3,0E+01	89	1,6E+01	89	8,7E+00	88
<b>0,1</b>	1,1E+06	51	4,3E+05	57	1,6E+05	62	6,0E+04	67	2,2E+04	72	8,0E+03	77	3,0E+03	81	1,2E+03	84	3,8E+02	87	1,7E+02	88	7,7E+01	88	3,7E+01	89	1,8E+01	89	9,6E+00	88	5,4E+00	88

Tabla 7.1.92. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% SE (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	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*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ	[G*]	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	1,8E+07	34	1,1E+07	38	6,0E+06	43	3,3E+06	47	1,8E+06	52	9,7E+05	56	5,2E+05	60	2,9E+05	64	1,5E+05	67	8,0E+04	70	4,5E+04	73	2,5E+04	76	1,4E+04	79	7,9E+03	81	4,5E+03	83
<b>61,1</b>	1,5E+07	36	8,6E+06	39	4,8E+06	44	2,6E+06	48	1,4E+06	53	7,2E+05	57	3,8E+05	61	2,0E+05	65	1,0E+05	68	5,5E+04	72	3,0E+04	75	1,7E+04	77	9,0E+03	80	5,0E+03	82	2,9E+03	84
<b>37,3</b>	1,2E+07	36	7,0E+06	41	3,8E+06	45	2,0E+06	49	1,0E+06	54	5,3E+05	58	2,7E+05	62	1,4E+05	66	7,0E+04	70	3,7E+04	73	2,0E+04	76	1,1E+04	79	5,8E+03	81	3,2E+03	84	1,8E+03	85
<b>22,8</b>	1,0E+07	37	5,6E+06	42	3,0E+06	46	1,5E+06	51	7,7E+05	55	3,9E+05	59	2,0E+05	63	1,0E+05	67	4,8E+04	71	2,5E+04	75	1,3E+04	78	6,9E+03	80	3,7E+03	83	2,0E+03	84	1,1E+03	86
<b>13,9</b>	8,3E+06	38	4,5E+06	43	2,3E+06	47	1,2E+06	52	5,7E+05	56	2,8E+05	61	1,4E+05	65	7,0E+04	69	3,2E+04	73	1,6E+04	76	8,4E+03	79	4,4E+03	82	2,3E+03	84	1,3E+03	85	7,0E+02	87
<b>8,48</b>	6,7E+06	39	3,6E+06	44	1,8E+06	49	8,8E+05	53	4,2E+05	58	2,0E+05	62	9,7E+04	66	4,8E+04	70	2,1E+04	75	1,1E+04	78	5,4E+03	81	2,8E+03	83	1,5E+03	85	7,8E+02	86	4,3E+02	88
<b>5,18</b>	5,5E+06	40	2,8E+06	45	1,4E+06	50	6,6E+05	55	3,1E+05	59	1,4E+05	64	6,7E+04	68	3,2E+04	72	1,4E+04	76	6,9E+03	79	3,5E+03	82	1,8E+03	84	9,1E+02	86	4,8E+02	87	2,7E+02	88
<b>3,16</b>	4,4E+06	42	2,2E+06	47	1,1E+06	51	4,9E+05	56	2,2E+05	61	1,0E+05	65	4,6E+04	70	2,2E+04	74	9,3E+03	78	4,5E+03	81	2,2E+03	83	1,1E+03	85	5,7E+02	87	3,0E+02	88	1,6E+02	89
<b>1,93</b>	3,6E+06	43	1,7E+06	48	8,1E+05	53	3,6E+05	58	1,6E+05	62	7,1E+04	67	3,2E+04	71	1,5E+04	75	6,0E+03	80	2,8E+03	82	1,4E+03	85	7,0E+02	86	3,5E+02	88	1,8E+02	88	1,0E+02	89
<b>1,18</b>	2,9E+06	44	1,4E+06	49	6,1E+05	54	2,7E+05	59	1,1E+05	64	4,9E+04	68	2,2E+04	73	9,7E+03	77	3,9E+03	81	1,8E+03	84	8,7E+02	86	4,3E+02	87	2,2E+02	88	1,1E+02	89	6,2E+01	89
<b>0,72</b>	2,3E+06	45	1,1E+06	51	4,6E+05	56	2,0E+05	61	8,2E+04	66	3,4E+04	70	1,5E+04	75	6,4E+03	79	2,5E+03	82	1,1E+03	85	5,4E+02	87	2,7E+02	88	1,3E+02	89	6,9E+01	89	3,8E+01	89
<b>0,44</b>	1,8E+06	47	8,1E+05	52	3,5E+05	57	1,4E+05	62	5,8E+04	67	2,3E+04	72	9,7E+03	77	4,1E+03	80	1,6E+03	84	7,1E+02	86	3,4E+02	87	1,6E+02	88	8,1E+01	89	4,2E+01	89	2,3E+01	89
<b>0,27</b>	1,5E+06	48	6,3E+05	54	2,6E+05	59	1,0E+05	64	4,0E+04	69	1,6E+04	74	6,4E+03	78	2,7E+03	82	9,9E+02	85	4,4E+02	87	2,1E+02	88	1,0E+02	89	5,0E+01	89	2,6E+01	89	1,4E+01	88
<b>0,16</b>	1,2E+06	49	4,9E+05	55	1,9E+05	60	7,5E+04	66	2,8E+04	71	1,1E+04	76	4,2E+03	80	1,7E+03	83	6,2E+02	86	2,7E+02	87	1,3E+02	89	6,1E+01	89	3,0E+01	89	1,6E+01	89	8,6E+00	88
<b>0,1</b>	9,5E+05	51	3,7E+05	57	1,4E+05	62	5,4E+04	67	2,0E+04	72	7,2E+03	77	2,7E+03	81	1,1E+03	84	3,9E+02	87	1,7E+02	88	7,8E+01	89	3,7E+01	89	1,8E+01	89	9,6E+00	88	5,3E+00	88

Tabla 7.1.93. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% RTFO (M1). (Elaboración propia)

Plato 8 [mm]

Frecuencia angular [rad/s]	T= 5 °C		T= 10 °C		T= 15 °C		T= 20 °C		T= 25 °C		T= 30 °C		T= 35 °C		T= 40 °C	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	3,0E+07	30	2,0E+07	33	1,2E+07	36	6,8E+06	40	3,9E+06	43	2,2E+06	47	1,2E+06	51	7,0E+05	54
61,1	2,6E+07	31	1,6E+07	34	9,6E+06	37	5,5E+06	41	3,1E+06	44	1,7E+06	48	9,3E+05	52	5,2E+05	55
37,3	2,2E+07	31	1,4E+07	35	7,9E+06	38	4,4E+06	42	2,4E+06	45	1,3E+06	49	7,0E+05	53	3,8E+05	56
22,8	1,9E+07	32	1,1E+07	36	6,4E+06	39	3,5E+06	43	1,9E+06	46	9,9E+05	50	5,3E+05	54	2,8E+05	58
13,9	1,6E+07	33	9,3E+06	36	5,2E+06	40	2,8E+06	44	1,5E+06	47	7,6E+05	51	3,9E+05	55	2,1E+05	59
8,48	1,3E+07	34	7,7E+06	37	4,2E+06	41	2,2E+06	45	1,1E+06	48	5,7E+05	52	2,9E+05	56	1,5E+05	60
5,18	1,1E+07	34	6,3E+06	38	3,4E+06	42	1,7E+06	46	8,7E+05	50	4,3E+05	54	2,1E+05	58	1,1E+05	62
3,16	9,2E+06	35	5,2E+06	39	2,7E+06	43	1,4E+06	47	6,6E+05	51	3,2E+05	55	1,6E+05	59	7,7E+04	63
1,93	7,7E+06	36	4,2E+06	40	2,1E+06	44	1,1E+06	48	5,1E+05	52	2,4E+05	56	1,1E+05	61	5,4E+04	65
1,18	6,4E+06	37	3,4E+06	41	1,7E+06	45	8,2E+05	49	3,8E+05	54	1,8E+05	58	8,2E+04	62	3,8E+04	66
0,72	5,3E+06	38	2,8E+06	42	1,4E+06	46	6,3E+05	51	2,9E+05	55	1,3E+05	59	5,8E+04	64	2,7E+04	68
0,44	4,4E+06	39	2,2E+06	44	1,1E+06	48	4,9E+05	52	2,2E+05	57	9,4E+04	61	4,1E+04	66	1,8E+04	70
0,27	3,7E+06	40	1,8E+06	45	8,4E+05	49	3,7E+05	54	1,6E+05	58	6,8E+04	63	2,9E+04	68	1,3E+04	72
0,16	3,0E+06	41	1,5E+06	46	6,6E+05	50	2,8E+05	55	1,2E+05	60	4,9E+04	64	2,0E+04	69	8,5E+03	74
0,1	2,5E+06	43	1,2E+06	47	5,2E+05	52	2,2E+05	56	8,8E+04	61	3,5E+04	66	1,4E+04	71	5,7E+03	76

Tabla 7.1.94. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% RTFO (M2).  
(Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Plato 8 [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		
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	
[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
100	3,2E+07	30	2,0E+07	33	1,2E+07	36	7,2E+06	40	4,1E+06	44	2,3E+06	48	1,3E+06	51	7,5E+05	55	
61,1	2,7E+07	30	1,7E+07	34	1,0E+07	37	5,8E+06	41	3,2E+06	45	1,8E+06	48	9,9E+05	52	5,6E+05	55	
37,3	2,3E+07	31	1,4E+07	35	8,3E+06	38	4,6E+06	42	2,5E+06	46	1,4E+06	49	7,5E+05	53	4,2E+05	56	
22,8	2,0E+07	32	1,2E+07	35	6,8E+06	39	3,7E+06	43	2,0E+06	47	1,1E+06	50	5,6E+05	54	3,1E+05	57	
13,9	1,7E+07	33	9,8E+06	36	5,5E+06	40	2,9E+06	44	1,5E+06	48	8,0E+05	51	4,2E+05	55	2,2E+05	59	

<b>8,48</b>	1,4E+07	33	8,1E+06	37	4,4E+06	41	2,3E+06	45	1,2E+06	49	6,1E+05	53	3,1E+05	56	1,6E+05	60
<b>5,18</b>	1,2E+07	34	6,6E+06	38	3,5E+06	42	1,8E+06	46	9,2E+05	50	4,6E+05	54	2,3E+05	57	1,2E+05	61
<b>3,16</b>	9,8E+06	35	5,4E+06	39	2,8E+06	43	1,4E+06	47	7,0E+05	51	3,4E+05	55	1,7E+05	59	8,4E+04	63
<b>1,93</b>	8,2E+06	36	4,4E+06	40	2,3E+06	44	1,1E+06	48	5,3E+05	52	2,5E+05	56	1,2E+05	60	6,0E+04	64
<b>1,18</b>	6,8E+06	37	3,6E+06	41	1,8E+06	45	8,6E+05	49	4,0E+05	54	1,9E+05	58	8,8E+04	62	4,2E+04	66
<b>0,72</b>	5,6E+06	38	2,9E+06	43	1,4E+06	47	6,6E+05	51	3,0E+05	55	1,4E+05	59	6,3E+04	63	2,9E+04	68
<b>0,44</b>	4,7E+06	39	2,3E+06	44	1,1E+06	48	5,1E+05	52	2,3E+05	56	1,0E+05	61	4,5E+04	65	2,0E+04	70
<b>0,27</b>	3,9E+06	40	1,9E+06	45	8,8E+05	49	3,9E+05	54	1,7E+05	58	7,3E+04	62	3,1E+04	67	1,4E+04	72
<b>0,16</b>	3,2E+06	41	1,5E+06	46	6,9E+05	50	3,0E+05	55	1,3E+05	59	5,3E+04	64	2,2E+04	69	9,4E+03	74
<b>0,1</b>	2,7E+06	43	1,2E+06	48	5,4E+05	52	2,3E+05	56	9,3E+04	61	3,8E+04	66	1,5E+04	71	6,3E+03	76

Tabla 7.1.95. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% PAV (M1). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	4,0E+07	27	2,6E+07	29	1,7E+07	32	1,1E+07	35	6,5E+06	37	3,9E+06	40	2,4E+06	43	1,4E+06	46
<b>61,1</b>	3,4E+07	27	2,3E+07	30	1,4E+07	33	8,8E+06	35	5,3E+06	38	3,2E+06	41	1,9E+06	44	1,1E+06	47
<b>37,3</b>	3,0E+07	28	1,9E+07	30	1,2E+07	33	7,3E+06	36	4,3E+06	39	2,5E+06	42	1,5E+06	44	8,7E+05	47
<b>22,8</b>	2,6E+07	28	1,6E+07	31	1,0E+07	34	6,0E+06	37	3,5E+06	39	2,0E+06	42	1,2E+06	45	6,7E+05	48
<b>13,9</b>	2,2E+07	29	1,4E+07	32	8,4E+06	34	4,9E+06	37	2,8E+06	40	1,6E+06	43	9,1E+05	46	5,2E+05	49
<b>8,48</b>	1,9E+07	29	1,2E+07	32	6,9E+06	35	4,0E+06	38	2,3E+06	41	1,3E+06	44	7,1E+05	47	3,9E+05	50
<b>5,18</b>	1,6E+07	30	9,9E+06	33	5,8E+06	36	3,3E+06	39	1,8E+06	42	1,0E+06	45	5,5E+05	48	3,0E+05	51
<b>3,16</b>	1,4E+07	31	8,3E+06	34	4,8E+06	37	2,7E+06	40	1,5E+06	43	7,9E+05	46	4,2E+05	49	2,3E+05	52
<b>1,93</b>	1,2E+07	31	7,0E+06	34	3,9E+06	38	2,2E+06	41	1,2E+06	44	6,2E+05	47	3,2E+05	50	1,7E+05	54
<b>1,18</b>	1,0E+07	32	5,8E+06	35	3,2E+06	38	1,7E+06	42	9,2E+05	45	4,8E+05	48	2,5E+05	51	1,3E+05	55
<b>0,72</b>	8,7E+06	33	4,9E+06	36	2,7E+06	39	1,4E+06	43	7,3E+05	46	3,7E+05	49	1,9E+05	53	9,5E+04	56
<b>0,44</b>	7,4E+06	34	4,1E+06	37	2,2E+06	40	1,1E+06	44	5,7E+05	47	2,9E+05	50	1,4E+05	54	7,0E+04	58

<b>0,27</b>	6,3E+06	35	3,4E+06	38	1,8E+06	42	9,0E+05	45	4,5E+05	48	2,2E+05	52	1,1E+05	56	5,1E+04	60
<b>0,16</b>	5,3E+06	36	2,8E+06	39	1,5E+06	42	7,2E+05	46	3,5E+05	49	1,7E+05	53	7,9E+04	57	3,7E+04	62
<b>0,1</b>	4,6E+06	37	2,4E+06	40	1,2E+06	44	5,8E+05	47	2,8E+05	51	1,3E+05	55	5,9E+04	59	2,7E+04	64

Tabla 7.1.96. Mediciones del módulo dinámico de corte y ángulo de fase obtenidos del barrido de frecuencia-temperatura para RAP con RC 10,3% PAV (M2). (Elaboración propia)

Frecuencia angular	Plato 8 [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	
	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ	G*	δ
[rad/s]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]	[°]
<b>100</b>	2,9E+07	27	2,0E+07	30	1,4E+07	32	8,5E+06	34	5,3E+06	37	3,2E+06	40	2,0E+06	43	1,2E+06	46
<b>61,1</b>	2,5E+07	27	1,7E+07	30	1,1E+07	32	7,1E+06	35	4,3E+06	38	2,6E+06	41	1,6E+06	43	9,5E+05	46
<b>37,3</b>	2,2E+07	28	1,5E+07	31	9,6E+06	33	5,9E+06	36	3,5E+06	38	2,1E+06	41	1,2E+06	44	7,4E+05	47
<b>22,8</b>	1,9E+07	28	1,2E+07	31	8,1E+06	34	4,8E+06	36	2,9E+06	39	1,7E+06	42	9,7E+05	45	5,7E+05	48
<b>13,9</b>	1,6E+07	29	1,0E+07	32	6,7E+06	34	4,0E+06	37	2,3E+06	40	1,3E+06	43	7,6E+05	46	4,4E+05	49
<b>8,48</b>	1,4E+07	30	8,9E+06	33	5,6E+06	35	3,3E+06	38	1,9E+06	41	1,1E+06	44	5,9E+05	47	3,4E+05	50
<b>5,18</b>	1,2E+07	30	7,5E+06	33	4,6E+06	36	2,7E+06	39	1,5E+06	41	8,3E+05	45	4,6E+05	48	2,6E+05	51
<b>3,16</b>	1,0E+07	31	6,3E+06	34	3,8E+06	37	2,2E+06	39	1,2E+06	42	6,6E+05	46	3,6E+05	49	1,9E+05	52
<b>1,93</b>	8,7E+06	31	5,3E+06	35	3,2E+06	37	1,8E+06	40	9,6E+05	43	5,1E+05	47	2,7E+05	50	1,5E+05	54
<b>1,18</b>	7,4E+06	32	4,5E+06	36	2,6E+06	38	1,4E+06	41	7,6E+05	44	4,0E+05	48	2,1E+05	51	1,1E+05	55
<b>0,72</b>	6,3E+06	33	3,7E+06	37	2,2E+06	39	1,2E+06	42	6,1E+05	46	3,1E+05	49	1,6E+05	53	8,2E+04	56
<b>0,44</b>	5,4E+06	34	3,1E+06	37	1,8E+06	40	9,3E+05	43	4,8E+05	47	2,4E+05	50	1,2E+05	54	6,0E+04	58
<b>0,27</b>	4,6E+06	35	2,6E+06	38	1,4E+06	41	7,5E+05	45	3,8E+05	48	1,8E+05	52	9,0E+04	56	4,4E+04	60
<b>0,16</b>	3,9E+06	35	2,2E+06	39	1,2E+06	42	6,0E+05	46	2,9E+05	49	1,4E+05	53	6,7E+04	57	3,2E+04	62
<b>0,1</b>	3,4E+06	36	1,9E+06	40	9,7E+05	44	4,8E+05	47	2,3E+05	51	1,1E+05	55	5,0E+04	59	2,3E+04	64



## 7.2. Anexo 2: Gráficas de barrido frecuencia- temperatura

En esta sección se presentan las gráficas obtenidas en el ensayo de barrido de frecuencia-temperatura, donde se observan la familia de curvas para los ligantes originales en sus tres estados de envejecimiento (SE, RTFO y PAV) y con adición de los rejuvenecedores en las dosis óptimas de aplicación determinadas.

### 7.2.1. CA-24 (SE, RTFO y PAV)

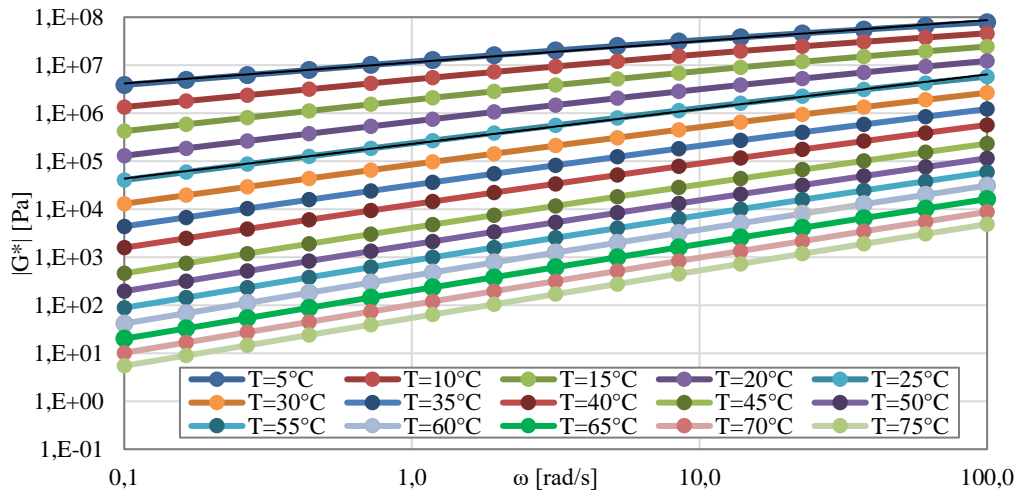


Figura 7.2.1. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 SE. (Elaboración propia)

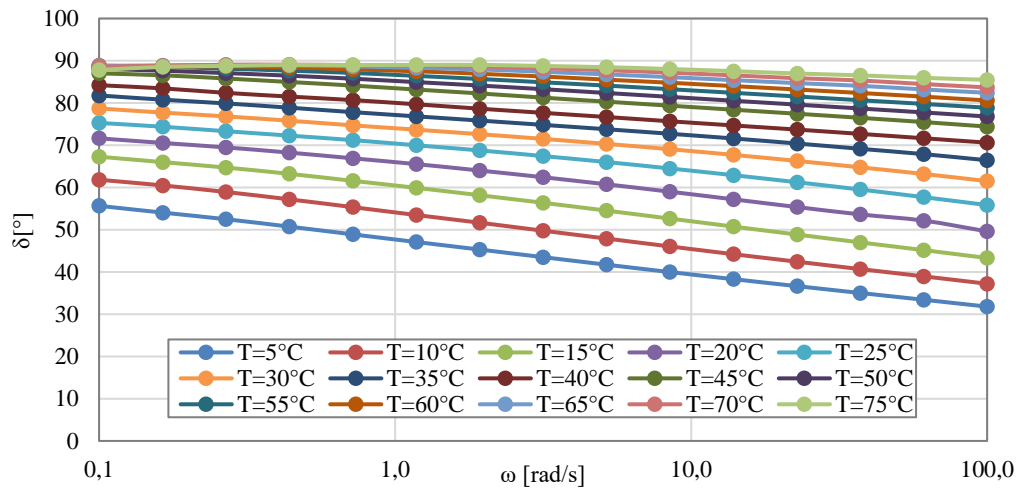


Figura 7.2.2. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 SE. (Elaboración propia)

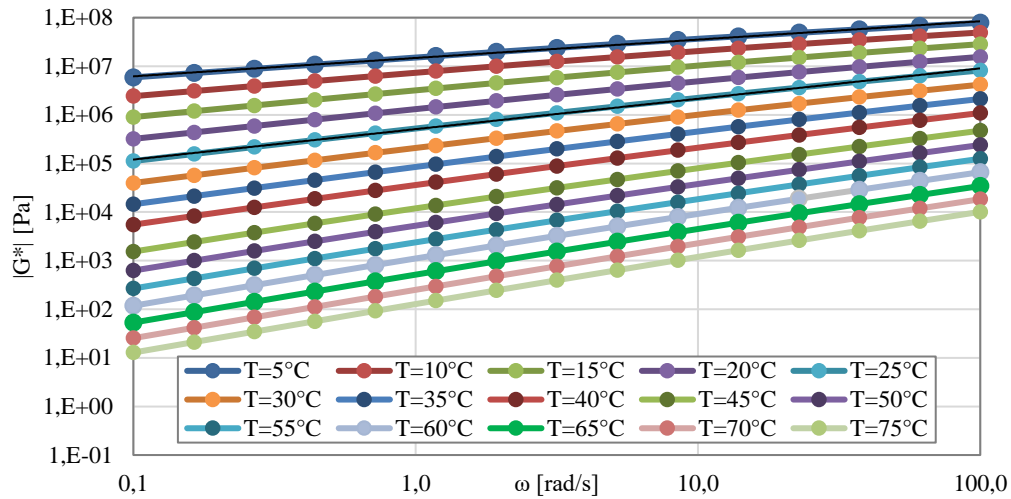


Figura 7.2.3. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 RTFO. (Elaboración propia)

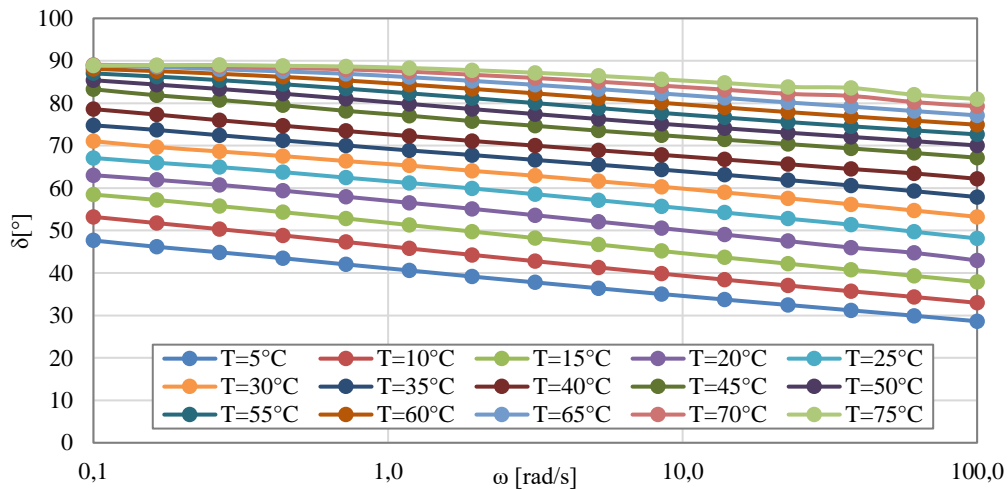


Figura 7.2.4. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 RTFO. (Elaboración propia)

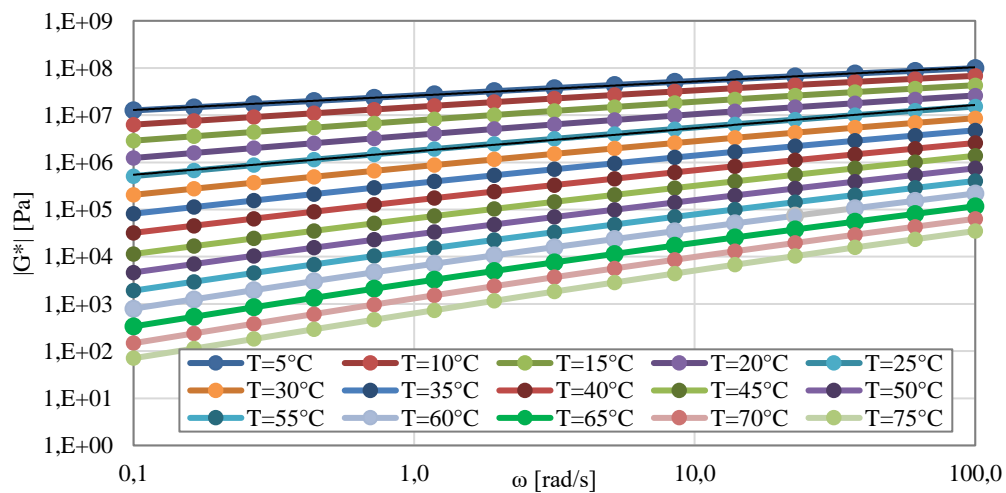


Figura 7.2.5. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 PAV. (Elaboración propia)

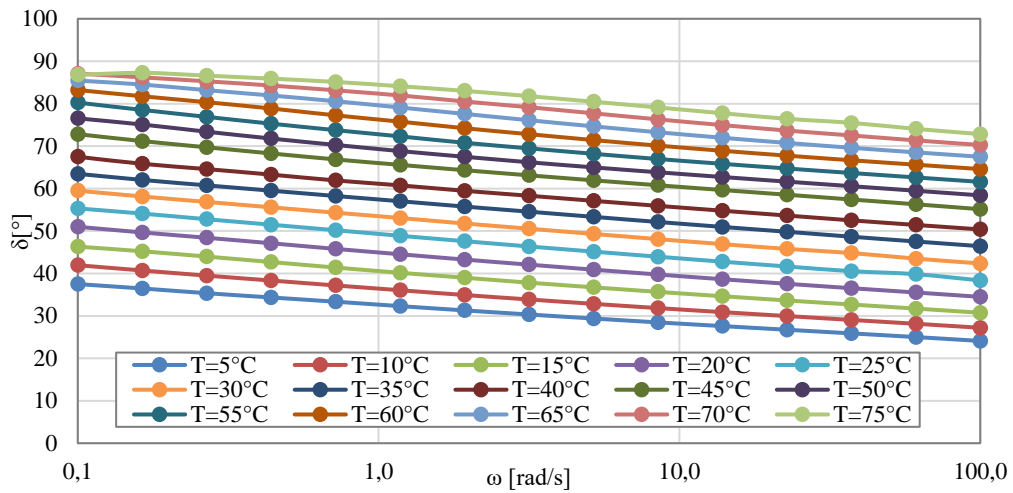


Figura 7.2.6. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 PAV. (Elaboración propia)

7.2.2. CA-14 (SE, RTFO y PAV)

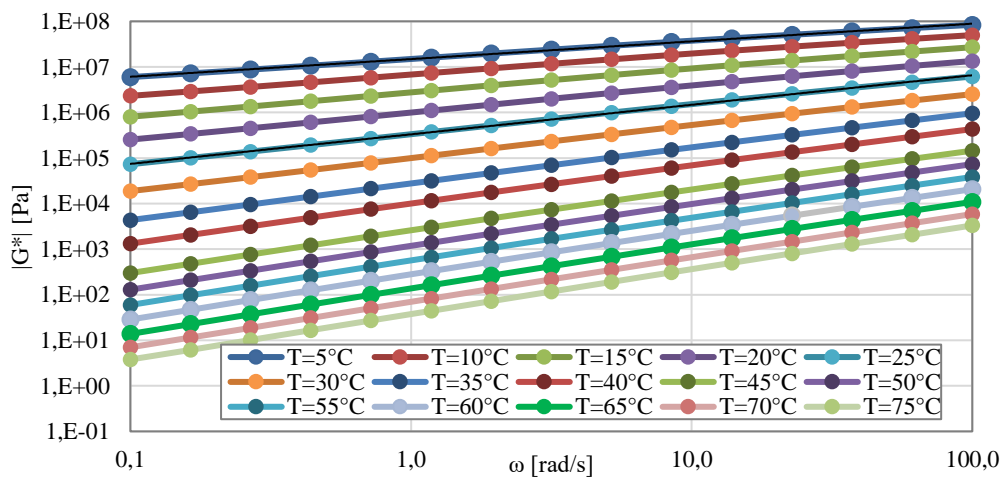


Figura 7.2.7. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 SE. (Elaboración propia)

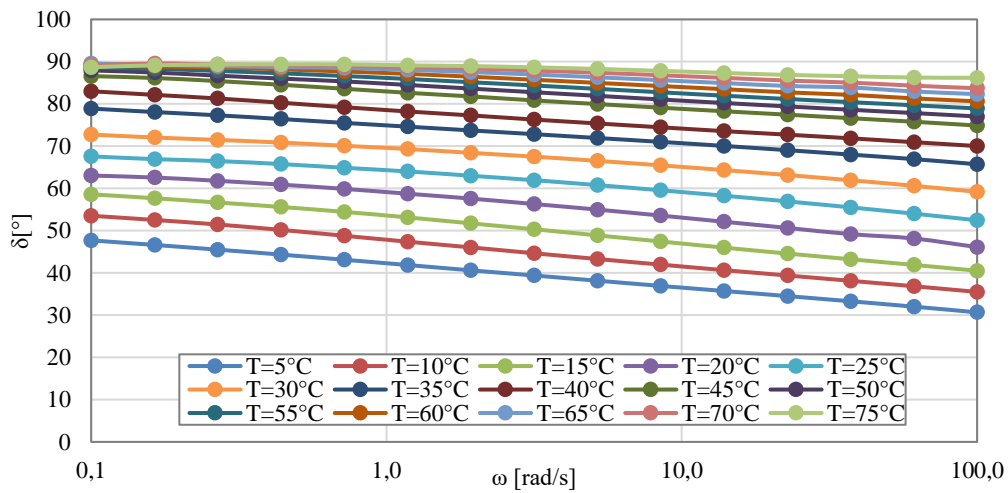


Figura 7.2.8. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 SE. (Elaboración propia)

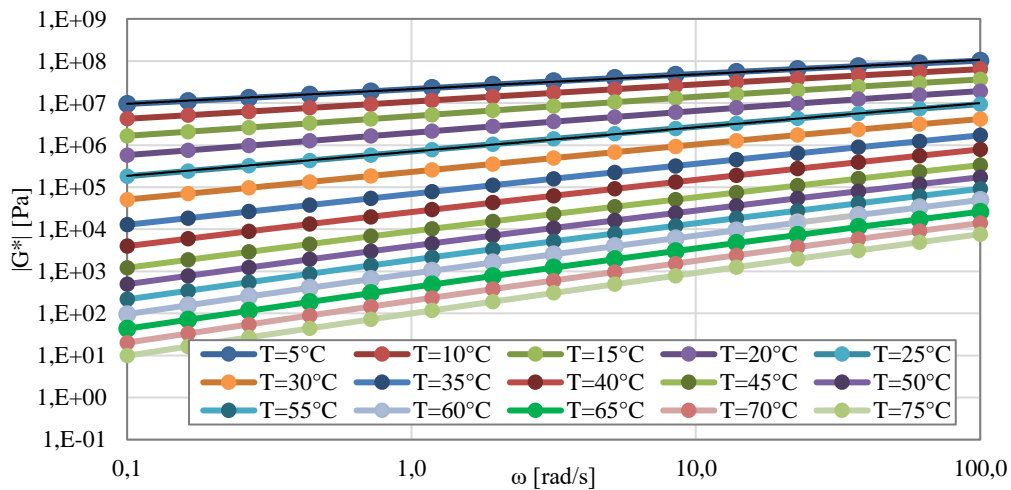


Figura 7.2.9. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 RTFO. (Elaboración propia)

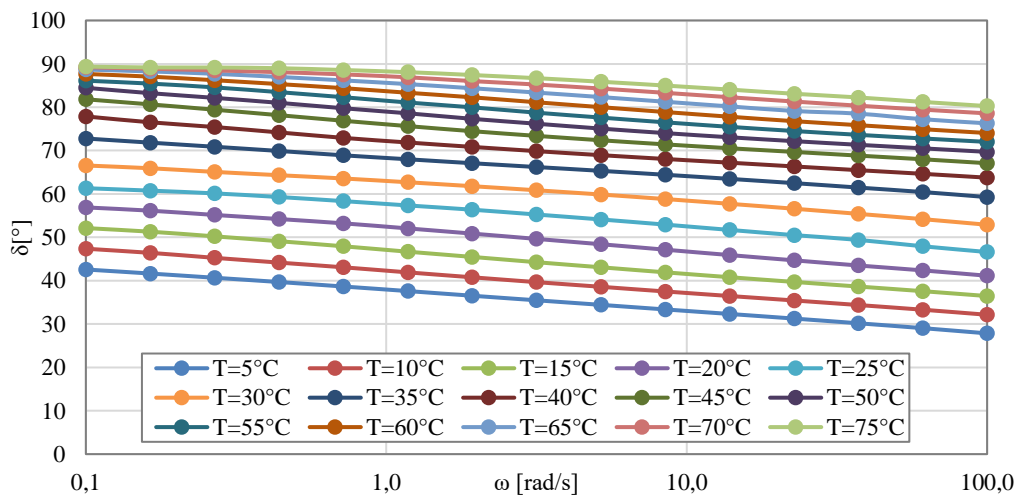


Figura 7.2.10. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 RTFO. (Elaboración propia)

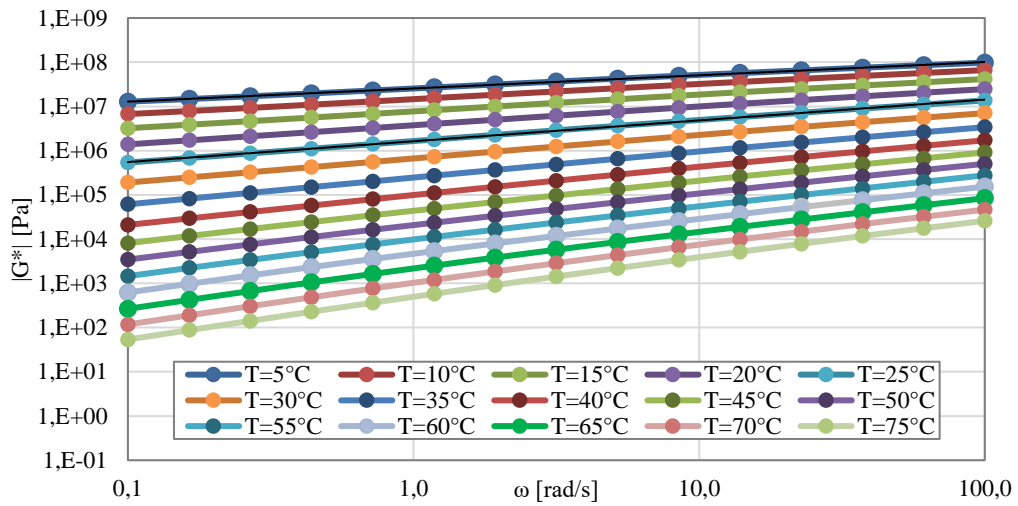


Figura 7.2.11. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 PAV. (Elaboración propia)

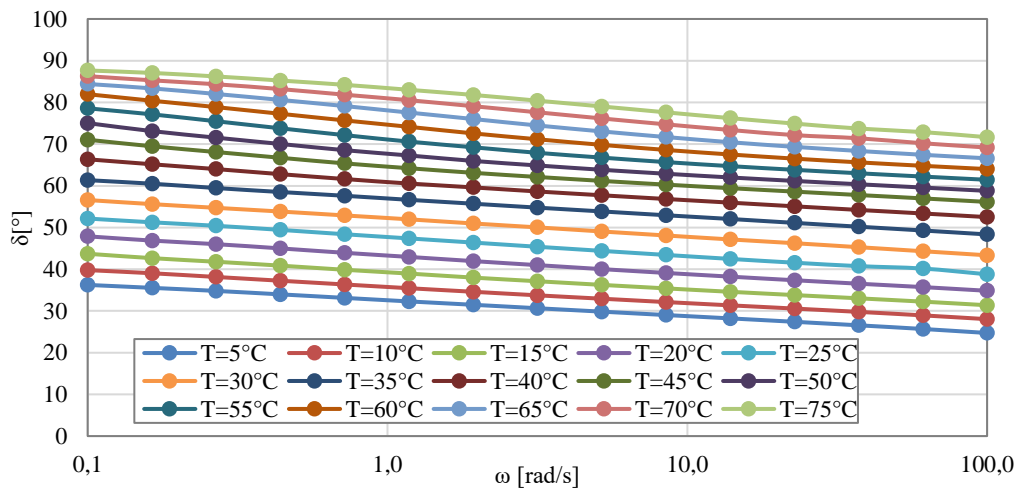


Figura 7.2.12. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 PAV. (Elaboración propia)

7.2.3. RAP (SE)

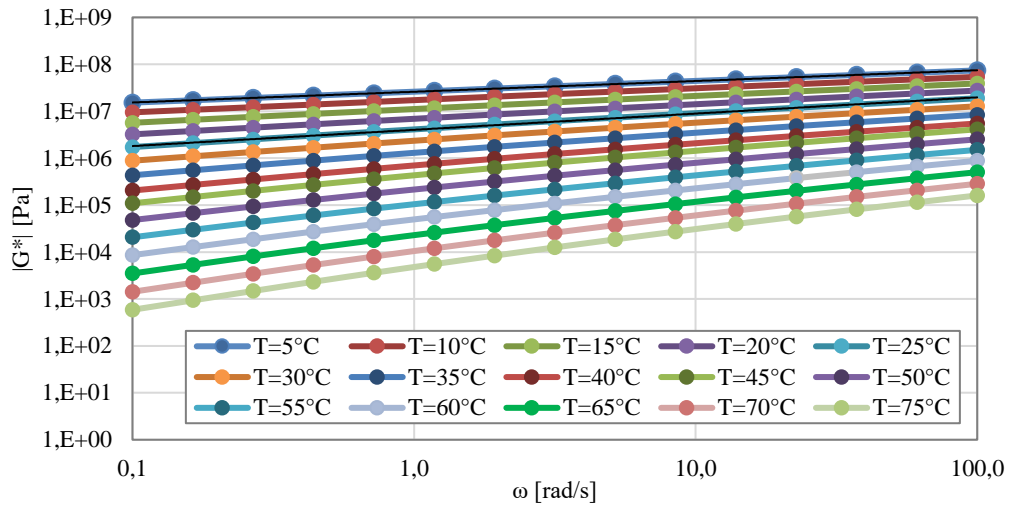


Figura 7.2.13. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP SE. (Elaboración propia)

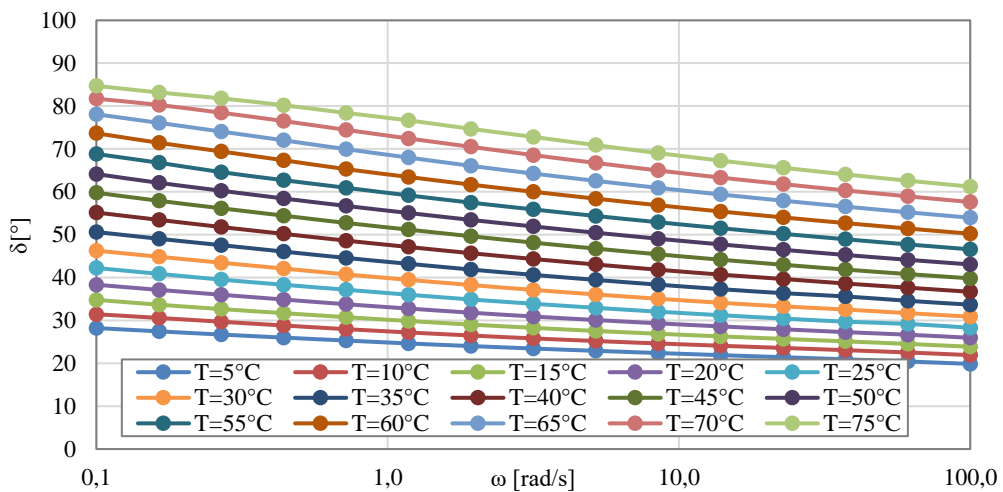


Figura 7.2.14. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP SE. (Elaboración propia)

7.2.4. Ligantes asfálticos con LPO-M aplicado en dosis óptimas (SE)

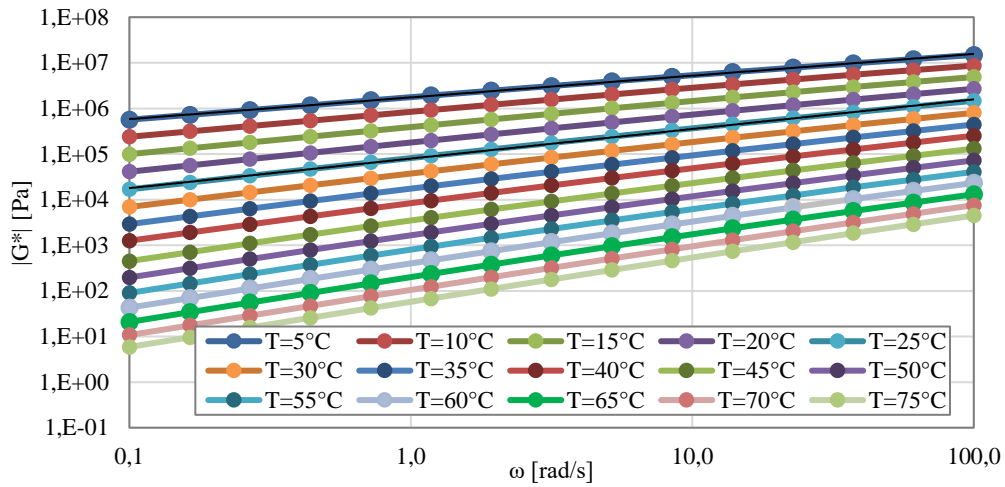


Figura 7.2.15. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 8,6% de LPO-M SE. (Elaboración propia)

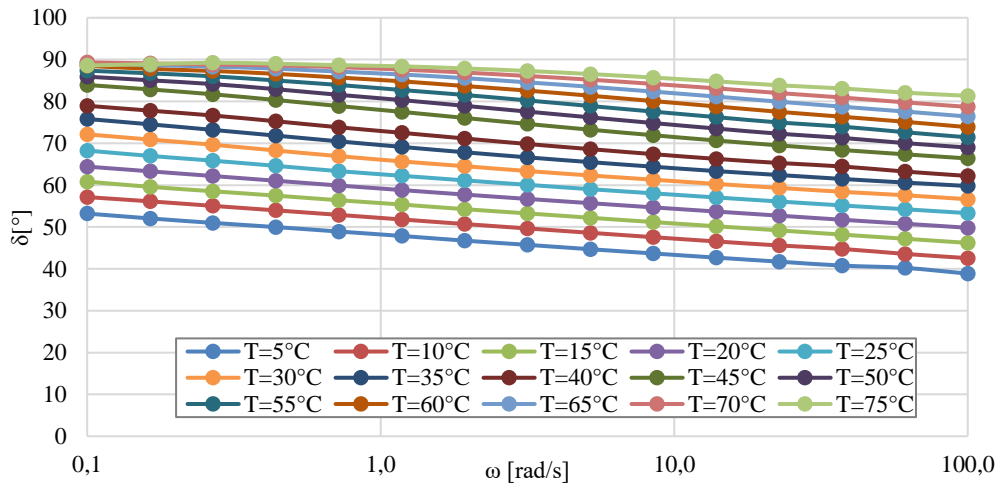


Figura 7.2.16. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 8,6% de LPO-M SE. (Elaboración propia)

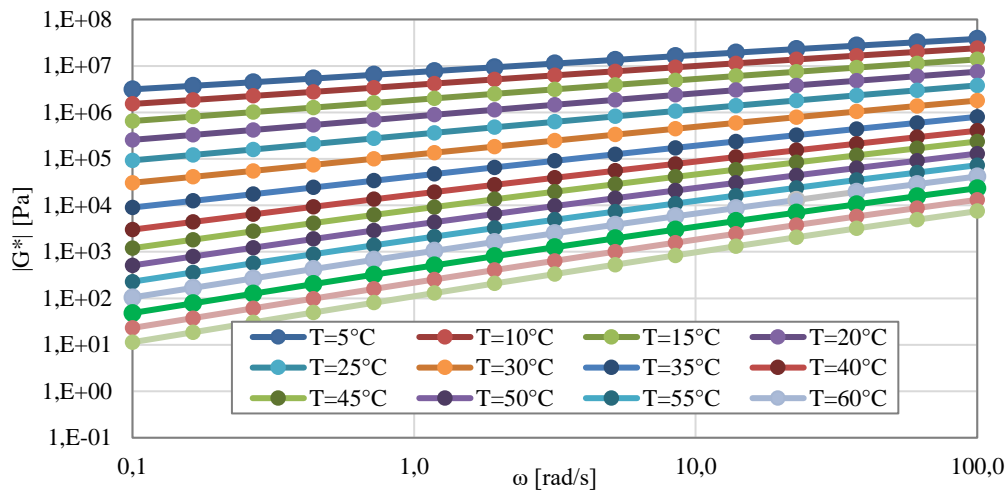


Figura 7.2.17. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 5,3% de LPO-M SE. (Elaboración propia)

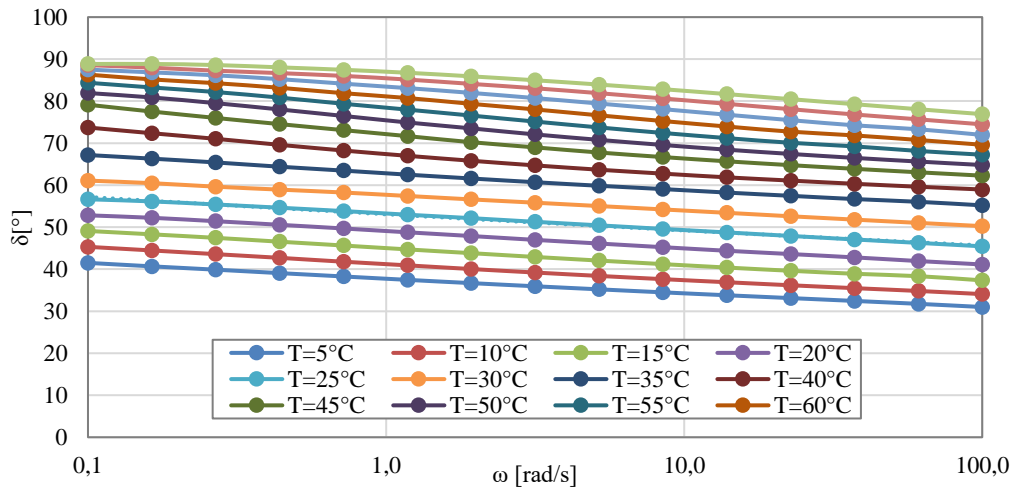


Figura 7.2.18. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 5,3% de LPO-M SE. (Elaboración propia)

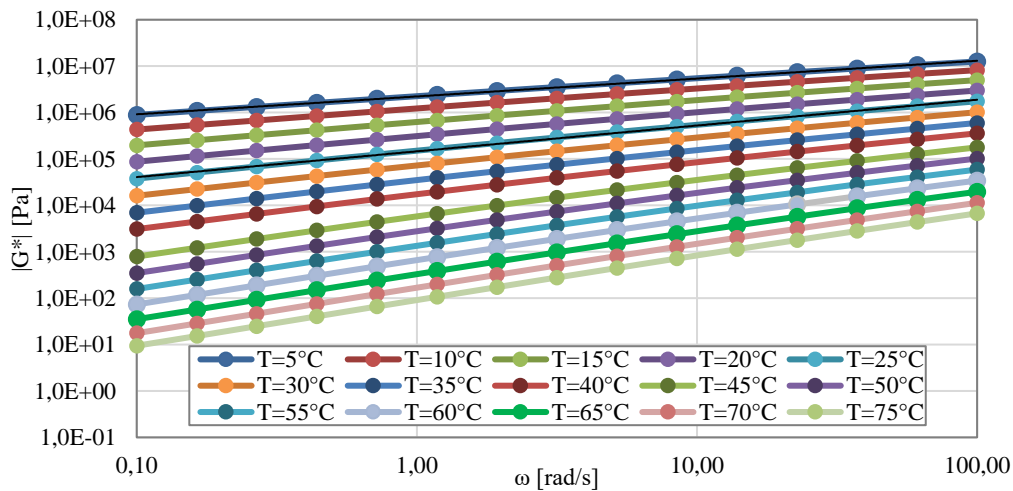


Figura 7.2.19. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP 13,4% de LPO-M SE. (Elaboración propia)

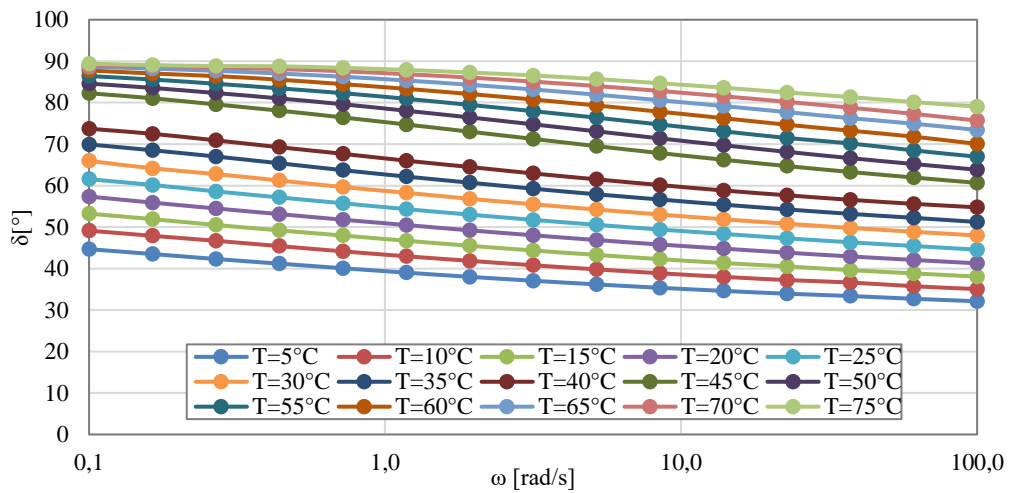


Figura 7.2.20. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP 13,4% de LPO-M SE. (Elaboración propia)

### 7.2.5. Ligantes asfálticos con RC aplicado en dosis óptimas (SE)

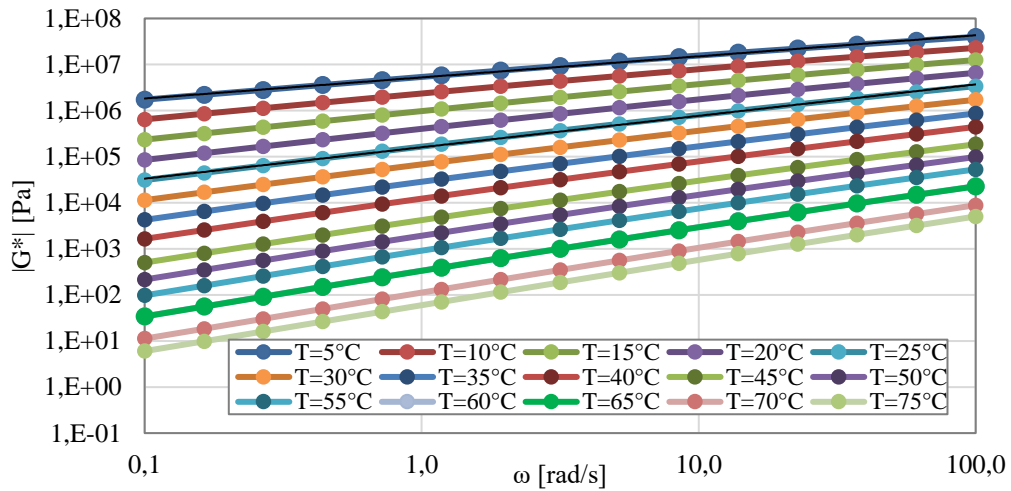


Figura 7.2.21. Gráfico de modulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 5,9% de RC SE. (Elaboración propia)

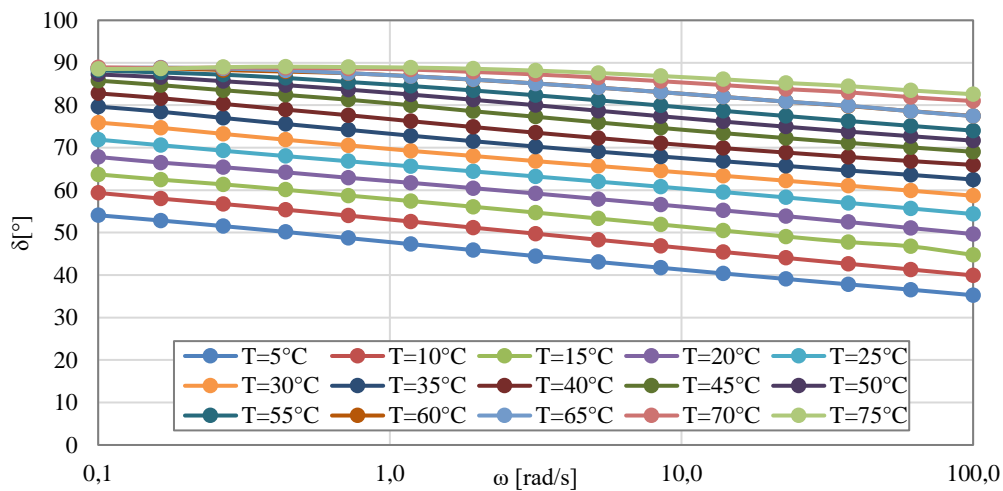


Figura 7.2.22. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-24 5,9% de RC SE. (Elaboración propia)

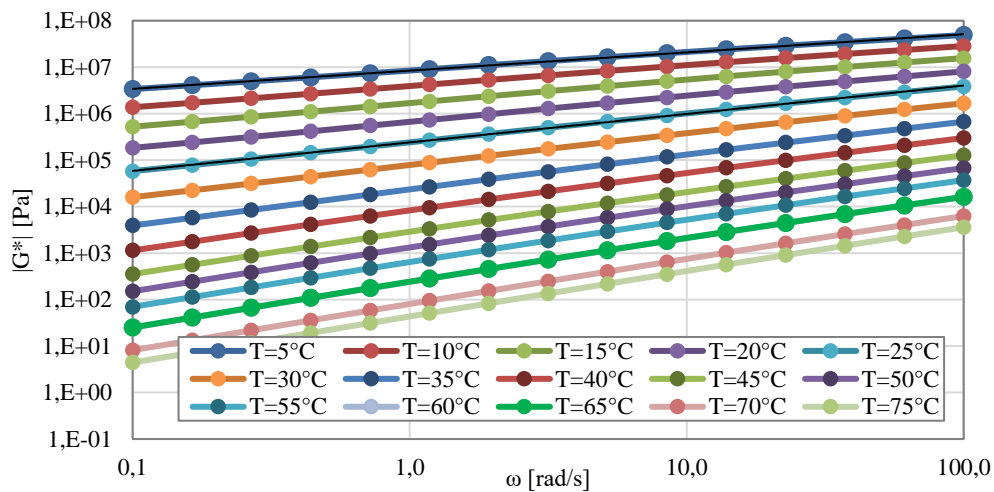


Figura 7.2.23. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 7,6% de RC SE. (Elaboración propia)

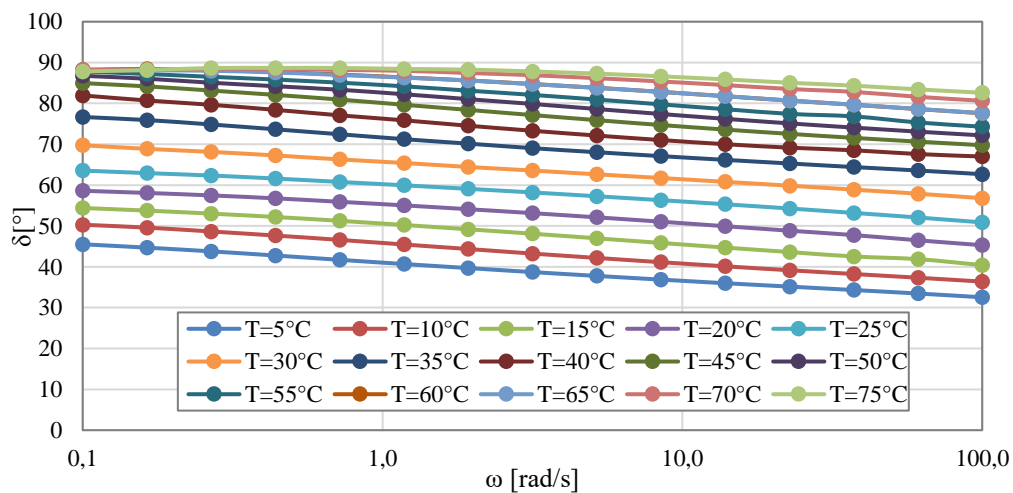


Figura 7.2.24. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante CA-14 7,6% de RC SE. (Elaboración propia)

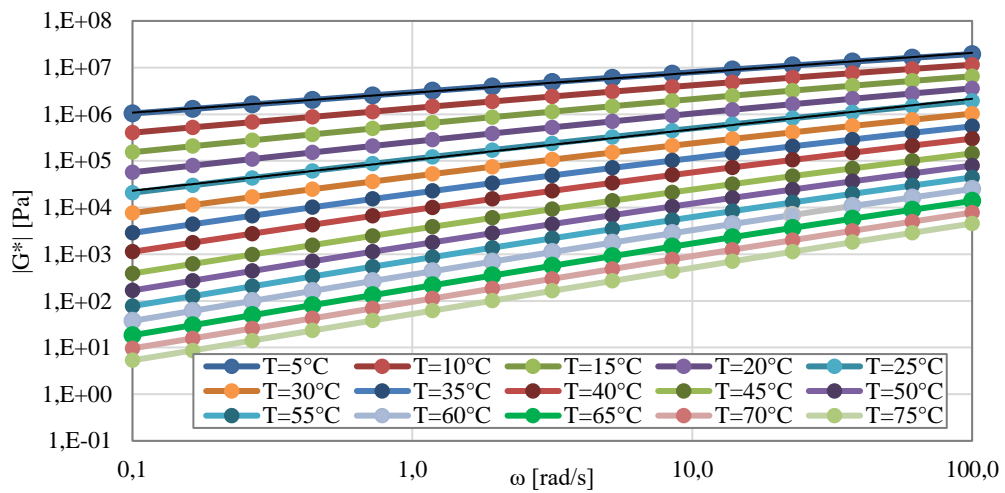


Figura 7.2.25. Gráfico de módulo dinámico del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP 10,3% de RC SE. (Elaboración propia)

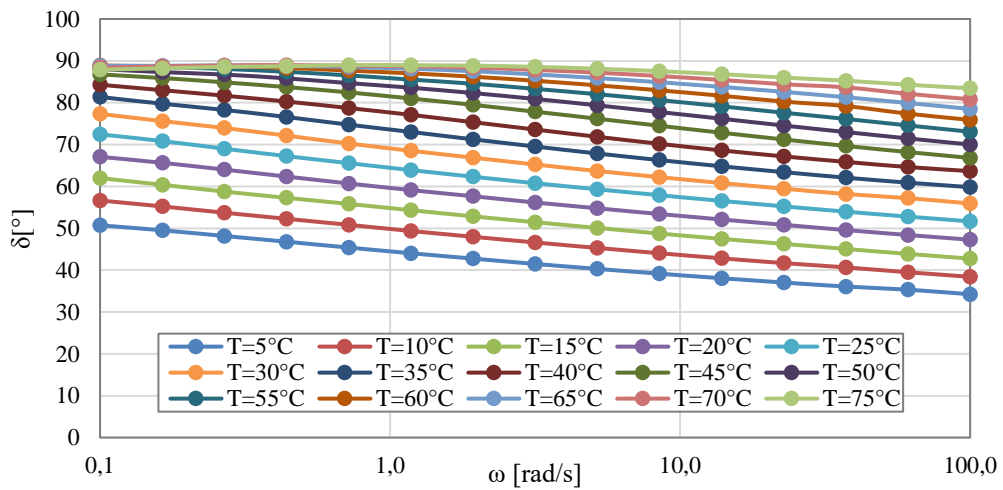


Figura 7.2.26. Gráfico del ángulo de fase del barrido de frecuencia-temperatura para el ligante RAP 10,3% de RC SE. (Elaboración propia)

### 7.3. Anexo 3: Diagramas de Black

En esta sección se presentan las gráficas de diagrama de black para los ligantes originales en sus tres estados de envejecimiento (SE, RTFO y PAV) y con adición de los rejuvenecedores en las dosis óptimas de aplicación determinadas.

#### 7.3.1. CA-24 (SE, RTFO y PAV)

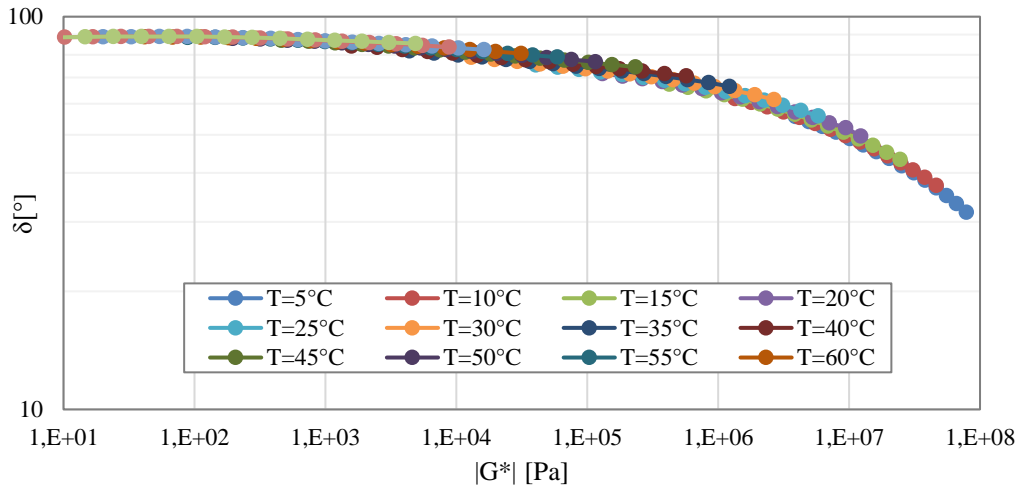


Figura 7.3.1. Diagrama de black del ligante CA-24 en estado SE. (Elaboración propia)

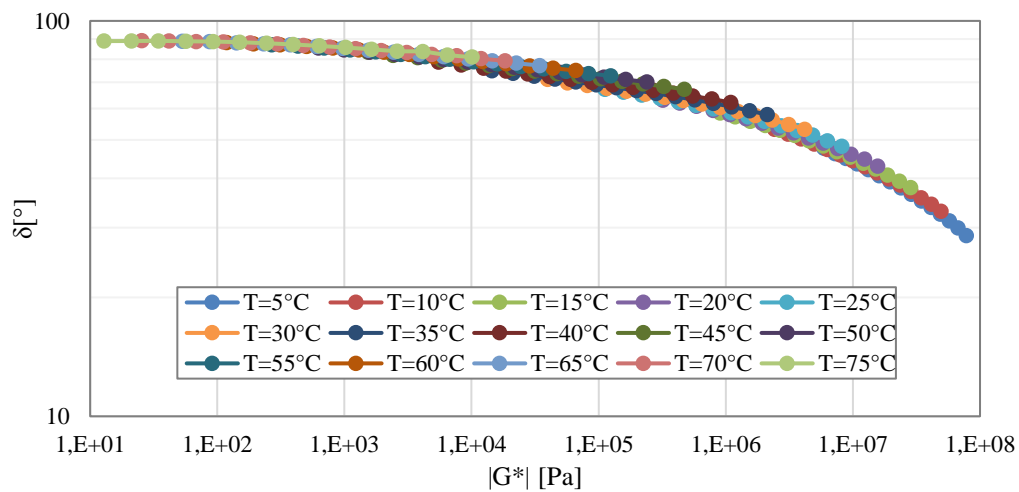


Figura 7.3.2. Diagrama de black del ligante CA-24 en estado RTFO. (Elaboración propia)

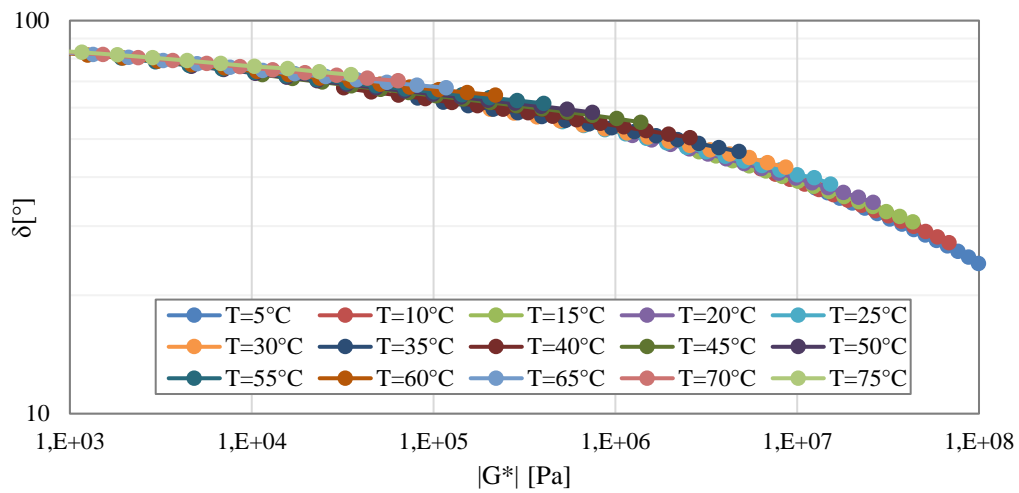


Figura 7.3.3. Diagrama de black del ligante CA-24 en estado PAV. (Elaboración propia)

7.3.2. CA-14 (SE, RTFO y PAV)

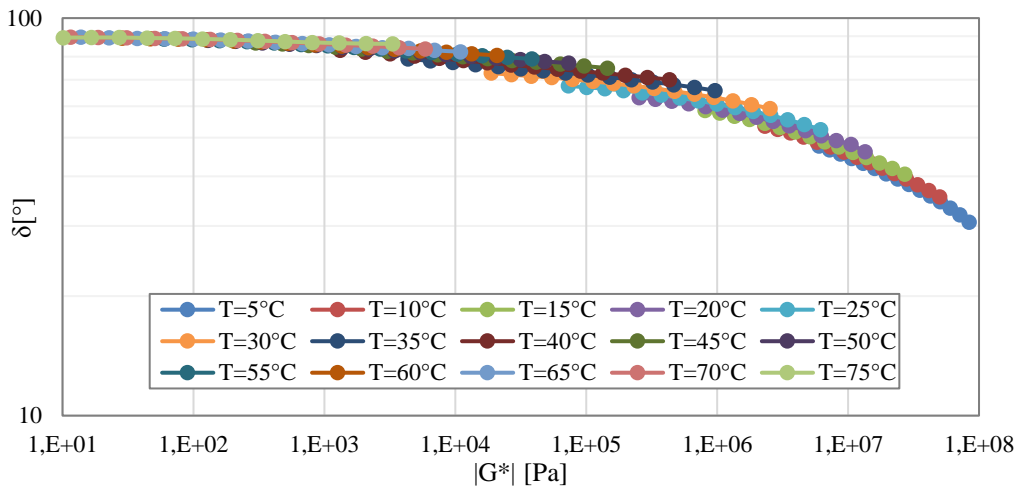


Figura 7.3.4. Diagrama de black del ligante CA-14 en estado SE. (Elaboración propia)

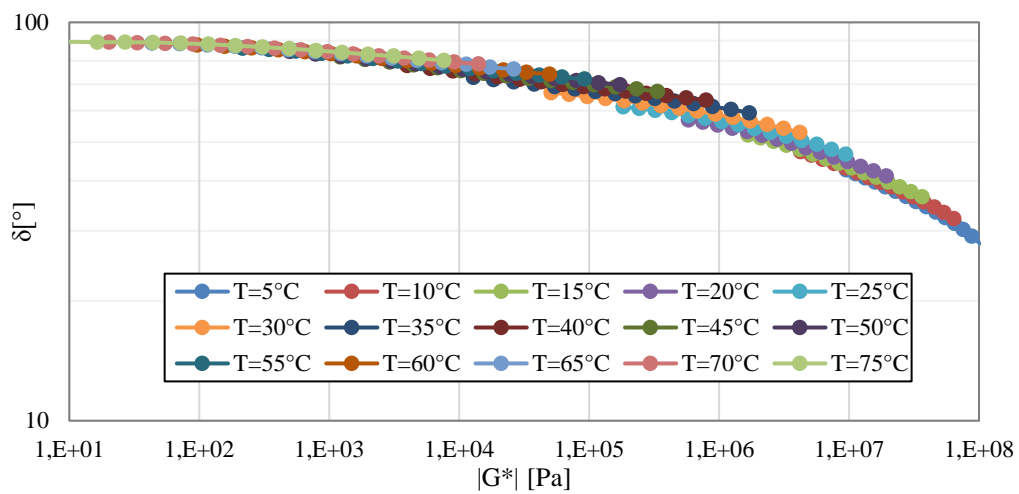


Figura 7.3.5. Diagrama de black del ligante CA-14 en estado RTFO. (Elaboración propia)

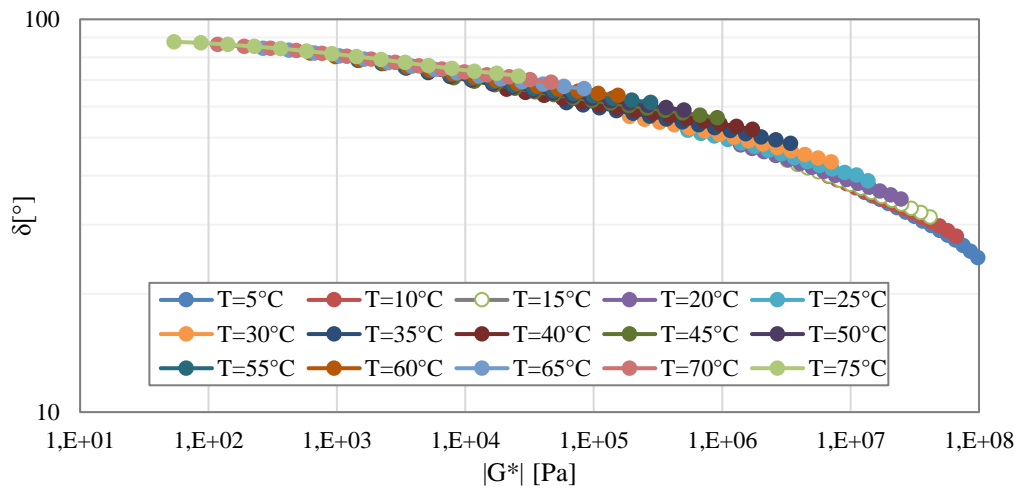


Figura 7.3.6. Diagrama de black del ligante CA-14 en estado PAV. (Elaboración propia)

### 7.3.3. RAP (SE)

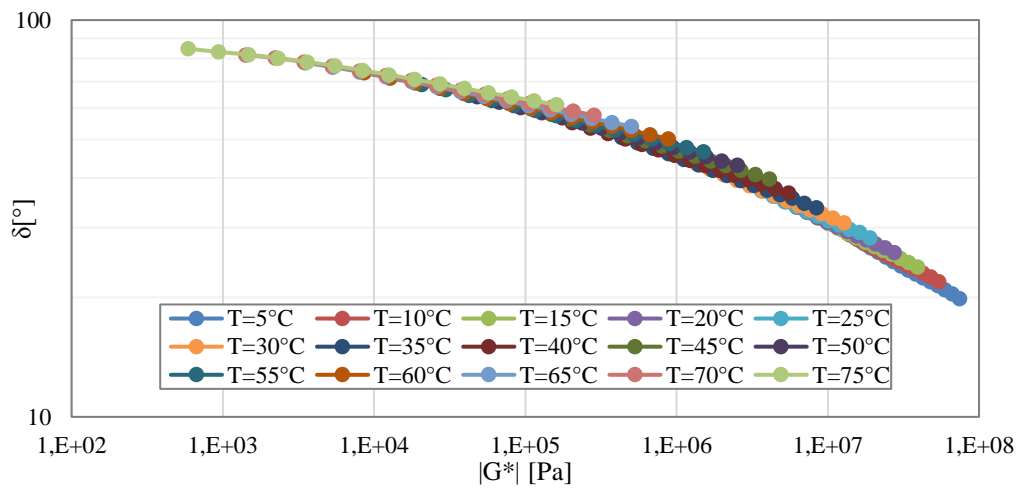


Figura 7.3.7. Diagrama de black del ligante RAP en estado SE. (Elaboración propia)

7.3.4. Ligantes asfálticos con LPO-M aplicado en dosis óptimas (SE)

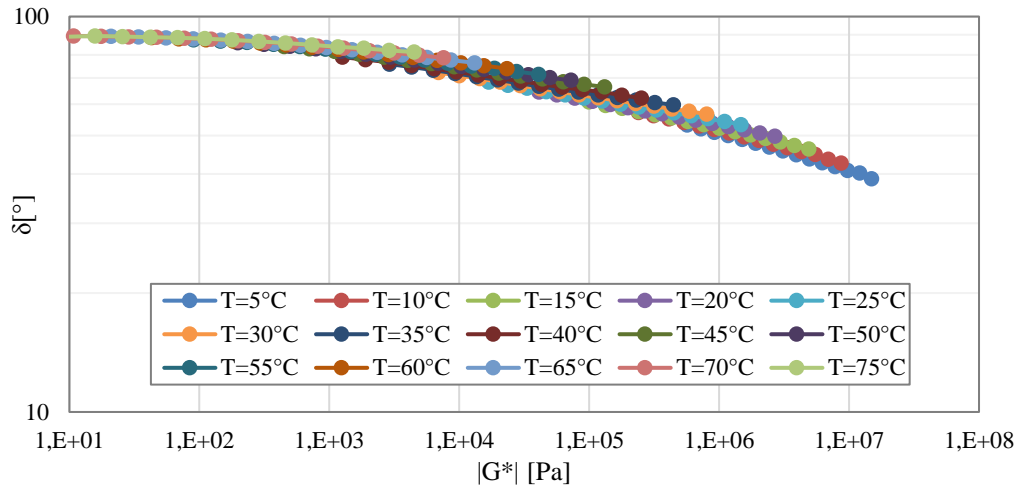


Figura 7.3.8. Diagrama de black del ligante CA-24 8,6% de LPO-M SE. (Elaboración propia)

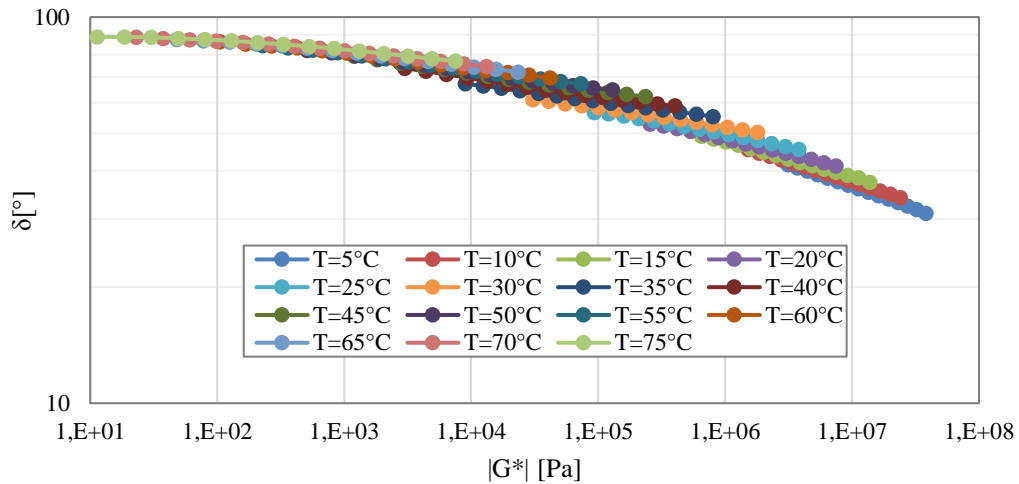


Figura 7.3.9. Diagrama de black del ligante CA-14 5,3% de LPO-M SE. (Elaboración propia)

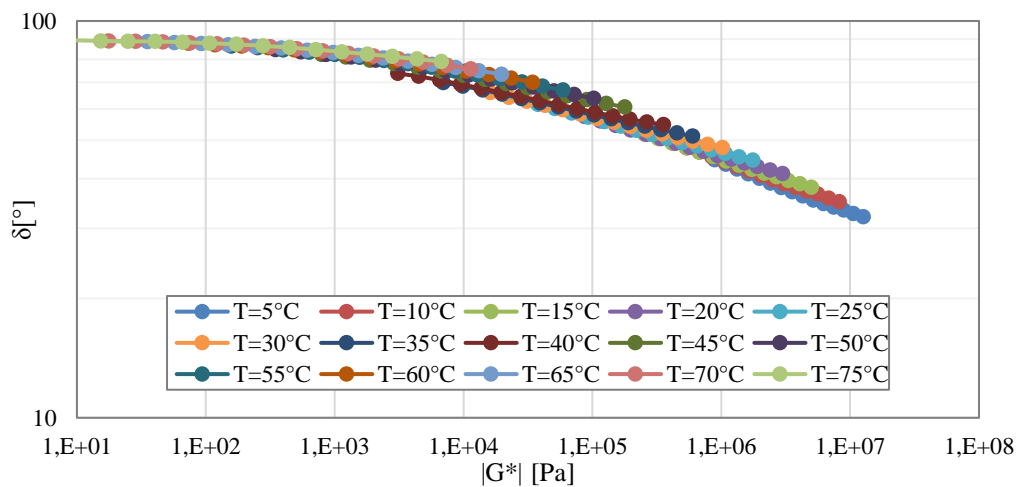


Figura 7.3.10. Diagrama de black del ligante RAP 13,4% de LPO-M SE. (Elaboración propia)

7.3.5. Ligantes asfálticos con RC aplicado en dosis óptimas (SE)

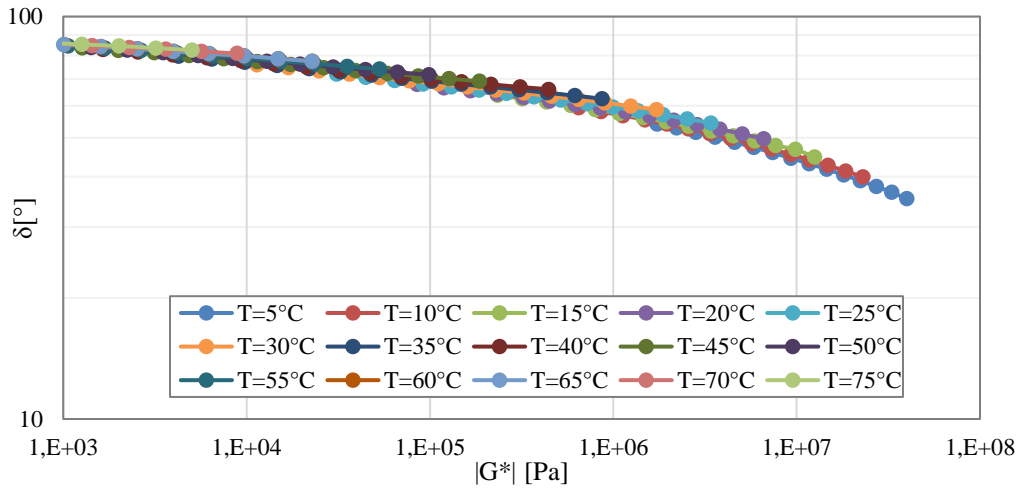


Figura 7.3.11. Diagrama de black del ligante CA-24 5,9% de RC SE. (Elaboración propia)

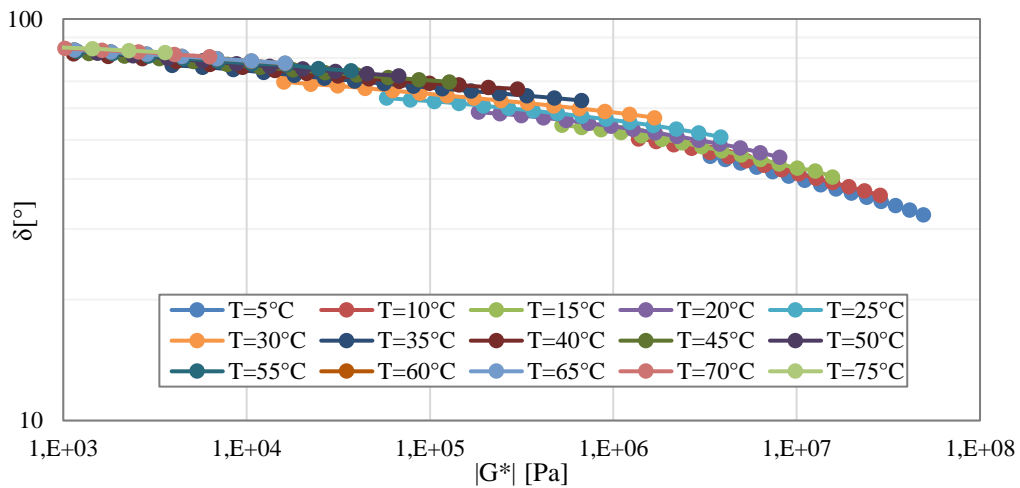


Figura 7.3.12. Diagrama de black del ligante CA-14 7,6% de RC SE. (Elaboración propia)

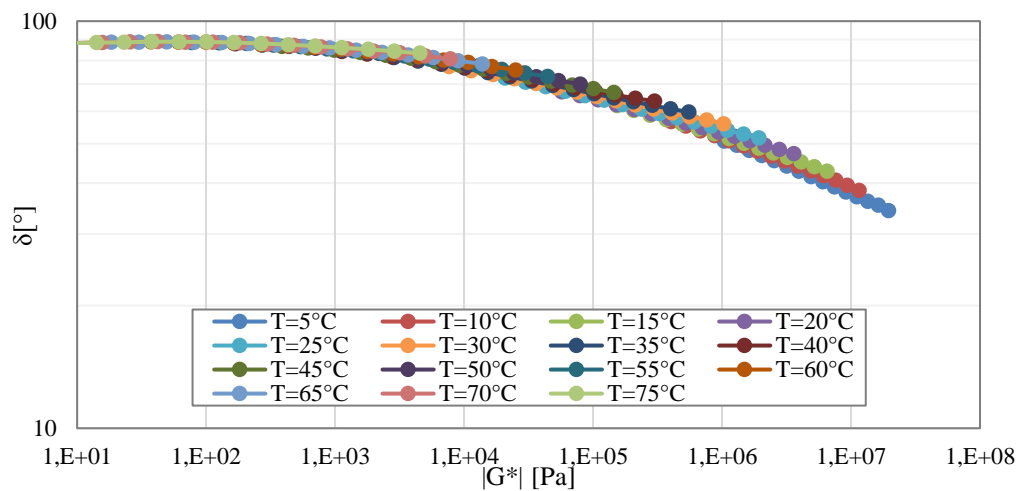


Figura 7.3.13. Diagrama de black del ligante RAP 10,3% de RC SE. (Elaboración propia)

## 7.4. Anexo 4: Análisis de repetibilidad

Coefficientes de variación entre muestras medidas en los ensayos de barrido frecuencia-temperatura de los ligantes en estado original (SE, RTFO y PAV) y los ligantes rejuvenecidos en dosis óptimas de LPO-M y RC (SE, re-envejecido en RTFO y PAV).

### 7.4.1. CA-24 (SE, RTFO y PAV)

Tabla 7.4.1. Precisión estimada para el ligante CA-24 SE. (Elaboración propia)

Coefficientes de variación para dos muestras del ligante CA-24 SE															
Frecuencia angular [rad/s]	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
100	0,34	1,96	2,65	3,17	3,29	3,01	2,48	2,23	4,10	4,51	4,76	4,58	5,33	4,83	1,87
61,1	0,44	1,95	2,66	3,24	3,29	2,99	2,45	2,17	4,17	4,58	4,84	4,63	5,40	4,83	1,97
37,3	0,50	1,90	2,67	3,23	3,27	2,98	2,49	2,20	4,22	4,62	4,90	4,68	5,46	4,86	2,00
22,8	0,63	1,86	2,64	3,20	3,25	2,98	2,54	2,29	4,24	4,68	4,94	4,70	5,50	4,86	2,01
13,9	0,72	1,82	2,64	3,18	3,23	3,01	2,60	2,35	4,37	4,73	4,98	4,73	5,55	4,85	2,01
8,48	0,81	1,73	2,58	3,14	3,22	3,03	2,65	2,47	4,40	4,76	5,02	4,78	5,58	4,85	1,99
5,18	0,91	1,69	2,54	3,09	3,22	3,07	2,71	2,55	4,46	4,82	5,05	4,79	5,61	4,82	1,96
3,16	1,02	1,63	2,51	3,00	3,23	3,17	2,78	2,67	4,52	4,86	5,07	4,85	5,64	4,83	1,90
1,93	1,14	1,52	2,31	3,03	3,17	3,18	2,88	2,77	4,54	4,86	5,06	4,86	5,67	4,75	1,81
1,18	1,18	1,45	2,35	2,93	3,27	3,25	2,90	2,91	4,62	4,95	5,06	4,88	5,60	4,63	1,81
0,72	1,20	1,30	2,07	3,04	3,29	3,19	3,11	3,09	4,56	4,93	5,17	4,83	5,64	4,56	1,41
0,44	1,21	1,13	1,89	2,90	3,13	3,19	3,25	3,26	4,69	4,98	5,15	4,87	5,56	4,50	1,41
0,27	1,26	0,95	1,75	2,85	3,08	3,22	3,35	3,47	4,72	4,93	5,06	4,83	5,59	3,95	1,12
0,16	1,26	0,73	1,62	2,90	3,19	3,33	3,48	3,58	4,59	4,88	5,03	4,73	5,44	3,55	0,08
0,1	1,29	0,62	1,86	2,59	3,27	3,50	3,46	3,87	4,60	4,87	4,82	4,75	5,21	3,46	0,21

Tabla 7.4.2. Precisión estimada para el ligante CA-24 RTFO. (Elaboración propia)

Coefficientes de variación para dos muestras del ligante CA-24 RTFO															
Frecuencia angular [rad/s]	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
100	8,13	8,16	8,44	8,21	8,45	8,31	8,02	7,63	2,05	1,89	1,99	1,89	1,93	2,16	1,85
61,1	8,31	8,31	8,61	8,57	8,57	8,39	8,00	7,46	2,07	1,92	2,01	1,92	2,00	2,21	1,83
37,3	8,44	8,44	8,79	8,59	8,81	8,48	8,04	7,49	2,10	2,00	2,05	1,96	2,02	2,26	1,84
22,8	8,59	8,61	8,97	8,78	8,81	8,61	8,12	7,53	2,14	2,01	2,08	1,99	2,08	2,28	1,79
13,9	8,78	8,79	9,16	8,96	8,94	8,72	8,21	7,57	2,18	2,03	2,12	2,02	2,13	2,32	1,77
8,48	8,91	8,92	9,32	9,13	9,11	8,83	8,32	7,64	2,20	2,07	2,16	2,04	2,16	2,37	1,78
5,18	9,03	9,11	9,50	9,32	9,25	8,94	8,36	7,67	2,22	2,12	2,20	2,06	2,18	2,40	1,77
3,16	9,19	9,28	9,66	9,44	9,35	9,02	8,41	7,70	2,27	2,14	2,20	2,06	2,18	2,41	1,75
1,93	9,37	9,57	9,93	9,65	9,56	9,11	8,52	7,82	2,32	2,21	2,24	2,10	2,19	2,46	1,71
1,18	9,42	9,56	9,97	9,83	9,58	9,17	8,52	7,80	2,38	2,15	2,25	2,07	2,22	2,45	1,74
0,72	9,66	9,88	10,15	9,99	9,80	9,21	8,53	7,88	2,37	2,32	2,29	2,09	2,16	2,54	1,58
0,44	9,93	10,15	10,46	10,09	9,95	9,26	8,72	7,92	2,41	2,30	2,28	2,05	2,12	2,24	1,47
0,27	10,23	10,35	10,71	10,21	9,99	9,29	8,75	7,90	2,44	2,25	2,30	2,09	2,05	2,13	1,34
0,16	10,41	10,42	10,62	10,34	10,04	9,34	8,61	7,92	2,41	2,35	2,22	2,13	2,10	2,39	1,58
0,1	10,44	10,15	10,44	10,33	9,75	9,38	8,59	7,73	2,46	2,22	2,26	1,95	1,99	2,19	0,91

Tabla 7.4.3. Precisión estimada para el ligante CA-24 PAV. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-24 PAV															
Frecuencia angular [rad/s]	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
100	1,18	1,64	1,82	1,63	1,77	2,02	2,01	0,00	3,12	2,75	2,77	2,64	2,61	2,75	2,94
61,1	1,12	1,63	1,82	1,63	1,76	2,02	2,01	0,00	2,99	2,81	2,86	2,79	2,71	2,86	3,06
37,3	1,09	1,64	1,82	1,62	1,78	2,04	2,00	0,00	2,95	2,91	2,94	2,91	2,86	2,97	3,22
22,8	1,05	1,66	1,83	1,62	1,81	2,02	2,00	0,00	2,97	3,01	3,05	3,01	3,00	3,12	3,24
13,9	1,00	1,66	1,82	1,60	1,78	2,03	1,95	0,00	3,03	3,11	3,15	3,11	3,17	3,26	3,35
8,48	0,97	1,68	1,83	1,59	1,77	2,02	1,93	0,00	3,12	3,23	3,31	3,27	3,30	3,35	3,35
5,18	0,93	1,68	1,81	1,57	1,76	2,01	1,89	0,00	3,23	3,35	3,45	3,39	3,44	3,56	3,44
3,16	0,88	1,70	1,81	1,57	1,75	1,97	1,83	0,00	3,36	3,51	3,63	3,55	3,55	3,75	3,32
1,93	0,88	1,69	1,81	1,52	1,73	1,91	1,81	0,00	3,50	3,67	3,79	3,73	3,67	3,89	3,48
1,18	0,85	1,65	1,79	1,50	1,68	1,89	1,73	0,00	3,72	3,84	3,94	3,93	3,81	3,92	3,42
0,72	0,83	1,64	1,81	1,48	1,68	1,83	1,79	0,00	3,70	3,97	4,12	4,00	3,94	4,10	3,44
0,44	0,82	1,63	1,78	1,51	1,62	1,85	1,63	0,00	3,96	4,15	4,25	4,34	4,05	4,14	2,73
0,27	0,80	1,71	1,79	1,42	1,56	1,75	1,57	0,00	4,11	4,29	4,44	4,52	4,25	4,26	2,72
0,16	0,96	1,87	1,83	1,41	1,59	1,57	1,74	0,00	4,16	4,41	4,61	4,46	4,37	4,33	2,03
0,1	1,22	1,92	1,93	1,51	1,63	1,63	1,61	0,00	4,53	4,66	4,73	4,65	4,49	4,46	3,39

## 7.4.2. CA-14 (SE, RTFO y PAV)

Tabla 7.4.4. Precisión estimada para el ligante CA-14 SE. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-14 SE															
Frecuencia angular [rad/s]	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
100	2,15	0,12	0,71	1,57	2,34	1,91	1,65	0,91	4,06	3,60	3,22	3,05	2,20	2,14	2,41
61,1	2,25	0,22	0,75	1,41	2,02	1,55	1,39	0,55	4,17	3,69	3,29	3,20	2,18	2,17	2,48
37,3	2,24	0,21	0,64	1,08	1,72	1,11	1,02	0,31	4,29	3,78	3,33	3,26	2,21	2,20	2,57
22,8	2,34	0,40	0,85	0,98	1,40	0,68	0,59	0,03	4,40	3,87	3,37	3,36	2,21	2,23	2,62
13,9	2,33	0,42	0,77	0,72	0,82	0,11	0,14	0,56	4,49	3,98	3,41	3,41	2,17	2,20	2,62
8,48	2,42	0,46	0,42	0,54	0,40	0,39	0,37	0,88	4,59	4,09	3,45	3,42	2,17	2,16	2,60
5,18	2,35	0,62	0,22	0,08	0,12	0,73	0,87	1,22	4,69	4,17	3,49	3,41	2,13	2,14	2,63
3,16	2,61	0,49	0,00	0,26	0,66	1,44	0,95	1,60	4,78	4,26	3,49	3,40	2,10	2,08	2,60
1,93	2,61	0,65	0,15	0,47	1,17	1,83	1,38	1,96	4,88	4,35	3,50	3,37	2,08	2,10	2,45
1,18	2,36	0,76	0,60	0,77	1,71	2,41	1,72	2,29	4,94	4,35	3,43	3,35	2,01	2,03	2,32
0,72	2,32	0,97	0,73	1,47	2,21	2,81	2,31	2,71	4,97	4,40	3,46	3,31	2,00	2,18	2,52
0,44	2,68	1,14	1,23	2,15	2,91	3,36	2,77	3,12	4,98	4,37	3,44	3,26	1,86	1,97	2,58
0,27	2,55	1,32	1,44	2,60	3,32	3,88	3,39	3,58	5,03	4,33	3,42	3,20	1,86	1,63	2,98
0,16	2,13	1,32	1,49	2,60	3,99	4,38	4,00	4,22	5,10	4,35	3,40	3,20	2,19	2,10	2,96
0,1	2,02	1,48	2,04	2,87	3,99	4,86	4,38	4,76	5,07	4,24	3,35	3,43	1,74	1,84	3,10

Tabla 7.4.5. Precisión estimada para el ligante CA-14 RTFO. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-14 RTFO															
Frecuencia angular [rad/s]	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

100	12,82	12,46	11,69	10,79	9,98	8,51	7,72	6,43	0,48	0,29	0,54	0,37	0,19	0,22	0,25
61,1	12,92	12,54	11,78	10,96	9,98	8,50	7,76	6,54	0,48	0,28	0,56	0,35	0,21	0,20	0,36
37,3	13,06	12,65	11,85	11,02	10,09	8,41	7,58	6,55	0,47	0,27	0,56	0,35	0,23	0,17	0,44
22,8	13,11	12,68	11,93	11,09	9,99	8,31	7,44	6,49	0,48	0,27	0,57	0,36	0,24	0,13	0,47
13,9	13,20	12,76	12,04	11,14	9,90	8,19	7,32	6,42	0,48	0,26	0,59	0,38	0,26	0,13	0,49
8,48	13,26	12,88	12,08	11,12	9,81	8,05	7,18	6,30	0,47	0,25	0,60	0,42	0,27	0,10	0,54
5,18	13,51	12,92	12,05	11,07	9,68	7,90	7,04	6,18	0,50	0,24	0,61	0,45	0,28	0,06	0,58
3,16	13,47	12,93	12,03	10,97	9,52	7,75	6,90	6,04	0,47	0,27	0,65	0,47	0,33	0,01	0,64
1,93	13,59	12,90	12,05	10,94	9,38	7,50	6,63	5,91	0,55	0,32	0,63	0,52	0,41	0,09	0,66
1,18	13,42	12,90	11,89	10,72	9,19	7,41	6,53	5,73	0,49	0,28	0,65	0,55	0,40	0,16	0,85
0,72	13,57	12,85	11,78	10,62	8,99	7,14	6,18	5,57	0,64	0,35	0,73	0,65	0,45	0,22	1,00
0,44	13,43	12,76	11,92	10,43	8,84	6,99	5,84	5,33	0,70	0,36	0,80	0,65	0,47	0,39	1,26
0,27	13,42	12,63	11,83	10,26	8,63	6,70	5,54	5,11	0,77	0,42	0,85	0,76	0,48	0,51	1,10
0,16	13,50	12,46	11,37	10,07	8,36	6,47	5,22	4,83	0,85	0,55	0,93	0,78	0,56	0,42	0,67
0,1	12,82	12,34	10,90	9,69	8,05	6,42	5,21	4,51	0,82	0,55	0,98	0,84	0,45	0,47	0,76

Tabla 7.4.6. Precisión estimada para el ligante CA-14 PAV. (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-14 PAV														
	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
100	1,35	0,63	0,21	0,77	1,18	1,66	2,43	2,78	4,65	2,87	2,27	1,66	0,42	0,26	0,53
61,1	1,49	0,74	0,31	0,68	1,09	1,59	2,46	2,86	4,86	3,08	2,43	1,84	0,54	0,18	0,44
37,3	1,57	0,87	0,45	0,57	1,01	1,55	2,46	2,90	5,12	3,29	2,63	2,01	0,68	0,35	0,41
22,8	1,66	0,97	0,56	0,47	0,89	1,49	2,45	2,94	5,41	3,56	2,85	2,20	0,82	0,01	0,35
13,9	1,78	1,10	0,67	0,34	0,83	1,41	2,42	2,97	5,67	3,84	3,08	2,42	0,98	0,11	0,28
8,48	1,90	1,26	0,82	0,25	0,74	1,36	2,39	3,02	5,98	4,09	3,33	2,65	1,16	0,24	0,19
5,18	2,05	1,37	0,95	0,15	0,66	1,28	2,37	3,06	6,30	4,40	3,58	2,88	1,32	0,36	0,15
3,16	2,16	1,52	1,06	0,07	0,59	1,22	2,36	3,12	6,64	4,72	3,87	3,11	1,52	0,55	0,07
1,93	2,30	1,68	1,16	0,01	0,48	1,17	2,33	3,21	6,96	5,02	4,19	3,37	1,70	0,61	0,00
1,18	2,46	1,82	1,27	0,11	0,45	1,06	2,37	3,30	7,35	5,41	4,45	3,63	1,88	0,71	0,02
0,72	2,68	1,93	1,27	0,15	0,32	1,05	2,35	3,40	7,69	5,73	4,83	3,83	2,00	0,87	0,04
0,44	2,87	2,04	1,35	0,27	0,37	0,90	2,44	3,55	8,13	6,21	5,09	4,07	2,15	0,89	0,03
0,27	3,08	2,15	1,34	0,30	0,24	0,87	2,48	3,71	8,47	6,67	5,45	4,31	2,17	0,77	0,11
0,16	3,41	2,24	1,19	0,32	0,07	1,02	2,42	3,83	8,82	6,98	5,79	4,39	2,21	0,62	0,31
0,1	3,55	2,34	1,20	0,39	0,15	0,90	2,35	4,08	9,35	7,49	6,06	4,50	2,19	0,42	0,41

## 7.4.3. RAP (SE)

Tabla 7.4.7. Precisión estimada para el ligante RAP SE. (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Coeficientes de variación para dos muestras del ligante RAP SE														
	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
100	7,86	7,33	8,21	9,03	9,23	8,47	7,54	6,19	6,17	6,34	6,85	7,35	7,43	8,21	8,58
61,1	7,84	7,93	8,60	9,29	9,88	9,31	8,38	7,06	6,27	6,54	7,08	7,60	7,70	8,47	8,86
37,3	8,01	8,58	9,28	10,33	10,63	10,05	9,20	7,92	6,41	6,75	7,32	7,85	7,97	8,77	9,13
22,8	8,25	9,25	10,06	11,07	11,45	10,88	10,04	8,75	6,56	6,98	7,58	8,13	8,25	9,03	9,22
13,9	8,54	10,01	10,85	11,86	12,23	11,69	10,87	9,62	6,75	7,24	7,83	8,41	8,55	9,48	9,73

8,48	8,96	10,75	11,67	12,70	13,00	12,46	11,70	10,48	7,00	7,50	8,10	8,70	8,83	9,65	10,06
5,18	9,47	11,52	12,49	13,46	13,77	13,22	12,51	11,34	7,24	7,77	8,39	9,01	9,13	9,97	10,42
3,16	9,99	12,28	13,28	14,20	14,49	13,95	13,30	12,19	7,52	8,02	8,69	9,31	9,44	10,34	10,79
1,93	10,50	12,97	14,00	14,95	15,20	14,66	14,05	13,04	7,81	8,30	9,01	9,61	9,80	10,66	11,15
1,18	11,02	13,70	14,77	15,63	15,84	15,33	14,82	13,83	8,08	8,67	9,35	9,95	10,18	11,03	11,54
0,72	11,45	14,40	15,36	16,23	16,44	16,01	15,59	14,72	8,37	8,79	9,64	10,32	10,49	11,35	11,88
0,44	11,89	15,05	16,08	16,80	16,94	16,58	16,26	15,41	8,60	9,23	10,02	10,70	10,88	11,80	12,15
0,27	12,31	15,60	16,69	17,33	17,41	17,08	16,85	16,01	9,01	9,69	10,37	11,01	11,33	12,16	12,63
0,16	12,45	16,16	17,01	17,76	17,82	17,55	17,35	16,60	9,26	9,71	10,62	11,30	11,80	12,37	12,73
0,1	12,67	16,66	17,55	18,01	18,21	18,14	18,10	17,16	9,52	10,28	11,05	11,76	12,09	12,91	12,82

#### 7.4.4. CA-24 con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Tabla 7.4.8. Precisión estimada para el ligante CA-24 con LPO-M 8,6% SE. (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-24 (% DO SE)														
	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
100	5,82	6,84	6,70	6,43	6,44	5,84	5,51	4,08	40,05	38,80	37,64	36,69	35,65	34,14	32,50
61,1	5,99	6,91	6,73	6,43	6,39	5,73	5,31	4,29	40,90	39,61	38,42	37,47	36,21	34,54	32,75
37,3	6,01	7,10	6,80	6,49	6,44	5,82	5,32	4,42	41,78	39,76	39,83	38,33	36,83	35,01	33,08
22,8	6,16	7,17	6,92	6,57	6,51	5,89	5,37	4,67	42,87	41,35	39,96	38,95	37,48	35,46	33,41
13,9	6,28	7,26	7,01	6,68	6,62	6,00	5,45	4,81	43,66	42,23	40,74	39,65	38,08	35,90	33,69
8,48	6,41	7,38	7,09	6,77	6,73	6,11	5,57	4,96	44,60	43,08	41,53	40,38	38,60	36,30	33,95
5,18	6,55	7,49	7,21	6,89	6,83	6,21	5,68	5,07	45,58	43,94	42,35	40,99	39,08	36,69	34,26
3,16	6,67	7,57	7,37	6,97	6,92	6,33	5,77	5,25	46,56	44,78	43,09	41,57	39,53	37,01	34,45
1,93	6,85	7,85	7,53	7,24	7,12	6,50	5,98	5,31	47,48	45,67	43,70	42,09	39,94	37,20	34,51
1,18	7,02	7,85	7,63	7,23	7,15	6,62	5,98	5,54	48,41	46,39	44,35	42,59	40,33	37,38	34,73
0,72	7,18	8,11	7,75	7,51	7,43	6,77	6,17	5,52	49,36	47,10	44,82	42,97	40,62	37,56	34,53
0,44	7,33	8,37	8,04	7,79	7,64	6,98	6,47	5,68	50,20	47,87	45,46	43,30	40,52	37,56	34,32
0,27	7,60	8,74	8,30	8,05	7,79	7,15	6,68	5,84	50,93	48,38	45,82	43,63	40,91	37,48	34,15
0,16	7,97	8,93	8,37	8,20	7,94	7,27	6,78	6,05	51,56	48,88	46,12	43,76	40,95	36,74	33,41
0,1	8,20	8,73	8,60	7,95	7,70	7,26	6,79	6,31	52,19	49,24	46,31	44,38	40,38	36,55	32,41

Tabla 7.4.9. Precisión estimada para el ligante CA-24 con LPO-M 8,6% RTFO. (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-24 (% DO RTFO)							
	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
100	39,36	12,74	3,82	3,38	3,30	3,36	3,40	3,34
61,1	34,81	10,86	4,01	3,69	3,65	3,86	4,09	4,09
37,3	30,89	8,49	4,19	3,93	4,06	4,31	4,63	4,60
22,8	26,95	6,17	4,35	4,19	4,39	4,77	5,14	5,04
13,9	22,45	5,06	4,57	4,45	4,78	5,23	5,61	5,43
8,48	17,42	5,00	4,79	4,77	5,20	5,69	6,02	5,65
5,18	11,59	5,06	5,02	5,11	5,62	6,14	6,39	5,81
3,16	7,39	5,20	5,21	5,44	6,07	6,61	6,68	5,96
1,93	6,45	5,46	5,60	5,94	6,56	6,90	6,92	6,02
1,18	6,31	5,48	5,83	6,15	6,95	7,26	7,14	6,15

<b>0,72</b>	6,30	5,80	6,21	6,72	7,40	7,36	7,27	6,23
<b>0,44</b>	6,35	6,03	6,53	7,21	7,79	7,66	7,58	6,62
<b>0,27</b>	6,37	6,26	6,89	7,64	8,12	7,60	7,35	6,56
<b>0,16</b>	6,05	6,49	7,28	7,91	8,22	7,57	7,54	6,40
<b>0,1</b>	6,06	6,22	7,11	7,72	8,09	7,76	7,34	6,14

Tabla 7.4.10. Precisión estimada para el ligante CA-24 con LPO-M 8,6% PAV. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-24 (% DO PAV)								
Frecuencia angular [rad/s]	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
<b>100</b>	20,88	19,74	19,26	18,79	18,32	17,73	17,14	16,19
<b>61,1</b>	21,23	19,87	19,30	18,76	18,35	17,81	17,18	16,20
<b>37,3</b>	21,46	19,96	19,38	18,94	18,34	17,83	17,37	16,17
<b>22,8</b>	21,64	20,04	19,45	19,02	18,46	17,83	17,18	16,34
<b>13,9</b>	21,77	20,12	19,53	19,07	18,57	17,85	17,15	16,12
<b>8,48</b>	21,93	20,22	19,59	19,18	18,62	17,85	17,13	16,04
<b>5,18</b>	22,14	20,29	19,65	19,22	18,64	17,83	17,11	15,98
<b>3,16</b>	22,23	20,37	19,72	19,29	18,67	17,81	17,03	15,94
<b>1,93</b>	22,32	20,42	19,78	19,32	18,67	17,74	16,96	15,88
<b>1,18</b>	22,47	20,49	19,84	19,36	18,62	17,74	16,94	15,86
<b>0,72</b>	22,48	20,52	19,84	19,30	18,68	17,62	16,84	15,72
<b>0,44</b>	22,61	20,64	19,90	19,33	18,53	17,65	16,76	15,74
<b>0,27</b>	22,66	20,66	19,92	19,28	18,37	17,51	16,68	15,63
<b>0,16</b>	22,64	20,52	19,82	19,08	18,35	17,29	16,58	15,48
<b>0,1</b>	22,52	20,58	19,95	19,19	18,27	17,34	16,49	15,68

#### 7.4.5. CA-14 con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Tabla 7.4.11. Precisión estimada para el ligante CA-14 con LPO-M 5,3% SE. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-14 (% DO SE)															
Frecuencia angular [rad/s]	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
<b>100</b>	0,42	3,82	5,06	6,36	7,16	9,98	12,20	14,23	8,65	8,19	7,67	7,31	6,69	6,83	6,95
<b>61,1</b>	0,15	3,12	4,21	5,58	6,40	8,96	11,42	13,58	8,97	8,33	8,01	7,51	7,14	6,94	7,02
<b>37,3</b>	0,78	2,50	3,69	4,81	5,55	8,39	11,00	13,25	9,18	8,63	7,98	7,93	7,17	7,22	7,06
<b>22,8</b>	1,26	1,88	3,13	4,16	5,14	7,88	10,77	12,93	9,63	9,49	8,70	8,38	7,58	7,49	7,34
<b>13,9</b>	1,86	1,42	2,36	3,48	4,43	7,43	10,50	12,78	10,06	9,36	9,10	8,54	7,84	7,88	7,26
<b>8,48</b>	2,85	0,58	1,61	2,78	3,65	7,15	9,89	12,50	10,33	9,62	9,12	8,89	8,13	7,91	7,68
<b>5,18</b>	3,49	0,09	0,78	2,12	3,37	6,77	9,82	12,20	10,76	10,03	9,70	9,13	8,37	7,87	7,80
<b>3,16</b>	4,18	0,80	0,08	1,38	2,92	6,32	9,47	11,96	11,19	10,20	10,10	9,50	8,68	8,34	7,93
<b>1,93</b>	4,67	1,51	0,67	1,08	2,46	6,15	9,07	11,61	11,48	10,93	10,46	9,82	8,86	8,57	8,12
<b>1,18</b>	5,08	2,17	1,32	0,32	2,08	5,40	8,84	11,39	12,13	11,28	10,82	9,86	9,13	8,77	8,13
<b>0,72</b>	5,78	2,77	2,20	0,16	1,63	5,24	8,43	10,85	12,67	11,71	11,24	10,32	9,19	8,84	141,17
<b>0,44</b>	6,73	3,67	2,46	0,75	1,59	4,90	7,67	10,41	13,15	12,08	11,43	10,56	9,41	8,82	141,17
<b>0,27</b>	7,30	4,18	2,93	1,16	1,47	4,35	7,31	10,10	13,72	12,53	11,65	10,80	9,69	141,17	141,17
<b>0,16</b>	7,60	4,01	3,44	1,30	0,70	3,96	7,00	9,50	14,13	12,98	12,12	10,78	141,17	141,17	141,17
<b>0,1</b>	7,90	5,33	3,66	1,41	0,53	3,59	6,44	9,46	14,72	13,34	12,36	11,24	141,18	141,17	141,17

Tabla 7.4.12. Precisión estimada para el ligante CA-14 con LPO-M 5,3% RTFO. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-14 (% DO RTFO)								
Frecuencia angular [rad/s]	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
100	12,15	11,64	11,28	11,28	10,45	9,23	7,72	6,52
61,1	11,73	11,53	11,24	11,43	9,79	9,09	7,59	6,92
37,3	11,49	11,49	11,17	11,15	10,09	8,60	7,03	6,76
22,8	11,33	11,44	11,10	10,98	9,60	7,99	6,37	6,43
13,9	11,26	11,37	11,01	10,74	9,10	7,22	5,69	6,14
8,48	11,19	11,36	10,84	10,37	8,51	6,46	5,06	5,97
5,18	11,22	11,32	10,64	9,98	7,87	5,69	4,59	5,89
3,16	11,21	11,19	10,41	9,59	7,19	4,98	4,21	5,80
1,93	11,12	11,09	10,14	9,03	6,37	4,49	4,12	5,77
1,18	11,06	11,01	9,85	8,47	5,89	4,05	3,95	5,84
0,72	10,93	10,84	9,50	7,72	5,09	3,94	4,00	6,21
0,44	10,83	10,47	9,06	7,29	4,52	3,59	4,16	6,09
0,27	10,68	10,26	8,60	6,72	4,11	3,61	4,12	6,29
0,16	10,44	10,20	8,26	5,76	3,93	4,07	4,00	6,45
0,1	10,37	9,82	7,86	5,59	4,29	3,78	4,06	7,16

Tabla 7.4.13. Precisión estimada para el ligante CA-14 con LPO-M 5,3% PAV. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-14 (% DO PAV)								
Frecuencia angular [rad/s]	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
100	1,13	0,79	0,63	0,92	1,46	1,85	2,39	2,85
61,1	1,39	1,02	0,88	1,05	1,54	1,92	2,44	2,91
37,3	1,57	1,14	0,94	1,16	1,59	1,96	2,48	2,96
22,8	1,65	1,19	0,97	1,21	1,67	2,01	2,51	2,99
13,9	1,67	1,21	1,00	1,28	1,73	2,06	2,56	3,00
8,48	1,64	1,18	1,00	1,30	1,77	2,09	2,58	3,04
5,18	1,58	1,16	1,01	1,34	1,78	2,12	2,60	3,05
3,16	1,55	1,11	0,99	1,35	1,82	2,14	2,60	3,06
1,93	1,48	1,12	0,98	1,34	1,81	2,16	2,59	3,10
1,18	1,40	1,03	0,98	1,38	1,85	2,14	2,62	3,11
0,72	1,37	1,00	0,95	1,29	1,78	2,11	2,62	3,20
0,44	1,27	0,90	0,95	1,32	1,83	2,07	2,70	3,12
0,27	1,25	0,87	0,92	1,32	1,78	2,04	2,45	2,99
0,16	1,36	0,94	0,82	1,19	1,60	2,11	2,57	3,19
0,1	1,17	0,78	0,90	1,15	1,70	1,89	2,59	3,32

#### 7.4.6. RAP con LPO-M en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Tabla 7.4.14. Precisión estimada para el ligante RAP con LPO-M 13,4% SE. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante RAP (% DO SE)															
Frecuencia angular [rad/s]	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

100	2,08	3,99	4,22	4,40	4,57	4,73	4,84	5,07	17,43	16,91	16,39	15,41	14,73	14,37	13,40
61,1	1,97	3,82	4,03	4,18	4,33	4,51	4,70	5,03	18,02	17,46	16,82	15,97	15,23	14,74	13,62
37,3	1,87	3,65	3,80	3,91	4,04	4,25	4,52	4,89	18,64	18,04	17,51	16,89	15,66	15,12	13,84
22,8	1,73	3,50	3,56	3,60	3,73	3,99	4,29	4,72	19,22	18,76	18,15	17,03	16,09	15,47	14,05
13,9	1,59	3,27	3,31	3,28	3,39	3,72	4,07	4,53	20,00	19,41	18,75	17,55	16,49	15,75	14,22
8,48	1,39	3,03	2,98	2,95	3,08	3,43	3,83	4,31	20,73	20,11	19,34	18,06	16,86	15,99	14,36
5,18	1,21	2,75	2,65	2,58	2,75	3,17	3,60	4,12	21,52	20,82	19,95	18,57	17,21	16,21	14,47
3,16	0,97	2,46	2,28	2,21	2,43	2,90	3,39	3,88	22,30	21,52	20,49	18,96	17,54	16,40	14,53
1,93	0,69	2,12	1,91	1,81	2,13	2,61	3,16	3,60	23,06	22,18	20,93	19,31	17,76	16,54	14,55
1,18	0,39	1,74	1,57	1,46	1,80	2,31	2,93	3,36	23,83	22,86	21,43	19,60	17,90	16,62	14,61
0,72	0,07	1,32	1,01	1,18	1,48	2,11	2,55	3,18	24,63	23,38	21,71	19,82	18,19	16,59	14,30
0,44	0,44	0,84	0,71	0,81	1,14	1,69	2,32	2,80	25,40	23,94	22,15	20,18	18,16	16,51	14,67
0,27	0,83	0,45	0,34	0,39	0,79	1,35	2,04	2,58	25,98	24,33	22,46	20,37	18,33	16,29	14,17
0,16	1,71	0,15	0,24	0,02	0,45	1,17	1,65	2,37	26,59	24,78	22,71	20,09	18,25	16,15	13,49
0,1	2,18	0,55	0,61	0,29	0,21	0,75	1,57	2,01	26,98	25,12	22,50	20,23	18,29	16,18	14,18

Tabla 7.4.15. Precisión estimada para el ligante RAP con LPO-M 13,4% RTFO. (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Coeficientes de variación para dos muestras del ligante RAP (% DO RTFO)														
	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
100	37,31	36,19	34,53	33,17	31,78	30,27	28,30	26,03	37,31	36,19	34,53	33,17	31,78	30,27	28,30
61,1	37,84	36,46	34,89	33,75	31,66	30,42	28,44	26,10	37,84	36,46	34,89	33,75	31,66	30,42	28,44
37,3	38,11	36,63	34,83	33,32	31,89	30,56	28,12	25,83	38,11	36,63	34,83	33,32	31,89	30,56	28,12
22,8	38,26	36,67	34,88	33,29	31,63	30,12	27,97	25,58	38,26	36,67	34,88	33,29	31,63	30,12	27,97
13,9	38,26	36,66	34,83	33,14	31,50	29,74	27,50	25,03	38,26	36,66	34,83	33,14	31,50	29,74	27,50
8,48	38,29	36,64	34,69	33,01	31,21	29,35	27,02	24,54	38,29	36,64	34,69	33,01	31,21	29,35	27,02
5,18	38,23	36,52	34,51	32,79	30,88	28,90	26,50	24,06	38,23	36,52	34,51	32,79	30,88	28,90	26,50
3,16	38,07	36,33	34,32	32,51	30,46	28,43	25,99	23,59	38,07	36,33	34,32	32,51	30,46	28,43	25,99
1,93	37,88	36,03	34,05	32,19	30,12	27,89	25,48	23,22	37,88	36,03	34,05	32,19	30,12	27,89	25,48
1,18	37,66	35,91	33,70	31,84	29,54	27,40	24,93	22,87	37,66	35,91	33,70	31,84	29,54	27,40	24,93
0,72	37,41	35,55	33,39	31,39	29,05	26,82	24,52	22,54	37,41	35,55	33,39	31,39	29,05	26,82	24,52
0,44	37,03	35,00	32,97	30,73	28,54	26,18	24,10	22,28	37,03	35,00	32,97	30,73	28,54	26,18	24,10
0,27	36,68	34,43	32,46	30,10	27,97	25,59	23,62	22,07	36,68	34,43	32,46	30,10	27,97	25,59	23,62
0,16	36,57	34,08	31,82	29,53	27,20	25,02	23,17	21,93	36,57	34,08	31,82	29,53	27,20	25,02	23,17
0,1	36,56	33,79	31,22	28,91	26,22	24,45	22,74	21,16	36,56	33,79	31,22	28,91	26,22	24,45	22,74

Tabla 7.4.16. Precisión estimada para el ligante RAP con LPO-M 13,4% PAV. (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Coeficientes de variación para dos muestras del ligante RAP (% DO PAV)														
	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
100	1,69	0,32	3,51	4,04	4,05	3,68	3,34	3,18	1,69	0,32	3,51	4,04	4,05	3,68	3,34
61,1	0,13	0,39	3,52	4,14	4,18	3,82	3,43	3,22	0,13	0,39	3,52	4,14	4,18	3,82	3,43
37,3	1,14	0,67	3,90	4,33	4,40	3,87	3,55	3,27	1,14	0,67	3,90	4,33	4,40	3,87	3,55
22,8	1,90	1,04	3,99	4,63	4,77	4,01	3,59	3,39	1,90	1,04	3,99	4,63	4,77	4,01	3,59
13,9	2,60	0,96	4,18	4,74	4,60	4,10	3,75	3,35	2,60	0,96	4,18	4,74	4,60	4,10	3,75
8,48	3,27	0,90	4,24	4,97	4,78	4,13	3,73	3,57	3,27	0,90	4,24	4,97	4,78	4,13	3,73

5,18	3,90	0,73	4,53	5,27	4,92	4,24	3,85	3,52	3,90	0,73	4,53	5,27	4,92	4,24	3,85
3,16	4,59	0,61	4,62	5,62	4,99	4,24	3,77	3,72	4,59	0,61	4,62	5,62	4,99	4,24	3,77
1,93	6,51	0,59	4,71	5,44	4,96	4,24	3,91	4,05	6,51	0,59	4,71	5,44	4,96	4,24	3,91
1,18	7,95	0,39	4,84	5,49	4,96	4,24	3,82	3,74	7,95	0,39	4,84	5,49	4,96	4,24	3,82
0,72	10,50	0,58	4,75	5,58	4,89	4,20	4,12	4,17	10,50	0,58	4,75	5,58	4,89	4,20	4,12
0,44	15,16	0,39	5,09	5,59	4,93	4,47	4,07	4,31	15,16	0,39	5,09	5,59	4,93	4,47	4,07
0,27	26,70	0,70	5,15	5,51	4,76	4,15	4,31	4,53	26,70	0,70	5,15	5,51	4,76	4,15	4,31
0,16	55,28	1,23	4,94	5,29	4,92	4,27	4,77	4,78	55,28	1,23	4,94	5,29	4,92	4,27	4,77
0,1	77,98	1,64	4,89	5,15	4,62	4,43	4,71	4,70	77,98	1,64	4,89	5,15	4,62	4,43	4,71

## 7.4.7. CA-24 con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Tabla 7.4.17. Precisión estimada para el ligante CA-24 con RC 5,9% SE. (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-24 (% DO SE)														
	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
100	7,03	5,17	3,92	3,36	2,57	1,99	1,57	1,83	1,82	1,67	1,38	43,65	41,30	1,20	1,99
61,1	7,12	5,24	4,02	3,38	2,67	2,05	1,67	1,79	1,80	1,65	1,37	44,44	42,07	1,03	2,00
37,3	7,23	5,30	4,04	3,43	2,73	2,09	1,73	1,76	1,79	1,66	1,36	45,34	42,98	0,92	2,01
22,8	7,29	5,36	4,06	3,47	2,78	2,12	1,77	1,73	1,68	1,67	1,34	45,88	43,59	0,89	2,01
13,9	7,40	5,43	4,12	3,52	2,83	2,17	1,79	1,72	1,77	1,64	1,32	46,64	44,33	0,84	2,06
8,48	7,48	5,51	4,16	3,50	2,90	2,18	1,82	1,72	1,76	1,63	1,32	47,34	45,01	0,82	2,06
5,18	7,54	5,56	4,23	3,54	2,96	2,23	1,87	1,74	1,77	1,63	1,32	47,92	45,60	0,80	2,04
3,16	7,66	5,63	4,32	3,54	2,99	2,25	1,93	1,74	1,76	1,64	1,32	48,46	46,16	0,81	1,94
1,93	7,72	5,78	4,32	3,65	3,03	2,32	1,90	1,68	1,74	1,64	1,29	48,95	46,71	0,78	1,91
1,18	7,75	5,68	4,50	3,55	3,15	2,35	1,96	1,73	1,74	1,61	1,28	49,39	47,21	0,69	1,76
0,72	7,80	5,83	4,39	3,76	3,29	2,31	2,03	1,72	1,71	1,56	1,29	49,68	47,65	0,46	1,57
0,44	8,05	5,99	4,33	3,81	3,11	2,53	1,87	1,67	1,70	1,56	1,20	50,02	48,14	0,32	1,55
0,27	8,04	6,04	4,31	3,85	3,13	2,60	1,83	1,56	1,65	1,52	1,11	50,11	48,49	0,05	1,20
0,16	7,83	5,83	4,31	3,88	3,33	2,46	1,95	1,53	1,61	1,41	1,13	50,09	48,87	0,02	0,74
0,1	7,96	5,60	4,60	3,59	3,39	2,41	1,97	1,42	1,55	1,33	0,88	50,17	49,22	0,43	0,22

Tabla 7.4.18. Precisión estimada para el ligante CA-24 con RC 5,9% RTFO. (Elaboración propia)

Frecuencia angular [rad/s]	Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-24 (% DO RTFO)							
	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
100	8,65	6,28	5,23	4,75	4,39	4,14	4,07	4,35
61,1	8,65	6,25	5,34	4,61	4,28	3,98	4,08	4,32
37,3	8,62	6,21	5,11	4,56	4,15	3,87	3,97	4,31
22,8	8,54	6,15	5,06	4,40	4,03	3,79	3,96	4,32
13,9	8,54	6,05	4,94	4,29	3,95	3,77	3,98	4,36
8,48	8,49	5,94	4,82	4,15	3,89	3,77	3,99	4,42
5,18	8,39	5,86	4,70	4,04	3,84	3,79	4,04	4,45
3,16	8,28	5,68	4,57	3,94	3,80	3,83	4,03	4,49
1,93	8,17	5,67	4,47	3,84	3,81	3,83	4,16	4,63
1,18	8,09	5,39	4,29	3,82	3,90	4,02	4,15	4,63
0,72	8,04	5,40	4,25	3,79	4,05	4,02	4,35	4,74

<b>0,44</b>	7,88	5,37	4,21	3,82	3,98	4,10	4,50	4,74
<b>0,27</b>	7,72	5,27	4,16	3,84	3,99	4,21	4,59	4,86
<b>0,16</b>	7,75	5,03	4,19	3,91	4,30	4,23	4,61	5,06
<b>0,1</b>	7,48	4,38	4,09	4,09	4,38	4,56	4,57	5,02

*Tabla 7.4.19. Precisión estimada para el ligante CA-24 con RC 5,9% PAV. (Elaboración propia)*

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-24 (% DO PAV)								
Frecuencia angular [rad/s]	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
<b>100</b>	4,80	3,77	3,43	3,30	3,19	3,08	3,32	3,64
<b>61,1</b>	4,63	3,60	3,00	3,08	2,91	2,77	2,95	3,25
<b>37,3</b>	4,47	3,40	3,04	2,81	2,63	2,42	2,58	2,92
<b>22,8</b>	4,29	3,20	2,79	2,51	2,31	2,06	2,24	2,61
<b>13,9</b>	4,09	2,98	2,54	2,22	1,96	1,66	1,88	2,35
<b>8,48</b>	3,87	2,76	2,25	1,88	1,56	1,28	1,55	2,12
<b>5,18</b>	3,62	2,48	1,96	1,52	1,13	0,86	1,24	1,89
<b>3,16</b>	3,40	2,20	1,63	1,12	0,68	0,48	0,95	1,69
<b>1,93</b>	3,13	1,90	1,26	0,68	0,23	0,08	0,64	1,47
<b>1,18</b>	2,89	1,60	0,88	0,24	0,18	0,28	0,45	1,25
<b>0,72</b>	2,69	1,23	0,52	0,26	0,70	0,59	0,13	1,17
<b>0,44</b>	2,41	0,91	0,06	0,74	1,04	0,90	0,04	0,86
<b>0,27</b>	2,15	0,58	0,47	1,23	1,48	1,20	0,37	0,60
<b>0,16</b>	1,96	0,12	0,92	1,70	1,91	1,55	0,70	0,37
<b>0,1</b>	1,79	0,17	1,36	2,15	2,30	1,97	0,95	0,23

#### 7.4.8. CA-14 con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

*Tabla 7.4.20. Precisión estimada para el ligante CA-14 con RC 7,6% SE. (Elaboración propia)*

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-14 (% DO SE)															
Frecuencia angular [rad/s]	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
<b>100</b>	0,42	0,08	1,10	1,76	2,28	3,26	3,99	4,97	0,28	0,89	0,56	41,06	42,90	2,04	1,54
<b>61,1</b>	0,38	0,14	1,17	1,83	2,35	3,47	4,37	5,00	0,33	0,99	0,58	41,75	43,66	2,10	1,59
<b>37,3</b>	0,32	0,17	1,20	1,87	2,39	3,54	4,56	4,94	0,39	1,08	0,41	42,49	44,49	2,13	1,65
<b>22,8</b>	0,28	0,20	1,24	1,87	2,43	3,58	4,65	4,99	0,43	1,14	0,62	43,13	45,20	2,18	1,68
<b>13,9</b>	0,24	0,27	1,26	1,88	2,45	3,62	4,68	4,98	0,48	1,19	0,66	43,89	46,00	2,23	1,73
<b>8,48</b>	0,15	0,32	1,26	1,91	2,46	3,64	4,70	4,98	0,53	1,24	0,71	44,48	46,67	2,26	1,76
<b>5,18</b>	0,08	0,38	1,28	1,94	2,51	3,67	4,71	4,99	0,55	1,30	0,74	45,04	47,33	2,30	1,81
<b>3,16</b>	0,06	0,45	1,31	1,98	2,58	3,69	4,72	4,99	0,60	1,37	0,79	45,58	47,93	2,36	1,78
<b>1,93</b>	0,10	0,51	1,50	2,18	2,76	3,69	4,74	5,05	0,69	1,40	0,83	46,07	48,47	2,42	1,76
<b>1,18</b>	0,24	0,66	1,37	2,12	2,68	3,85	4,77	4,97	0,70	1,48	0,90	46,47	49,03	2,37	1,79
<b>0,72</b>	0,33	0,80	1,62	2,44	2,99	3,84	4,75	5,16	0,74	1,47	0,84	46,84	49,40	2,30	1,62
<b>0,44</b>	0,40	0,62	1,94	2,71	3,19	3,88	4,94	5,12	0,85	1,58	0,97	47,15	49,81	2,22	1,48
<b>0,27</b>	0,60	0,65	2,25	3,04	3,41	3,93	4,94	5,21	0,91	1,66	1,05	47,58	50,05	2,00	1,54
<b>0,16</b>	0,93	1,16	2,39	3,26	3,63	4,04	4,80	5,34	0,88	1,62	0,99	47,64	50,14	1,72	1,32
<b>0,1</b>	0,99	1,58	2,27	3,05	3,55	4,17	4,73	5,31	0,93	1,71	1,03	47,85	50,37	1,34	0,78

Tabla 7.4.21. Precisión estimada para el ligante CA-14 con RC 7,6% RTFO. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-14 (% DO RTFO)								
Frecuencia angular [rad/s]	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
100	7,92	6,12	5,90	6,00	6,01	5,81	5,14	4,87
61,1	7,92	6,06	5,90	5,88	5,84	5,67	4,99	4,72
37,3	7,94	6,01	5,73	5,84	5,75	5,61	4,99	4,69
22,8	7,93	5,98	5,59	5,69	5,68	5,61	5,00	4,66
13,9	7,89	5,92	5,64	5,67	5,67	5,64	5,03	4,66
8,48	7,82	5,91	5,59	5,60	5,65	5,71	5,11	4,68
5,18	7,75	5,82	5,51	5,57	5,71	5,77	5,11	4,69
3,16	7,74	5,77	5,40	5,59	5,80	5,87	5,17	4,68
1,93	7,69	5,72	5,49	5,45	5,76	5,86	5,22	4,68
1,18	7,58	5,60	5,29	5,63	6,00	6,07	5,25	4,65
0,72	7,49	5,50	5,45	5,49	5,92	6,03	5,27	4,60
0,44	7,68	5,66	5,52	5,62	5,99	6,16	5,51	4,52
0,27	7,78	5,67	5,65	5,65	6,13	6,28	5,64	4,26
0,16	7,43	5,41	5,75	5,70	6,26	6,43	5,77	4,25
0,1	7,47	5,22	5,30	6,34	6,94	7,06	6,05	4,09

Tabla 7.4.22. Precisión estimada para el ligante CA-14 con RC 7,6% PAV. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante CA-14 (% DO PAV)								
Frecuencia angular [rad/s]	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
100	8,83	6,94	2,70	2,38	2,18	2,34	2,84	4,36
61,1	8,96	7,01	2,62	2,35	2,18	2,39	2,95	4,57
37,3	9,06	7,02	2,63	2,30	2,18	2,39	2,99	4,70
22,8	9,15	7,07	2,55	2,27	2,14	2,39	2,98	4,76
13,9	9,29	7,09	2,52	2,23	2,15	2,37	2,95	4,79
8,48	9,49	7,15	2,44	2,20	2,12	2,31	2,90	4,81
5,18	9,58	7,13	2,37	2,18	2,08	2,24	2,82	4,82
3,16	9,73	7,13	2,34	2,14	2,03	2,14	2,70	4,78
1,93	9,86	7,07	2,27	2,06	1,97	2,00	2,55	4,75
1,18	10,02	6,95	2,24	2,03	1,90	1,88	2,43	4,68
0,72	10,19	6,74	2,19	1,95	1,74	1,62	2,13	4,59
0,44	10,36	6,41	2,13	1,88	1,65	1,46	1,95	4,46
0,27	10,60	5,95	2,09	1,79	1,53	1,18	1,61	4,23
0,16	10,61	5,36	2,02	1,57	1,29	0,73	1,20	4,06
0,1	10,95	4,87	1,95	1,62	0,98	0,36	0,86	3,70

#### 7.4.9. RAP con RC en dosis óptimas (SE, RTFO y PAV)

Tabla 7.4.23. Precisión estimada para el ligante RAP con RC 10,3% SE. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante RAP (% DO SE)															
Frecuencia angular [rad/s]	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
100	13,12	11,33	10,50	9,78	9,22	8,59	7,13	6,77	1,27	1,32	1,15	0,66	1,07	0,91	0,06

<b>61,1</b>	13,49	11,10	10,27	9,53	8,92	8,15	6,85	6,22	1,20	1,29	1,14	0,51	1,05	0,78	0,10
<b>37,3</b>	13,20	11,12	10,11	9,36	8,71	7,93	6,73	5,99	1,16	1,26	1,10	0,41	1,06	0,74	0,18
<b>22,8</b>	13,24	11,01	10,02	9,22	8,60	7,81	6,68	5,83	1,45	1,23	1,10	0,34	1,04	0,73	0,23
<b>13,9</b>	13,28	10,92	9,91	9,10	8,50	7,72	6,64	5,74	1,06	1,19	1,07	0,25	1,02	0,71	0,26
<b>8,48</b>	13,27	10,86	9,78	8,99	8,43	7,67	6,59	5,70	1,01	1,14	1,06	0,26	0,98	0,71	0,28
<b>5,18</b>	13,24	10,76	9,66	8,89	8,35	7,62	6,57	5,69	0,99	1,11	1,02	0,22	0,95	0,69	0,31
<b>3,16</b>	13,20	10,68	9,59	8,81	8,29	7,57	6,56	5,66	0,94	1,07	1,03	0,18	0,95	0,63	0,33
<b>1,93</b>	13,11	10,45	9,39	8,73	8,25	7,52	6,49	5,60	0,89	1,10	1,00	0,21	0,91	0,59	0,32
<b>1,18</b>	13,02	10,49	9,37	8,64	8,18	7,51	6,58	5,58	0,92	1,00	0,96	0,19	0,87	0,52	0,34
<b>0,72</b>	12,94	10,32	9,11	8,58	8,13	7,45	6,42	5,63	0,83	1,03	0,93	0,18	0,83	0,51	0,41
<b>0,44</b>	12,97	9,89	9,09	8,56	8,14	7,41	6,43	5,49	0,79	0,96	0,92	0,12	0,86	0,45	0,44
<b>0,27</b>	12,82	9,64	8,96	8,47	8,10	7,37	6,41	5,46	0,77	0,92	0,86	0,07	0,66	0,42	0,52
<b>0,16</b>	12,47	9,69	8,67	8,36	7,98	7,36	6,29	5,40	0,69	0,87	0,75	0,05	0,67	0,05	1,00
<b>0,1</b>	12,09	9,84	8,75	8,25	7,94	7,43	6,42	5,10	0,72	0,81	0,66	0,04	0,41	0,02	1,18

Tabla 7.4.24. Precisión estimada para el ligante RAP con RC 10,3% RTFO. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante RAP (% DO RTFO)								
Frecuencia angular [rad/s]	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
<b>100</b>	3,71	2,99	3,25	3,37	3,34	3,03	3,61	4,48
<b>61,1</b>	3,87	3,19	3,41	3,61	3,68	3,60	4,28	5,24
<b>37,3</b>	3,95	3,27	3,52	3,66	3,76	3,78	4,50	5,63
<b>22,8</b>	4,05	3,31	3,52	3,66	3,73	3,84	4,64	5,83
<b>13,9</b>	4,14	3,34	3,49	3,57	3,64	3,88	4,73	5,97
<b>8,48</b>	4,21	3,35	3,41	3,46	3,57	3,90	4,86	6,07
<b>5,18</b>	4,26	3,34	3,29	3,36	3,52	3,99	4,97	6,21
<b>3,16</b>	4,25	3,32	3,21	3,27	3,54	4,13	5,07	6,40
<b>1,93</b>	4,33	3,29	3,08	3,21	3,57	4,20	5,30	6,49
<b>1,18</b>	4,27	3,22	3,05	3,21	3,56	4,38	5,38	6,66
<b>0,72</b>	4,42	3,15	2,93	3,23	3,61	4,50	5,66	6,73
<b>0,44</b>	4,23	3,03	2,90	3,17	3,93	4,50	5,89	7,05
<b>0,27</b>	4,07	2,95	2,85	3,16	4,06	4,66	6,03	7,13
<b>0,16</b>	4,43	2,80	2,80	3,44	3,88	4,85	6,17	7,26
<b>0,1</b>	3,92	2,71	2,95	3,48	3,96	5,24	6,14	7,64

Tabla 7.4.25. Precisión estimada para el ligante RAP con RC 10,3% PAV. (Elaboración propia)

Coeficientes de variación para dos muestras del ligante RAP (% DO PAV)								
Frecuencia angular [rad/s]	T=5 °C	T=10 °C	T=15 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=40 °C
<b>100</b>	22,10	18,50	15,37	15,10	14,85	14,34	13,29	11,97
<b>61,1</b>	22,17	18,18	15,87	15,10	14,82	14,26	13,17	11,83
<b>37,3</b>	22,32	18,69	15,06	15,05	14,77	14,13	12,99	11,65
<b>22,8</b>	22,39	18,75	15,27	15,02	14,64	14,10	12,78	11,47
<b>13,9</b>	22,45	18,80	15,43	14,96	14,51	13,73	12,57	11,31
<b>8,48</b>	22,51	18,86	15,40	14,87	14,36	13,52	12,35	11,14
<b>5,18</b>	22,53	18,86	15,37	14,76	14,17	13,30	12,16	11,02
<b>3,16</b>	22,53	18,81	15,29	14,63	13,95	13,06	11,97	10,92

<b>1,93</b>	22,51	18,70	15,21	14,45	13,73	12,86	11,85	10,86
<b>1,18</b>	22,47	18,54	15,14	14,27	13,48	12,64	11,73	10,75
<b>0,72</b>	22,40	18,34	14,99	14,04	13,25	12,58	11,69	10,77
<b>0,44</b>	22,26	18,05	14,83	13,81	13,01	12,38	11,67	10,62
<b>0,27</b>	22,18	17,47	14,60	13,66	12,84	12,22	11,60	10,52
<b>0,16</b>	21,89	16,83	14,25	13,29	12,63	12,26	11,58	10,70
<b>0,1</b>	21,59	16,38	14,14	13,14	12,54	12,20	11,53	10,65

## 7.5. Anexo 5: Factores de corrimiento y coeficientes de ecuación WLF

### 7.5.1. Factores de corrimiento $a(T)$ para curvas maestras

En esta sección se presentan los valores de  $a(T)$  tanto para el módulo dinámico como para el ángulo de fase, desde la Tabla 7.5.1 hasta la Tabla 7.5.2 se observan los resultados para las muestras ensayadas en un rango de temperatura de 5°C a 75°C. Mientras que, desde la

Tabla 7.5.3 hasta la Tabla 7.5.8 se observan las muestras ensayadas en un rango desde 5°C a 40°C.

Tabla 7.5.1. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) de los ligantes CA-24, CA-14 y RAP en rangos de medición 5 a 75°C. (Elaboración propia)

Temperatura [°C]	CA-24					CA-14					RAP		
	SE	RTFO	PAV	8,6 LPO-M	5,9 RC	SE	RTFO	PAV	5,3 LPO-M	7,6 RC	SE	13,4 LPO-M	10,3 RC
5	427,04	447,97	531,37	156,56	262,69	907,01	1025,68	834,69	624,49	766,24	449,98	197,68	262,77
10	85,88	91,21	109,26	40,05	56,59	161,47	187,36	164,01	136,27	138,37	88,90	50,41	55,13
15	17,53	18,38	21,28	10,87	13,23	28,94	32,80	30,47	26,42	26,27	19,26	12,73	13,11
20	3,96	4,07	4,43	3,17	3,47	5,24	5,68	5,58	5,13	5,10	4,28	3,45	3,45
25	1	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	2,68E-01	2,61E-01	2,37E-01	3,22E-01	2,97E-01	1,90E-01	1,80E-01	1,83E-01	1,93E-01	1,95E-01	2,38E-01	2,96E-01	2,99E-01
35	8,07E-02	7,58E-02	6,09E-02	1,13E-01	9,57E-02	3,78E-02	3,38E-02	3,43E-02	3,83E-02	3,91E-02	6,00E-02	9,62E-02	9,83E-02
40	2,72E-02	2,48E-02	1,68E-02	4,33E-02	3,37E-02	1,12E-02	9,26E-03	8,29E-03	1,07E-02	1,07E-02	1,63E-02	3,47E-02	3,57E-02
45	7,94E-03	6,55E-03	4,73E-03	1,50E-02	9,64E-03	2,51E-03	2,53E-03	2,49E-03	3,96E-03	3,12E-03	6,46E-03	8,67E-03	1,17E-02
50	3,29E-03	2,51E-03	1,61E-03	6,24E-03	3,99E-03	1,07E-03	9,76E-04	8,81E-04	1,54E-03	1,29E-03	1,90E-03	3,54E-03	4,92E-03
55	1,46E-03	1,04E-03	5,82E-04	2,76E-03	1,76E-03	4,86E-04	4,07E-04	3,25E-04	6,45E-04	5,83E-04	5,91E-04	1,53E-03	2,23E-03
60	6,86E-04	4,50E-04	2,22E-04	1,29E-03	6,14E-04	2,32E-04	1,78E-04	1,27E-04	2,85E-04	2,06E-04	1,92E-04	6,92E-04	1,06E-03
65	3,28E-04	1,99E-04	8,75E-05	6,16E-04	6,02E-04	1,11E-04	7,89E-05	5,04E-05	1,27E-04	2,05E-04	6,49E-05	3,25E-04	5,17E-04
70	1,65E-04	9,37E-05	3,67E-05	3,13E-04	1,97E-04	5,58E-05	3,66E-05	2,13E-05	5,93E-05	6,61E-05	2,33E-05	1,59E-04	2,65E-04
75	8,75E-05	4,68E-05	1,65E-05	1,68E-04	1,04E-04	2,98E-05	1,78E-05	9,42E-06	2,89E-05	3,51E-05	8,87E-06	8,39E-05	1,45E-04

Tabla 7.5.2. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) de los ligantes CA-24, CA-14 y RAP en rangos de medición 5 a 75°C. (Elaboración propia)

Temperatura [°C]	CA-24					CA-14					RAP		
	SE	RTFO	PAV	8,6 LPO-M	5,9 RC	SE	RTFO	PAV	5,3 LPO-M	7,6 RC	SE	13,4 LPO-M	10,3 RC
5	1414,11	1362,53	1327,12	1043,65	1261,16	6990,31	6283,68	4011,71	8796,56	15559,03	805,35	751,29	1139,09
10	239,79	229,02	222,42	157,39	192,24	853,25	824,94	571,42	1062,64	1648,65	119,39	114,56	155,43
15	38,32	36,60	35,90	28,00	30,99	107,97	106,34	78,45	120,03	177,90	22,50	22,43	26,28
20	6,00	5,95	5,90	5,10	5,44	11,25	11,49	9,65	11,97	15,29	4,68	4,63	4,84
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	2,26E-01	2,12E-01	1,94E-01	2,07E-01	2,19E-01	6,70E-02	6,81E-02	9,61E-02	6,05E-02	4,93E-02	2,06E-01	2,23E-01	2,31E-01
35	5,35E-02	4,57E-02	3,98E-02	4,81E-02	5,25E-02	3,45E-03	3,62E-03	7,62E-03	2,79E-03	2,52E-03	4,44E-02	5,39E-02	6,27E-02
40	1,37E-02	1,04E-02	8,66E-03	1,30E-02	1,43E-02	4,88E-04	4,58E-04	9,04E-04	2,84E-04	3,24E-04	1,02E-02	1,45E-02	1,98E-02
45	2,28E-03	1,68E-03	1,43E-03	2,00E-03	3,64E-03	5,28E-05	9,52E-05	1,68E-04	4,85E-05	6,80E-05	2,94E-03	1,03E-03	6,28E-03
50	9,01E-04	5,28E-04	3,92E-04	7,33E-04	1,40E-03	1,93E-05	2,68E-05	4,14E-05	1,41E-05	2,43E-05	8,24E-04	4,02E-04	2,81E-03
55	3,91E-04	1,87E-04	1,11E-04	3,00E-04	6,20E-04	8,17E-06	8,91E-06	1,04E-05	4,79E-06	1,05E-05	2,26E-04	1,69E-04	1,39E-03
60	1,92E-04	7,40E-05	3,32E-05	1,33E-04	1,91E-04	3,59E-06	3,32E-06	2,97E-06	1,77E-06	3,04E-06	6,29E-05	7,33E-05	7,43E-04
65	9,39E-05	3,10E-05	1,09E-05	6,15E-05	2,01E-04	1,59E-06	1,26E-06	9,24E-07	6,95E-07	3,45E-06	1,82E-05	3,32E-05	4,32E-04
70	5,17E-05	1,37E-05	3,99E-06	3,06E-05	5,96E-05	7,57E-07	5,29E-07	3,25E-07	2,88E-07	9,41E-07	5,72E-06	1,64E-05	2,53E-04
75	3,06E-05	7,08E-06	1,67E-06	1,61E-05	3,46E-05	2,74E-07	2,43E-07	1,26E-07	1,25E-07	4,82E-07	2,00E-06	8,08E-06	1,63E-04

Tabla 7.5.3. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-24 en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)

Temperatura [°C]	LPO-M						RC				
	3%	6%	9%	12%	8,6% RTFO	8,6% PAV	3%	6%	9%	5,9% RTFO	5,9% PAV
5	329,03	206,79	149,94	76,34	357,68	460,21	380,01	308,56	220,10	309,25	325,39
10	72,93	50,19	40,30	29,19	81,07	91,22	78,78	67,09	49,97	67,16	71,76
15	16,41	12,71	11,07	9,15	17,91	19,06	16,84	14,89	12,43	15,03	15,99
20	3,88	3,42	3,20	2,94	4,10	4,23	3,92	3,67	3,39	3,69	3,84
25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

<b>30</b>	2,67E-01	3,02E-01	3,25E-01	3,48E-01	2,51E-01	2,42E-01	2,65E-01	2,83E-01	3,05E-01	2,82E-01	2,70E-01
<b>35</b>	7,81E-02	1,02E-01	1,16E-01	1,31E-01	6,80E-02	6,30E-02	7,70E-02	8,74E-02	1,01E-01	8,73E-02	7,98E-02
<b>40</b>	2,50E-02	3,79E-02	4,51E-02	5,33E-02	1,99E-02	1,77E-02	2,48E-02	2,98E-02	3,68E-02	2,98E-02	2,57E-02

Tabla 7.5.4. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)

Temperatura [°C]	LPO-M						RC				
	3%	6%	9%	12%	8,6% RTFO	8,6% PAV	3%	6%	9%	5,9% RTFO	5,9% PAV
<b>5</b>	1182,37	1166,95	956,03	481,76	639,22	1049,81	1148,69	1079,11	1201,13	1236,95	1277,26
<b>10</b>	201,12	194,97	168,12	114,15	178,68	159,57	175,08	176,65	177,79	189,95	194,11
<b>15</b>	33,50	32,96	29,81	23,39	31,99	28,20	29,76	29,79	29,57	31,52	31,96
<b>20</b>	5,74	5,69	5,43	4,69	5,51	5,21	5,23	5,28	5,23	5,42	5,51
<b>25</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>30</b>	2,04E-01	1,94E-01	1,98E-01	2,20E-01	1,93E-01	1,99E-01	2,23E-01	2,27E-01	2,34E-01	2,13E-01	2,01E-01
<b>35</b>	4,22E-02	4,03E-02	4,15E-02	5,43E-02	4,08E-02	4,16E-02	5,30E-02	5,44E-02	6,08E-02	4,70E-02	4,27E-02
<b>40</b>	8,90E-03	9,11E-03	9,32E-03	1,41E-02	9,08E-03	9,31E-03	1,35E-02	1,46E-02	1,80E-02	1,16E-02	9,49E-03

Tabla 7.5.5. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-14 en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)

Temperatura [°C]	LPO-M					RC				
	3%	6%	9%	5,3 RTFO	5,3% PAV	3%	6%	9%	7,6 RTFO	7,6 PAV
<b>5</b>	767,88	598,33	141,42	813,70	751,97	936,97	830,59	829,49	761,11	680,97
<b>10</b>	154,32	128,34	70,41	160,00	148,05	170,49	152,41	148,35	141,76	133,68
<b>15</b>	28,90	25,80	19,34	29,93	28,31	30,57	27,84	27,41	26,47	27,12
<b>20</b>	5,32	5,08	4,53	5,49	5,33	5,48	5,17	5,20	5,11	5,15
<b>25</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>30</b>	1,88E-01	1,97E-01	2,19E-01	1,83E-01	1,88E-01	1,85E-01	1,96E-01	1,91E-01	1,94E-01	1,94E-01
<b>35</b>	3,60E-02	4,19E-02	5,78E-02	3,43E-02	3,62E-02	3,56E-02	3,95E-02	3,85E-02	3,92E-02	3,89E-02
<b>40</b>	9,27E-03	1,34E-02	2,30E-02	8,02E-03	8,23E-03	9,02E-03	1,03E-02	1,06E-02	1,06E-02	9,94E-03

Tabla 7.5.6. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-14 en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)

Temperatura [°C]	LPO-M					RC				
	3%	6%	9%	5,3 RTFO	5,3% PAV	3%	6%	9%	7,6 RTFO	7,6 PAV
5	6205,46	42204,62	26262,39	4453,69	3264,63	4584,55	6028,31	18090,05	14359,03	6445,11
10	804,08	3537,79	13733,92	609,33	439,31	613,39	776,21	1976,78	1580,17	765,25
15	99,45	283,58	1548,58	82,58	63,95	81,59	97,81	200,93	175,47	109,82
20	10,43	18,69	59,16	9,76	8,34	9,70	10,57	16,42	14,97	11,33
25	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	7,98E-02	3,78E-02	1,04E-02	8,92E-02	1,04E-01	8,86E-02	7,93E-02	4,43E-02	4,54E-02	6,86E-02
35	5,27E-03	1,28E-03	1,24E-04	7,34E-03	1,02E-02	5,93E-03	4,92E-03	2,29E-03	2,11E-03	4,39E-03
40	5,87E-04	1,40E-04	9,43E-06	8,45E-04	1,19E-03	6,16E-04	5,29E-04	3,00E-04	2,36E-04	4,84E-04

Tabla 7.5.7. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante RAP en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)

Temperatura [°C]	LPO-M								RC					
	3%	6%	9%	12%	15%	18%	13,4% RTFO	13,4% PAV	3%	6%	9%	12%	10,3% RTFO	10,3% PAV
5	404,75	283,60	235,43	148,89	108,13	60,93	387,66	159,77	524,82	368,20	243,00	278,33	331,03	309,90
10	88,34	67,59	59,84	42,98	35,48	24,63	86,00	58,44	101,02	79,65	55,67	59,05	71,60	68,28
15	18,84	15,93	14,60	11,79	10,24	8,27	18,73	16,48	20,39	17,37	13,52	13,80	15,97	16,07
20	4,21	3,86	3,72	3,34	3,10	2,82	4,22	4,03	4,36	4,02	3,53	3,54	3,82	3,85
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	1,00
30	2,41E-01	2,58E-01	2,69E-01	3,02E-01	3,30E-01	3,53E-01	2,38E-01	2,45E-01	2,35E-01	2,51E-01	2,86E-01	2,90E-01	2,71E-01	2,65E-01
35	6,27E-02	7,13E-02	7,82E-02	9,84E-02	1,18E-01	1,37E-01	6,04E-02	6,25E-02	6,01E-02	6,84E-02	8,86E-02	9,22E-02	8,14E-02	7,62E-02
40	1,78E-02	2,14E-02	2,48E-02	3,48E-02	4,58E-02	5,79E-02	1,64E-02	1,69E-02	1,69E-02	2,04E-02	2,99E-02	3,21E-02	2,72E-02	2,40E-02

Tabla 7.5.8. Factores de corrimiento ( $a(T)$ ) para curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante RAP en un rango de medición 5 a 40°C. (Elaboración propia)

Temperatura [°C]	LPO-M								RC					
	3%	6%	9%	12%	15%	18%	13,4% RTFO	13,4% PAV	3%	6%	9%	12%	10,3% RTFO	10,3% PAV
5	1158,67	734,32	737,93	1406,48	389,83	222,91	588,98	140,64	3702,74	670,80	589,17	941,88	1310,16	1111,94
10	171,05	117,14	114,29	158,58	83,98	65,30	98,60	33,32	470,19	114,39	103,27	133,99	172,51	136,49
15	28,89	22,46	21,98	25,72	18,70	16,65	20,43	10,79	64,42	22,35	21,00	24,27	28,62	26,13

ANEXOS

<b>20</b>	5,19	4,55	4,62	4,76	4,27	4,16	4,41	3,27	8,33	4,59	4,42	4,74	5,11	4,91
<b>25</b>	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	1,00
<b>30</b>	1,87E-01	2,14E-01	2,15E-01	2,06E-01	2,43E-01	2,32E-01	2,21E-01	2,83E-01	1,13E-01	2,27E-01	2,36E-01	2,30E-01	2,05E-01	1,97E-01
<b>35</b>	3,80E-02	5,00E-02	4,98E-02	4,75E-02	6,11E-02	5,71E-02	5,14E-02	7,84E-02	1,38E-02	5,53E-02	6,14E-02	5,91E-02	4,62E-02	4,16E-02
<b>40</b>	8,45E-03	1,25E-02	1,23E-02	1,23E-02	1,74E-02	1,33E-02	1,29E-02	2,15E-02	2,50E-03	1,43E-02	1,76E-02	1,77E-02	1,17E-02	9,40E-03

### 7.5.2. Coeficientes de ajuste k1 y k2 de ecuación WLF para curvas maestras

Se presentan los coeficientes de ajuste k y k2 para los tres ligantes utilizados en este estudio en las diferentes condiciones de mezclado. Los coeficientes para las curvas maestras del módulo dinámico se presentan desde Tabla 7.5.9 hasta la Tabla 7.5.11. Mientras que, para las curvas del ángulo de fase desde la Tabla 7.5.12 hasta la Tabla 7.5.14.

*Tabla 7.5.9. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF k1 y k2 para curva maestra del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) para ligante CA-24. (Elaboración propia)*

Ligante asfáltico	Estado muestra	k1	k2		
CA-24	Original	SE	12,31	110,89	
		RTFO	12,74	110,92	
		PAV	13,37	113,31	
	LPO-M	3%	25,2	219,6	
		6%	19,0	183,2	
		9%	18,5	188,8	
		12%	29,9	330,4	
		8,6% (SE)	17,38	163,31	
		8,6% (RTFO)	17,18	174,33	
		8,6% (PAV)	15,83	136,70	
		RC	3%	22,74	196,42
			6%	22,90	196,02
	9%		23,92	212,04	
	5,9%(SE)		13,76	128,82	
	5,9% (RTFO)		19,88	179,15	
	5,9% (PAV)		24,21	212,00	

*Tabla 7.5.10. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF k1 y k2 para curva maestra del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) para ligante CA-14. (Elaboración propia)*

Ligante asfáltico	Estado muestra	k1	k2		
CA-14	Original	SE	13,34	104,93	
		RTFO	13,63	104,44	
		PAV	21,50	158,43	
	LPO-M	3%	26,78	198,64	
		6%	26,53	205,84	
		9%	34,38	298,00	
		5,3% (SE)	21,24	156,29	
		5,3% (RTFO)	18,68	148,68	
		5,3% (PAV)	18,29	137,03	
		RC	3%	22,90	196,02
			6%	21,60	161,33
			9%	21,51	161,01
	7,6% (SE)		16,49	152,77	
	7,6% (RTFO)		65,13	470,19	
	7,6% (PAV)		103,93	749,24	

Tabla 7.5.11. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF  $k_1$  y  $k_2$  para curva maestra del módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) para ligante RAP. (Elaboración propia)

Ligante asfáltico	Estado muestra	$k_1$	$k_2$		
RAP + LPO-M	Original	SE	14,14	121,53	
		3%	29,97	239,83	
		6%	30,97	256,04	
	LPO-M	9%	36,84	319,64	
		12%	40,51	362,00	
		15%	25,94	271,51	
		18%	39,01	447,99	
		13,4% (SE)	29,31	240,57	
		13,4% (RTFO)	53,15	429,20	
		13,4% (PAV)	19,89	187,82	
		RC	3%	21,46	157,15
			6%	33,48	280,29
			9%	21,14	154,21
	12%		21,82	160,44	
	10,3% (SE)		22,40	180,80	
	10,3% (RTFO)		21,98	193,79	
		10,3% (PAV)	29,50	256,34	

Tabla 7.5.12. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF  $k_1$  y  $k_2$  para la curva maestra del ángulo de fase ( $\delta$ ) para el ligante CA-24. (Elaboración propia)

Ligante asfáltico	Estado muestra	$k_1$	$k_2$	
CA-24	Original	SE	13,10	98,70
		RTFO	14,17	105,01
		PAV	14,92	109,36
	LPO-M	3%	40,9	284,1
		6%	42,5	295,3
		9%	52,2	368,2
		12%	52,6	406,0
		8,6% (SE)	43,90	348,05
		8,6% (RTFO)	19,28	142,06
		8,6% (PAV)	20,26	142,81
	RC	3%	30,04	216,49
		6%	30,34	216,36
		9%	30,07	216,03
		5,9% (SE)	11,04	89,80
		5,9% (RTFO)	27,42	196,39
		5,9% (PAV)	35,41	247,44

Tabla 7.5.13. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF  $k_1$  y  $k_2$  para la curva maestra del ángulo de fase ( $\delta$ ) para el ligante C-14. (Elaboración propia)

Ligante asfáltico	Estado muestra	$k_1$	$k_2$	
CA-14	Original	SE	20,61	113,80
		RTFO	21,08	116,50
		PAV	37,28	205,55
	LPO-M	3%	33,89	181,07
		6%	29,97	135,92
		9%	39,65	155,91
		5,3% (SE)	37,28	205,55
		5,3% (RTFO)	29,86	153,92
		5,3% (PAV)	29,48	162,72
	RC	3%	58,80	290,71
		6%	51,67	258,45
		9%	45,06	226,27
		7,6% (SE)	27,75	148,78
		7,6% (RTFO)	30,04	426,20
		7,6% (PAV)	34,72	424,73

Tabla 7.5.14. Coeficientes de ajuste de la ecuación WLF  $k_1$  y  $k_2$  para la curva maestra del ángulo de fase ( $\delta$ ) para el ligante RAP. (Elaboración propia)

Ligante asfáltico	Estado muestra	$k_1$	$k_2$	
RAP	Original	SE	16,32	126,74
		3%	40,72	299,59
		6%	35,03	246,82
	LPO-M	9%	40,73	306,28
		12%	24,23	176,31
		15%	56,19	453,96
		18%	41,12	309,29
		13,4% (SE)	17,23	135,90
		13,4% (RTFO)	54,61	418,78
	RC	13,4% (PAV)	26,10	191,79
		3%	53,77	418,90
		6%	72,57	572,43
		9%	116,21	941,82
		12%	80,48	646,26
		10,3% (SE)	29,68	174,95
		10,3% (RTFO)	26,97	193,99
		10,3% (PAV)	46,87	333,54

## 7.6. Anexo 6: Coeficientes de ajuste polinómico curvas maestras

### 7.6.1. Ligantes asfálticos sin y con LPO-M en diferentes dosis

Tabla 7.6.1. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de módulo dinámico, para ligante CA-24 sin y con LPO-M. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras CA-24							
Coeficientes	SE	RTFO	PAV	LPO-M 3%	LPO-M 6%	LPO-M 9%	LPO-M 12%
A	-0,0019	-0,0004	0,0008	0,0002	0,0003	0,0004	0,0008
B	-0,042	-0,043	-0,038	-0,038	-0,039	-0,040	-0,038
C	0,77	0,67	0,53	0,60	0,66	0,69	0,72
D	5,40	5,74	6,26	5,69	5,09	4,77	4,50

Tabla 7.6.2. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante CA-24 sin y con LPO-M. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras CA-24							
Coeficientes	SE	RTFO	PAV	LPO-M 3%	LPO-M 6%	LPO-M 9%	LPO-M 12%
A	-0,0002	-0,00006	0,0001	-0,00005	-0,0001	-0,0001	-0,00007
B	-0,005	-0,0039	-0,0024	-0,002	-0,0012	-0,0011	-0,0006
C	-0,037	-0,044	-0,051	-0,042	-0,036	-0,035	-0,032
D	1,85	1,79	1,69	1,75	1,78	1,80	1,82

Tabla 7.6.3. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de módulo dinámico, para ligante CA-14 sin y con LPO-M. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras CA-14						
Coeficientes	SE	RTFO	PAV	LPO-M 3%	LPO-M 6%	LPO-M 9%
A	0,0005	0,001	0,001	0,0013	0,0020	0,003
B	-0,046	-0,044	-0,037	-0,037	-0,040	-0,047
C	0,69	0,615	0,50	0,54	0,61	0,68
D	5,55	5,87	6,23	5,93	5,04	4,29

Tabla 7.6.4. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante CA-14 sin y con LPO-M. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras CA-14						
Coeficientes	SE	RTFO	PAV	LPO-M 3%	LPO-M 6%	LPO-M 9%
A	-0,0005	-0,00009	-0,00002	-0,00028	-0,00030	-0,00036
B	-0,0031	-0,0023	-0,0015	-0,0014	-0,00043	-0,00057
C	-0,025	-0,037	-0,041	-0,030	-0,019	-0,0092
D	1,84	1,76	1,68	1,73	1,77	1,80

Tabla 7.6.5. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de módulo dinámico, para ligante RAP sin y con LPO-M. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras RAP							
Coeficientes	SE	LPO-M 3%	LPO-M 6%	LPO-M 9%	LPO-M 12%	LPO-M 15%	LPO-M 18%

A	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001
B	-0,032	-0,030	-0,037	-0,038	-0,039	-0,039	-0,049
C	0,37	0,42	0,46	0,50	0,54	0,64	0,68
D	6,63	6,31	6,00	5,76	5,30	4,67	4,12

Tabla 7.6.6. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante RAP sin y con LPO-M. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras RAP							
Coeficientes	SE	LPO-M 3%	LPO-M 6%	LPO-M 9%	LPO-M 12%	LPO-M 15%	LPO-M 18%
A	0,0001	0,0001	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001	0,0005
B	0,00071	0,00025	0,000002	-0,00019	0,00135	-0,00128	-0,00200
C	-0,059	-0,051	-0,058	-0,054	-0,046	-0,041	-0,043
D	1,56	1,60	1,64	1,67	1,70	1,78	1,80

## 7.6.2. Ligantes asfálticos con RC en diferentes dosis

Tabla 7.6.7. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de módulo dinámico, para ligante CA-24 y CA-14 con RC. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras						
Coeficientes	CA-24			CA-14		
	RC 3%	RC 6%	RC 9%	RC 3%	RC 6%	RC 9%
A	0,0002	-0,0005	-0,0006	0,0013	0,0011	0,0013
B	-0,041	-0,041	-0,041	-0,039	-0,041	-0,044
C	0,63	0,70	0,76	0,55	0,60	0,66
D	5,76	5,42	4,91	5,99	5,74	5,27

Tabla 7.6.8. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante CA-24 y CA-14 con RC. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras						
Coeficientes	CA-24			CA-14		
	RC 3%	RC 6%	RC 9%	RC 3%	RC 6%	RC 9%
A	-0,00006	-0,00023	-0,00027	-0,00003	-0,00008	-0,00016
B	-0,0025	-0,0025	-0,0017	-0,0019	-0,0017	-0,0010
C	-0,045	-0,040	-0,035	-0,040	-0,036	-0,030
D	1,77	1,81	1,84	1,71	1,75	1,78

Tabla 7.6.9. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante RAP con RC. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras RAP				
Coeficientes	RC 3%	RC 6%	RC 9%	RC 12%
A	0,0017	0,0016	0,0015	0,0014
B	-0,039	-0,040	-0,044	-0,048
C	0,46	0,50	0,58	0,64
D	6,38	6,13	5,69	5,35

Tabla 7.6.10. Coeficientes de ajuste polinómico para curvas maestras de ángulo de fase, para ligante RAP con RC. (Elaboración propia)

Coeficientes de línea de tendencia curvas maestras RAP				
Coeficientes	RC 3%	RC 6%	RC 9%	RC 12%
A	0,00042	0,00033	0,00007	0,00004
B	-0,0011	-0,0013	-0,0007	-0,0011
C	-0,065	-0,062	-0,053	-0,052
D	1,64	1,67	1,73	1,78

## 7.7. Anexo 7: Curvas maestras módulo dinámico y ángulo de fase

### 7.7.1. CA-24, CA-14 y RAP (SE, RTFO y PAV)

#### 7.7.1.1. Muestras medidas en un rango de medición de 5 a 40°C

Desde la Figura 7.7.1 hasta la Figura 7.7.6 se presentan las curvas maestras del módulo dinámico y ángulo de fase para el ligante CA-24, CA-14 Y RAP medidas en un rango de temperatura de 5°C a 40°C.

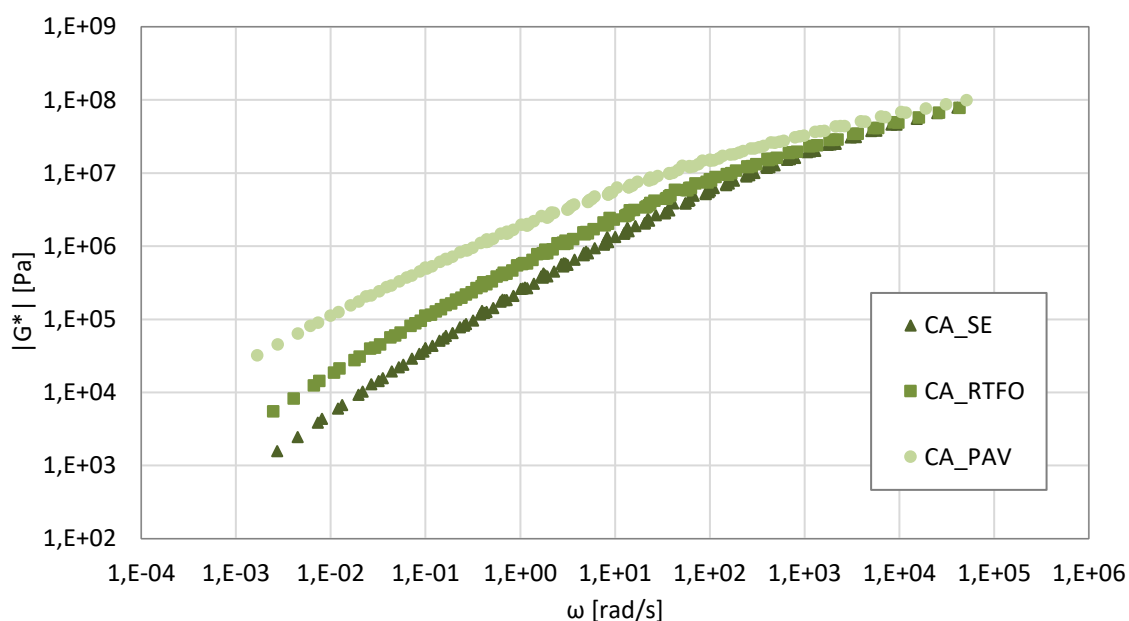


Figura 7.7.1. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-24 en estado SE, RTFO y PAV medido en un rango de 5°C a 40°C. (Elaboración propia)

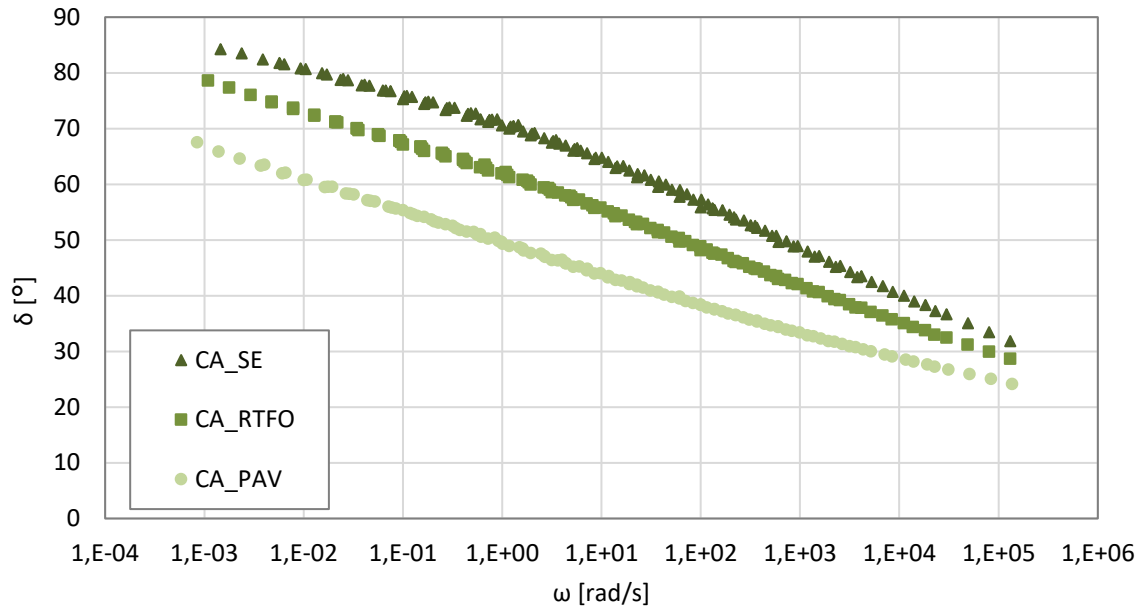


Figura 7.7.2. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia)

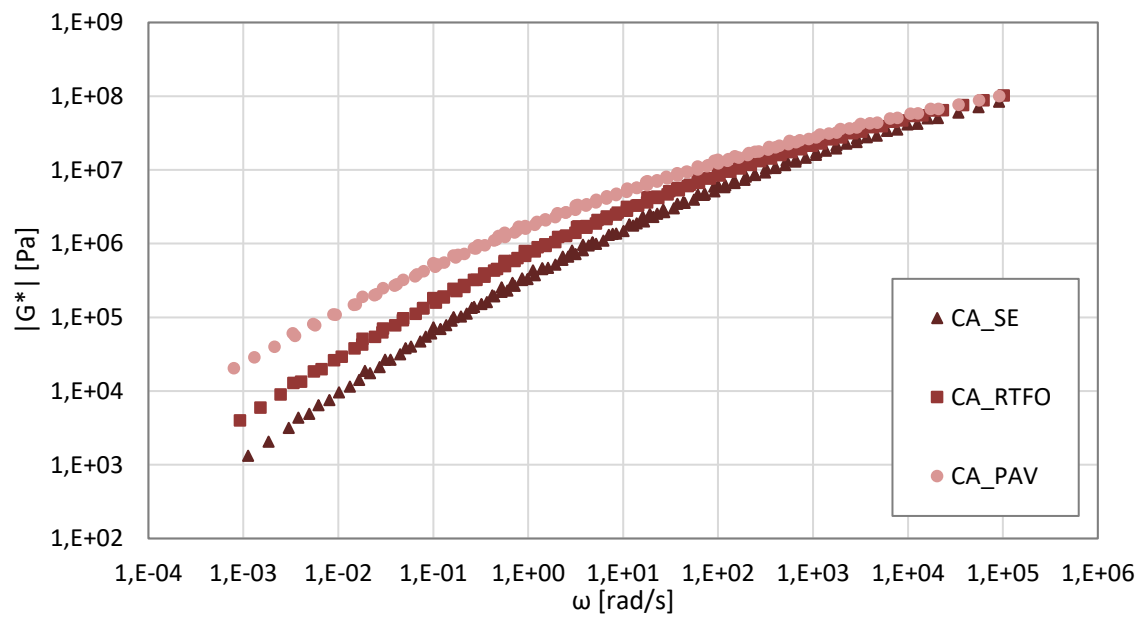


Figura 7.7.3. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-14 en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia)

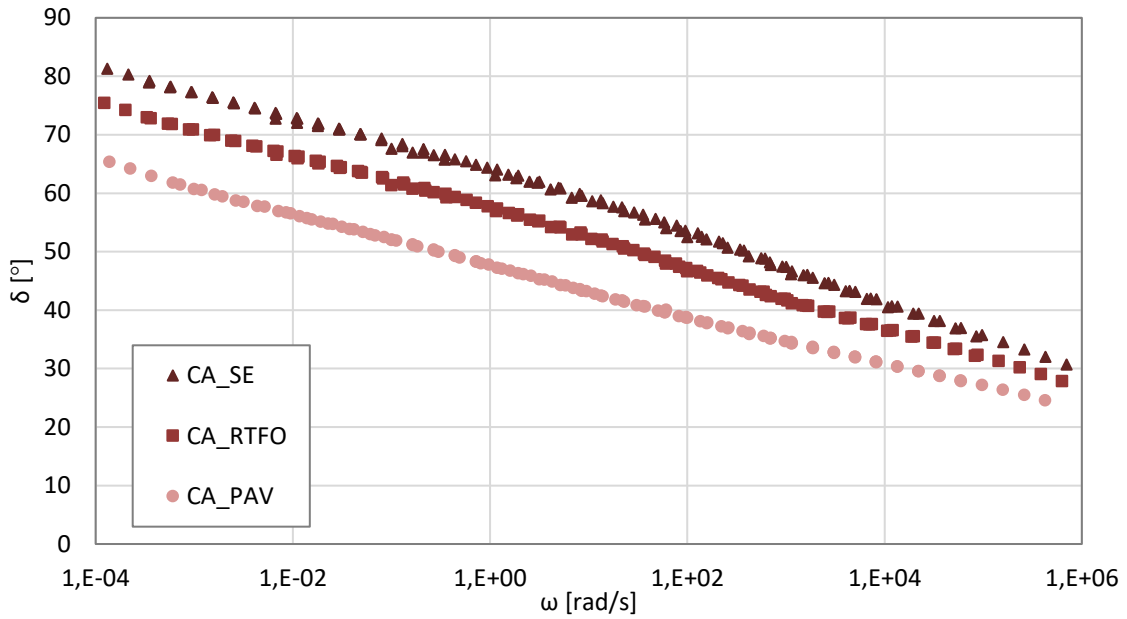


Figura 7.7.4. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia)

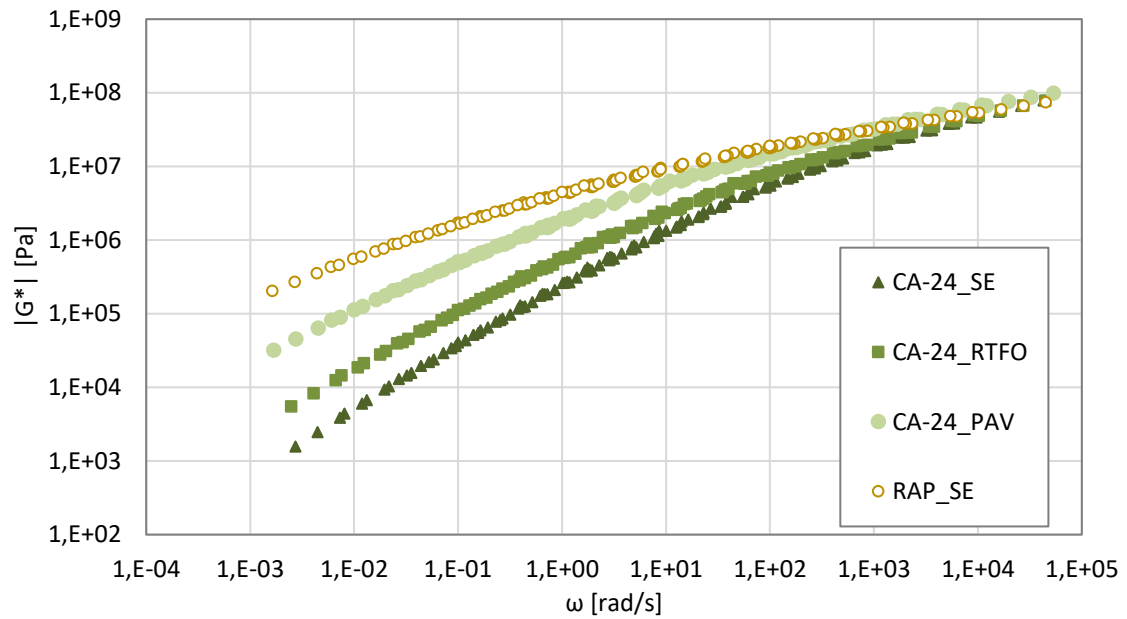


Figura 7.7.5. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante RAP en estado SE, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia)

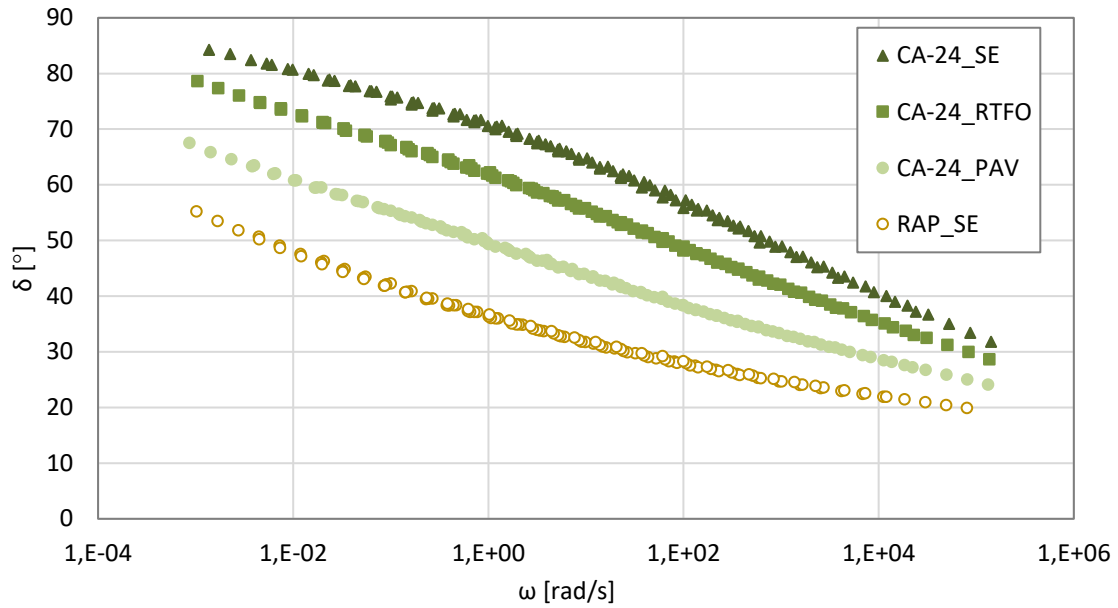


Figura 7.7.6. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante RAP en estado SE, medido en un rango de 5 a 40°C. (Elaboración propia)

#### 7.7.1.2. Muestras medidas en un rango de medición de 5 a 75°C

En la Figura 7.7.7 y Figura 7.7.8 se presentan las curvas maestras del módulo dinámico y ángulo de fase para el ligante CA-24, CA-14 Y RAP medidas en un rango de temperatura de 5 a 75°C, respectivamente.

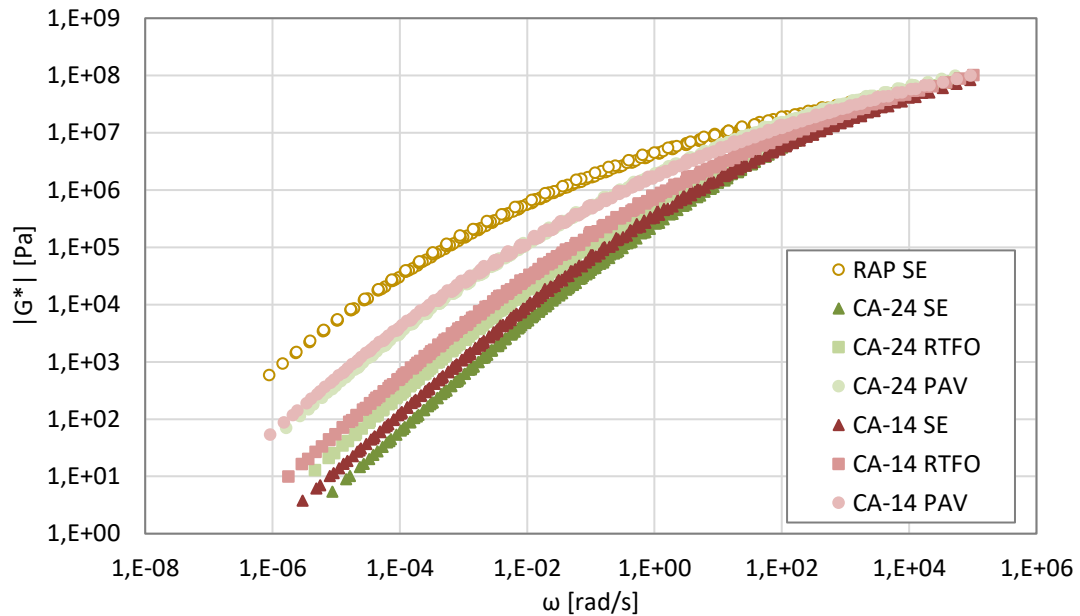


Figura 7.7.7. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-24, CA-14 y RAP en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 75°C. (Elaboración propia)

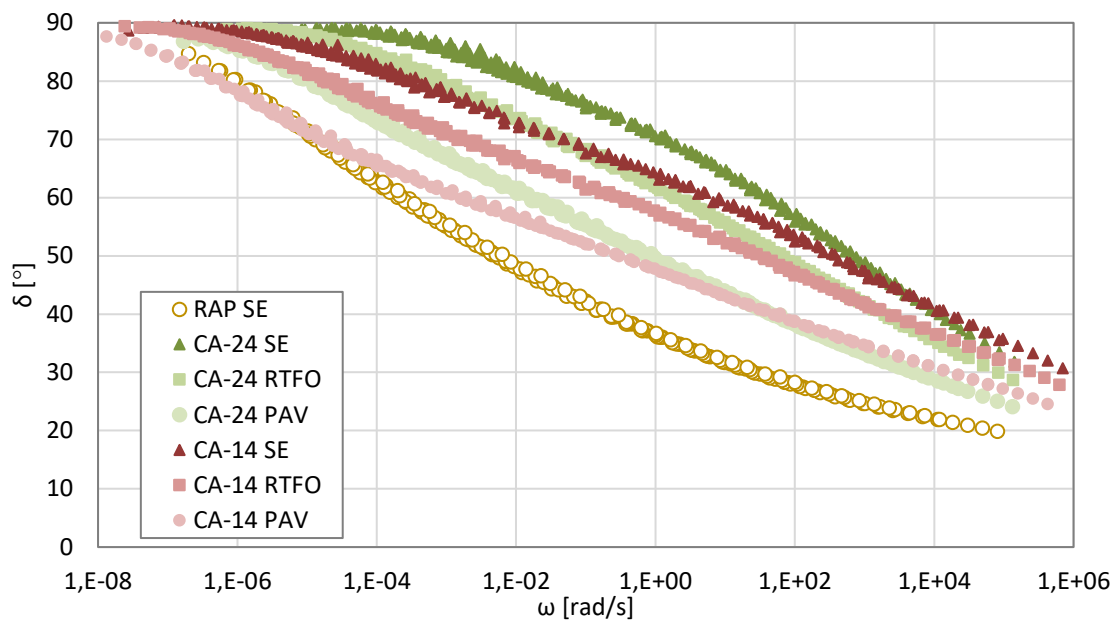


Figura 7.7.8. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24, CA-14 y RAP en estado SE, RTFO y PAV, medido en un rango de 5 a 75°C. (Elaboración propia)

### 7.7.2. CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12%

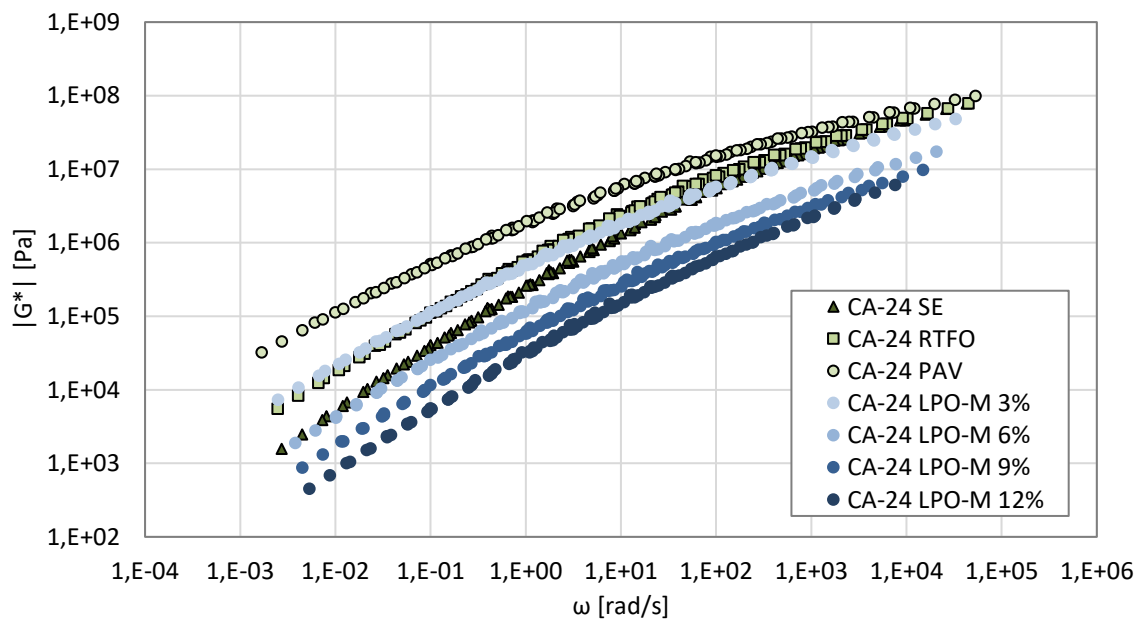


Figura 7.7.9. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12%. (Elaboración propia)

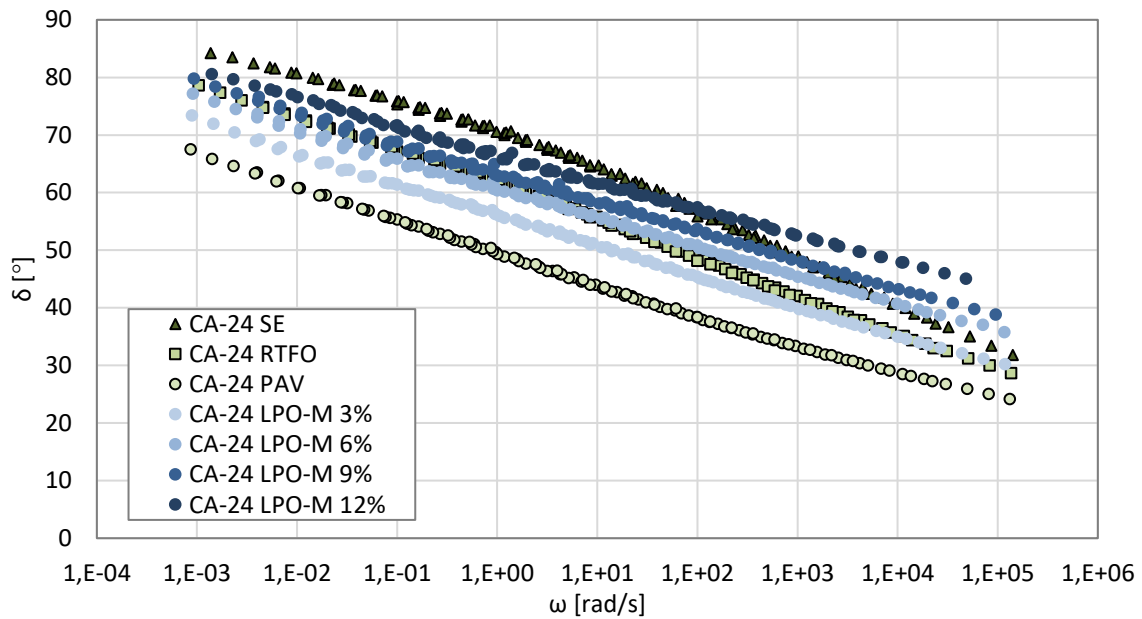


Figura 7.7.10. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12%. (Elaboración propia)

### 7.7.3. CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9%

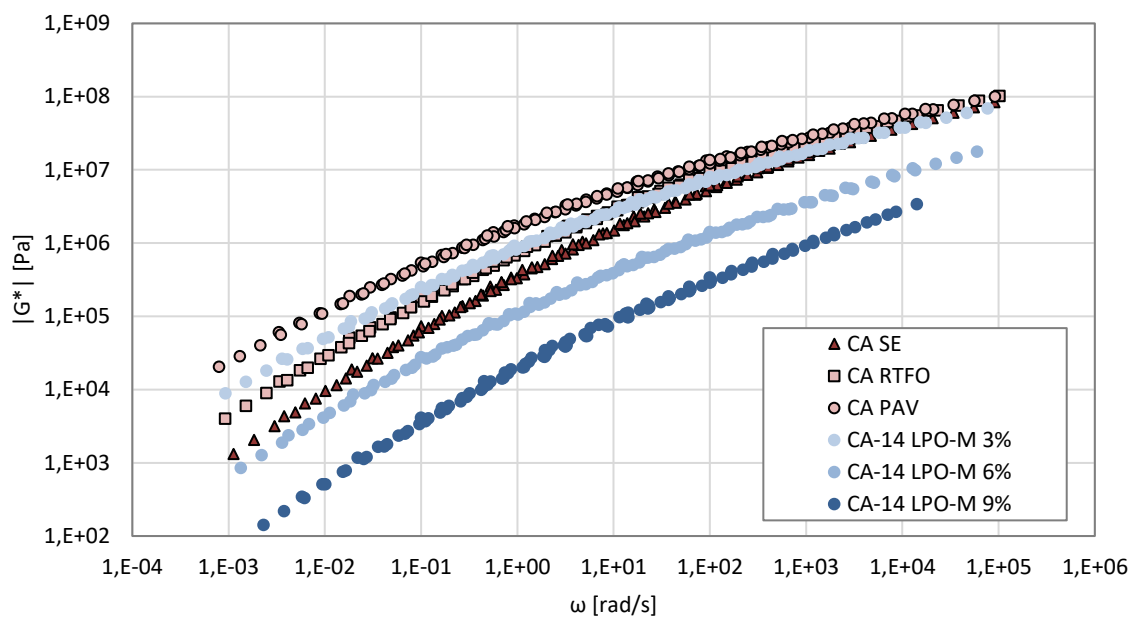


Figura 7.7.11. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia)

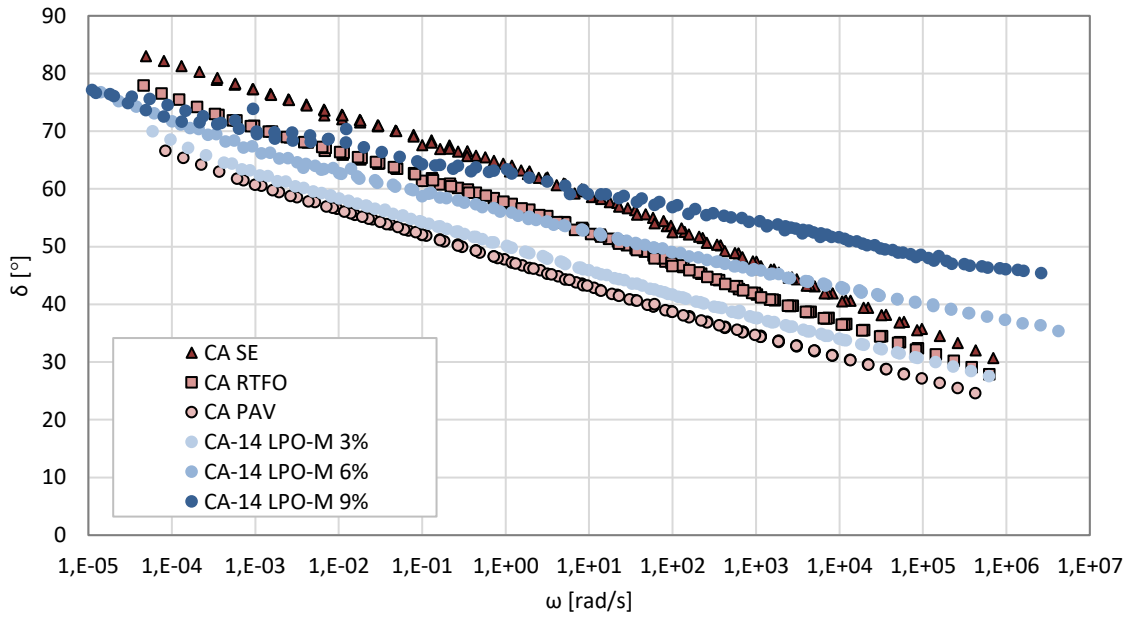


Figura 7.7.12. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia)

#### 7.7.4. RAP con LPO-M en dosis de 3, 6, 9, 12, 15 y 18%

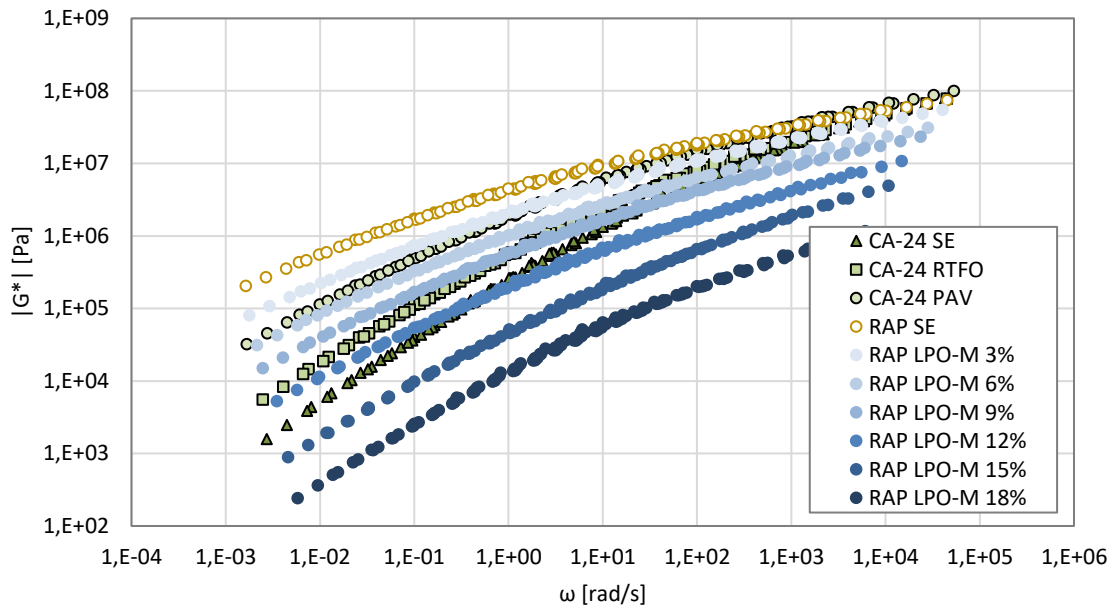


Figura 7.7.13. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante RAP con LPO-M en dosis de 3, 6, 9, 12, 15 y 18%. (Elaboración propia)

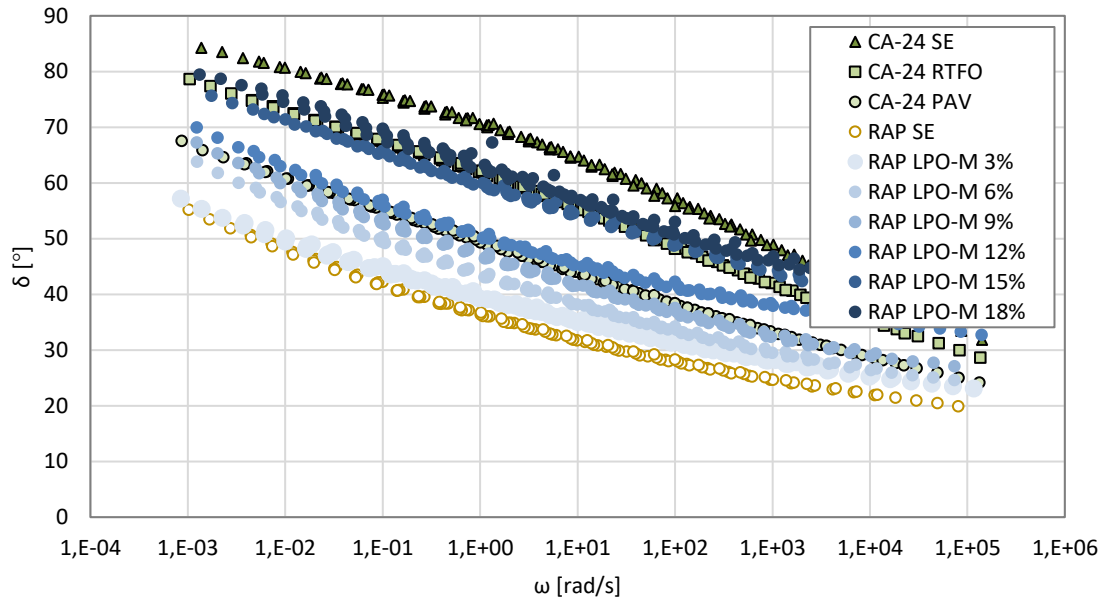


Figura 7.7.14. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante RAP con LPO-M en dosis de 3, 6, 9, 12, 15 y 18%. (Elaboración propia)

### 7.7.5. CA-24 con RC en dosis de 3, 6 y 9%

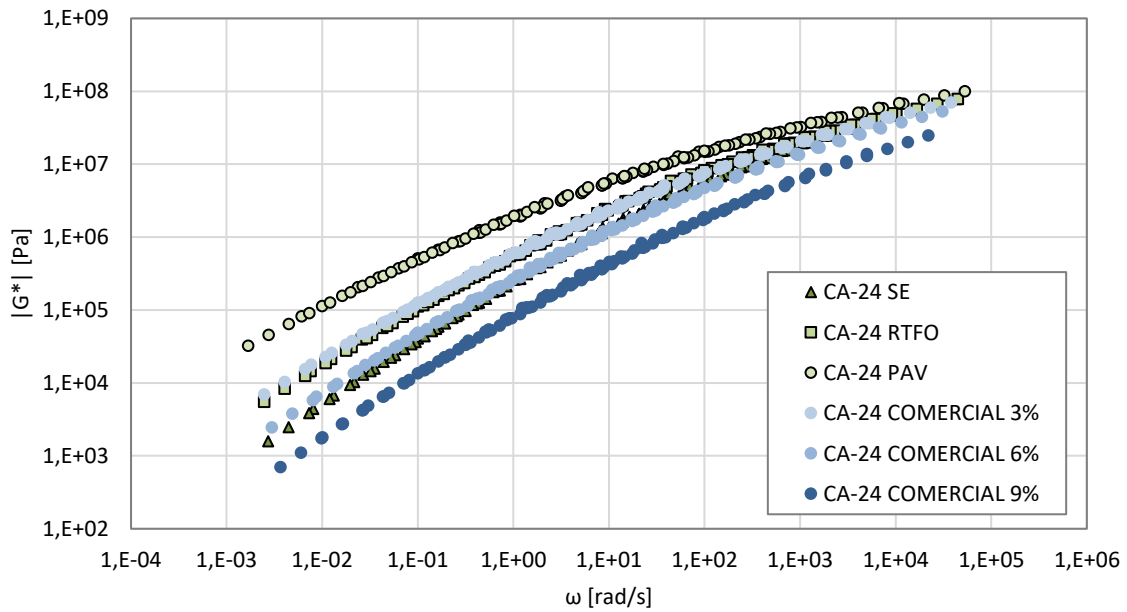


Figura 7.7.15. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-24 con RC en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia)

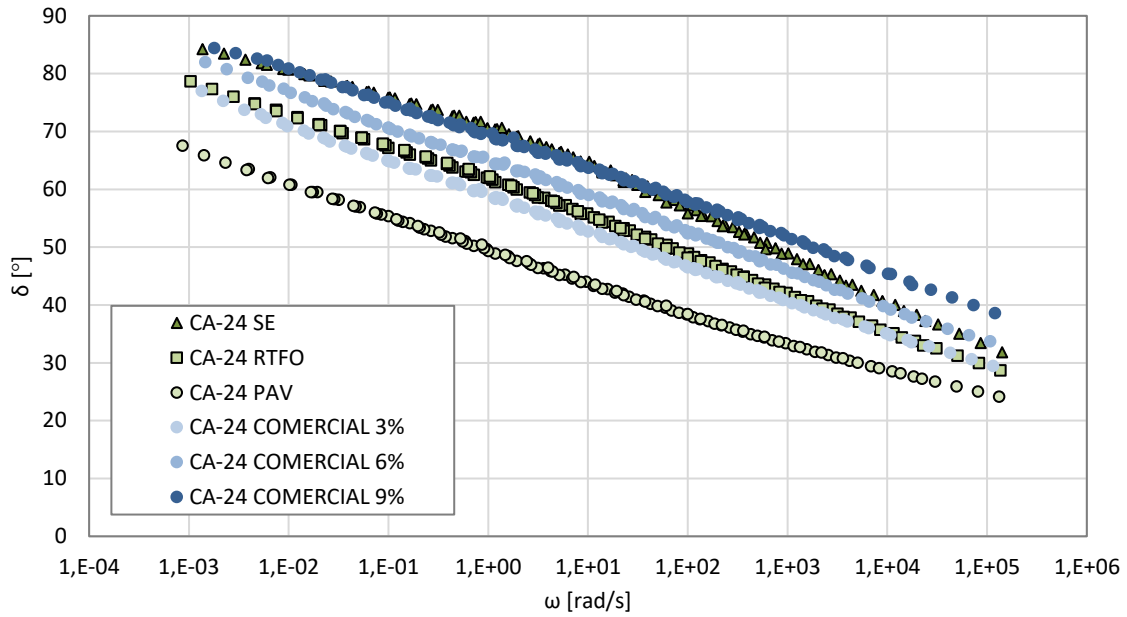


Figura 7.7.16. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-24 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia)

### 7.7.6. CA-14 con RC en dosis de 3, 6 y 9%

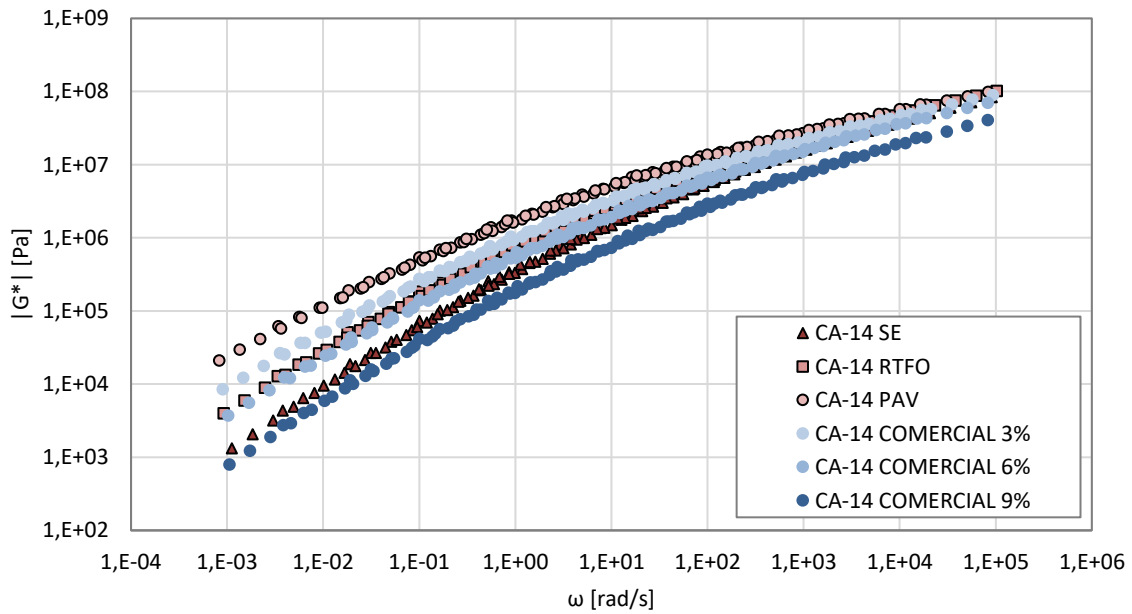


Figura 7.7.17. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante CA-14 con RC en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia)

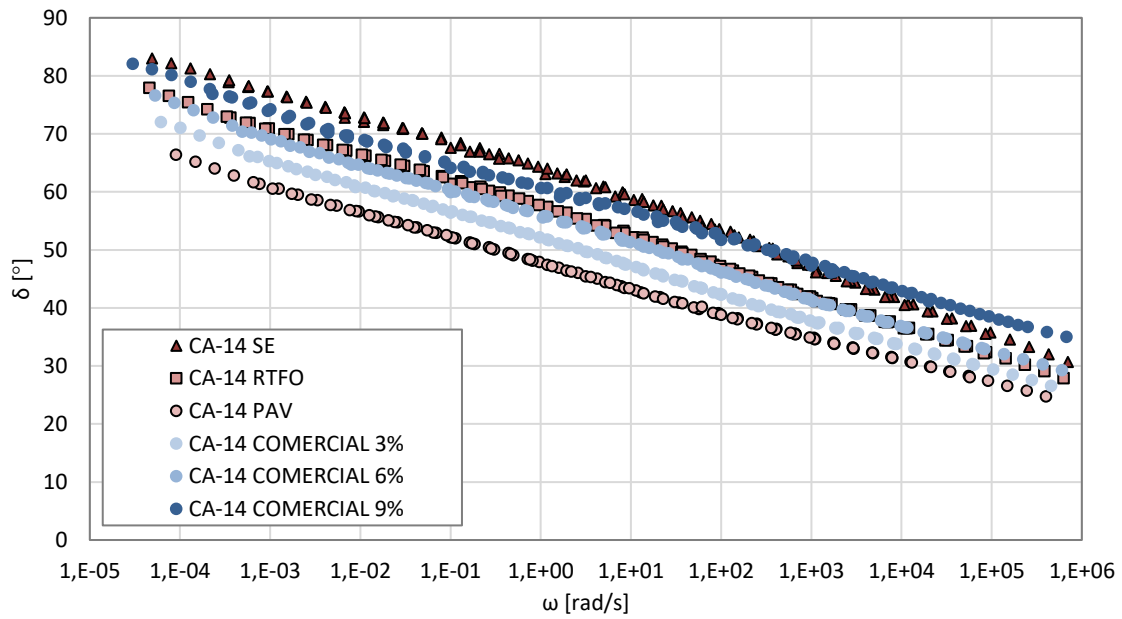


Figura 7.7.18. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante CA-14 con LPO-M en dosis de 3, 6 y 9%. (Elaboración propia)

### 7.7.7. RAP con RC en dosis de 3, 6, 9 y 12%

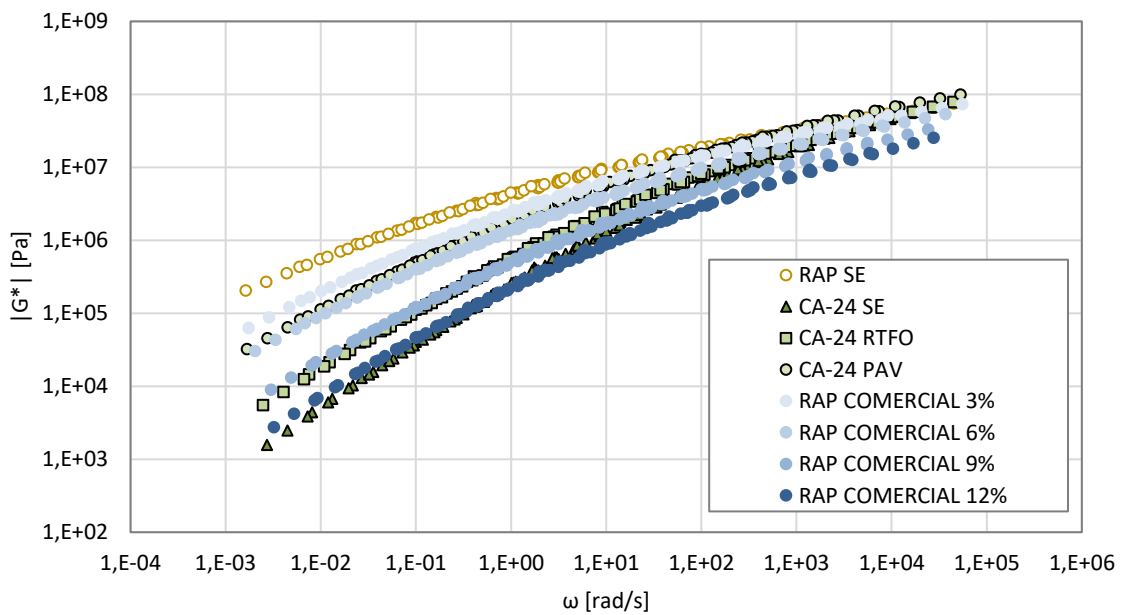


Figura 7.7.19. Curvas maestras de módulo dinámico de corte ( $|G^*|$ ) del ligante RAP con RC en dosis de 3, 6, 9 y 12%. (Elaboración propia)

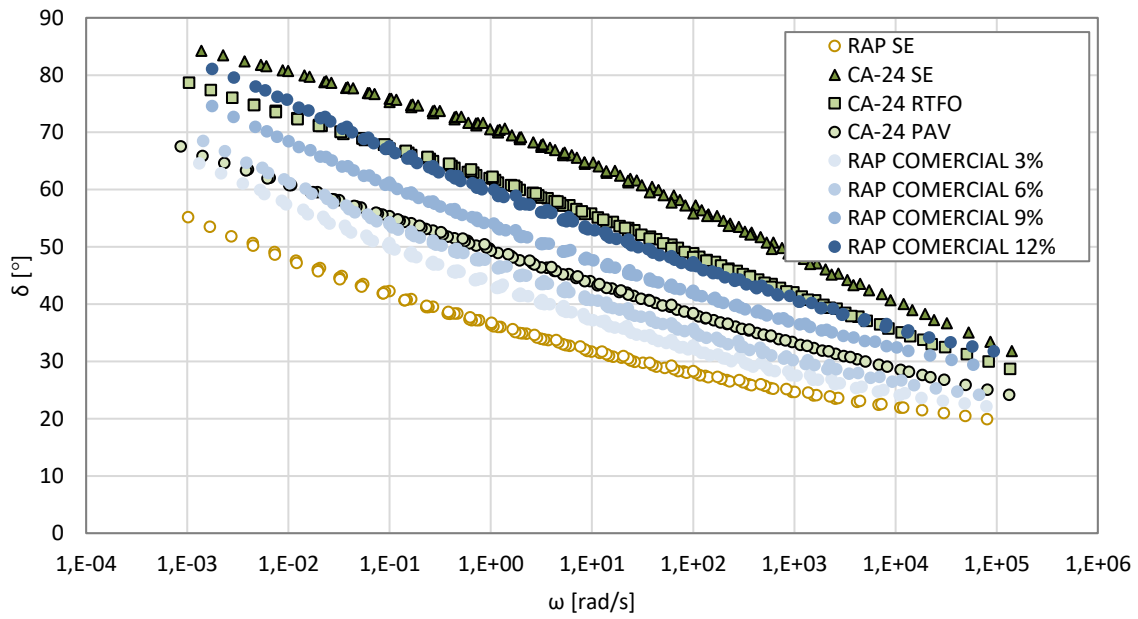


Figura 7.7.20. Curvas maestras del ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante RAP con RC en dosis de 3, 6, 9 y 12%. (Elaboración propia)

## 7.8. Anexo 8: Curvas maestras análisis comparativo LPO-M y RC

### 7.8.1. Misma dosis (%) de LPO-M aplicado al CA-24, CA-14 y RAP

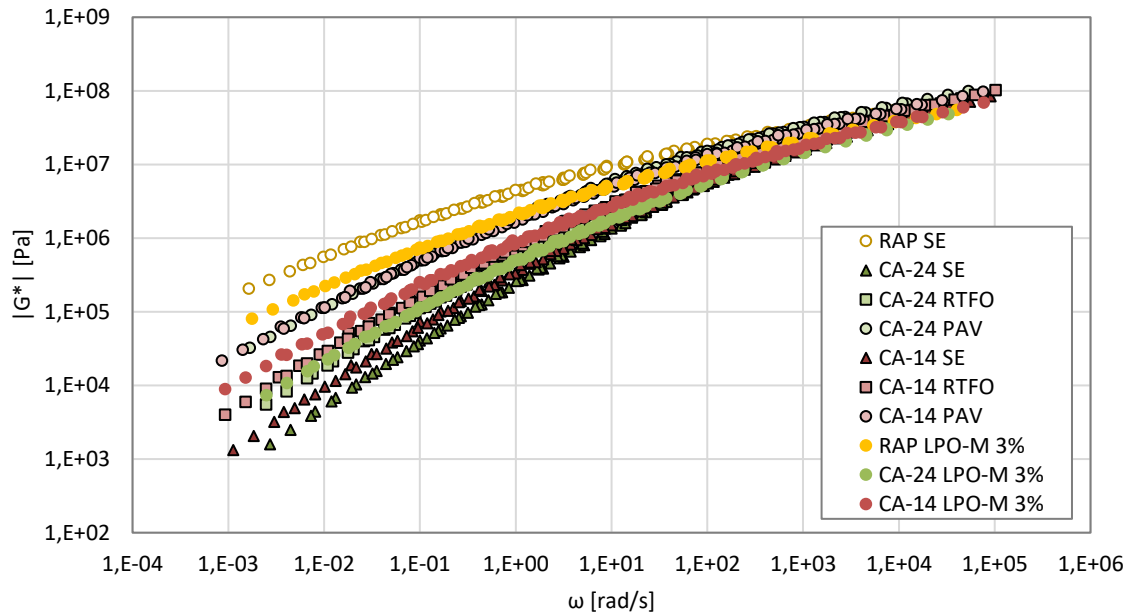


Figura 7.8.1. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 3%. (Elaboración propia)

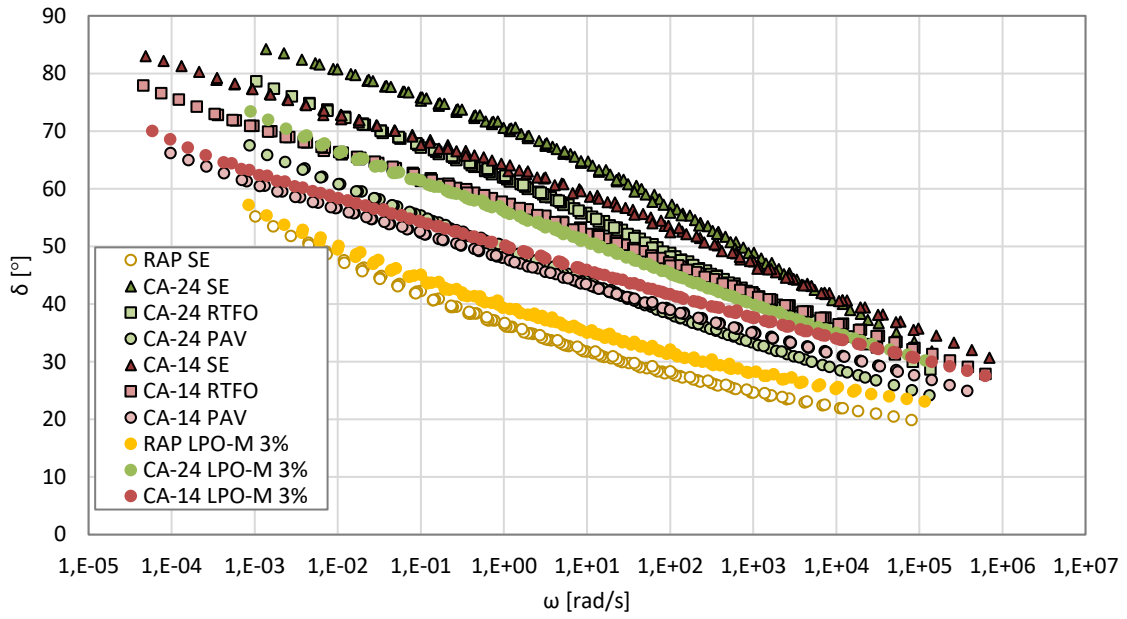


Figura 7.8.2. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 3%. (Elaboración propia)

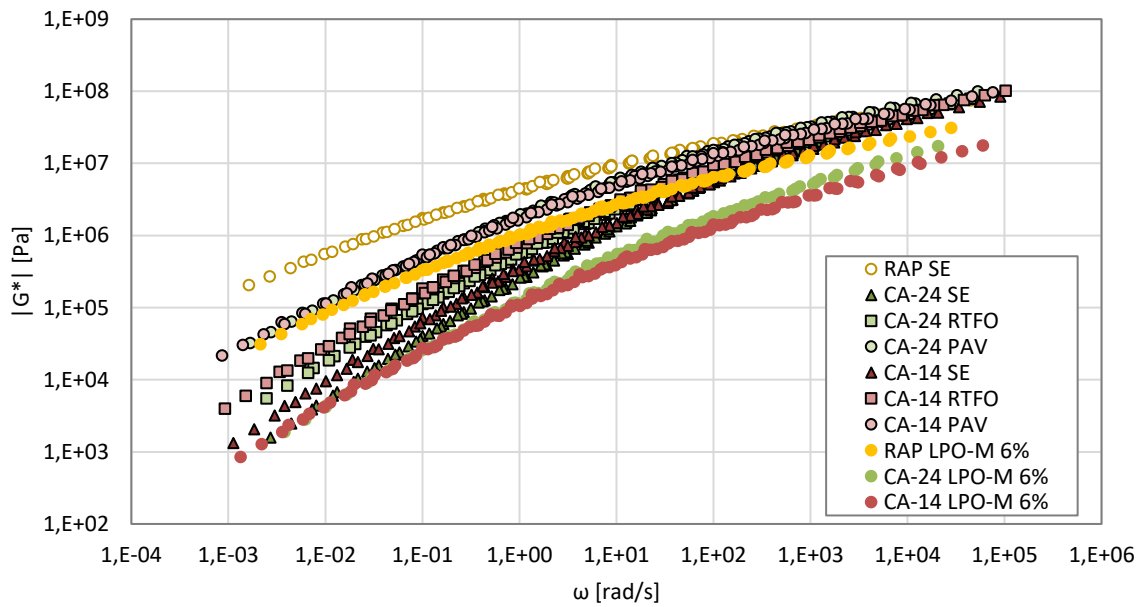


Figura 7.8.3. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 6%. (Elaboración propia)

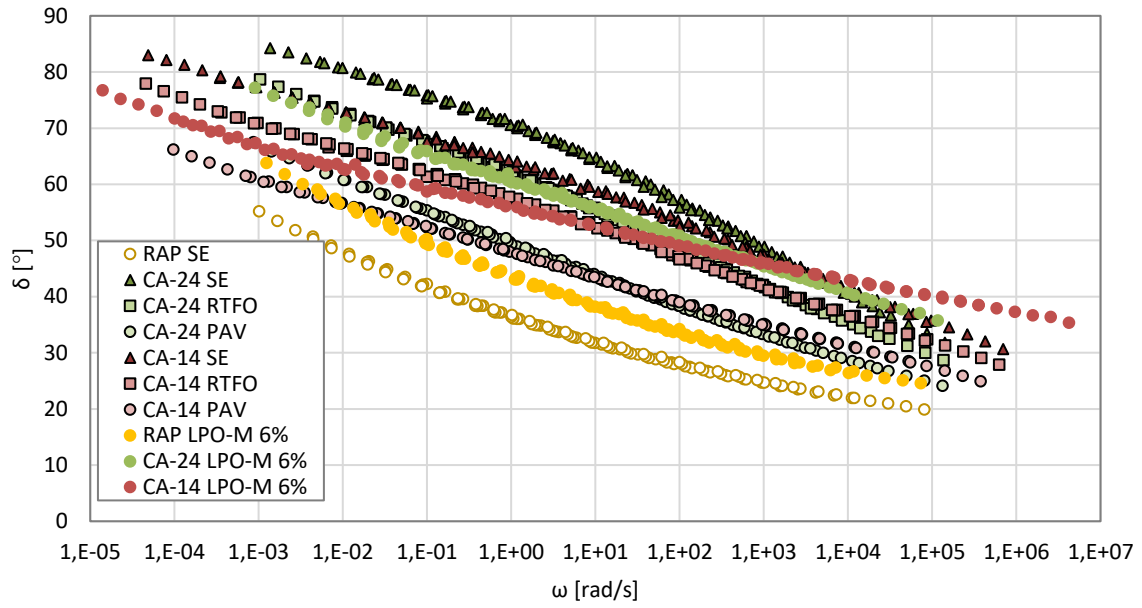


Figura 7.8.4. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 6%. (Elaboración propia)

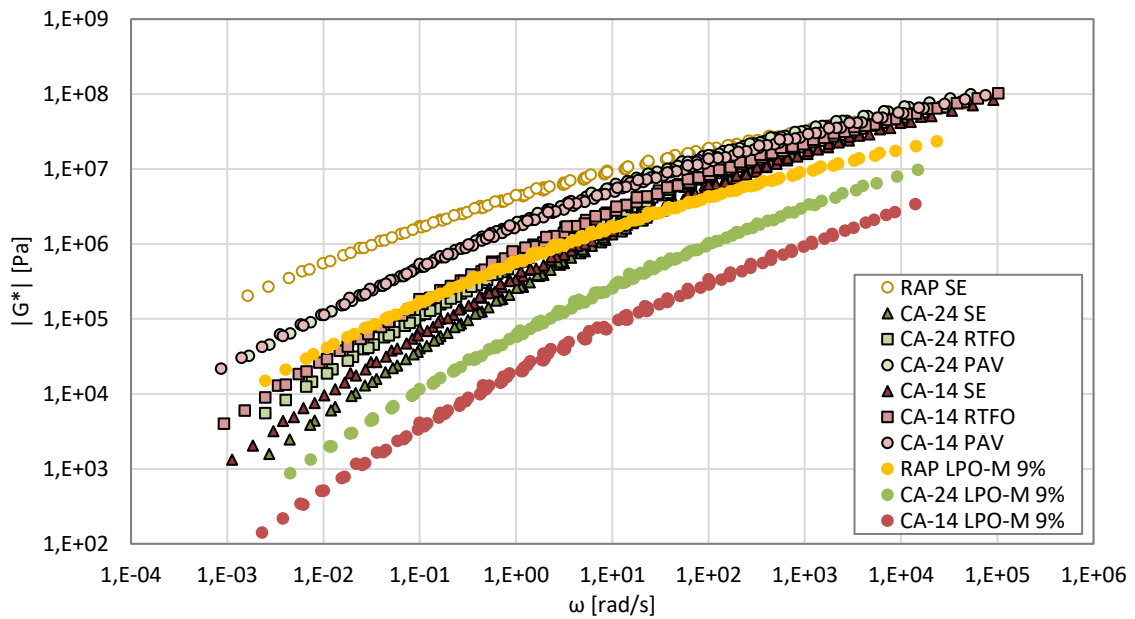


Figura 7.8.5. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 9%. (Elaboración propia)

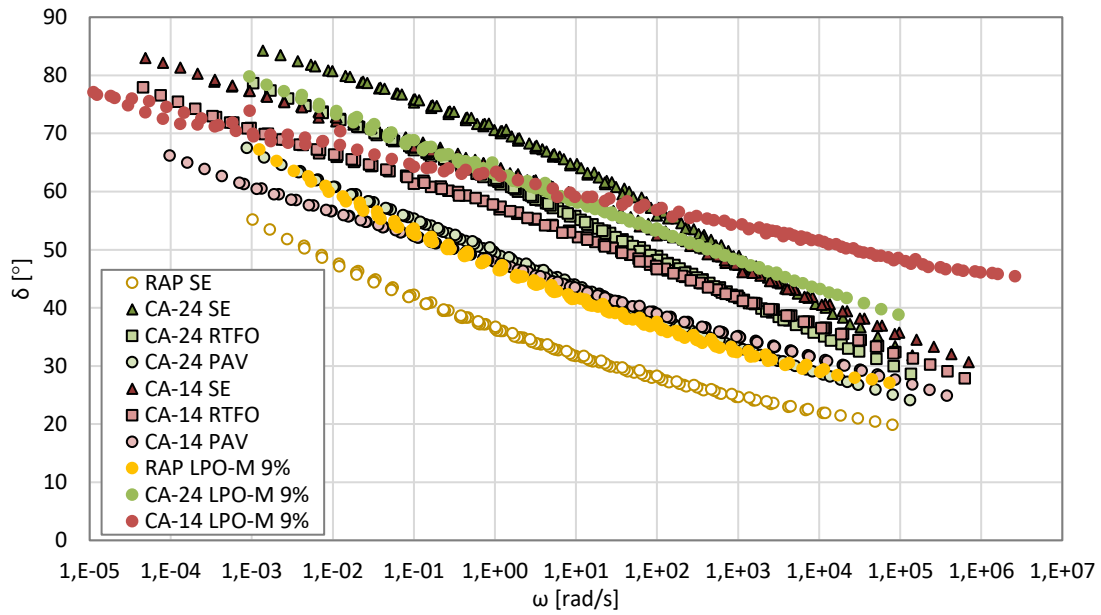


Figura 7.8.6. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con LPO-M en dosis de 9%. (Elaboración propia)

### 7.8.2. Misma dosis (%) de RC aplicado al CA-24, CA-14 y RAP

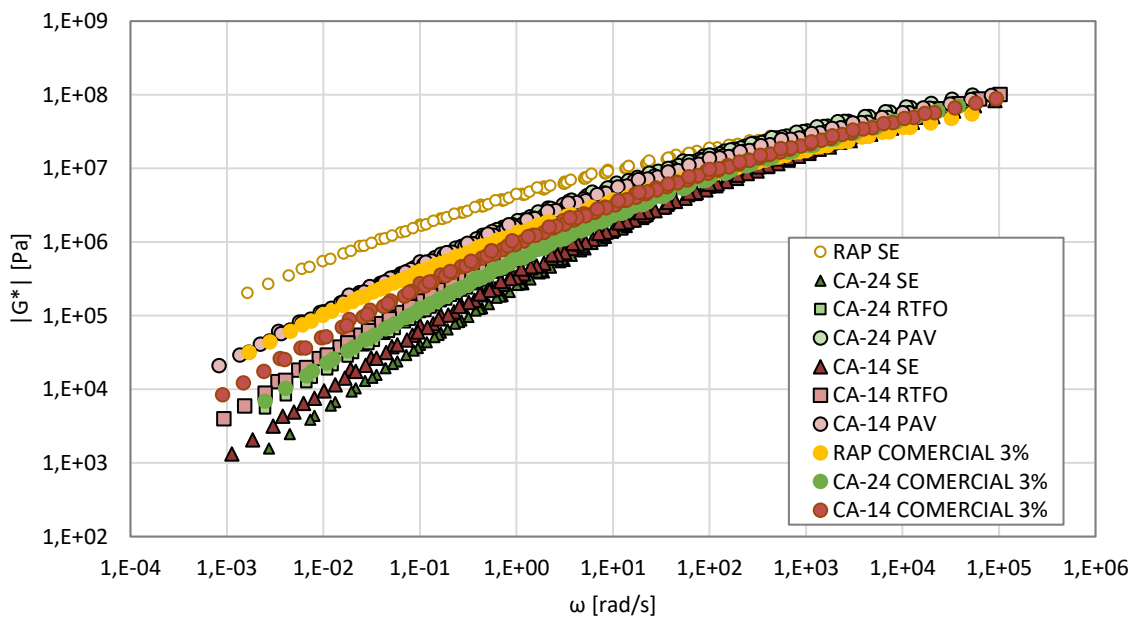


Figura 7.8.7. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 3%. (Elaboración propia)

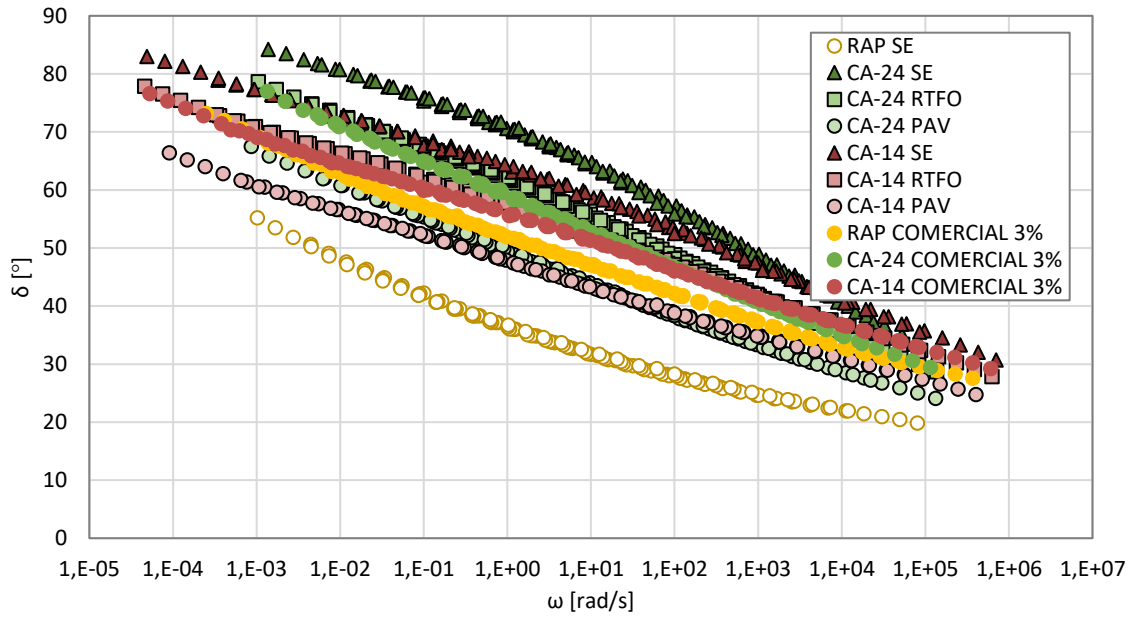


Figura 7.8.8. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 3%. (Elaboración propia)

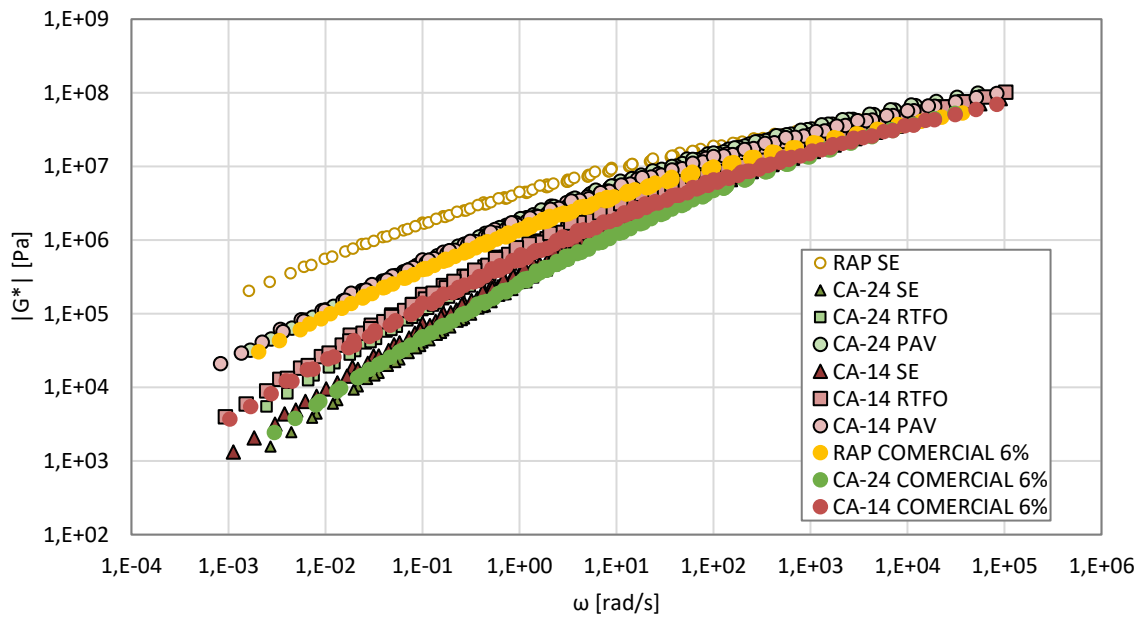


Figura 7.8.9. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 6%. (Elaboración propia)

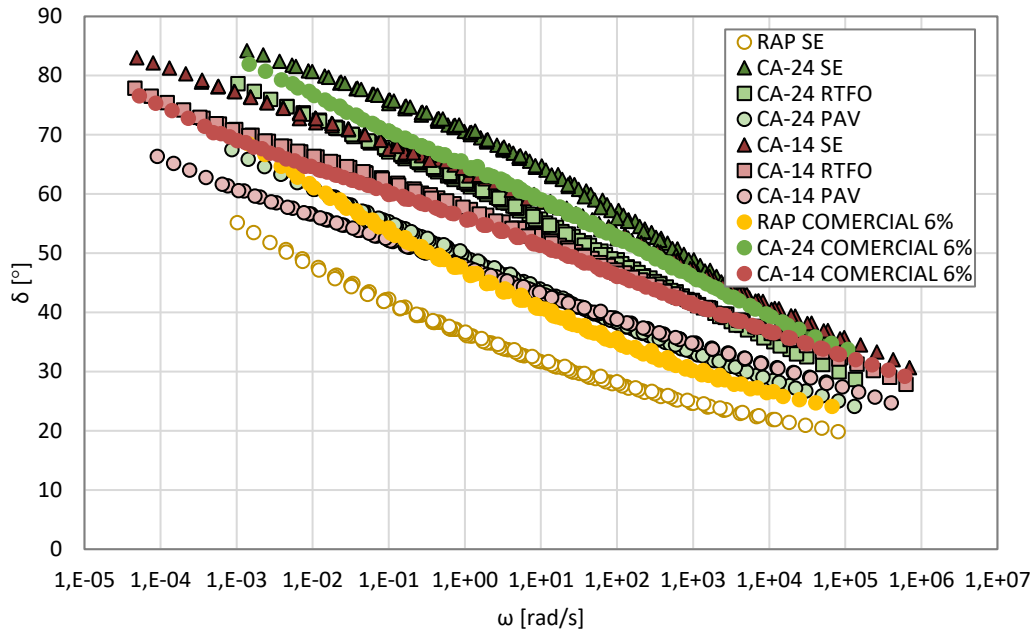


Figura 7.8.10. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 6%. (Elaboración propia)

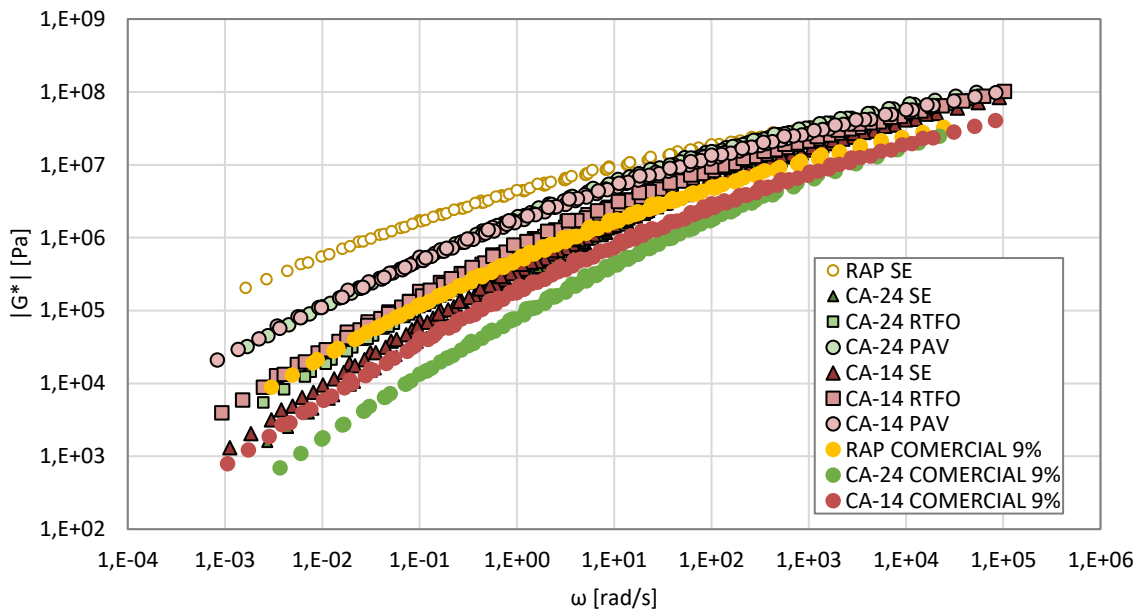


Figura 7.8.11. Curvas maestras de módulo dinámico de corte de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 9%. (Elaboración propia)

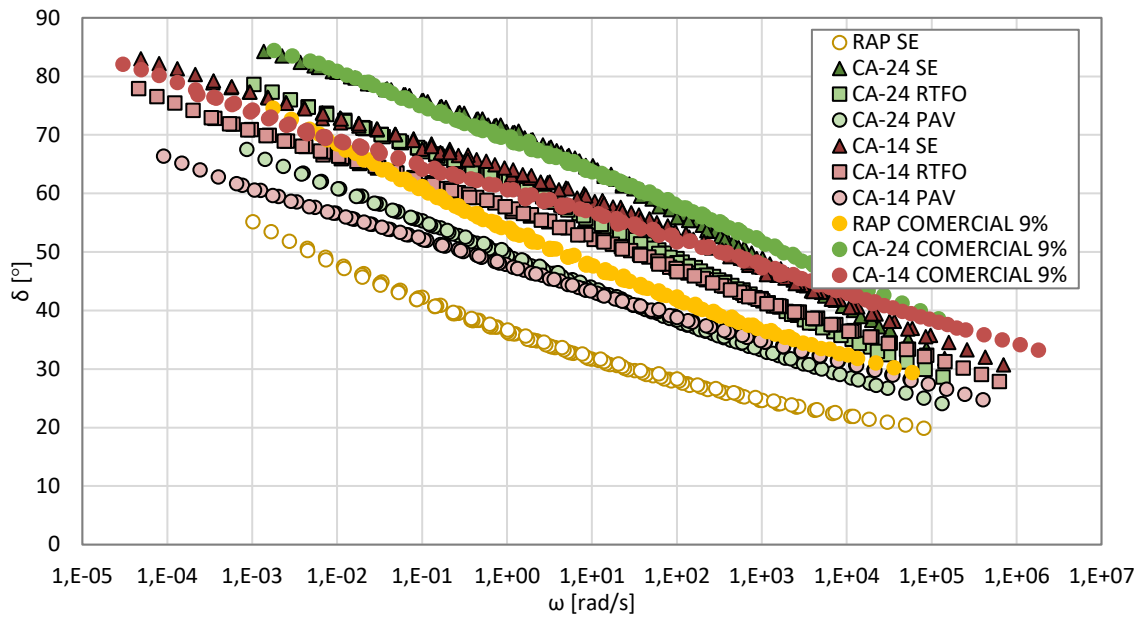


Figura 7.8.12. Curvas maestras del ángulo de fase de CA-24, CA-14 y RAP con RC en dosis de 9%. (Elaboración propia)

### 7.8.3. Diferentes dosis de LPO-M y RC aplicado al CA-24

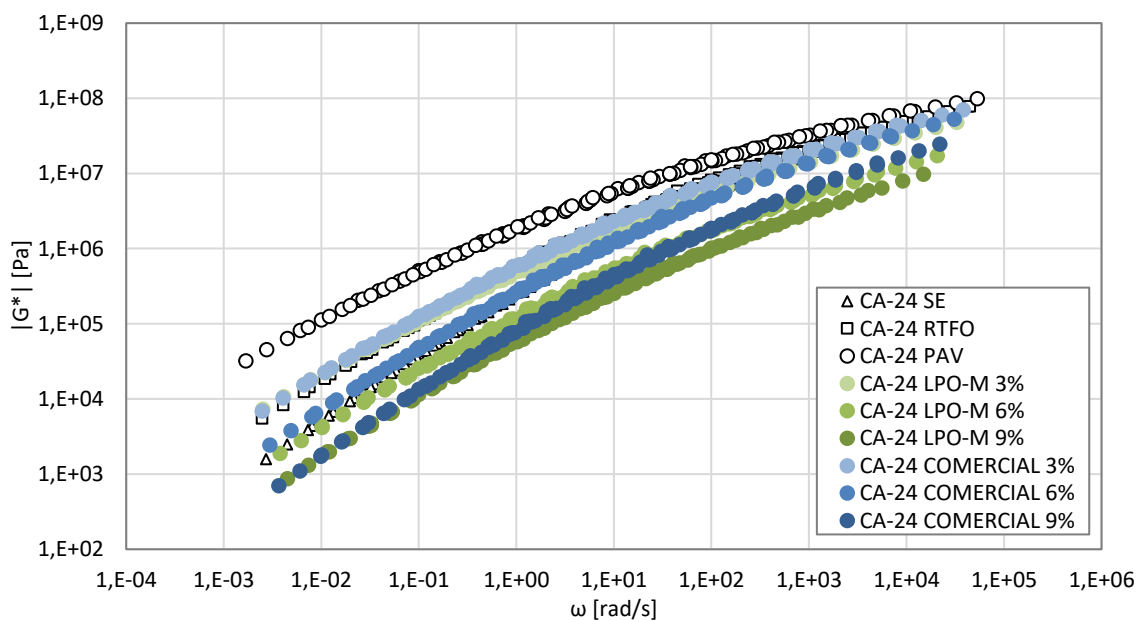


Figura 7.8.13. Curvas maestras de CA-24 con RC y LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% del módulo dinámico de corte. (Elaboración propia)

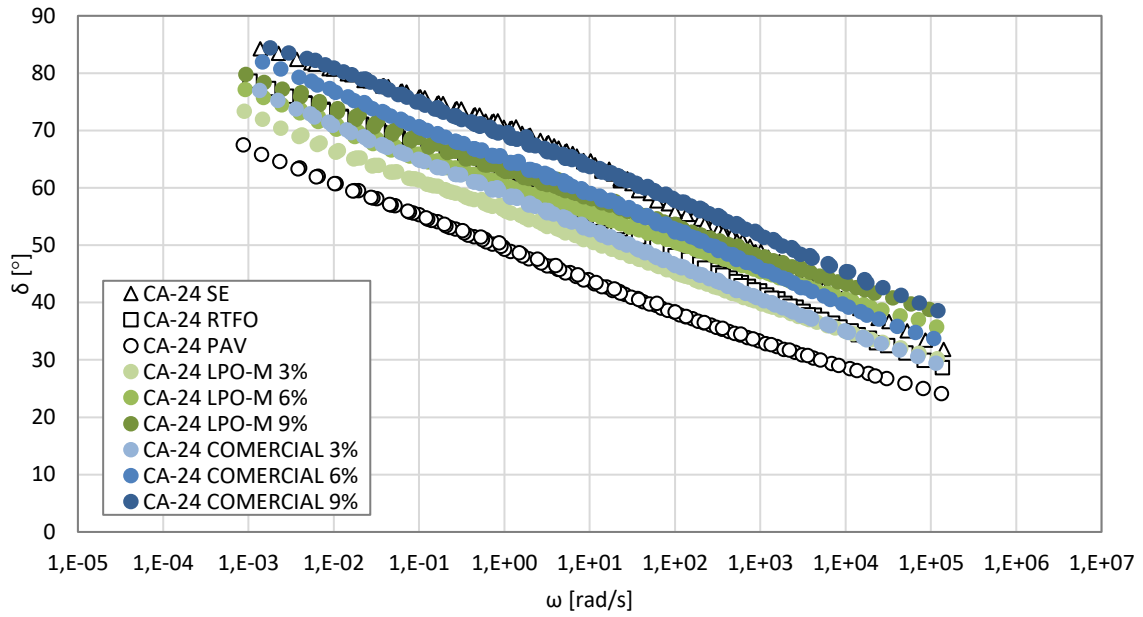


Figura 7.8.14. Curvas maestras de CA-24 con RC y LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% del ángulo de fase. (Elaboración propia)

#### 7.8.4. Diferentes dosis de LPO-M y RC aplicado al CA-14

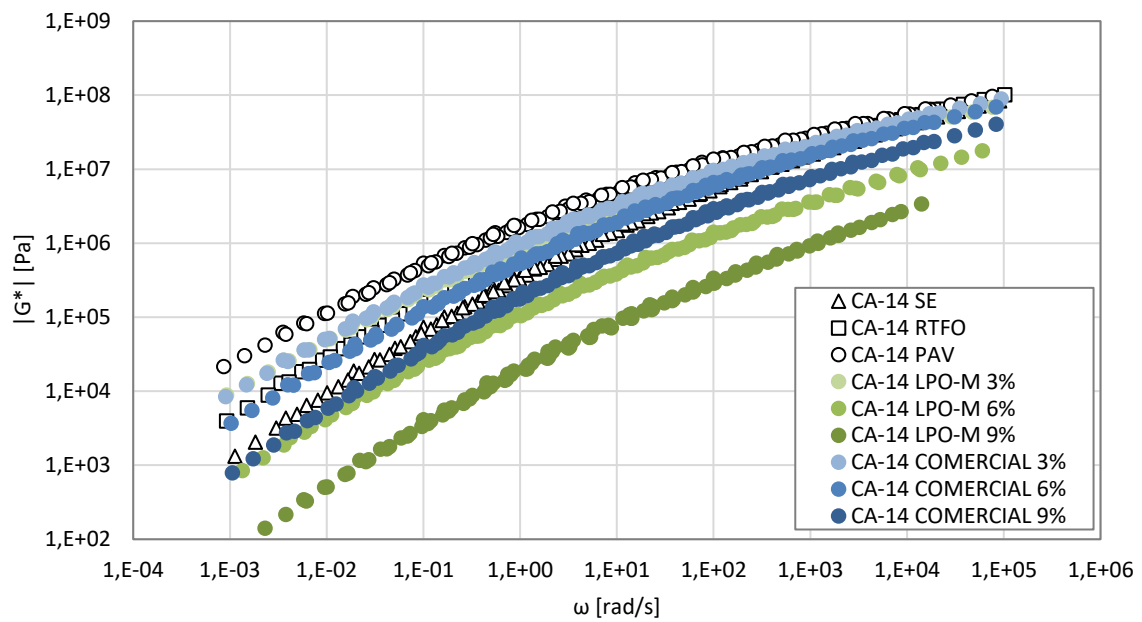


Figura 7.8.15. Curvas maestras de CA-14 con RC y LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% del módulo dinámico de corte. (Elaboración propia)

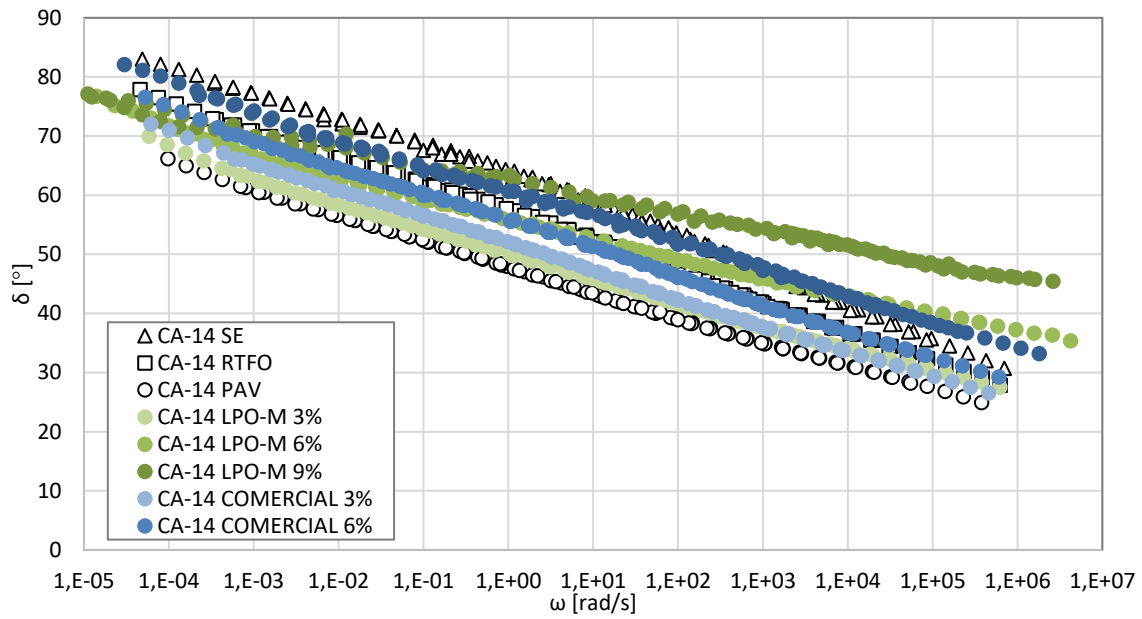


Figura 7.8.16. Curvas maestras de CA-14 con RC y LPO-M en dosis de 3, 6 y 9% del ángulo de fase. (Elaboración propia)

### 7.8.5. Diferentes dosis de LPO-M y RC aplicado a RAP

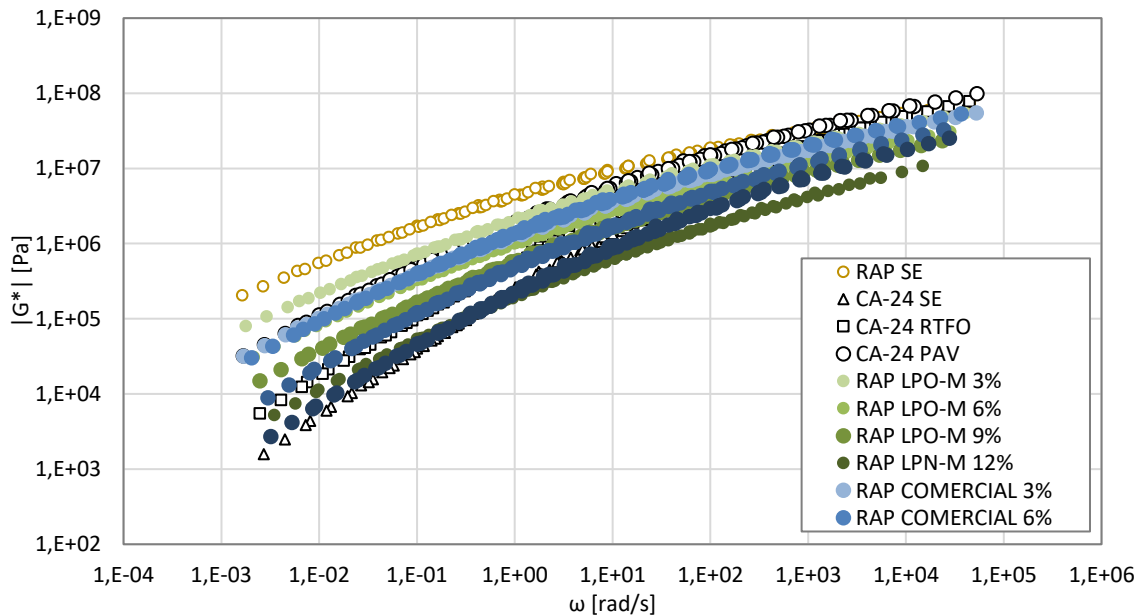


Figura 7.8.17. Curvas maestras de RAP con RC y LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12% del módulo dinámico de corte. (Elaboración propia)

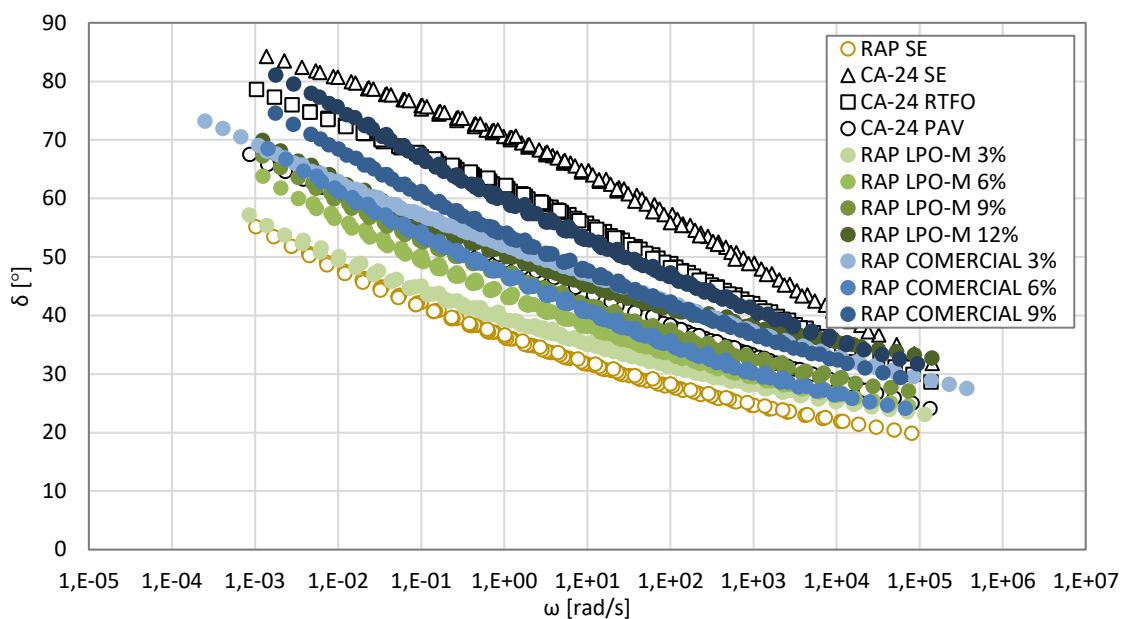


Figura 7.8.18. Curvas maestras de RAP con RC y LPO-M en dosis de 3, 6, 9 y 12% del ángulo de fase. (Elaboración propia)

## 7.9. Anexo 9: Características LPO-M

En la Tabla 7.9.1 se presenta la caracterización de la muestra líquida (LPO-M) abarcando la identificación y cuantificación de compuesto químicos por GC-MS, evaluación del envejecimiento acelerado y la identificación de los principales grupos funcionales mediante FTIR.

Tabla 7.9.1. Caracterización química del líquido pirolítico LPO-M. (Fuente: Informe técnico de resultado Hito 1 proyecto FONDEF ID21110127)

Compuesto (%)	LPO-M
Benceno	N.D
Tolueno	4,37
Xileno	4,44
Total BTX	<b>8,81</b>
Limoneno	<b>36,0</b>
Cimeno	10,57
Terpenos	31,09
Monoaromáticos	<b>43,2</b>
Terpenos + Monoaromáticos	74,29
Máltenos	100
Alcanos	9,02
Alquenos	7,75
HPAs	2,31
Estabilidad al envejecimiento (%)	93,3

N.D: No detectado; BTX: Benceno, Tolueno y Xileno; HPAs: Hidrocarburos policíclicos aromáticos.