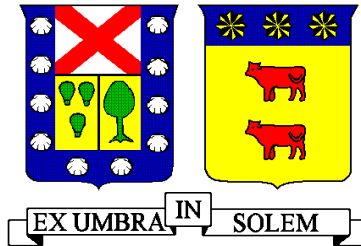


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO CON
ABLANDADOR Y POLVO DE CAUCHO RECICLADO**

Memoria de titulación presentada por
KATHERINE ROCÍO LANDEROS CASTILLO

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Rodrigo Delgadillo Sturla

Agosto 2019

Dedicado a la memoria de mi padre, Luis Alberto Landeros Valenzuela

AGRADECIMIENTOS

Al llegar al final de esta etapa tan importante, quiero dedicar unas palabras a quienes han sido partícipes de este proceso:

Gracias infinitas a mis padres, por darme la oportunidad de estudiar e impulsarme siempre a luchar por concretar mis objetivos y metas. A mi madre, que siempre tuvo una palabra de aliento para calmar mi angustia en momentos difíciles, por confiar en mí y apoyarme en todo momento. A mi padre, por estar siempre preocupado de que durmiera lo necesario y no me quedara estudiando hasta tarde, por consentirme y darme su amor incondicional; lamentablemente la vida no nos permitió vivir este momento juntos, pero estoy segura de que desde el cielo me sigue acompañando y cuidando.

Gracias a mis hermanas, Ana Patricia, Loredana y Verónica, por darme apoyo económico y emocional en todo momento, por sus consejos y su ayuda; sin duda fueron un pilar fundamental en este proceso.

Gracias a mi compañero de vida, Hernán, por estar conmigo desde que decidí estudiar Ingeniería Civil, por acompañarme durante esas largas noches de estudio y por su paciencia inigualable en período de certámenes. No fue para nada fácil, pero me siento muy afortunada de haber vivido este proceso juntos de inicio a fin.

Gracias a mis amigas, Javiera, Valentina e Isadora, por cruzarse en mi camino para afrontar juntas este desafío, por el apoyo y la bella amistad que nos une hasta el día de hoy.

Gracias al personal de LEMCO, especialmente a Rodrigo Verdugo, Alejandra Zamora y Paul Gálvez, por su buena disposición y porque no sólo me ayudaron con su conocimiento técnico, sino que sus consejos y palabras de aliento fueron fundamentales para seguir adelante cuando las cosas no salían como esperaba. Estaré eternamente agradecida de haberlos conocido.

Por último, agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma, me acompañaron durante estos años de estudio.

RESUMEN

Ante la necesidad de preservar los pavimentos el mayor tiempo posible en su condición original, existe una búsqueda constante de nuevos elementos que permitan mejorar las propiedades reológicas del asfalto y, de esta manera, llevar su desempeño a niveles de satisfacción más altos. En paralelo, el problema de la acumulación de neumáticos afecta a todo el mundo, convirtiéndose en un foco de contaminación y enfermedades; sin embargo, estudios a lo largo de la historia han demostrado que el uso de polvo de caucho reciclado es capaz de aumentar la resistencia del asfalto a sus principales deterioros, y a la vez, dar una solución a esta problemática medioambiental.

Cabe destacar que, las diversas investigaciones en el extranjero han demostrado que el polvo de caucho resulta ser una excelente alternativa para mejorar el desempeño de ligantes asfálticos teniendo, además, mayores ventajas económicas y medioambientales en comparación a los modificadores convencionales que se encuentran en el mercado.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es analizar el efecto modificador del polvo de caucho reciclado en el asfalto, con el fin de establecer una relación entre la concentración de modificador y las propiedades reológicas del asfalto modificado. De esta manera, se busca poder determinar las concentraciones de polvo de caucho que cumplen con los diferentes límites de la clasificación por clima estipulados en la norma AASHTO M332-14, en base a los valores de flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) entregados en el ensayo "Multiple Stress Creep and Recovery" (MSCR).

Específicamente, se utiliza un aditivo ablandador que permita obtener un ligante con clasificación Superpave PG 58-28 (recomendado para las zonas norte y sur de nuestro país), a partir de un cemento asfáltico convencional CA-24. Se consideran concentraciones de polvo de caucho de 0%, 5%, 7% y 10%, incorporadas al ligante asfáltico por vía húmeda, utilizando un mezclador de alto corte a 3000 [rpm], por un tiempo y temperatura de mezclado de 60 minutos y 180°C, respectivamente.

A partir de los resultados obtenidos, se puede apreciar que el polvo de caucho tiene un efecto positivo en las propiedades del ligante asfáltico, logrando aumentar su resistencia al ahuellamiento, fatiga y agrietamiento térmico, además de disminuir su susceptibilidad térmica. Sin embargo, sería de gran importancia estudiar la interacción que existe entre el ablandador y el polvo de caucho, y la manera en que ésta influye en las propiedades reológicas del asfalto modificado y su desempeño tanto a alta como a baja temperatura.

Finalmente, resulta trascendental seguir investigando el efecto del polvo de caucho en ligantes asfálticos, considerando las solicitaciones de carga y condiciones climáticas del lugar de emplazamiento, así como también, elaborar un manual de empleo de caucho en mezclas asfálticas que no sólo indique las condiciones de temperatura y tiempo de mezclado, sino que también establezca límites para el tamaño de partículas y concentración del polvo de caucho a utilizar para el proceso de modificación.

Palabras clave: Ligante asfáltico, polvo de caucho, asfalto modificado, Multiple Stress Creep and Recovery, Superpave, vía húmeda, clasificación por clima.

ABSTRACT

Given the need to preserve the pavements in their original condition for as long as possible, there is a constant search for new elements that allow improving the rheological properties of asphalt and, in this way, improve its performance. In turn, the problem of waste tires accumulation affects everyone, becoming a source of pollution and diseases; however, studies throughout history have shown that using recycled crumb rubber can increase the resistance of asphalt to its main deterioration, whilst providing a solution to this environmental problem.

It should be noted that the various investigations abroad have shown that crumb rubber is an excellent alternative to improve the performance of asphalt binders, also having greater economic and environmental advantages compared to conventional modifiers found in the civil engineering market.

The main objective of this research work is to analyze the effect of recycled crumb rubber on asphalt, in order to establish a relationship between the modifier concentration and the rheological properties of the modified asphalt. Thus, it seeks to determine the concentrations of crumb rubber that meet the different climate classification limits, stated in the AASHTO M332-14 standard, based on the values of non-recoverable creep compliance (J_{nr}) provided in the "Multiple Stress Creep and Recovery" (MSCR) test.

Specifically, a softening additive is used to obtain a binder PG 58-28 (recommended for the northern and southern regions of our country), from a conventional asphalt binder CA-24. Crumb rubber concentrations of 0%, 5%, 7% and 10% were considered, incorporated into the asphalt binder by wet process, using a high-shear mixer at 3000 [rpm], for a mixing time and temperature of 60 minutes and 180°C, respectively.

The results show that the crumb rubber has a positive effect on the properties of the asphalt binder, increasing its resistance to rutting, fatigue and thermal cracking, in addition to reducing its thermal susceptibility. However, it would be of great importance to study the interaction between the softener and the crumb rubber, and the way in which it influences the rheological properties of modified asphalt and its performance at both high and low temperatures.

Lastly, it is important to keep investigating the effect of crumb rubber on asphalt binders, considering the load stresses and climatic conditions of the site, as well as to develop a manual for the use of rubber in asphalt mixtures that not only states the conditions of temperature and mixing time, but also set limits for the particle size and concentration of the crumb rubber to be used for the modification process.

Keywords: Asphalt binder, crumb rubber, modified asphalts, Multiple Stress Creep and Recovery, Superior Performing Asphalt Pavement, wet process, Climate Classification.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes Generales	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Alcance	3
1.4 Metodología	4
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Introducción a Superpave	5
2.1.1 Envejecimiento.....	5
2.1.2 Efecto tiempo y temperatura.....	5
2.2 Métodos de ensaye y equipos Superpave	6
2.2.1 Procedimientos de envejecimiento.....	6
2.2.2 Viscosímetro rotacional Brookfield	9
2.2.3 Reómetro de Corte Dinámico (DSR).....	10
2.2.4 Reómetro de Viga de Flexión (BBR)	11
2.2.5 Ensayo de Tracción Directa (DTT).....	13
2.2.6 Otros ensayos	14
2.3 Etapas de vida del asfalto y especificaciones Superpave	17
2.3.1 Primera etapa	17
2.3.2 Segunda etapa.....	17
2.3.3 Tercera etapa	17
2.4 Clasificación Superpave.....	19
2.5 Selección de un ligante asfáltico según su lugar de emplazamiento	22
2.5.1 Zonificación Superpave del territorio chileno	22

2.5.2	Tipo de Tránsito.....	24
2.5.3	Grado de desempeño del ligante requerido	24
2.6	Aditivos o modificadores.....	24
2.6.1	Índice de Temperatura Útil (ITU) para clasificación PG	25
2.6.2	Tipos de modificadores	25
2.7	Ablandadores	26
2.7.1	Tipos de ablandadores	26
2.7.2	Efecto de aceites ablandadores en ligantes asfálticos.....	27
2.8	Polímeros.....	29
2.9	El caucho como modificador	30
2.9.1	Caucho.....	30
2.9.2	Neumáticos Fuera de Uso (NFU)	33
2.10	Asfaltos modificados con caucho	38
2.10.1	Vías de incorporación	38
2.10.2	Proceso de digestión.....	41
2.10.3	Evolución histórica.....	43
2.10.4	Estudios relevantes.....	45
2.10.5	Influencia del área superficial y tamaño de las partículas de caucho	49
2.10.6	Estabilidad de almacenamiento.....	50
2.11	Interacción ablandador – polvo de caucho.....	51
2.12	Especificaciones asfaltos modificados	52
2.12.1	Cementos asfálticos modificados con polímeros	52
2.12.2	Mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho	52
2.13	Especificación Superpave	54
2.14	Especificación mediante ensayo Multiple Stress Creep and Recovery	55
3	EXPERIMENTACIÓN	60
3.1	Materiales	60
3.1.1	Ligante asfáltico.....	60
3.1.2	Aditivo ablandador	61
3.1.3	Polvo de caucho	61
3.2	Proceso de modificación	62
3.2.1	Modificación con ablandador.....	63
3.2.2	Modificación con polvo de caucho.....	64

3.3	Ensayos y plan de trabajo.....	65
3.3.1	Modificación con ablandador.....	65
3.3.2	Modificación con polvo de caucho.....	67
3.3.3	Porcentajes finales	69
4	RESULTADOS	70
4.1	Modificación con ablandador.....	70
4.1.1	Viscosidad rotacional	70
4.1.2	Caracterización PG	71
4.1.3	Multiple Stress Creep and Recovery	71
4.2	Modificación con polvo de caucho.....	72
4.2.1	Viscosidad rotacional	72
4.2.2	Multiple Stress Creep and Recovery	74
4.3	Porcentajes finales	77
4.3.1	Ajustes	77
4.3.2	Caracterización PG de porcentajes de polvo de caucho elegidos.....	81
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
6	REFERENCIAS.....	91
7	ANEXOS	95
7.1	Anexo 1: Ablandadores	95
7.1.1	Tipos de ablandadores	95
7.1.2	Efecto de aceites ablandadores en ligantes asfálticos.....	97
7.2	Anexo 2: Polímeros	107
7.2.1	Tipos de polímeros	107
7.2.2	Ventajas y desventajas del uso de polímeros en asfaltos	110
7.3	Anexo 3: Experiencia en Estados Unidos. “Effect of Crumb Rubber on Rheological Properties of Asphalt Binder and Aggregate Packing of Asphalt Mixtures”	113
7.4	Anexo 4: Interacción Ablandador – Polvo de Caucho. “Evaluation of the Effect of bio-oil on the High-temperature Performance of Rubber Modified Asphalt”	119
7.4.1	Materiales.....	119
7.4.2	Proceso de modificación	119
7.4.3	Ensayos y resultados	120
7.4.4	Análisis.....	125
7.4.5	Conclusiones.....	126

7.5	Anexo 5: Caracterización PG ligante base	127
7.6	Anexo 6: Granulometría polvo de caucho.....	132
7.7	Anexo 7: Viscosidades modificación con ablandador	132
7.7.1	Ligante base – 0% de ablandador.....	132
7.7.2	Modificación con 3% de ablandador.....	132
7.7.3	Modificación con 5% de ablandador.....	133
7.7.4	Modificación con 7% de ablandador.....	133
7.7.5	Modificación con 14% de ablandador.....	133
7.7.6	Modificación con 15% de ablandador.....	134
7.8	Anexo 8: Caracterización PG modificación con ablandador	135
7.8.1	Modificación con 3% de Ablandador	135
7.8.2	Modificación con 5% de ablandador.....	140
7.8.3	Modificación con 7% de ablandador.....	145
7.8.4	Modificación con 12% de ablandador.....	150
7.8.5	Modificación con 14% de ablandador.....	155
7.8.6	Modificación con 15% de ablandador.....	160
7.9	Anexo 9: Resumen resultados MSCR y análisis de varianza para muestras con 7% de ablandador	165
7.9.1	Resultados MSCR a 58°C – Modificación con 7% de ablandador.....	165
7.9.2	Análisis de varianza ANOVA – Modificación con ablandador	165
7.10	Anexo 10: Resultados MSCR modificación con 7% de ablandador utilizando mezclador	166
7.10.1	Modificación 1	166
7.10.2	Modificación 2	168
7.10.3	Modificación 3	170
7.11	Anexo 11: Viscosidades modificación con ablandador y polvo de caucho	173
7.11.1	Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho.....	173
7.11.2	Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho.....	173
7.11.3	Modificación con 7% de ablandador y 7% de polvo de caucho.....	175
7.11.4	Modificación con 7% de ablandador con 10% de polvo de caucho	176
7.12	Anexo 12: Resultados MSCR modificación con 7% de ablandador utilizando dispersor	177
7.12.1	Modificación 1	177
7.12.2	Modificación 2	179

7.12.3	Modificación 3	181
7.13	Anexo 13: Análisis de repetibilidad en muestras con 7% de ablandador	183
7.14	Anexo 14: Resultados MSCR modificación con polvo de caucho.....	185
7.14.1	Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho.....	185
7.14.2	Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra H) .	187
7.14.3	Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra I)...	189
7.14.4	Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J) ..	191
7.14.5	Modificación con 7% de ablandador y 7% de polvo de caucho.....	194
7.14.6	Modificación con 7% de ablandador y 10% de polvo de caucho.....	196
7.15	Anexo 15: Análisis de repetibilidad modificación con polvo de caucho	198
7.16	Anexo 16: Caracterización PG modificación con 7% de ablandador utilizando dispersor de polímeros en asfalto	199
7.17	Anexo 17: Resultados MSCR modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho.	204
7.18	Anexo 18: Caracterización PG modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho	206
7.19	Anexo 19: Resultados MSCR modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho	211
7.20	Anexo 20: Caracterización PG modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho	213

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: EFECTO TIEMPO-TEMPERATURA EN LIGANTES ASFÁLTICOS, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 2000	6
FIGURA 2: HORNO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA (HPDR), LEMCO.	7
FIGURA 3: ILUSTRACIÓN DE CONTENEDORES CILÍNDRICOS HPDR, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 2000	7
FIGURA 4: CÁMARA A PRESIÓN (PAV), LEMCO.	8
FIGURA 5: CÁMARA DESGASIFICADORA, LEMCO.	8
FIGURA 6: VISCOSÍMETRO ROTACIONAL DE BROOKFIELD, LEMCO	9
FIGURA 7: REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (DSR), LEMCO	10
FIGURA 8: ESFUERZO DE CORTE APLICADO Y DEFORMACIÓN RESULTANTE EN EQUIPO DSR, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 2000	11
FIGURA 9: CURVA DE DEFLEXIÓN EN EL TIEMPO, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 2000.	11
FIGURA 10: CURVA DE RIGIDEZ VS Y TIEMPO DE CARGA, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 2000.	12
FIGURA 11: REÓMETRO DE VIGA DE FLEXIÓN (BBR), LEMCO	13
FIGURA 12: MOLDE PARA LA VIGA DE ENSAYE EN EQUIPO BBR, LEMCO.....	13
FIGURA 13: ESQUEMA DE ENSAYO DTT, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 2000	14
FIGURA 14: RELACIÓN ESFUERZO-DEFORMACIÓN A PARTIR DE ENSAYO DTT, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 2000	14
FIGURA 15: EJEMPLO DE DATOS DE SALIDA EN BARRIDO DE FRECUENCIAS, AASHTO TP101-12	16
FIGURA 16: ESQUEMA DE CARGA PRUEBA DE BARRIDO DE AMPLITUD, AASHTO TP101-12	16
FIGURA 17: ESQUEMA RESUMEN CLASIFICACIÓN POR GRADO DE DESEMPEÑO (PG) USANDO MSCR, ELABORACIÓN PROPIA.....	21
FIGURA 18: CURVA %R VS JNR PARA VERIFICACIÓN DE RESPUESTA ELÁSTICA, COMPLEMENTO N°1, MANUAL DE CARRETERAS VOL. 8, 2019.	21
FIGURA 19: ZONIFICACIÓN SUPERPAVE CHILE UTILIZANDO EL MODELO BASADO EN DAÑO LTPP 3.1, PARA UN 98% DE CONFIABILIDAD, ARTEAGA L. ET AL. 2017.	23
FIGURA 20: EFECTO EN LA RIGIDEZ DE UN ASFALTO MODIFICADO, DELGADILLO R., 2014.	25
FIGURA 21: CRITERIO DE SELECCIÓN ASFALTOS MODIFICADOS, DELMAR SALOMÓN, 2016.	25
FIGURA 22: RELACIÓN TENSIÓN-FATIGA EN ASFALTOS CONVENCIONALES Y A.M.P, VÁZQUEZ I., 2010.	29
FIGURA 23: AHUELLAMIENTO A 60°C EN ASFALTO CONVENCIONAL Y ASFALTO MODIFICADO, VÁZQUEZ I., 2010.	29
FIGURA 24: PROCESO PRODUCTIVO DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE CAUCHO NATURAL, RIVANO F., 2009.....	31
FIGURA 25: PROCESO DE OBTENCIÓN DEL POLVO DE CAUCHO, ELABORACIÓN PROPIA.....	34
FIGURA 26: TRITURACIÓN PRIMARIA, RECICLAJE DE NEUMÁTICOS < HTTP://ICORE.ES/PORTFOLIO_ITEM/CAUCHO-Y-NEUMATICOS/ >	35
FIGURA 27: TRITURACIÓN SECUNDARIA, RECICLAJE DE LLANTAS USADAS, < HTTP://WWW.VIVOENITALIA.COM/LINEA-DE-RECICLAJE-DE-LLANTAS-USADAS/ >.....	35
FIGURA 28: POLVO DE CAUCHO, ACERO Y FIBRA TEXTIL LUEGO DEL PROCESO DE SEPARACIÓN, VIVEROS J. & PEREIRA A., 2015..	36
FIGURA 29: PRODUCTOS ELABORADOS EN BASE A CAUCHO NFU RECICLADO, POLAMBIENTE, 2017.	37
FIGURA 30: UNIDAD DE FABRICACIÓN CON MEZCLADOR Y TANQUE DIGESTOR, BERMEJO J. ET AL. 2014.....	40

FIGURA 31: ESQUEMA DE LA INCORPORACIÓN DE CAUCHO POR VÍA HÚMEDA "IN SITU" PARA LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, BERMEJO J. ET AL. 2014.	40
FIGURA 32: ESQUEMA DE LA INCORPORACIÓN DE CAUCHO POR VÍA SECA PARA LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS, DANTAS S. ET AL. 2006.	41
FIGURA 33: EVOLUCIÓN DE LA INTERACCIÓN BETÚN-CAUCHO, BERMEJO J. ET AL. 2014.	42
FIGURA 34: EVOLUCIÓN DE PROPIEDADES MODIFICADAS, BERMEJO J. ET AL. 2014.	42
FIGURA 35: EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL USO DE POLVO DE CAUCHO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS, ELABORACIÓN PROPIA.	44
FIGURA 36: EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL USO DE POLVO DE CAUCHO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS, ELABORACIÓN PROPIA.	45
FIGURA 37: VALORES DE JNR PARA LIGANTES CON CLASIFICACIÓN PG 64-22 Y PG 70-22, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010.	56
FIGURA 38: GRÁFICO JNR VS TEMPERATURA PARA LIGANTE PG 64-22, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010.	57
FIGURA 39: GRÁFICO JNR VS ESFUERZO PARA LIGANTES CONVENCIONALES Y MODIFICADOS, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010.	57
FIGURA 40: GRÁFICO JNR VS ESFUERZO PARA LIGANTE PG 76-22, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010.	58
FIGURA 41: ADITIVO ABLANDADOR, ELABORACIÓN PROPIA.	61
FIGURA 42: GRANULOMETRÍA EN PESO POLVO DE CAUCHO, ELABORACIÓN PROPIA.	62
FIGURA 43: RESUMEN PROCESO DE MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR Y POLVO DE CAUCHO, ELABORACIÓN PROPIA.	63
FIGURA 44: VÁSTAGO DE MEZCLADO POLYTRON-AGGREGATE TYPE PT-DA 30/2EC-F250, LEMCO.	63
FIGURA 45: PROCESO DE MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR, ELABORACIÓN PROPIA.	64
FIGURA 46: DISPERSOR DE POLÍMEROS EN ASFALTO, ELABORACIÓN PROPIA.	65
FIGURA 47: PRUEBA CON SEPARACIÓN ENTRE PLATOS DSR DE 3[MM], ELABORACIÓN PROPIA.	68
FIGURA 48: PRUEBA CON SEPARACIÓN ENTRE PLATOS DSR DE 2 [MM], ELABORACIÓN PROPIA.	69
FIGURA 49: GRÁFICO VISCOSIDAD VS CONTENIDO DE ABLANDADOR, ELABORACIÓN PROPIA.	70
FIGURA 50: GRÁFICO VISCOSIDAD VS CONTENIDO DE POLVO DE CAUCHO (ESTADO ORIGINAL), ELABORACIÓN PROPIA.	73
FIGURA 51: GRÁFICO VISCOSIDAD VS CONTENIDO DE POLVO DE CAUCHO (HPDR), ELABORACIÓN PROPIA.	73
FIGURA 52: GRÁFICO DEFORMACIÓN A 58°C VS TIEMPO PARA MODIFICACIÓN CON POLVO DE CAUCHO, ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 53: GRÁFICO % RECUPERACIÓN VS JNR A 58°C PARA MODIFICACIÓN CON POLVO DE CAUCHO, ELABORACIÓN PROPIA. ...	76
FIGURA 54: GRÁFICO JNR A 58°C VS CONCENTRACIÓN POLVO DE CAUCHO - AJUSTE LINEAL, ELABORACIÓN PROPIA.	78
FIGURA 55: RANGOS CATEGORÍAS CLASIFICACIÓN POR CLIMA A 58°C - AJUSTE LINEAL, ELABORACIÓN PROPIA.	78
FIGURA 56: GRÁFICO JNR A 58°C VS CONCENTRACIÓN POLVO DE CAUCHO - AJUSTE CUADRÁTICO, ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIGURA 57: RANGOS CATEGORÍAS CLASIFICACIÓN POR CLIMA A 58°C - AJUSTE CUADRÁTICO, ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIGURA 58: GRÁFICO JNR A 58°C VS CONCENTRACIÓN POLVO DE CAUCHO - AJUSTE CÚBICO, ELABORACIÓN PROPIA.	80
FIGURA 59: RANGOS CATEGORÍAS CLASIFICACIÓN POR CLIMA A 58°C - AJUSTE CÚBICO, ELABORACIÓN PROPIA.	80
FIGURA 60: CURVA GRADO PG ALTA TEMPERATURA VS FLEXIBILIDAD EN FLUENCIA NO RECUPERABLE (JNR) A 58°C, ELABORACIÓN PROPIA.	85
FIGURA 61: CURVA GRADO PG BAJA TEMPERATURA VS FLEXIBILIDAD EN FLUENCIA NO RECUPERABLE (JNR) A 58°C, ELABORACIÓN PROPIA.	85
FIGURA 62: CURVA GRADO PG ALTA TEMPERATURA VS CONTENIDO DE POLVO DE CAUCHO, ELABORACIÓN PROPIA.	86

FIGURA 63: GRADO PG BAJA TEMPERATURA VS CONTENIDO DE POLVO DE CAUCHO, ELABORACIÓN PROPIA.....	86
FIGURA 64: CURVA RESUMEN CLASIFICACIÓN PG VS CONTENIDO DE POLVO DE CAUCHO, ELABORACIÓN PROPIA.	87

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: MUESTRA ESQUEMÁTICA DE LA RELACIÓN ENTRE LAS ESPECIFICACIONES Y LOS ENSAYOS SUPERPAVE, LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, 2017	18
TABLA 2: REQUISITOS DE LA CLASIFICACIÓN DE ASFALTOS POR GRADO DE DESEMPEÑO (PG) USANDO MSCR, COMPLEMENTO N°1, MANUAL DE CARRETERAS VOL. 8, 2019.....	20
TABLA 3: TIPO DE TRÁNSITO SEGÚN VOLUMEN DE TRÁNSITO Y VELOCIDAD DE TRÁFICO, COMPLEMENTO N°1, MANUAL DE CARRETERAS VOL. 8, 2019.	24
TABLA 4: COMPOSICIÓN SEGÚN TIPO DE NEUMÁTICO, RUBBER MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2008.....	33
TABLA 5: GRANULOMETRÍA POLVO DE CAUCHO TRAMO EXPERIMENTAL RUTA X-65, RAMÍREZ N. 2006.	48
TABLA 6:ESPECIFICACIONES PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS, MANUAL DE CARRETERAS VOL. 8, 2018.	52
TABLA 7: BANDAS GRANULOMÉTRICAS POLVO DE CAUCHO, MANUAL DE CARRETERAS VOL. 5, 2018.	53
TABLA 8: TIPO DE CLIMA SEGÚN RANGO DE TEMPERATURA, LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, 2017.....	53
TABLA 9: ESPECIFICACIONES PARA LIGANTE ASFALTO-CAUCHO POR PROCESO HÚMEDA, LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, 2017.	53
TABLA 10: SELECCIÓN DE GRADO PG DE ALTA TEMPERATURA SEGÚN VELOCIDAD Y NIVEL DE TRÁFICO, AASHTO M323-12.....	54
TABLA 11: VALOR DE JNR PARA UN NIVEL DE ESFUERZO DE 3.2[kPa] Y LA TEMPERATURA EN LA QUE $G^*/\sin(\Delta)$ ES IGUAL A 2.2, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010.....	56
TABLA 12: RELACIÓN ENTRE CAMBIOS EN EL VALOR DE JNR Y CAMBIOS EN EL AHUELLAMIENTO PARA TRES MEZCLAS ESTUDIADAS, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010.....	59
TABLA 13: GRADO PG ALTA TEMPERATURA LIGANTE BASE - ESTADO ORIGINAL	60
TABLA 14: GRADO PG ALTA TEMPERATURA LIGANTE BASE - HPDR.....	60
TABLA 15: GRADO PG TEMPERATURA INTERMEDIA LIGANTE BASE	60
TABLA 16: GRADO PG BAJA TEMPERATURA LIGANTE BASE	60
TABLA 17: RESULTADOS MSCR A 64°C - LIGANTE BASE.....	61
TABLA 18: MATRIZ DE ENSAYOS ETAPA EXPERIMENTAL, ELABORACIÓN PROPIA.....	65
TABLA 19: CANTIDADES DE ADITIVO ABLANDADOR UTILIZADAS.....	66
TABLA 20: CANTIDADES DE POLVO DE CAUCHO UTILIZADAS.	67
TABLA 21: VISCOSIDADES MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR.	70
TABLA 22:RESUMEN CLASIFICACIÓN PG PARA MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR, ELABORACIÓN PROPIA.....	71
TABLA 23: RESUMEN VALORES DE JNR PARA MODIFICACIONES CON 7% DE ABLANDADOR.....	71
TABLA 24: VISCOSIDADES MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR Y POLVO DE CAUCHO – ESTADO ORIGINAL.....	72
TABLA 25: VISCOSIDADES MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR Y POLVO DE CAUCHO - HPDR.	72

TABLA 26: RESULTADOS MSCR A 58°C - MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE POLVO DE CAUCHO.	74
TABLA 27: RESULTADOS MSCR A 58°C - MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5% DE POLVO DE CAUCHO (MUESTRA H).74	
TABLA 28: RESULTADOS MSCR A 58°C - MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5% DE POLVO DE CAUCHO (MUESTRA I). 75	
TABLA 29: RESULTADOS MSCR A 58°C - MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5% DE POLVO DE CAUCHO (MUESTRA J). 75	
TABLA 30: RESULTADOS MSCR A 58°C - MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 7% DE POLVO DE CAUCHO.	75
TABLA 31: RESULTADOS MSCR A 58°C - MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 10% DE POLVO DE CAUCHO.	75
TABLA 32: RESUMEN VALORES DE JNR SEGÚN CONTENIDO DE CAUCHO.	77
TABLA 33: RESUMEN CONTENIDO DE POLVO DE CAUCHO SEGÚN AJUSTE LINEAL, CUADRÁTICO Y CÚBICO.	81
TABLA 34: GRADO PG ALTA TEMPERATURA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR (DISPERSOR) - ESTADO ORIGINAL.	81
TABLA 35: GRADO PG ALTA TEMPERATURA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR (DISPERSOR) - HPDR.	81
TABLA 36: GRADO PG TEMPERATURA INTERMEDIA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR (DISPERSOR).	82
TABLA 37: GRADO PG BAJA TEMPERATURA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR (DISPERSOR).	82
TABLA 38: RESULTADOS MSCR A 58°C - MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE POLVO DE CAUCHO - CATEGORÍA "VERY HEAVY".	82
TABLA 39: GRADO PG ALTA TEMPERATURA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE POLVO DE CAUCHO - ESTADO ORIGINAL.	82
TABLA 40: GRADO PG ALTA TEMPERATURA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE POLVO DE CAUCHO - HPDR.....	83
TABLA 41: GRADO PG TEMPERATURA INTERMEDIA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE POLVO DE CAUCHO.	83
TABLA 42: GRADO PG BAJA TEMPERATURA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE POLVO DE CAUCHO.	83
TABLA 43: RESULTADOS MSCR A 58°C - MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5.5% DE POLVO DE CAUCHO - CATEGORÍA "EXTREMELY HEAVY".	83
TABLA 44: GRADO PG ALTA TEMPERATURA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5.5% DE POLVO DE CAUCHO - ESTADO ORIGINAL.	84
TABLA 45: GRADO PG ALTA TEMPERATURA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5.5% DE POLVO DE CAUCHO - HPDR...	84
TABLA 46: GRADO PG TEMPERATURA INTERMEDIA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5.5% DE POLVO DE CAUCHO. ...	84
TABLA 47: GRADO PG BAJA TEMPERATURA MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5.5% DE POLVO DE CAUCHO.	84
TABLA 48: RESUMEN RESULTADOS CATEGORÍAS CLASIFICACIÓN POR CLIMA.	84

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

En la actualidad, nuestro país exige un alto estándar para sus carreteras debido al rápido crecimiento que ha experimentado su parque automotriz en la última década. Dado que, en Chile aproximadamente el 87% de la red vial pavimentada corresponde a pavimentos asfálticos (Departamento de Gestión Vial, Dirección de Vialidad, 2016), la importancia de contar con caminos adecuados genera la necesidad de investigar y desarrollar nuevos tratamientos y/o técnicas que mejoren el comportamiento del asfalto y garanticen mejores índices de desempeño.

Existen tres deterioros fundamentales que afectan a los pavimentos asfálticos dependiendo, entre otros factores, de las condiciones de circulación, volumen de tránsito y condiciones climáticas; estos son el ahuellamiento, agrietamiento térmico y agrietamiento por fatiga. El ahuellamiento se presenta, por lo general, durante los primeros años de servicio del pavimento bajo niveles elevados de tránsito, tráfico pesado y/o lento, además de altas temperaturas de servicio. Durante los últimos años de vida útil, cuando la mezcla se envejece y se vuelve más rígida y frágil, el pavimento se vuelve propenso a sufrir agrietamiento térmico a bajas temperaturas, y agrietamiento por fatiga cuando está sometido a temperaturas de servicio intermedias.

Ante la idea de preservar los pavimentos el mayor tiempo posible en su condición original, existe una búsqueda constante de nuevos agentes que aseguren un desempeño óptimo durante sus años de servicio y que, en lo posible, lo hagan de forma eficiente sin generar un impacto negativo a nivel ambiental. Por el contrario, se busca aprovechar los recursos disponibles y a la vez mitigar, posibles efectos adversos que puedan existir; en este sentido, el reciclaje resulta ideal si se trata de residuos industriales que aportan en la mejora de las propiedades del asfalto, y cuyo aprovechamiento, además permite minimizar el impacto ambiental que conlleva su acumulación.

En los últimos años se ha impulsado la idea de utilizar el polvo de caucho reciclado, dado que se ha comprobado que su utilización como agente modificador, permite mejorar las propiedades reológicas de ligantes asfálticos y, por lo tanto, elevar el desempeño del pavimento (Mandal T. & Bahia H., 2015). Esto a su vez, contribuye a solucionar o aminorar la problemática ambiental asociada a la acumulación de neumáticos que afecta al mundo entero, ya que tardan más de 500 años en descomponerse y en ese proceso, contaminan el suelo y provocan el estancamiento del agua, trayendo consigo insectos y por consecuencia, enfermedades (Organización Mundial de la Salud, 2013).

El polvo de caucho reciclado se obtiene a partir de la trituration de neumáticos fuera de uso (NFU), la cual puede llevarse a cabo a temperatura ambiente o de manera criogénica. La primera de ellas corresponde a un proceso puramente mecánico, en donde no existen agentes químicos ni adición de calor, y consta de pasar el neumático por una serie de triturados sucesivos hasta conseguir reducir su volumen; en la trituration criogénica, en cambio, el neumático es sometido a bajas temperaturas hasta volverse frágil y quebradizo, para que sea posible obtener el tamaño deseado. Finalmente, el caucho es separado de otros componentes, tales como, materiales metálicos y textiles, con lo que queda listo para ser reutilizado.

La incorporación del polvo de caucho a una mezcla asfáltica se realiza comúnmente de dos maneras: mediante vía húmeda o vía seca. La vía húmeda consiste en la mezcla previa del polvo de caucho con el betún para su posterior empleo como ligante en la mezcla bituminosa, mientras que,

la vía seca consiste en introducir el polvo de caucho directamente en el mezclador de la planta que fabrica la mezcla, en donde el polvo de caucho actúa en parte como árido, pero las partículas más finas interaccionan con el betún modificando y mejorando sus propiedades (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).

La experiencia en el uso de este tipo de modificador demuestra que permite mejorar las propiedades del ligante asfáltico al reducir la susceptibilidad térmica (Lee S.-J., Amirkhanian S., Putman B. & Kim K., 2007). Diversas investigaciones han dejado en evidencia que la adición de polvo de caucho a ligantes asfálticos, aumenta su resistencia al ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico (Dantas S., Muniz M., Pais J. & Pereira P., 2003). Además, estudios adicionales afirman que el uso de polvo de caucho podría conllevar incluso a una disminución de los niveles de ruido y costos de mantenimiento (Huang B., Mohammad L., Graves P. & Abadie C., 2002).

El tamaño del caucho y el tiempo de reacción tienen un efecto importante en las propiedades reológicas del asfalto y, por lo tanto, en el desempeño de la mezcla asfáltica; los resultados además comprueban que una mayor concentración de polvo de caucho mejorará en mayor medida el comportamiento del ligante asfáltico (Mandal T. & Bahia H., 2015).

Por otro lado, dado que los factores climáticos juegan un rol fundamental en el deterioro del pavimento, existe una zonificación Superpave del territorio chileno para condiciones de circulación de alta velocidad y volúmenes de tránsito bajo, cuyos resultados indican que la mayor parte de nuestro territorio puede cubrirse con tres tipos de ligantes asfálticos recomendados para la zona norte, zona centro y zona sur, respectivamente (Arteaga L., 2017).

La presente investigación se enfoca en el estudio del efecto del polvo de caucho reciclado, incorporado mediante vía húmeda, a un ligante con la clasificación PG recomendada para las zonas norte y sur de nuestro país. Es decir, se utilizará un ligante con clasificación PG 58-28 obtenido a partir de un ligante convencional CA 24, para lo cual se requiere de un aditivo ablandador que permita alcanzar la clasificación PG deseada.

Con los resultados obtenidos, se espera poder determinar las concentraciones de polvo de caucho que cumplen con los diferentes límites de la clasificación por clima estipulados en la norma AASHTO M332-14 según los valores de deformación residual (Jnr) entregados por el ensayo "Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)".

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Analizar el efecto de la modificación con un ablandador y polvo de caucho reciclado, incorporado por vía húmeda, en las propiedades reológicas del asfalto, mediante ensayos de desempeño que permitan establecer una relación entre la concentración del modificador y las características del asfalto modificado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la concentración apropiada de aditivo ablandador necesaria para obtener un ligante asfáltico con clasificación PG 58-28, a partir de un cemento asfáltico convencional CA-24 con clasificación PG 64-22.
- Establecer una relación entre la concentración de polvo de caucho incorporada al asfalto y los valores de deformación residual (Jnr) entregados por el ensayo “Multiple Stress Creep and Recovery”.
- Analizar la variabilidad de los resultados obtenidos, tanto en la modificación con polvo de caucho como en la incorporación del aditivo ablandador.
- Determinar las concentraciones de polvo de caucho que cumplen con los diferentes límites de la clasificación por clima estipulados en la norma AASHTO M332-14, en base a los valores de deformación residual (Jnr).
- Analizar la caracterización PG de los asfaltos modificados con los porcentajes de polvo de caucho definidos a partir de la curva Jnr vs Contenido de Caucho.

1.3 ALCANCE

En el presente estudio, se exponen los resultados del análisis de las propiedades reológicas del asfalto modificado con polvo de caucho (AMC), incorporado por vía húmeda. Dicho análisis se realiza a partir del ensayo “Multiple Stress Creep and Recovery”, llevado a cabo según lo estipulado en la norma ASTM D7405-15 “Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder using a Dinamic Shear Rheometer”, aplicado a cuatro muestras de asfalto modificado con diferentes concentraciones de polvo de caucho.

Se considera un ligante base con clasificación PG 58-28, sin embargo, dado que éste no se encuentra disponible en el mercado para su adquisición directa, es necesario obtenerlo a partir de un cemento convencional CA-24 sometido a un proceso de modificación con aditivo ablandador. Cabe destacar que, se realiza la caracterización Superpave tanto del ligante base, como de los ligantes modificados, cuya metodología se rige de acuerdo con lo expuesto en la norma ASTM D6373-16 “Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder”.

1.4 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo para llevar a cabo el proceso de investigación consta, en términos generales, de las siguientes fases:

- **Estudio bibliográfico:** Se realiza una recopilación de información relevante, enfocada al estudio de las principales características del polvo de caucho reciclado, sus formas de obtención, vías de incorporación y su interacción con ligantes asfálticos. Además, se consideran antecedentes sobre el uso de este tipo de agente modificador en el extranjero, con el fin de identificar sus ventajas y desventajas, como también, su contribución a la mejora del desempeño de mezclas asfálticas.
- **Etapas experimental:** El proceso de modificación del ligante asfáltico considerado en este estudio, se lleva a cabo en el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO), perteneciente al Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María.
Para el caso de la modificación con aditivo ablandador, se realizan caracterizaciones Superpave a muestras de ligante con diferentes concentraciones de componente, con el fin de determinar la concentración adecuada para la clasificación PG objetivo. En el caso de la modificación con polvo de caucho reciclado, se someten muestras con diferentes concentraciones de agente modificador al ensayo “Multiple Stress Creep and Recovery” para poder estudiar su efecto en las propiedades reológicas del asfalto.
- **Análisis de resultados:** En base a los resultados, obtenidos a partir de los ensayos anteriormente mencionados, se procede a analizar el comportamiento de los ligantes en estudio y, por ende, el efecto del agente modificador en cada caso.
- **Conclusiones:** Se realiza un análisis de todo el proceso de investigación y experimentación, que además permita brindar recomendaciones que se desprendan de los hallazgos encontrados en este estudio.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN A SUPERPAVE

Las especificaciones SUPERPAVE (SUperior PERforming Asphalt PAVEment) corresponden a un sistema de especificaciones para pavimentos asfálticos desarrollado con el fin de contribuir de mejor manera al diseño de mezclas, enfocándose en la prevención de los tres tipos de deterioros fundamentales de los pavimentos asfálticos en Estados Unidos. Dentro de sus ventajas está el hecho de que se caracterizan los materiales a las temperaturas esperadas en terreno y se consideran los efectos asociados al envejecimiento a largo plazo del betún, el efecto del tiempo de carga (de manera indirecta) y el efecto del volumen de tránsito (de manera indirecta) (Delgadillo R., Segovia M., Wahr C., & Thenoux G., 2017). Además, se utilizan instrumentos que miden las propiedades fundamentales del betún (reómetros), los cuales permiten predecir de cierta forma, el desempeño del pavimento en cuestión.

2.1.1 Envejecimiento

Se produce por medio de varias y complejas reacciones, cuando éste está expuesto a agentes ambientales como calor y oxígeno. El envejecimiento produce cambios en el comportamiento reológico del asfalto, transformándolo en un material más rígido y de menor susceptibilidad térmica (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2017; National Highway Institute, 2000).

2.1.1.1 Envejecimiento primario

Se produce durante el mezclado, almacenamiento y colocación de la mezcla asfáltica debido, principalmente, a las altas temperaturas a la que es sometida durante el proceso de mezclado y colocación, donde los componentes volátiles del asfalto tienden a evaporarse. (National Highway Institute, 2000; Laboratorio Nacional de Vialidad, 2017).

2.1.1.2 Envejecimiento secundario

Es el que sufre el asfalto durante la vida de servicio del pavimento y está asociado a su exposición al aire y agua, el cual ocurre a un ritmo relativamente lento, siendo más común en climas o estaciones más cálidas. Por otro lado, el pavimento que es sometido a bajas temperaturas por períodos prolongados de tiempo, también se envejece y rigidiza, volviéndose más susceptible a las grietas.

Los pavimentos asfálticos compactados incorrectamente pueden presentar un envejecimiento prematuro, dado que durante la compactación se deja un mayor porcentaje de huecos de aire, lo que permite que penetre más aire en la mezcla, provocando un mayor envejecimiento (National Highway Institute, 2000).

2.1.2 Efecto tiempo y temperatura

El asfalto es un material viscoelástico, sin embargo, la propiedad que éste exhibe ya sea viscosa, elástica o, con mayor frecuencia, una combinación de ambas depende de la temperatura y el tiempo de carga. El comportamiento de flujo de un asfalto, como se muestra en la *Figura 1*, podría ser el mismo durante una hora a 60°C ó 10 horas a 25°C.

En otras palabras, los efectos del tiempo y la temperatura están relacionados; el comportamiento a altas temperaturas durante períodos de tiempo cortos es equivalente a lo que ocurre a temperaturas más bajas y tiempos más prolongados.

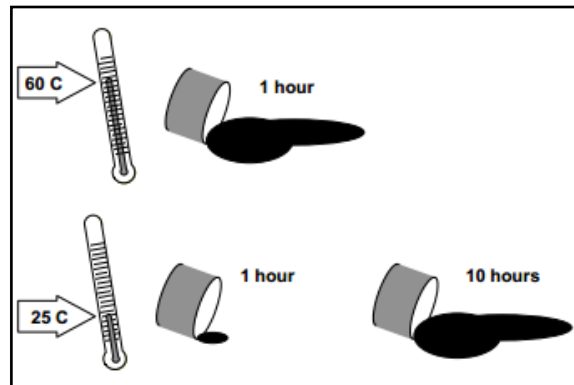


Figura 1: Efecto tiempo-temperatura en ligantes asfálticos, National Highway Institute, 2000

A altas temperaturas y/o cargas lentas: El asfalto se comporta como un líquido viscoso cuya viscosidad varía con las condiciones específicas de carga y temperatura. Fluyen siguiendo la Ley de Newton; la energía de deformación se disipa en el líquido en forma de calor, lo que quiere decir que no puede ser recuperada al desaparecer el esfuerzo, por lo tanto, es necesario aportar continuamente energía para mantener el flujo del líquido.

A bajas temperaturas y/o cargas rápidas: El asfalto se comporta como un sólido elástico, cuya rigidez depende de las condiciones específicas de temperatura y carga. Los asfaltos a bajas temperaturas se comportan según la Ley de Hooke, es decir, cuando están cargados, se deforman y, una vez descargados, vuelven a su forma original; cualquier deformación elástica se recupera por completo. Aunque el asfalto es un sólido elástico a bajas temperaturas, puede volverse demasiado quebradizo y agrietarse cuando está excesivamente cargado. En estos casos, las cargas se aplican por tensiones internas que se acumulan en el pavimento cuando intenta contraerse y se restringe.

A temperaturas intermedias: El asfalto se comporta como un material viscoelástico; este comportamiento se caracteriza por una respuesta combinada ante una carga, con una componente viscosa y una componente elástica. Cuando se calienta, el asfalto actúa como un lubricante, lo que permite que el agregado se mezcle, recubra y compacte firmemente para formar una superficie lisa y densa. Luego de enfriarse, el asfalto actúa como pegamento para mantener unido el agregado a una matriz sólida (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2017; National Highway Institute, 2000).

2.2 MÉTODOS DE ENSAYE Y EQUIPOS SUPERPAVE

2.2.1 Procedimientos de envejecimiento

Se realizan bajo condiciones de temperatura y envejecimiento representativos de la condición en la que se encuentra el asfalto en el pavimento.

2.2.1.1 Horno de Película Delgada Rotatoria (HPDR)

Norma ASTM D2872-12 – MC 8.302.33. Se somete la muestra de cemento asfáltico a condiciones de envejecimiento primario similares a las que ocurren normalmente en el proceso de

fabricación y colocación de la mezcla en terreno. En esta etapa, el asfalto es sometido a altas temperaturas lo que provoca una oxidación acelerada y volatilización de los constituyentes más livianos.

El equipo utilizado se muestra en la *Figura 2*, el cual posee 8 contenedores cilíndricos como los que se ilustran en la *Figura 3*. Las condiciones de ensayo más relevantes a considerar son las siguientes:

- Muestras: 35 ± 0.5 [g]
- Velocidad: 15 ± 0.2 [rpm]
- Flujo de aire: 4 ± 0.3 [l/min]
- Temperatura: 163 ± 0.5 [°C] (se debe alcanzar dentro de los primeros 10 minutos).
- Duración ensayo: 75 minutos
- Material obtenido debe ocuparse dentro de 24 horas de ejecutado el envejecimiento.
- Se puede determinar la pérdida de masa provocada por la evaporación de gases del betún.



Figura 2: Horno de Película Delgada Rotatoria (HPDR), LEMCO.

El envejecimiento del ligante ocurre por la evaporación de aceites contenidos en el cemento asfáltico, el cual no debe superar un 0.8% de elementos volátiles. Por reacción química, algunas resinas que constituyen el ligante asfáltico se oxidan, aumentando su resistencia a esfuerzos de corte, lo que provoca un aumento en la viscosidad.

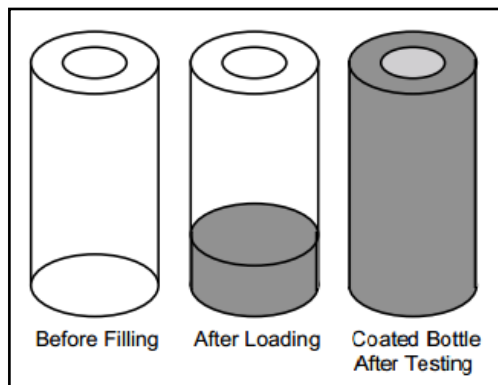


Figura 3: Ilustración de contenedores cilíndricos HPDR, National Highway Institute, 2000

2.2.1.2 Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV)

Norma ASTM D6521-13 – MC 8.302.23. Simula el envejecimiento producido en los primeros años de servicio (entre 5 a 10 años), donde el ligante es sometido a altas presiones y temperaturas. El equipo utilizado se muestra en la *Figura 4*, el cual posee dimensiones adecuadas para alojar una repisa con 10 bandejas estándares de acero inoxidable. Las condiciones de ensayo más relevantes a considerar son las siguientes:

- Muestra: 50 ± 0.5 [g] (produce una película de ligante de 3.2 [mm] de espesor). La muestra es previamente envejecida en HPDR.
- Temperatura: 100 ± 0.1 [°C]
- Presión: 2.1 ± 0.1 [MPa]
- Duración ensayo: 20 horas
- Posteriormente se coloca la muestra en un contenedor especial en la cámara degasificadora, como la presentada en la
- Figura 5, la cual está a una temperatura de 170 [°C], donde se aplica vacío a una presión de 15 ± 2.5 [kPa] para retirar la mayor cantidad de aire del betún.



Figura 4: Cámara a Presión (PAV), LEMCO.

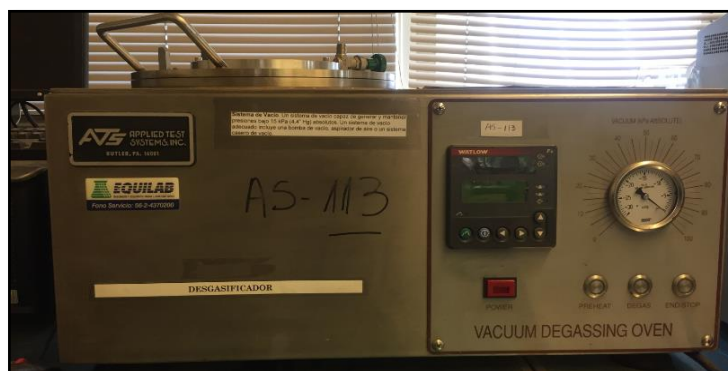


Figura 5: Cámara degasificadora, LEMCO.

El envejecimiento de ligantes asfálticos durante su vida útil es afectado por un conjunto de variables asociadas, tales como las proporciones volumétricas de la mezcla, la permeabilidad de la mezcla, propiedades de los agregados y posiblemente otros factores. Este ensayo permite evaluar la resistencia relativa, de distintos ligantes asfálticos, al envejecimiento por oxidación para temperaturas seleccionadas y no considera el conjunto de todas las variables descritas.

2.2.2 Viscosímetro rotacional Brookfield

Norma ASTM D4402-15 – MC 8.302.24. Es ejecutado para asegurar que el betún posee la fluidez requerida para poder ser bombeado y manipulado en la planta, además de tener una consistencia adecuada para ser mezclado y puesto en terreno. El ensayo mide la viscosidad del cemento asfáltico a altas temperaturas, mediante el torque producido por un motor que hace girar un cilindro metálico sumergido en la muestra a ensayar.

El equipo utilizado se muestra en la *Figura 6*, y las condiciones de ensayo más relevantes a considerar son las siguientes:

- Viscosidad en [Pa·s]
- Temperatura: 135 [°C]
- Acondicionamiento: 30 minutos y esperar 10 minutos para que se estabilice.
- Lecturas: intervalos de 3 minutos (3 mediciones).



Figura 6: Viscosímetro rotacional de Brookfield, LEMCO

La resistencia que opone al fluido al movimiento producido por el cilindro metálico es la viscosidad del ligante asfáltico, característica intrínseca de cada material y está relacionado con su composición química y molecular.

Algunos asfaltos pueden exhibir un comportamiento no Newtoniano bajo las condiciones de este ensayo, o a temperaturas dentro del rango de este método. Los valores de viscosidad no Newtonianos no son la única propiedad del material, pero reflejan el comportamiento del fluido bajo las condiciones particulares del ensayo. En estos casos, las mediciones tomadas con este

método no siempre predicen el comportamiento bajo las condiciones de uso posterior. Las comparaciones entre valores de viscosidad no Newtonianos se deben hacer sólo para mediciones realizadas con viscosímetros similares, bajo condiciones similares de esfuerzo de corte e historia de tensiones.

2.2.3 Reómetro de Corte Dinámico (DSR)

Norma ASTM D7175-15 – MC 8.302.22. Se usa para medir las propiedades viscoelásticas (no newtonianas) del ligante asfáltico a temperaturas altas (ahuellamiento) e intermedias (fatiga). El cemento asfáltico en un rango de temperaturas intermedias (10°C a 50°C), se comporta como material viscoelástico. Este comportamiento se caracteriza por una respuesta combinada ante una carga, formada por una componente viscosa y una componente elástica.

El equipo utilizado se muestra en la *Figura 7*, en donde uno de los platos paralelos oscila con respecto al otro a frecuencia y amplitudes de deformación rotacional (o amplitudes de torque) preseleccionadas. Las condiciones de ensayo más relevantes a considerar son las siguientes:

- Muestras:
 - Para plato de 25 [mm] de diámetro: 0.5211 [g] (1 [mm] de espesor), usado a alta temperatura (40°C a 90°C).
 - Para plato de 8 [mm] de diámetro: 0.1125 [g] (2[mm] de espesor), usado a temperatura baja e intermedia (-5°C a 40°C).
- Es aplicable a ligantes asfálticos con valores de módulo de corte dinámico de 100 [Pa] a 10 [MPa], lo cual se obtiene típicamente entre 5 y 85°C.
- El ensaye es apropiado para material original o envejecido en HPDR o PAV.
- No es aplicable a ligantes asfálticos que contengan material particulado de dimensiones mayores que 250 [µm].

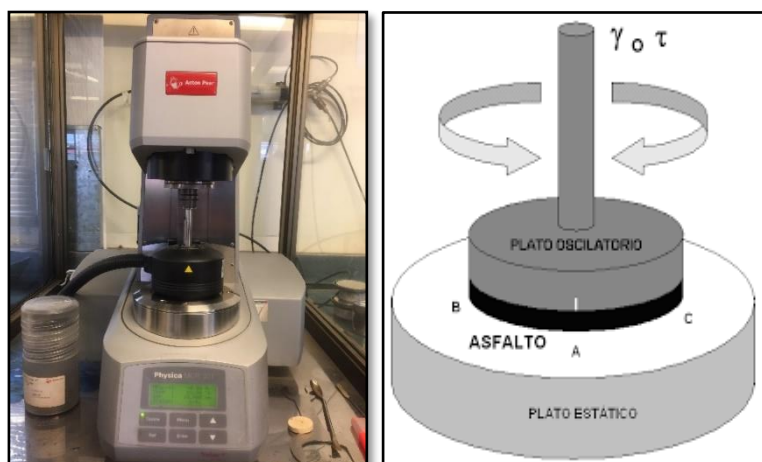


Figura 7: Reómetro de Corte Dinámico (DSR), LEMCO

El reómetro de corte dinámico puede aplicar un patrón sinusoidal de tensión de corte, sobre una muestra de cemento asfáltico, determinándose como respuesta la deformación. La respuesta del asfalto presenta una senoide de la misma frecuencia, pero de distinta amplitud y desfasada en el tiempo, como se muestra en la *Figura 8*. El mismo proceso se puede realizar aplicando su deformación en lugar de la tensión.

Comparando ambos patrones se obtienen dos importantes parámetros reológicos del asfalto:

- **Módulo complejo (G^*):** Razón entre la máxima tensión de corte aplicada y la máxima deformación obtenida. La magnitud de este parámetro indica la resistencia del asfalto a deformarse por esfuerzos de corte.
- **Ángulo de fase (δ):** La respuesta del asfalto a temperaturas intermedias presenta ambos comportamientos, elástico y viscoso. Si la respuesta fuera puramente elástica sería inmediata, sin embargo, la componente viscosa hace que la respuesta se retrarde. El ángulo de fase indica el grado de retraso de la respuesta, variando desde 0° (respuesta puramente elástica) hasta 90° (respuesta puramente viscosa).

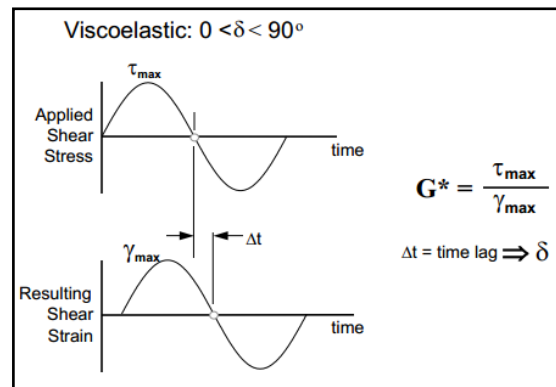


Figura 8: Esfuerzo de corte aplicado y deformación resultante en equipo DSR, National Highway Institute, 2000

2.2.4 Reómetro de Viga de Flexión (BBR)

Norma ASTM D6648-08 – MC 8.302.25. Se usa para estudiar el comportamiento reológico del asfalto a bajas temperaturas. Durante el ensayo se aplica una carga constante a una viga de asfalto y se registra su deflexión, como se muestra en la Figura 9. Otro parámetro importante de considerar, se expone en la Figura 10 donde, a los 60 segundos de carga se mide la rigidez del asfalto (S_{60}) y la tasa a la cual la rigidez disminuye (valor m), el cual representa la capacidad del ligante asfáltico de relajar los esfuerzos cuando es sometido a tensiones.

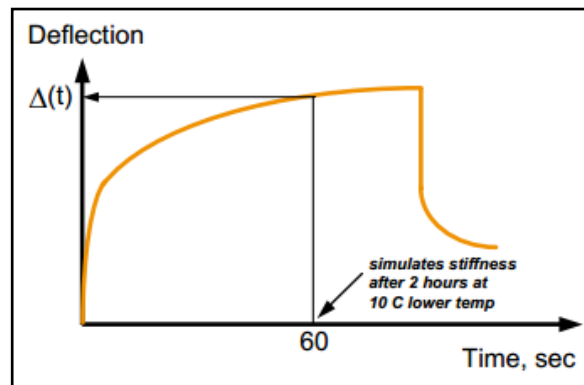


Figura 9: Curva de deflexión en el tiempo, National Highway Institute, 2000.

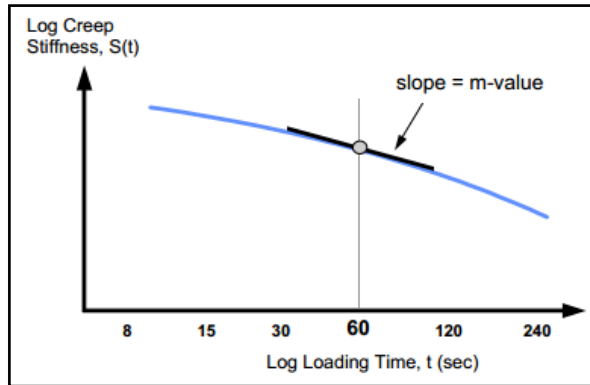


Figura 10: Curva de Rigidez vs y Tiempo de carga, National Highway Institute, 2000.

El equipo utilizado se muestra en la *Figura 11* y las condiciones de ensayo más relevantes a considerar son las siguientes:

- Es aplicable a materiales con valores de rigidez en flexión entre 20 [MPa] y 1 [GPa] (valores de deformabilidad en flexión de 50 [nPa^{-1}] a 1 [nPa^{-1}]) y puede ser usado con material original o envejecido en HPDR o PAV. El ensayo está diseñado para operar en un rango de temperatura desde -36°C a 22°C .
- Se utilizan moldes, como el que se muestra en la *Figura 12*, para fabricar vigas de asfalto cuyas dimensiones, una vez desmoldadas, sean de 6.35 ± 0.05 [mm] de espesor por 12.7 ± 0.05 [mm] de ancho y 127 ± 2.0 [mm] de largo.
- Cargas:
 - Carga de contacto de 35 ± 10 [mN] (para asegurar contacto entre el vástago de carga y la viga) (sistema manual).
 - Carga de 980 ± 50 [mN] (sistema automático).
- Acondicionamiento a temperatura de ensayo por 60 ± 5 [min] (baño de alcohol).
- Temperatura: Comienza en 0°C y se va disminuyendo -6°C hasta que la viga falla.
- Ensayo: Carga de 980 ± 50 [mN] durante 1 ± 0.1 [s], se reduce la carga a 35 ± 10 [mN], recuperación por 20 ± 0.1 [seg]. La carga de 980 ± 50 [mN] debe mantenerse en un rango de ± 50 [mN] los primeros 5 segundos y ± 10 [mN] durante el resto del ensayo. Al finalizar, verificar que la viga retorna a 35 ± 10 [mN].
- El procedimiento se repite hasta que el valor de la rigidez sea mayor a 300 [MPa] o cuando el valor m sea menor que 0.3.
- Datos obtenidos:
 - Módulo de rigidez de fluencia (S) en el tiempo.
 - Pendiente de la curva $\log(S)$ vs $\log(\text{tiempo})$. (valor m)



Figura 11: Reómetro de Viga de Flexión (BBR), LEMCO

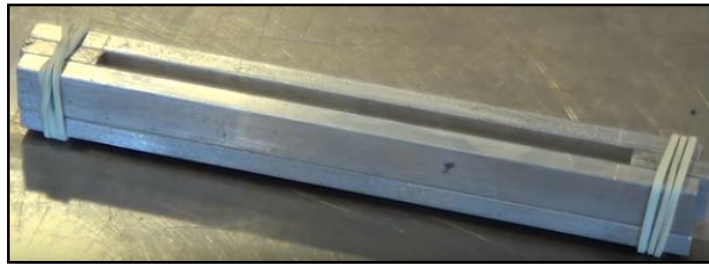


Figura 12: Molde para la viga de ensaye en equipo BBR, LEMCO

2.2.5 Ensayo de Tracción Directa (DTT)

Norma ASTM D6723 – MC 8.302.26. Se usa para estudiar el grado de fragilidad del asfalto a bajas temperaturas. El ensayo consiste en traccionar una muestra asfáltica hasta la rotura, como se muestra en la *Figura 13*, registrando la deformación de falla (correspondiente a la máxima tracción). Entrega una medida del módulo de rigidez y módulo de relajación.

El equipo está diseñado para un rango de temperatura de 6°C a -36°C. Este método no es aplicable a ligantes asfálticos que contengan material particulado de dimensiones mayores a 250 [µm], y se puede utilizar para ensayar tanto asfaltos originales como envejecidos en HPDR o PAV.

La deformación de falla es fácilmente identificable como la deformación para la máxima carga cuando la falla es por fractura (quiebre de la pieza en dos). Sin embargo, cuando la probeta no se fractura, pero alcanza una tensión máxima y fluye sin fracturarse, la deformación de falla se considera como aquella correspondiente a la tensión máxima.

Su objetivo es determinar si la falla del material es dúctil o frágil, a partir de la relación esfuerzo-deformación que presenta el asfalto, como se muestra en la *Figura 14*.

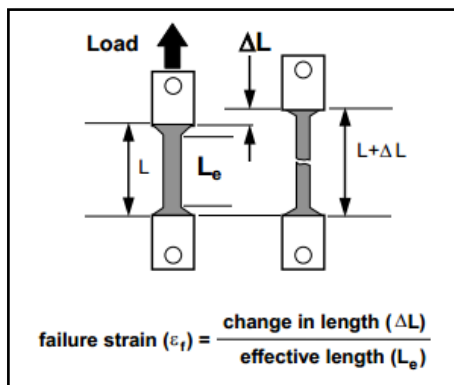


Figura 13: Esquema de ensayo DTT, National Highway Institute, 2000

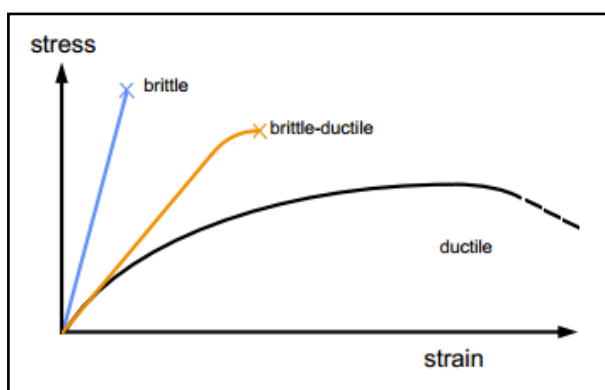


Figura 14: Relación esfuerzo-deformación a partir de ensayo DTT, National Highway Institute, 2000

2.2.6 Otros ensayos

2.2.6.1 Ensayo Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Norma ASTM D7405-15. Se utiliza para predecir el comportamiento del betón a deformaciones permanentes, aplicando ciclos de carga y recuperación en una muestra. El equipo utilizado en este ensayo corresponde al Reómetro de Corte Dinámico (DSR), el cual fue anteriormente descrito en la Sección 2.2.3 y se muestra en la Figura 7.

Las condiciones de ensayo más relevantes a considerar son las siguientes:

- **Muestra:** para plato de 25 [mm] de diámetro: 0.5211[g] (1 [mm] de espesor).
- El ensayo es apropiado para material original o envejecido en HPDR o PAV, siendo más común utilizar material envejecido en HPDR.
- El porcentaje de recuperación busca determinar la respuesta elástica y la dependencia del esfuerzo de ligantes asfálticos modificados con polímeros y no modificados.
- **Terminología:**
 - Creep and Recovery: Prueba reológica estándar mediante la cual, una muestra es sometida a una carga constante durante un período de tiempo definido, para luego

permitir su recuperación quitando la carga por cierta cantidad de tiempo, por lo general, superior al de carga.

- Non-recoverable creep compliance (J_{nr}): Corresponde a la tensión residual que presenta una muestra de ligante asfáltico luego de ser sometida a un ciclo de “creep and recovery”, dividida por el esfuerzo aplicado en [kPa].
- El ensaye se realiza a dos niveles de tensión (0.1[kPa] y 3.2 [kPa]) a una temperatura específica. Para ligantes de asfálticos por grado de desempeño (PG), la temperatura especificada para el ensaye es por lo general, el grado PG de alta temperatura.
- Ensayo: Se coloca la muestra y se acondiciona hasta que ocupe la totalidad del plato. Posteriormente se disminuye la temperatura a la adecuada para comenzar el ensayo (grado PG de alta temperatura).
- Duración: 200 [seg].
 - 100 primeros segundos (10 primeros ciclos), esfuerzo de 0.1[kPa] durante 1 [seg] y 9 [seg] de recuperación [S/carga].
 - 100 segundos restantes (10 ciclos), esfuerzo de 3.2 [kPa] durante 1 [seg] y 9 [seg] de recuperación.

2.2.6.2 Prueba de barrido de amplitud lineal – Linear Amplitud Sweep (LAS)

Norma AASHTO TP101-12. El ensaye LAS se utiliza para determinar la resistencia al daño del ligante asfáltico, el que es sometido a una carga cíclica empleando amplitudes de carga que aumentan linealmente y aceleran el daño. Las características de la tasa de acumulación de daño en el material, puede utilizarse como indicador del rendimiento de fatiga del ligante asfáltico dadas las condiciones estructurales del pavimento y/o la cantidad esperada de carga de tráfico.

El barrido de amplitud se realiza utilizando el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), descrito en la *Sección 2.2.3* e ilustrado en la *Figura 7*, a la temperatura intermedia determinada a partir del grado de desempeño (PG) del ligante en cuestión. Las condiciones de ensayo más relevantes a considerar son las siguientes:

- Muestra: Utilizando platos de 8[mm] de diámetro: 0.1125 [g] (2 [mm] de espesor).
- El ensaye es apropiado para ligantes asfálticos envejecidos en HPDR para representar el envejecimiento a corto plazo del pavimento, o en PAV si se quiere simular el envejecimiento a largo plazo del pavimento.
- Ensayo: El ensaye LAS consiste en una carga cíclica en el DSR donde las amplitudes de carga se aumentan sistemáticamente, de manera lineal, para causar un daño por fatiga acelerado.

El ensayo LAS incluye una prueba de barrido de frecuencias, antes del barrido de amplitud, para obtener información sobre las propiedades reológicas del material no dañado usando la mecánica del daño continuo viscoelástico (VECD). El barrido de frecuencia se realiza a la temperatura seleccionada con una pequeña amplitud de carga de 0.1% de tensión, para evitar provocar daños, en un rango de frecuencias de 0.2-30 [Hz]. El módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) se registran en cada frecuencia, como se muestra en la *Figura 15*.

El barrido de amplitud se ejecuta a la temperatura seleccionada y a una frecuencia de 10 [Hz]. El esquema de carga se muestra en la *Figura 16*; la carga sinusoidal aumenta linealmente de 0 a 30% en incrementos a intervalos de tensión del 1%, en donde cada intervalo de tensión consta de 100 ciclos de carga a una frecuencia de 10 Hz. La deformación máxima de corte y el esfuerzo máximo de corte se registran cada 10 ciclos de carga (1 [seg]), junto con el ángulo de fase (δ) y el Módulo de Corte Dinámico ($|G^*|$).

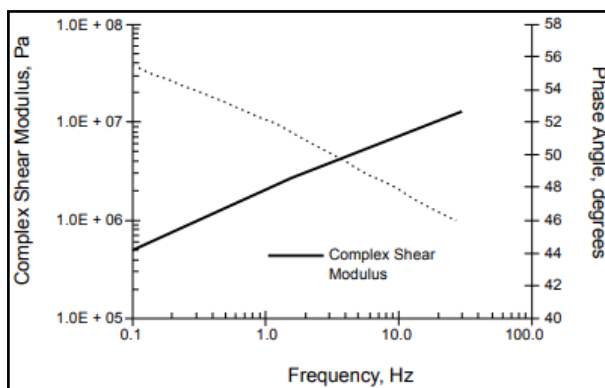


Figura 15: Ejemplo de datos de salida en barrido de frecuencias, AASHTO TP101-12

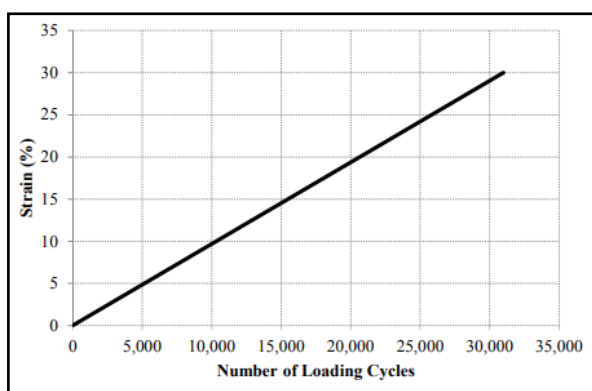


Figura 16: Esquema de carga prueba de Barrido de Amplitud, AASHTO TP101-12

2.2.6.3 Ensayo de fractura a baja temperatura – Single-Edge Notched Beam (SENB)

El ensayo SENB tiene como propósito determinar la energía de fractura del ligante asfáltico, suponiendo que se cumplen las condiciones de la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM). Se basa en la norma ASTM E399-90, enfocada a la resistencia a la fractura por deformación plana de materiales metálicos.

La geometría de la viga es como la usada en el ensayo BBR (descrito en la *Sección 2.2.4* e ilustrado en la *Figura 11* y *Figura 12*, es decir, de dimensiones 6.35 ± 0.05 [mm] de espesor por 12.7 ± 0.05 [mm] de ancho y 127 ± 2.0 [mm] de largo. La diferencia es que se realiza un corte de 3 [mm] (correspondiente al 20-25% de la profundidad de la viga) en el lado ancho (es decir, 12.7 [mm]). El ensayo incluye pruebas realizadas durante un período de acondicionamiento de una hora a la temperatura baja del grado de desempeño (PG) del ligante, a una velocidad de desplazamiento constante.

2.3 ETAPAS DE VIDA DEL ASFALTO Y ESPECIFICACIONES SUPERPAVE

Las especificaciones Superpave controlan la calidad del asfalto en distintas etapas de su vida útil, es decir, desde la mezcla en planta hasta varios años de servicio en terreno (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2017; National Highway Institute, 2000). De esta manera, se identifican tres etapas, las cuales se detallan a continuación:

2.3.1 Primera etapa

Durante la construcción de la mezcla asfáltica se requiere usar el cemento asfáltico a temperaturas que permitan su bombeo.

Para verificar un buen comportamiento en esta etapa, Superpave específica medir la viscosidad del asfalto a 135°C en el viscosímetro rotacional. Se recomienda también hacerlo a 165°C para obtener la curva temperatura viscosidad y determinar las temperaturas de mezclado y compactación.

2.3.2 Segunda etapa

Durante los primeros años de servicio (1 a 3), y especialmente en períodos calurosos, la mezcla es propensa a sufrir ahuellamiento. Para minimizar la contribución de asfalto al ahuellamiento se exige que éste tenga una alta rigidez a altas temperaturas y presente un comportamiento predominantemente elástico.

Superpave exige que el parámetro $G^*/\sin\delta$, que representa la rigidez a altas temperaturas, tenga un valor mínimo de 2.2 kPa, medido en el rango alto de temperaturas de servicio. Este parámetro se mide en el Reómetro de Corte Dinámico, sobre muestras envejecidas en Horno de Película Delgada Rotatorio (HPDR).

2.3.3 Tercera etapa

Tras varios años en servicio, el asfalto alcanzará una condición de envejecimiento de largo plazo, por lo cual su rigidez habrá aumentado. En este caso, los modos de falla probables son el agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico.

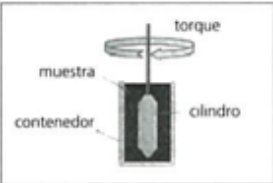
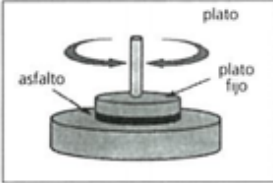
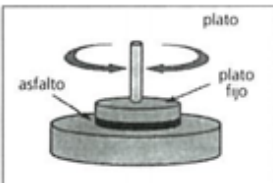
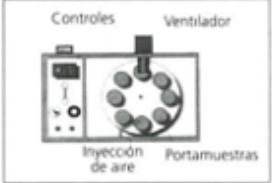
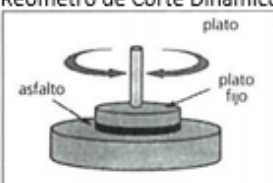
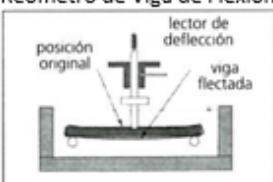
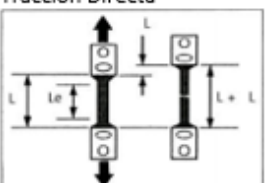
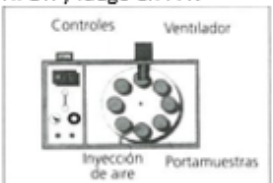
Superpave exige que el parámetro $G^*\cdot\sin\delta$, que representa la rigidez a temperaturas de servicio, tenga un valor mínimo de 5000 kPa, medido en el rango de temperaturas de servicio. Este parámetro se mide en el Reómetro de Corte Dinámico, sobre muestras envejecidas en HPDR y PAV.

Por otro lado, para minimizar la tendencia al agrietamiento térmico, Superpave controla los siguientes parámetros, medidos en muestras envejecidas en HPDR y PAV:

- **Reómetro de Viga de Flexión (BBR):** Se exige un valor S máximo de 300 MPa, es decir, el asfalto debe tener una baja rigidez. Se exige un valor mínimo de 0.3 para el valor m , lo que significa que el asfalto disminuye rápidamente su rigidez al estar bajo carga a baja temperatura.
- **Ensayo de Tracción Directa (DTT):** La deformación de falla en tracción debe ser mayor al 1%, para asegurar que el asfalto no se agrietará durante los ciclos de contracción térmica. Este ensayo sólo se requiere cuando los resultados en la viga reométrica no son totalmente satisfactorios.

La *Tabla 1* muestra un diagrama que relaciona cada ensayo Superpave con la respectiva característica que se está midiendo y la condición de la muestra asfáltica requerida.

Tabla 1: Muestra esquemática de la relación entre las especificaciones y los ensayos Superpave, Laboratorio Nacional de Vialidad, 2017

Etapas de Desempeño	Equipo Utilizado	Qué mide	Tipo de Muestra
Primera Etapa	Viscosímetro Rotacional  Reómetro de Corte Dinámico 	Fluidez para el bombeo desde el estanque Trabajabilidad y facilidad en la fabricación de la mezcla en caliente	Muestra original
Segunda Etapa	Reómetro de Corte Dinámico 	Deformación permanente (ahuellamiento)	Muestra original y muestra envejecida en HPDR 
Tercera Etapa	Reómetro de Corte Dinámico  Reómetro de Viga de Flexión  Tracción Directa 	Fatiga estructural del material Fatiga térmica del material (creep) Fatiga térmica (contracción del material)	Muestra envejecida en HPDR y luego en PAV  

2.4 CLASIFICACIÓN SUPERPAVE

Los ligantes son caracterizados de acuerdo con el desempeño esperado ante tres tipos de deterioros: ahuellamiento, fatiga y agrietamiento térmico. Como cada una de estas fallas sucede a temperaturas distintas, la denominación de un asfalto cuenta con tres temperaturas características, expresadas en grados Celsius.

En base a lo anterior, la especificación Superpave se rige por lo estipulado en la Tabla 1 de la norma ASTM D6373-16 y representa las condiciones del pavimento mediante una doble numeración. En esta clasificación, los grados del ligante se definen por PG XX-YY, donde XX e YY corresponden a las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente, a las que el ligante poseería propiedades físicas adecuadas para presentar un buen desempeño.

Recientemente, el Manual de Carreteras incorpora el uso del ensaye MSCR en las especificaciones para ligantes asfálticos por grado de desempeño (PG). Esta especificación incorpora la norma AASHTO T350-14 para determinar la Flexibilidad en Fluencia no recuperable Jnr, empleando las designaciones de tráfico S, H, V, E, para las categorías de tráfico Estándar, Alto, Muy Alto y Extremadamente Alto, respectivamente.

La *Tabla 2* presenta los requisitos de la clasificación de asfaltos por grados de desempeño (PG) usando MSCR. En la *Figura 17* se presenta un esquema del proceso de determinación del grado PG de un determinado ligante asfáltico, a partir de los ensayos y especificaciones Superpave previamente descritos en la *Sección 2.2* del presente documento.

De esta manera, se puede decir que un ligante asfáltico con clasificación PG 64H-22 tiene la capacidad de resistir ahuellamiento a temperaturas de hasta 64°C bajo condiciones de tránsito alto, de resistir agrietamiento térmico a temperaturas de hasta -22°C y de resistir fatigas a temperaturas menores o iguales a 25°C.

Sumado a lo anterior, para un ligante asfáltico ensayado según T350, con el porcentaje de recuperación se establece un método para determinar la presencia de respuesta elástica y la dependencia de los esfuerzos de los ligantes modificados con polímeros y no modificados. Para esto, en la curva de la *Figura 18*, se debe dibujar el porcentaje de recuperación promedio a 3.2 [kPa], $R_{3.2}$, versus la Flexibilidad en Fluencia no recuperable a 3.2 [kPa], $J_{nr3.2}$, medido a la misma temperatura. Si el punto dibujado cae sobre o arriba de la línea del gráfico es un indicador que la modificación se efectuó con un polímero elastomérico adecuado; si el punto cae bajo la línea del gráfico es un indicador que el ligante no está modificado con polímero elastomérico. Cabe destacar que, el uso de este indicador de respuesta elástica no es obligatorio.

Tabla 2: Requisitos de la clasificación de asfaltos por grado de desempeño (PG) usando MSCR, Complemento N°1, Manual de Carreteras Vol. 8, 2019.

GRADO DE DESEMPEÑO	PG 52							PG 58							PG 64						
	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40			
Temp. máx de diseño del pavimento promedio de 7 días, °C ^(b)	< 52							< 58							< 64						
Temperatura mínima de diseño, °C ^(b)	>= 10	>= 16	>= 22	>= 28	>= 34	>= 40	>= 46	>= 16	>= 22	>= 28	>= 34	>= 40	>= 10	>= 16	>= 22	>= 28	>= 34	>= 40			
LIGANTE ASFÁLTICO ORIGINAL																					
Punto de inflamación, T 48 o 8.302.9, min °C	230																				
Viscosidad, T 316 o 8.302.24: Máx. 3 Pa's, temperatura de ensaye, °C	135																				
Corte dinámico, T 315 o 8.302.22: G*/sinδ, min 1.00 kPa a 10 rad/s, temperatura de ensaye, °C	52							58							64						
HORNO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIO (T 240 O 8.302.33)																					
Cambio de masa, máx., porcentaje ^(f)	1,00																				
MSCR, T 350: Tráfico estándar "S", Jnr3.2, máx.4.5 kPa ⁻¹ J _{ndiff} , máx. 75%, Temperatura de ensaye, °C	52							58							64						
MSCR, T 350: Tráfico pesado "H", Jnr3.2, máx.2.0 kPa ⁻¹ , J _{ndiff} , máx. 75%, Temperatura de ensaye, °C	52							58							64						
MSCR, T 350: Tráfico muy pesado "V", Jnr3.2, máx.1.0 kPa ⁻¹ , J _{ndiff} , máx. 75%, Temperatura de ensaye, °C	52							58							64						
MSCR, T 350: Tráfico extremadamente pesado "E", Jnr3.2, máx.0.5 kPa ⁻¹ , J _{ndiff} , máx. 75%, Temperatura de ensaye, °C	52							58							64						
CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN PAV (R 28 O 8.302.23)																					
PAV Temperatura de envejecimiento, °C ^(g)	90							100							100						
Corte dinámico, T315 o 8.302.22: "S" G*senδ, máx. 5000 KPa ^(h) a 10 rad/s, temperatura de ensaye, °C	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16			
Corte dinámico, T 315 o 8.302.22: "H", "V", "E". G*senδ, máx. 6000 KPa ^(h) a 10 rad/s, temperatura de ensaye, °C	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16			
Rigidez creep, T 313 o 8.302.25: S, máx. 300 MPa, @ 60 s valor-m, min 0.300 temperatura de ensaye, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30			
a) El ensayo MSCR debe ejecutarse al ligante envejecido en Horno de película delgada rotatorio a la temperatura alta del grado PG seleccionado de acuerdo con la zona climática en que va a ser empleado. El aumento de uno o dos grados por efecto de volumen de tráfico o por baja velocidad se cumple disminuyendo el Jnr determinado a la temperatura de la zona climática. b) Las temperaturas del pavimento se determinan de acuerdo a la zona climática sin aplicar el aumento de uno o dos grados de alta temperatura indicada en M 323 o R35. c) Este requisito podrá ser variado por el Inspector Fiscal si el productor garantiza que el cemento asfáltico puede ser bombeado y mezclado cumpliendo los estándares de seguridad. d) Para el control de calidad en la producción de ligantes asfálticos sin modificar puede emplearse la viscosidad como control suplementario de la medición de G*/sinδ a temperaturas en que tenga un comportamiento newtoniano. e) G*/sinδ = rigidez a alta temperatura y G* sinδ = rigidez a temperatura intermedia. f) El cambio de masa debe ser inferior a 1,00 por ciento pudiendo ser positivo (ganancia de masa) o negativo (pérdida de masa). g) En condiciones de tránsito S, podrá reemplazarse el requisito de Jnr3,2 < 4.5 KPa⁻¹ para el ligante envejecido en PDR, por G*/seno δ > 2,2 KPa para el ligante en las mismas condiciones de envejecimiento. h) El requisito de Jndiff máx 75% podrá reemplazarse por el cumplimiento de lo especificado en el Apéndice A (sobre la curva).																					

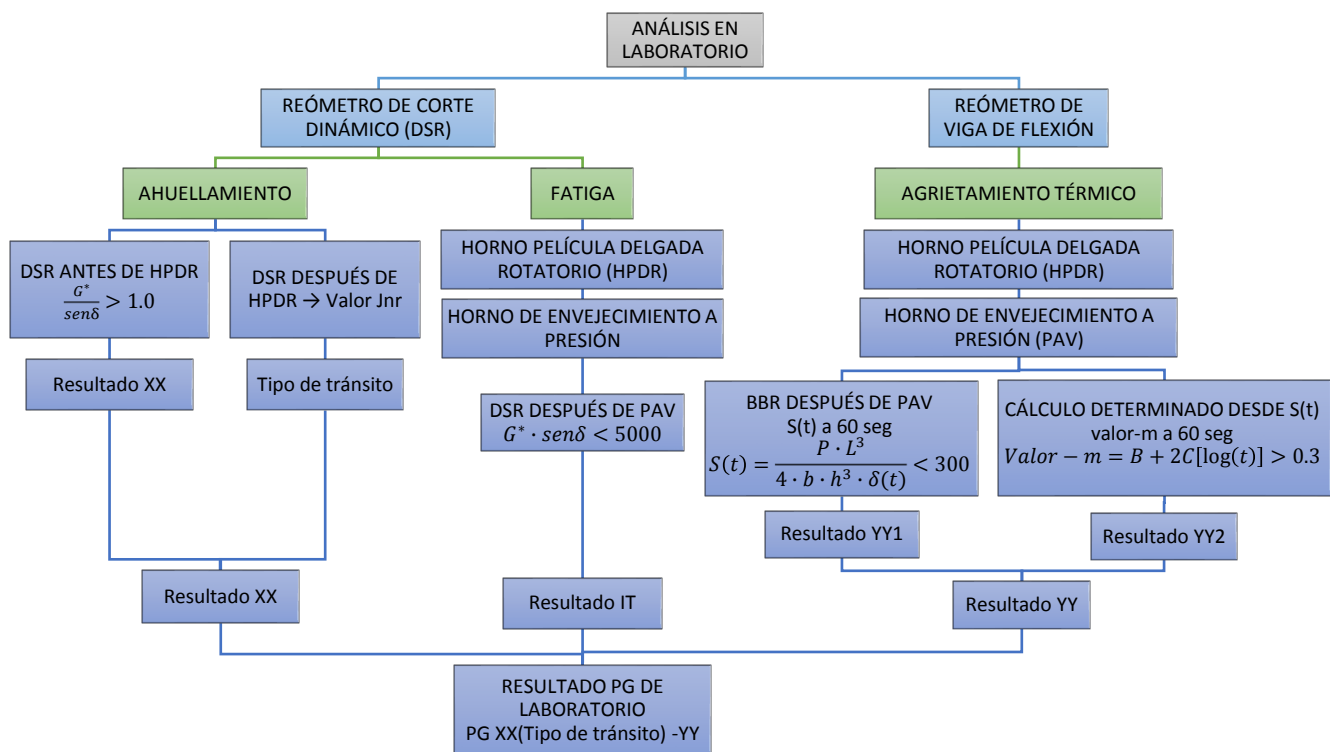


Figura 17: Esquema resumen clasificación por grado de desempeño (PG) usando MSCR, Elaboración propia.

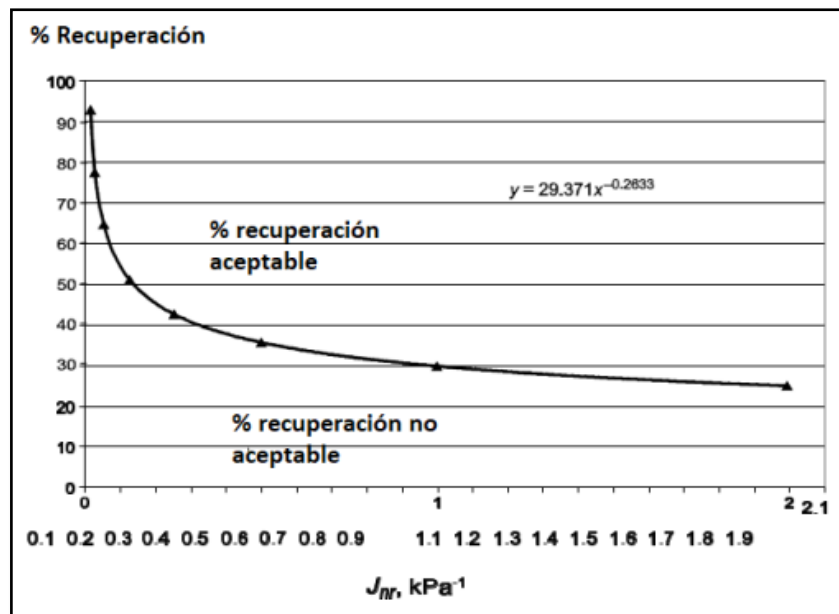


Figura 18: Curva %R vs Jnr para verificación de respuesta elástica, Complemento N°1, Manual de Carreteras Vol. 8, 2019.

2.5 SELECCIÓN DE UN LIGANTE ASFÁLTICO SEGÚN SU LUGAR DE EMPLAZAMIENTO

El desempeño de un ligante asfáltico dependerá principalmente del clima y las condiciones de tránsito que presente el lugar en el que será emplazado.

2.5.1 Zonificación Superpave del territorio chileno

Las necesidades de mantenimiento de los pavimentos dependen significativamente de una adecuada selección de materiales para las respectivas capas estructurales. Los ligantes asfálticos son materiales susceptibles térmicamente, es decir, su desempeño depende fuertemente del clima donde se utilicen, por lo que, se realizó una zonificación del territorio chileno que permitiera asignar ligantes asfálticos con una clasificación Superpave acorde al clima del lugar de emplazamiento.

Esta zonificación se realiza en base a registros históricos de temperatura considerando un factor de confiabilidad, donde específicamente se utilizó información de 94 estaciones climáticas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y de la Dirección General de Aguas (DGA), las que cuentan con información confiable para un mínimo de 20 años. Los datos meteorológicos, en conjunto con la clasificación climática de Köppen para Chile y la topografía de nuestro territorio, fueron utilizados para definir de manera aproximada las zonas donde es apropiado el uso de cada tipo de ligante asfáltico.

Para cada una de las estaciones climáticas seleccionadas se procedió a calcular las temperaturas extremas esperadas en el pavimento, las que definen el grado PG aplicable:

2.5.1.1 Componente XX

Para calcular el grado de alta temperatura se utiliza el modelo basado en daño (LTPP 3.1), desarrollado en base a datos climáticos por hora, los cuales proporcionan una representación más precisa de las condiciones de alta temperatura del pavimento. De esta manera, el grado PG de alta temperatura (PG_d) se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$PG_d = 48.2 + 14 \cdot DD_{aire} - 0.96 \cdot (DD_{aire})^2 - 2 \cdot RD$$

Ecuación 2-1

Donde:

- PG_d : Grado de alta temperatura basado en daño LTPP 3.1. [°C]
- DD_{aire} : Promedio de las sumas anuales de Grados-días sobre 10°C. [1000°C-días]
- RD : Profundidad del ahuellamiento permitido (5-13mm) [mm]

2.5.1.2 Componente YY

La temperatura mínima del pavimento a una determinada profundidad se calcula utilizando el modelo LTPP 2.1, a partir de la siguiente ecuación:

$$T_{pav\ H\ mm} = 1.56 + 0.72 \cdot T_{aire} - 0.0004 \cdot Lat^2 + 6.26 \cdot \log_{10} \cdot (H + 25) + Z \cdot (4.4 + 0.52 \cdot (\sigma_{aire})^2)^{1/2}$$

Ecuación 2-2

Donde:

- $T_{pav\ H\ mm}$: Temperatura mínima del pavimento asfáltico a una profundidad de H [mm] [°C]
- T_{aire} : Temperatura mínima del aire para el período en estudio en [°C]
- Lat : Latitud geográfica de la zona en estudio en grados

- σ_{aire} : Desviación estándar de las temperaturas mínimas para el período en estudio en [°C]
- Z: Variable estándar de la distribución normal

2.5.1.3 Temperatura Intermedia

Refleja la temperatura al interior de la carpeta asfáltica y se calcula de acuerdo con la *Ecuación 2-3*:

$$T_{int} = \frac{(T_{alta} - T_{baja})}{2} + 4$$

Ecuación 2-3

Los resultados indican que la mayor parte de nuestro territorio puede cubrirse con tres tipos de ligantes asfálticos, considerando un 98% de confiabilidad: en la zona austral (XI y XII región) y cordillerana del país es recomendable utilizar un PG 52-34; para la zona norte, zona sur (IX, XIV y parte de la X región) y sector costero entre la II y IX región se requiere un PG 58-28; finalmente para la zona central entre la III y VIII región se recomienda un PG 64-22 (excluyendo sectores cordilleranos y costeros) (Arteaga L., 2017).

Lo anterior se resume en la *Figura 19*, donde se muestra esquemáticamente la distribución de los tres tipos de clasificación PG mencionados.

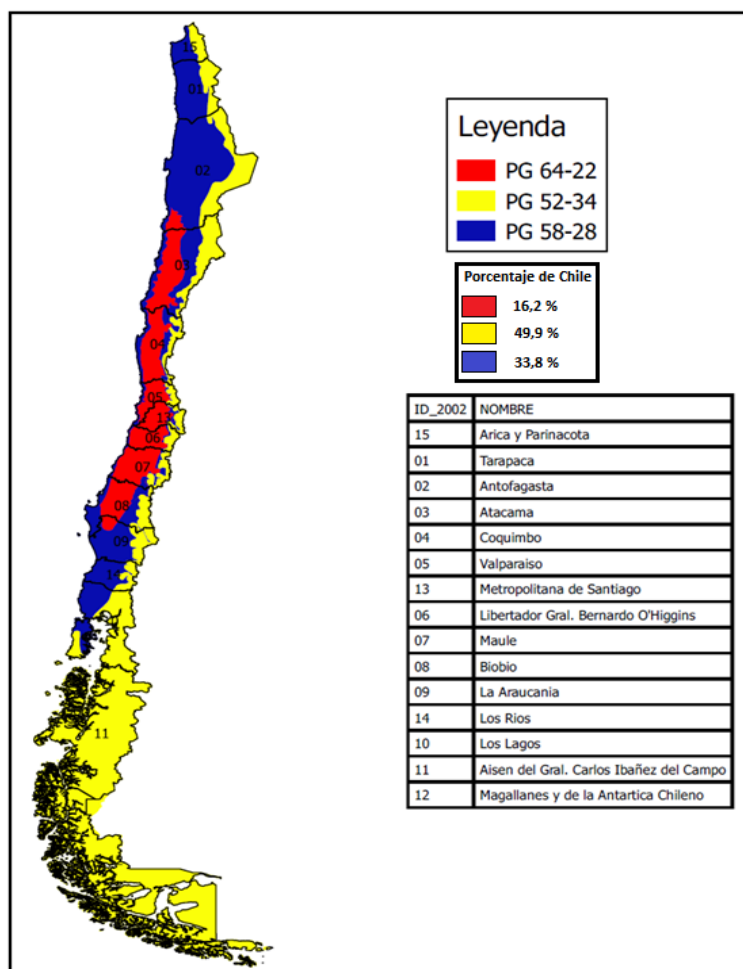


Figura 19: Zonificación Superpave Chile utilizando el modelo basado en daño LTPP 3.1, para un 98% de confiabilidad, Arteaga L. et al. 2017.

2.5.2 Tipo de Tránsito

El tipo de tránsito se selecciona de acuerdo con el volumen de tránsito y velocidad de tráfico, según lo presentado en la Tabla 3

Tabla 3: Tipo de tránsito según volumen de tránsito y velocidad de tráfico, Complemento N°1, Manual de Carreteras Vol. 8, 2019.

Volumen de Tránsito EE millones	Velocidad de Tráfico		
	Menor a 20 km/hr	Entre 20 y 70 km/hr	Mayor a 70 km/hr
$0.3 \leq EE < 3$	H	S	S
$3 \leq EE < 10$	V	H	H
$10 \leq EE < 30$	E	V	V
$EE \geq 30$	E	E	E

Cabe destacar que, las velocidades corresponden aproximadamente a la velocidad de operación, y los ejes equivalentes corresponden a los que se esperan durante la vida de diseño del pavimento.

2.5.3 Grado de desempeño del ligante requerido

De acuerdo con lo descrito en las Secciones 2.5.1 y 2.5.2 para seleccionar el ligante se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Determinar el PG según Zona Geográfica utilizando la *Figura 19* (por ej. PG 64-22; Santiago).
2. Utilizar la *Tabla 3* para seleccionar el tipo de tránsito de acuerdo con su volumen y velocidad: estándar (S), pesado (H), muy pesado (V) o extremadamente pesado (E).
3. Especificar el grado de desempeño requerido indicando la zonificación climática y el tipo de tránsito (por ej. PG 64H-22 para Santiago y tránsito pesado).

2.6 ADITIVOS O MODIFICADORES

Dado que el asfalto es un material que se caracteriza por su susceptibilidad térmica, es necesario o recomendable que éste sea modificado, con el fin de mejorar su desempeño y aumentar así, su vida útil (Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (AMAAC), 2000).

Los modificadores, corresponden a cualquier producto que se adiciona al asfalto para modificar sus propiedades o su costo, contribuyendo a la resistencia de los principales deterioros que lo afectan. En particular, el efecto del modificador se aprecia en el cambio de la relación viscosidad-temperatura, lo que puede manifestarse como una mejora en su desempeño tanto a altas como a bajas temperaturas.

Como se aprecia en la *Figura 20*, en el rango de temperaturas altas de servicio, el asfalto modificado se vuelve más rígido o elástico y presenta una mayor resistencia al ahuellamiento, mientras que a bajas temperaturas, éste se vuelve más “blando” y dúctil lo cual permite obtener mejoras en la relajación de esfuerzos, y por ende, aumentar su resistencia al agrietamiento térmico. Además, en el rango de temperaturas intermedias, con el uso de polímeros se inhibe la propagación de grietas por red interna elástica, contribuyendo a la resistencia al agrietamiento por fatiga.

Cabe destacar que, se desea una menor rigidez (o viscosidad) a temperaturas de construcción para facilitar el bombeo del ligante asfáltico durante el mezclado y compactación. (National Cooperative Highway Research Program, 2017)

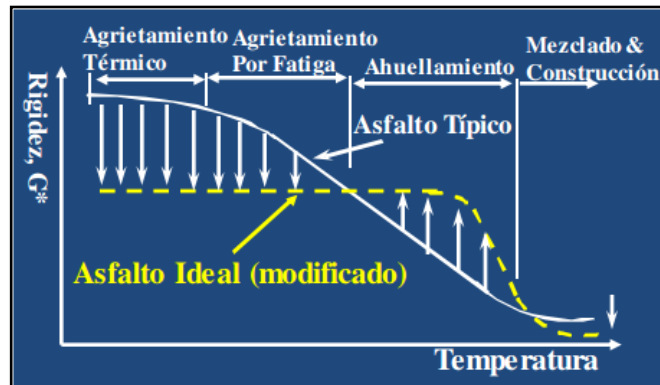


Figura 20: Efecto en la rigidez de un asfalto modificado, Delgadillo R., 2014.

2.6.1 Índice de Temperatura Útil (ITU) para clasificación PG

El Índice de Temperatura Útil (ITU) se consigue sumando los números absolutos de su clasificación PG. Por ejemplo, un ligante asfáltico con clasificación PG 64-22 tiene un índice de temperatura útil de $|64| + |-22| = 86$.

Como regla general, para obtener un ITU con valor igual o superior a 92, el asfalto se debe “modificar”. En la Figura 21 se presenta un esquema que muestra de manera gráfica este criterio de selección (Salomón D., 2016).

		High Temperature, °C				
		52	58	64	70	76
Low Temperature, °C	-16	52-16	58-16	64-16	70-16	76-16
	-22	52-22	58-22	64-22	70-22	76-22
	-28	52-28	58-28	64-28	70-28	76-28
	-34	52-34	58-34	64-34	70-34	76-34
	-40	52-40	58-40	64-40	70-40	76-40
Crudo		= Crude Oil				
(Crudo de buena calidad)		= High Quality Crude Oil				
Requiere modificación		= Modifier Required				

Figura 21: Criterio de selección asfaltos modificados, Delmar Salomón, 2016.

2.6.2 Tipos de modificadores

- **Modificadores de reología:** Corresponden a *Polímeros*, los cuales se definen como macromoléculas formadas por la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades simples llamadas monómeros, que mejoran las propiedades mecánicas y reológicas del asfalto, es decir, modifican su viscosidad, ductilidad, resistencia al envejecimiento, susceptibilidad térmica y elasticidad. Existen dos grupos de polímeros:

Termo-endurecibles y Termoplásticos; los que a su vez se dividen en: Termoplásticos Plastómeros y Termoplásticos Elastómeros.

- **Aditivos extendedores:** Disminuyen la cantidad de asfalto a emplear en una mezcla asfáltica, y suelen ser más económicos que el asfalto. Ejemplos de este tipo de aditivos son el Azufre y la Lignina.
- **Aditivos endurecedores:** Corresponden a oxidantes químicos. Son asfaltos naturales conocidos como “Asfaltita” o “Gilsonita”, los cuales tienen un alto contenido de asfaltenos (alrededor del 60-70%).
- **Aditivos ablandadores:** Aumentan la penetración de los asfaltos de forma duradera en el tiempo y mejoran algunas características del asfalto. Este tipo de modificador se analiza con más detalle en la *Sección 2.7* del presente documento.
- **Aditivos rejuvenecedores:** Restablecen o mejoran las características originales de un asfalto que ha llegado al final de su vida útil.
- **Fibras:** Existen dos tipos de fibras:
 - **Cortas (< 1mm):** Permiten incrementar la dotación de asfalto en una mezcla sin que este migre. Mejora ligeramente el comportamiento mecánico de las mezclas, existe una mejoría por el mero incremento de la dotación de asfalto. Ejemplos: Celulosa, asbestos.
 - **Largas (4-12mm):** Además de lo anterior, mejoran considerablemente la resistencia a la tensión de las mezclas. Ejemplos: Poliéster, Polipropileno.
- **Aditivos mejoradores de adherencia:** Este tipo de aditivos son tensoactivos, es decir, sustancias orgánicas con una parte polar (hidrofílica) y una parte apolar (lipofílica). La parte apolar tiene tendencia a estar en el asfalto, mientras que la parte polar tiene carga positiva y tiene tendencia a salirse del asfalto. De esta manera, la parte polar al acercarse al pétreo forma un puente de unión entre asfalto y pétreo que facilita la unión entre éstos.

2.7 ABLANDADORES

A continuación, se presenta un resumen de los tipos de ablandadores que existen, sus principales características y su efecto en el desempeño de ligantes asfálticos basado en la investigación titulada “*Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders*” (Golalipour A., 2013). Para mayores detalles, consultar el *Anexo 1: Ablandadores* del presente documento.

2.7.1 Tipos de ablandadores

Las propiedades de los ablandadores y su efecto modificador en los ligantes asfálticos, varía significativamente dependiendo de su fuente, composición y técnica de refinación. Este tipo de aditivos se pueden clasificar en tres categorías principales:

2.7.1.1 Aceites en base a petróleo

Los lubricantes corresponden al derivado del petróleo crudo al cual ya se le han eliminado los componentes más ligeros en la torre de destilación atmosférica (como lo son el gas, gasolina y

diesel, entre otros). El aceite contiene componentes parafínicos, nafténicos y aromáticos, los cuales son separados por un disolvente de las moléculas aromáticas.

La composición química de este tipo de productos corresponde a la asociación de átomos de hidrógeno y carbono (hidrocarburos). La disposición de estos átomos es la que determina si el aceite es aromático, nafténico o parafínico.

- **Aceites parafínicos:** Los aceites parafínicos contienen ceras que dan como resultado una mayor viscosidad a bajas temperaturas.
- **Aceites nafténicos:** Los aceites nafténicos ofrecen excelentes propiedades de solvencia y fluidez a baja temperatura.
- **Aceites aromáticos:** El aceite aromático puede obtenerse a partir de procesos de producción parafínicos o nafténicos, en donde éste es extraído con solvente y luego es recuperado por destilación. Los aromáticos tienen buena propiedad de solvencia, pero una estabilidad de oxidación relativamente pobre.

2.7.1.2 *Bio-aceites*

Surgen como alternativa a los aceites en base a petróleo debido al incremento en el precio de estos últimos y la disminución de las reservas de petróleo en Estados Unidos. De esta manera, se entiende como un material renovable, amigable con el medio ambiente, que proporciona seguridad energética y resulta conveniente en términos económicos.

Estudios realizados, concluyen que la adición de bio-aceite a ligantes asfálticos, mejora su desempeño a baja temperatura, pero compromete su resistencia a alta temperatura. De ahí, es que surge la propuesta de mezclar bio-aceite con ligantes asfálticos modificados con polímeros tradicionales.

2.7.1.3 *Aceites en base a residuos refinados*

Este tipo de aceite corresponde a la reutilización de aquellos que han sido usados en ciertas aplicaciones como lo son fábricas, automóviles, casas, etc., por lo tanto, su consumo resulta beneficioso en términos financieros y ambientales. Los principales son: residuos de aceites lubricantes, residuos de aceite de motor y residuos de aceite de cocina.

Estudios realizados, indican que:

- Los residuos de aceites lubricantes pueden ser usados como aditivos ablandadores sin afectar el desempeño de ligantes asfálticos, sin embargo, también presentan algunas desventajas.
- Los residuos de aceite de motor son modificadores económicos utilizados para aumentar el rango del grado PG, pero que incrementan significativamente la tasa de oxidación de los ligantes asfálticos.
- El aceite de cocina puede polimerizarse para ser usado como un aditivo en ligantes asfálticos, logrando reducir el PG dado a su mayor resistencia al agrietamiento térmico. Sin embargo, existe una menor resistencia al ahuellamiento.

2.7.2 *Efecto de aceites ablandadores en ligantes asfálticos*

Las investigaciones enfocadas directamente al estudio del efecto de aceites ablandadores en ligantes asfálticos son escasas, sin embargo, se destaca una en particular realizada para obtener el

grado de doctor en la Universidad de Wisconsin – Madison titulada: *“Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders”* (Golalipour A., 2013). En general, se espera que la mejora en las propiedades a baja temperatura del ligante modificado, tenga como resultado una reducción del agrietamiento térmico debido a la disminución de su rigidez y el aumento del valor m .

En el estudio en cuestión se utilizaron dos ligantes asfálticos, ambos con clasificación Superpave PG 64-22, pero con diferente contenido de asfaltenos. En el caso de los modificadores, se estudiaron nueve tipos de aceites ablandadores, en la dosificación respectiva que permitiera que el grado PG de alta temperatura del asfalto modificado no sufriera una disminución importante, sino que se mantuviera similar al del ligante base.

Para el proceso de modificación se utiliza un mezclador de alto corte, a una velocidad constante de 5000 rpm, a una temperatura de mezcla de $150 \pm 5^\circ\text{C}$, con un tiempo de mezclado de 30 minutos. Los principales resultados obtenidos, se resumen a continuación:

- La modificación con aceite altera significativamente las propiedades reológicas del ligante asfáltico a diferentes temperaturas y frecuencias. Los resultados confirman que la modificación del aceite reduce la rigidez del ligante asfáltico, por lo tanto, afecta negativamente el desempeño a altas temperaturas y mejora el desempeño a baja temperatura.
- Los resultados de BBR mostraron que la adición de aceite reduce el módulo del ligante a bajas temperaturas de servicio, teniendo una mayor reducción si se utiliza un mezclador de alto corte.
- La modificación del aceite aumenta la movilidad molecular del ligante, por lo tanto, aumenta la susceptibilidad térmica y la dependencia del tiempo del material.
- El parámetro $|G^*|/\sin\delta$ y el cumplimiento de la flexibilidad en fluencia no recuperable (J_{nr}) se emplearon para evaluar el rendimiento a alta temperatura de los ligantes. Los resultados muestran que la modificación del aceite es perjudicial para el rendimiento a altas temperaturas.
- La modificación con aceite afectó la susceptibilidad al envejecimiento del ligante, lo cual depende del tipo de aceite. Las diferencias se atribuyeron a la composición del aceite, lo que afecta a diferentes compuestos dentro del ligante base. Se observa un aumento en el endurecimiento por envejecimiento del ligante modificado con bioaceite, mientras que existe una disminución en el endurecimiento por envejecimiento cuando se incorpora aceite residual refinado.
- Los resultados indican que existe una relación lineal entre el contenido de aceite y el logaritmo de la rigidez. Análisis adicionales indican que esta relación lineal también se puede extender al valor m y al ángulo de fase.

Finalmente, este estudio indica que la adición de aceite podría cambiar el comportamiento reológico y térmico del ligante asfáltico. En base a los resultados, se concluye que la modificación con aceite puede mejorar las propiedades de baja temperatura del ligante debido a la reducción de la rigidez y al aumento del módulo de relajación. Los resultados también muestran que la modificación con aceite tiene un efecto positivo sobre la resistencia al agrietamiento del ligante en un amplio rango de temperaturas.

2.8 POLÍMEROS

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos, como se mencionó anteriormente, es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas. Por su parte, la relación tensión/fatiga mostraría un comportamiento como el que se muestra cualitativamente en la *Figura 22*.

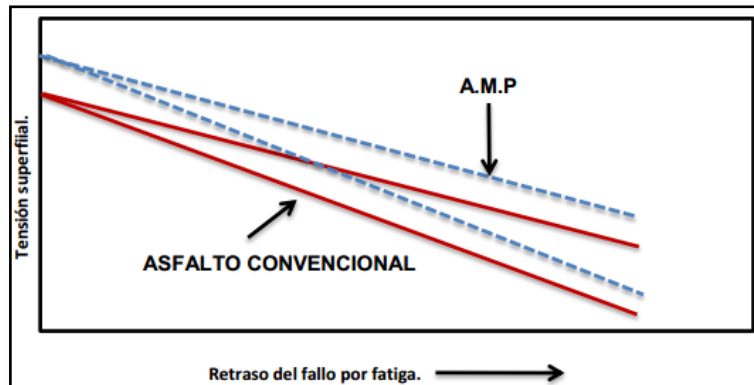


Figura 22: Relación tensión-fatiga en asfaltos convencionales y A.M.P, Vázquez I., 2010.

Las diferencias que existen entre asfaltos convencionales y asfaltos modificados con polímeros pueden apreciarse al comparar el desempeño de cada uno frente a diferentes factores que intervienen o influyen en el desempeño de la mezcla asfáltica. Múltiples investigaciones han demostrado que, para factores como permeabilidad, durabilidad, adhesión y susceptibilidad a volúmenes de tráfico y cambios climáticos, el asfalto modificado supera en todos los casos el desempeño de los asfaltos convencionales, a excepción del costo en donde obviamente se requiere de una inversión inicial superior (Vázquez I., 2010).

Está comprobado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una amplia gama de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito, sin embargo, el incremento del volumen del tránsito y magnitud de las cargas, sumado a la necesidad de optimizar las inversiones provoca que, en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

Como se muestra en la *Figura 23*, la resistencia al ahuellamiento en asfaltos modificados mejora considerablemente en relación con el desempeño obtenido en el caso de asfaltos convencionales.

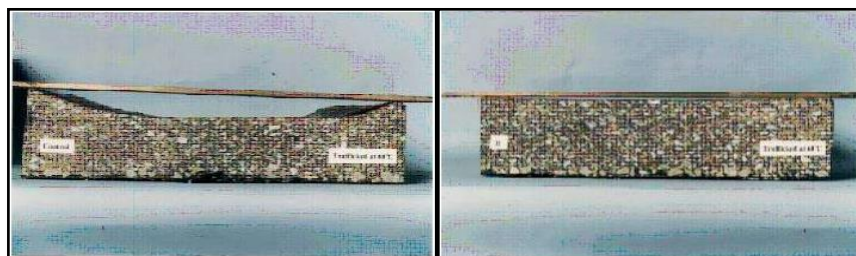


Figura 23: Ahuellamiento a 60°C en asfalto convencional y asfalto modificado, Vázquez I., 2010.

Cabe destacar que, el *Anexo 2: Polímeros* del presente documento contiene información adicional sobre polímeros, correspondiente a su clasificación, características, ejemplos, además de ventajas y desventajas más detalladas.

2.9 EL CAUCHO COMO MODIFICADOR

2.9.1 Caucho

El caucho corresponde a una sustancia natural o sintética que se caracteriza principalmente por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica.

2.9.1.1 Tipos de caucho

2.9.1.1.1 Caucho natural

El caucho natural es un producto vegetal procesado que se obtiene de la savia de varios centenares de especies de árboles y plantas existentes en distintas partes del mundo, en especial en África Ecuatorial, el Sudeste Asiático y Sudamérica. La savia de aspecto lechoso o látex que se obtiene del árbol *Hevea Brasiliensis* cubre más del 99% del consumo mundial de caucho natural.

El látex se obtiene practicando en la corteza del árbol del caucho una incisión en espiral en días alternos, aunque la frecuencia y el método pueden variar. El látex se recoge en vasos colgados del árbol, bajo la incisión, y a continuación se transfiere a cubos que se transportan a las estaciones de procesamiento. Por lo general, se añade amoníaco como conservante, el cual rompe las partículas de caucho y produce dos fases con un 30-40% de parte sólida. Este producto se concentra hasta obtener un 60% de parte sólida, logrando así un concentrado de látex amoniacal con un 1.6% de amoníaco en peso.

Entre los diferentes tipos de caucho natural que se producen actualmente se encuentran las planchas estriadas ahumadas, el caucho de especificación técnica, los crepés, el látex, el caucho natural epoxidizado y el caucho natural termoplástico. El proceso productivo de los principales tipos de caucho natural se resume en la *Figura 24*.

El látex contiene 30 a 36% del hidrocarburo del caucho, 0.3-0.7% de cenizas, 1-2% de proteínas, 2% de resina y 0.5% de quebrachitol. La composición del látex varía en las distintas partes del árbol; generalmente el porcentaje de caucho (hidrocarburo) decrece del tronco a las ramas y hojas. La época del año afecta a la composición del látex, así como el tipo de suelo y la línea o casta del árbol.

El látex obtenido del árbol puede comercializarse directamente en forma de concentrado o bien procesarse para obtener caucho seco. Un método de fabricación del caucho de especificación técnica (que debe su nombre al hecho de que su calidad, especialmente su pureza y elasticidad, se determina mediante especificaciones técnicas, en vez de las especificaciones visuales convencionales) o caucho natural en bloque, consiste en coagular el látex bruto con ácido y pasarlo después por las máquinas de cortado y por una serie de cilindros de crepado; a continuación, con una trituradora de martillos o un granulador, se convierte el producto en grumos de caucho que son tamizados, lavados, secados, embalados y acondicionados. Otro método de producción de caucho de especificación técnica consiste en añadir un agente disgregante antes de la coagulación, seguido de la trituración con cilindros de crepado.

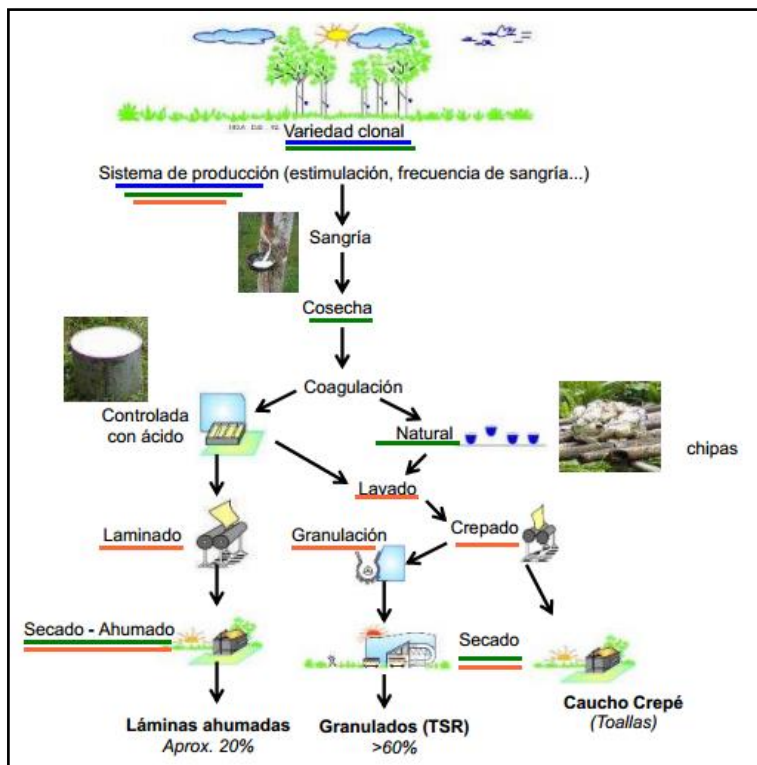


Figura 24: Proceso productivo de los principales tipos de caucho natural, Rivano F., 2009.

Las planchas estriadas ahumadas se obtienen pasando el látex coagulado a través de una serie de cilindros, de los que salen planchas finas que se estampan con un patrón estriados para aumentar la superficie del material y mejorar su secado. (Beliczky L. & Fajen J., 2001).

2.9.1.1.2 Caucho sintético

El caucho sintético corresponde a toda sustancia elaborada artificialmente que se parezca al caucho natural. Se obtiene por reacciones químicas, conocidas como condensación o polimerización, a partir de determinados hidrocarburos insaturados. Después de su fabricación, el caucho sintético se vulcaniza.

Se producen varios tipos de caucho sintético, entre los cuales se pueden destacar:

2.9.1.1.2.1 Neopreno

Caucho sintético obtenido por polimerización del cloropreno (2-cloro-1,3 butadieno) y es resistente al calor y a productos químicos como aceites y petróleo. Se emplea en tuberías de conducción de petróleo y como aislante para cables y maquinaria.

2.9.1.1.2.2 Buna o caucho artificial

Caucho sintético obtenido por copolimerización, que consiste en la polimerización de dos monómeros denominados comonómeros. La palabra Buna deriva de las letras iniciales de Butadieno, uno de los comonómeros, y Natrium (Sodio), empleado como catalizador.

En el Buna-N, el otro comonómero es el acrilonitrilo ($\text{CH}_2\text{-CH}(\text{CN})$), que se produce a partir del ácido cianhídrico. El Buna-N es muy útil en aquellos casos que se requiere resistencia a la acción de aceites

y a la abrasión. También se obtiene caucho industrialmente por copolimerización de butadieno y estireno.

2.9.1.1.2.3 *Caucho de Butilo*

Caucho sintético que se obtiene por copolimerización de isobutileno con butadieno o isopreno. Es un plástico y puede trabajarse como el caucho natural, pero es difícil de vulcanizar. Debido a su baja permeabilidad a los gases, se utiliza en los tubos interiores de las llantas de automóviles.

2.9.1.2 *Propiedades del caucho*

2.9.1.2.1 Propiedades químicas

- La solubilidad del caucho bruto en sus disolventes más comunes no es muy elevada. En la práctica, los disolventes más usados son el benceno y la nafta. Otros buenos disolventes son el tricloroetileno, tetracloroetano, pentacloroetano, tetracloruro de carbono, cloroformo, tolueno, xileno, keroseno, etc.
- La viscosidad de la solución del caucho bruto es elevada.
- El caucho a una temperatura de hasta 200°C se ablanda y sus soluciones tienen menor viscosidad, pero el número de dobles enlaces se conserva sin alteración. Cuando la temperatura se eleva hasta 250°C, los enlaces dobles se separan y tiene lugar la formación de anillos.

2.9.1.2.2 Propiedades físicas

- En estado natural es un hidrocarburo blanco o incoloro.
- Al amasarlo mecánicamente, o al calentarlo por encima de 50°C, el caucho adquiere una textura de plástico pegajoso.
- Adquiere gran deformación permanente debido a su naturaleza plástica.
- La plasticidad del caucho varía de un árbol a otro y también depende de la cantidad de trabajo dado a éste desde el estado látex, de las bacterias que lo acompañan e influyen en su oxidación y de otros factores. La plasticidad puede modificarse dentro de ciertos límites por la acción de productos químicos.
- El caucho puro es insoluble en agua o ácidos débiles, y soluble en benceno, petróleo, hidrocarburos clorados y disulfuro de carbono.
- Con agentes oxidantes químicos se oxida rápidamente.

2.9.1.2.3 Propiedades ecológicas

El caucho es un agente muy contaminante porque:

- Es un producto altamente inflamable.
- La quema de neumáticos produce gases perjudiciales para la salud generando dioxinas, mercurio, hidrocarburos poli-aromáticos y metales pesados.
- La acumulación de este material en vertederos provoca focos de infección y enfermedades.

2.9.1.3 Aplicaciones

El caucho en general es utilizado en la fabricación de artículos tales como guantes quirúrgicos, preservativos, bandas elásticas, suelas de calzado, entre otras aplicaciones, pero su uso mayoritario es en la fabricación de neumáticos, el cual corresponde a más del 50% de la producción mundial. También es utilizado para la elaboración de adhesivos, mediante la disolución en un solvente volátil como el tolueno.

Cabe destacar que, la proporción de caucho natural y sintético va a depender de si se trata de neumáticos de automóviles o camiones, siendo necesaria una mayor proporción de caucho natural para el caso de camiones, con el fin de controlar la generación de calor.

2.9.2 Neumáticos Fuera de Uso (NFU)

Los neumáticos fuera de uso (NFU) son aquellos neumáticos que se han retirado del vehículo de manera permanente sin posibilidad de ser utilizados para circular en carretera por no cumplir las normas de seguridad (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).

2.9.2.1 Composición y características

A pesar de que la composición del neumático suele variar según su tipo y país de fabricación, la *Tabla 4* muestra sus principales componentes.

Tabla 4: Composición según tipo de neumático, Rubber Manufacturers Association, 2008.

Componente	Tipo de Vehículo	
	Automóviles	Camiones
Caucho Natural	14%	27%
Caucho Sintético	27%	14%
Negro de humo	28%	28%
Acero	14-15%	14-15%
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16-17%	16-17%
Peso promedio	8.6 Kg	45.4 Kg
Volumen	0.06 m ³	0.36 m ³

Como se puede apreciar, además de caucho, se agregan otros materiales para mejorar sus propiedades, tales como:

- Suavizantes, que aumentan la trabajabilidad del caucho antes de la vulcanización.
- Óxido de Zinc y de Magnesio, comúnmente denominados activadores, dado que son añadidos para reducir el tiempo de vulcanización de varias horas a pocos minutos.
- Antioxidantes, para aumentar la vida del caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono.
- Negro de Humo, especie de humo negro obtenido por combustión incompleta de gases naturales, que entrega mayor resistencia a la abrasión y a la tensión.
- Fibra textil y acero, usualmente en forma de hilos, que buscan reforzar y aportar resistencia al neumático.

2.9.2.2 ¿Por qué es importante el reciclaje de NFU?

Cada año se generan alrededor de 80.000 toneladas de N.F.U carretero y minero en nuestro país. Cuando un neumático no es reciclado y termina en un basural, su degradación puede tardar hasta 500 años, lo cual constituye un grave impacto en el medio donde se encuentran, debido a la degradación química parcial que se produce con el paso del tiempo y que contamina el suelo, generando problemas de seguridad. Además, esto favorece al estancamiento del agua, lo que trae consigo insectos y ratones, y por consecuencia, enfermedades.

La masiva fabricación de neumáticos y la gran dificultad para hacerlos desaparecer una vez usados, es uno de los problemas medioambientales más graves en todo el mundo. Un neumático necesita mucha energía al ser fabricado y si no es reciclado, provoca una gran contaminación ambiental al degradarse.

Actualmente los neumáticos son quemados como combustible en cementeras, arrojados en vertederos o rellenos formales, o depositados en vertederos clandestinos y sitios eriazos. Por otro lado, muchas personas los queman para disminuir el espacio que ocupan en los vertederos, lo cual provoca problemas aún más graves en el medio ambiente, debido a la emisión de gases químicos liberados, entre ellos ácido sulfúrico, que contienen partículas nocivas y además genera un material aceitoso que queda suspendido, contaminando el agua y los suelos. Cabe destacar que, el destino desconocido (clandestino) ronda el 85% de la generación anual de neumáticos fuera de uso.

2.9.2.3 Proceso de obtención del polvo de caucho NFU

El proceso de reciclaje de Neumáticos Fuera de Uso y la posterior obtención del Polvo de Caucho NFU, comienza con el destalonado de los neumáticos que consiste en extraer el anillo de alambres de acero que se encuentra en el interior de la llanta. Luego, las llantas son lavadas con detergente de uso industrial con el fin de retirar los posibles contaminantes que posean; y secadas para comenzar el proceso que se muestra en la *Figura 25*.

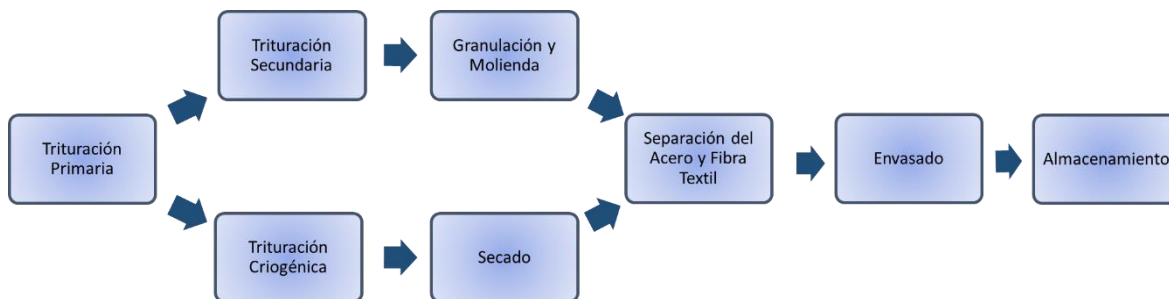


Figura 25: Proceso de obtención del polvo de caucho, Elaboración propia.

A continuación, se detallan las etapas más relevantes del proceso de obtención del polvo de caucho a partir de NFU:

2.9.2.3.1 Trituración primaria

Los neumáticos enteros se introducen en la trituradora primaria que generalmente consta de un conjunto formado por dos o más ejes de cuchillas paralelos que giran en sentido contrario, tal como se muestra en la *Figura 26*. La maquinaria está provista de un dispositivo que detecta las sobrecargas e invierte el sentido de giro de las cuchillas para hacer retroceder al neumático.

Dependiendo de la separación de las cuchillas de los ejes y de una rejilla que se coloca bajo los mismos, se puede determinar el tamaño de los trozos de neumático que se quieran obtener, los que por lo general corresponden a trozos y tiras de un tamaño comprendido entre 10 y 30 cm.



Figura 26: Trituración primaria, reciclaje de neumáticos <http://icore.es/portfolio_item/caucho-y-neumaticos/>

2.9.2.3.2 Trituración secundaria

Este proceso, al igual que la trituración primaria, es netamente mecánico y se lleva a cabo a temperatura ambiente. Existen diversos tipos de trituradores secundarios, los que son capaces de reducir el tamaño de los trozos obtenidos en la trituración primaria a tamaños que van de 40 [mm] a 0.1 [mm] de caucho, como se muestra en la *Figura 27*, a la vez que se obtiene gran parte de la separación del acero y fibra textil.



Figura 27: Trituración secundaria, reciclaje de llantas usadas, <<http://www.vivoenitalia.com/linea-de-reciclaje-de-llantas-usadas/>>

2.9.2.3.3 Granulación y molienda

El material de caucho proveniente del proceso secundario se introduce en un granulador con el fin de obtener tamaños comprendidos entre 0.1 y 10 [mm], o bien, en un molino directamente para obtener polvo de caucho de tamaño inferior a 0.8 [mm].

Los granuladores operan reduciendo el tamaño del caucho mediante corte por la acción de cuchillas, y el tamaño del producto final se puede modificar cambiando los tamices ubicados dentro de la máquina. Por otro lado, los molinos operan en serie, compuestos por grandes rodillos que van rotando y que están provistos de dentaduras que cortan el caucho. El tamaño del producto final en el caso de la molienda se regula al variar la distancia entre rodillos, y las partículas de caucho obtenidas por lo general son alargadas, angostas y con gran superficie de área.

2.9.2.3.4 Trituración criogénica

A diferencia de la trituración secundaria, que se realiza a temperatura ambiente, la molienda por criogenización se basa en la reducción de la temperatura del material hasta conseguir su fragilización. Se suele emplear el producto obtenido en la trituración primaria, el que se introduce en una cámara cilíndrica en presencia de nitrógeno líquido por la que se desplaza el material en sentido contrario al del Nitrógeno.

La temperatura de criogenización va de los -60°C a los -200°C . En este rango de temperatura, los trozos de neumáticos se pueden moler en molinos de impacto, obteniéndose así, distintos tamaños de gránulos y de polvo de caucho. La característica del caucho resultante, en comparación con el caucho obtenido a temperatura ambiente, es básicamente que las caras de fractura de las partículas de gránulos y polvo que se obtienen son lisas, y consecuentemente, con una menor superficie de área, lo cual no representa ninguna ventaja para las mezclas con ligante asfáltico sino todo lo contrario (Federación Española de la Recuperación y el Reciclaje (FER), 2013).

Como las bajas temperaturas favorecen la condensación, es necesario un secado posterior antes de su envasado y almacenamiento, lo que encarece enormemente el proceso.

2.9.2.3.5 Separación del acero y de las fibras textiles

La separación de las fibras textiles y del acero se produce en todos los procesos de trituración, granulación y molienda, el acero se retira mediante separadores magnéticos y la separación de las fibras se consigue aprovechando su textura y su ligereza. Un dispositivo empleado es la cinta balística, que consiste en una cinta transportadora dotada con un movimiento de vibración perpendicular al desplazamiento del material que, combinado con una inclinación adecuada, permite que el material más liviano (la fibra) se separe de los más pesados (acero y caucho). También se pueden emplear mesas o bandejas vibratorias que combinan la separación del caucho por tamizado con dispositivos fluidodinámicos basados en corrientes de aire o ciclones.

Al final del proceso, se debería obtener lo que se aprecia en la *Figura 28*:



Figura 28: Polvo de caucho, acero y fibra textil luego del proceso de separación, Viveros J. & Pereira A., 2015.

2.9.2.4 Aplicaciones

Como se mencionó anteriormente, los N.F.U son de larga data en su degradación (no menos de 500 años en un proceso natural) y contar con caucho reciclado permite acelerar la transformación de estos pasivos ambientales, además de destinarlos a la fabricación de diversos productos en el mercado. Polambiente es la primera empresa en instalar una Planta de Trituración y Granulación de NFU en la comuna de Lampa, logrando reciclar aproximadamente 9000 toneladas de neumáticos N.F.U al año, para su posterior reutilización y distribución.

A partir del reciclaje de N.F.U., Polambiente produce gránulos, polvo y chips de caucho reciclado destinados a la fabricación de diversos productos, como los que se muestran en la *Figura 29*, y se detallan a continuación (Polambiente, 2017):

- Pisos para superficies deportivas y multiusos, por sus propiedades de resistencia a los impactos y absorción acústica.
- Láminas para protección y transporte de carga, recomendados para rampas, acoplados de camiones, pick-up de camionetas y carros de arrastre, en transporte de bobinas, pallets, tuberías y animales.
- Pisos para bienestar y confort animal, que previenen riesgos de lesiones, disminuyen el estrés y mejoran la producción, gracias a su permeabilidad, amortiguación y resistencia.
- Limpiapiés y alfombras antideslizantes, para uso residencial y comercial, en interior y exterior, que son resistentes al tráfico intenso, reversibles y no acumulan basura al no poseer filamentos.

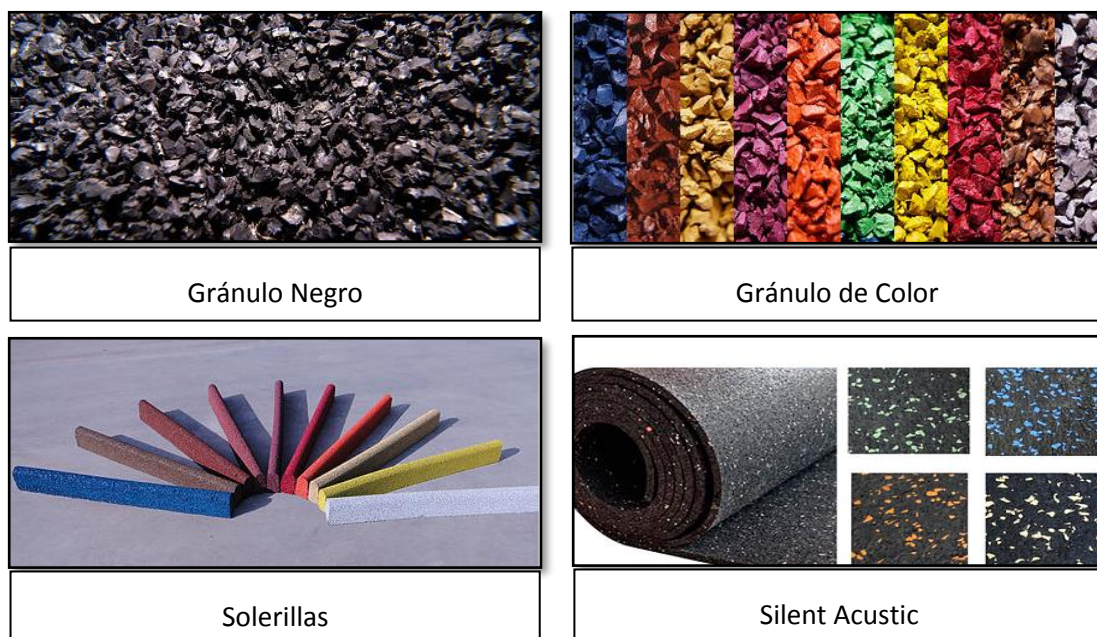


Figura 29: Productos elaborados en base a caucho NFU reciclado, Polambiente, 2017.

2.10 ASFALTOS MODIFICADOS CON CAUCHO

El uso de asfaltos modificados en la fabricación de pavimentos flexibles ha sido un tema de interés a nivel mundial como respuesta a la necesidad de preservar los pavimentos el mayor tiempo posible en su condición original. Es por lo anterior que existe una búsqueda constante de nuevos elementos que permitan mejorar las propiedades reológicas del asfalto y, de esta manera, llevar su desempeño a niveles de satisfacción más altos.

En paralelo, el problema de la acumulación de neumáticos afecta a todo el mundo, convirtiéndose en un foco de contaminación y enfermedades; su degradación puede tardar más de 500 años, lo cual contribuye a la contaminación del suelo y al estancamiento del agua contenida en ellos que, a su vez, atrae insectos y por consecuencia, enfermedades (Organización Mundial de la Salud, 2013). De esta manera, ante la necesidad de reutilizar un residuo empleando el reciclaje como herramienta de aprovechamiento de los recursos, frente a otras opciones como la incineración que son más dañinas desde un punto de vista medioambiental, surge la idea de utilizarlo como modificador de ligantes asfálticos, obteniendo resultados muy favorables.

Estudios a lo largo de la historia han demostrado que el uso de polvo de caucho reciclado permite mejorar las propiedades reológicas de ligantes asfálticos y, por lo tanto, elevar el desempeño del pavimento (Mandal T. & Bahia H., 2015). Esta mejora en sus propiedades se debe a que el caucho presente en los neumáticos, tanto el de origen natural como el sintético, se componen en más del 50% de polímeros elastoméricos (Witoszek B., Hernández F., Benito C., & Alonso M., 2004), confiriendo propiedades elásticas al ligante asfáltico.

La experiencia en el uso de este tipo de modificador demuestra que permite mejorar las propiedades del ligante asfáltico al reducir la susceptibilidad térmica (Lee S.-J. et al. 2007), y al aumentar la resistencia a sus principales deterioros, como lo son: el ahuellamiento, agrietamiento térmico y agrietamiento por fatiga (Dantas S. et al. 2003). Además, estudios adicionales afirman que el uso de polvo de caucho podría conllevar a una reducción de los niveles de ruido, bajar costos de mantenimiento y aumentar la resistencia al ahuellamiento (Huang B. et al. 2002). Por consiguiente, ha sido de gran interés estudiar el potencial que tiene el ligante asfáltico para recuperarse elásticamente en condiciones de envejecimiento, con el fin de evaluar su capacidad de absorber esfuerzos sin presentar fisuras, y también, deformarse elásticamente para evitar deformaciones plásticas, luego de un proceso de envejecimiento relacionado con la durabilidad (Elizondo F., Salazar J. & Villegas E., 2010).

Cabe destacar que, reutilizar el N.F.U. resulta beneficioso desde el punto de vista ecológico, pero se debe tener especial cuidado con que el intento de aprovechar un residuo no implique la generación en exceso de otros residuos como el CO₂ o el abuso de recursos energéticos. Por otro lado, un exceso de polvo de caucho reciclado en un ligante asfáltico puede generar un aumento significativo de la viscosidad, lo cual implica un alza importante en las temperaturas de fabricación y compactación de la mezcla asfáltica, las que podrían sobrepasar los 200°C y además generar inconvenientes en su manipulación y colocación, implicando un mayor consumo de combustible, riesgos por emisión de gases tóxicos, entre otros problemas asociados (Potti J., 2004).

2.10.1 Vías de incorporación

La incorporación del polvo de caucho como modificador de una mezcla asfáltica se puede realizar de dos maneras: por vía húmeda o vía seca.

2.10.1.1 Vía húmeda

La incorporación por vía húmeda consiste en la mezcla previa del polvo de caucho con el betún para su posterior empleo como ligante en la mezcla asfáltica. Cuando el polvo de caucho se incorpora a un ligante asfáltico a elevada temperatura, las partículas de caucho se reblandecen, absorben los componentes más ligeros del ligante y se hinchan, con lo que disminuye la distancia entre partículas y el ligante se vuelve más viscoso. Este fenómeno de hinchamiento se suele denominar digestión o maduración.

El proceso se controla mediante la medida de la viscosidad del ligante; un ligante con el 15% de polvo de caucho puede aumentar su viscosidad en un factor de 10 o más. Las características del producto resultante de la mezcla del ligante base con el polvo de caucho dependen de las de ambos componentes, del tamaño de las partículas de caucho, del tiempo y temperatura de mezclado, así como también, del contenido aromático del asfalto (Heitzman M., 1992). Las temperaturas elevadas, los largos tiempos de mezclado y las partículas más pequeñas de caucho producen interacciones más rápidas (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).

Existen dos opciones para incorporar el polvo de caucho al ligante asfáltico por vía húmeda:

- La primera opción consiste en fabricar el asfalto modificado con caucho “in situ”, es decir, en el mismo lugar donde se sitúa la planta asfáltica, de manera que no existe en la práctica un almacenaje y transporte del producto. Cabe destacar que, la mezcla de ligante con polvo de caucho es inestable y necesita estar en continua agitación para que el caucho no se separe, por lo que esta opción resulta muy conveniente dado que el ligante se añade a la mezcla inmediatamente después de su fabricación sin dar tiempo a que se segregue (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).

En este tipo de proceso productivo se utiliza un mezclador con tanque de digestión, como el que se aprecia en la *Figura 30*, el cual toma el betún puro de los tanques de almacenamiento, lo mezcla con el caucho y lo dispensa a demanda de la central de mezclas gracias a una bomba manejada desde el cuadro de control de la central (Bermejo J., Gallego J. & Saiz L., 2014). La *Figura 31* esquematiza el proceso descrito anteriormente.

- La segunda opción consiste en realizar la mezcla en las centrales de fabricación de asfaltos modificados convencionales; en cuyo caso, se debe contar con los medios para estabilizar el asfalto modificado de forma que se pueda trasladar a obra y almacenar sin que se segregue. Para conseguir la estabilidad al almacenamiento, y también para poder trasegar y bombear los ligantes, el contenido de caucho debe ser menor que en los ligantes fabricados “in situ”. De esta manera, si el contenido de polvo de caucho supera el 15%, se recomienda que la fabricación del asfalto modificado se lleve a cabo “in situ” (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).



Figura 30: Unidad de fabricación con mezclador y tanque digestor, Bermejo J. et al. 2014.

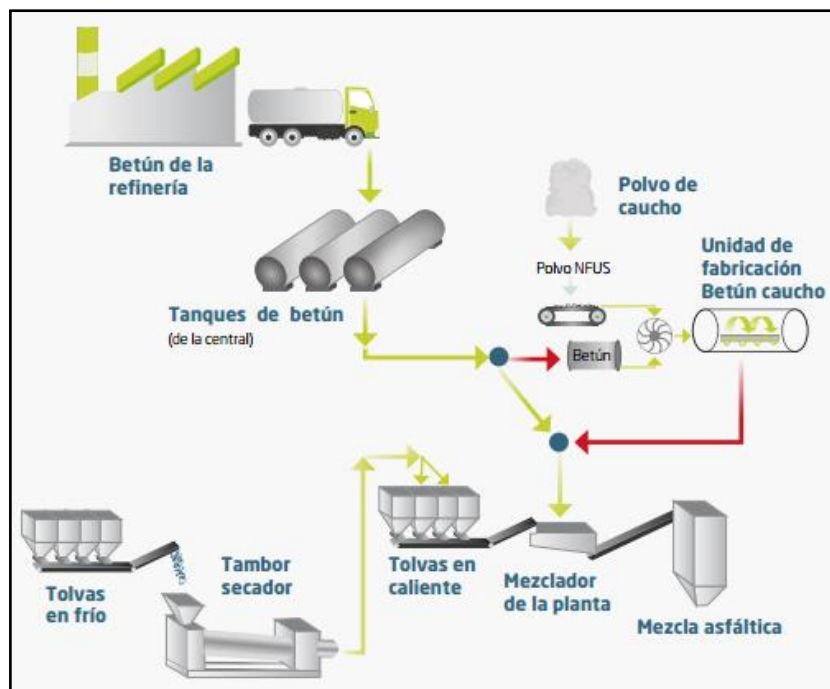


Figura 31: Esquema de la incorporación de caucho por vía húmeda "in situ" para la fabricación de mezclas asfálticas, Bermejo J. et al. 2014.

2.10.1.2 Vía seca

La incorporación por vía seca consiste en tratar el polvo de caucho como un árido e introducirlo directamente en el mezclador de la central de fabricación de mezclas asfálticas, junto con el ligante asfáltico y los áridos, como se ilustra en la Figura 32. El polvo de caucho actúa en parte como árido, pero las partículas más finas interaccionan con el ligante modificando sus propiedades, y consiguiendo así, mejorar el desempeño de la mezcla asfáltica.

En el proceso por vía seca pueden diferenciarse dos técnicas, según el tamaño máximo del polvo de caucho:

- La primera utiliza tamaños máximos elevados, de hasta 2 [mm]. Como la superficie específica de las partículas de caucho es reducida y el período de interacción es limitado, no hay tiempo suficiente para que la maduración se desarrolle en la totalidad de las partículas más gruesas del polvo de caucho. Por tanto, el polvo de caucho funciona como un sistema de dos componentes en el que las partículas más finas (principalmente las que pasan por el tamiz 0.5 [mm]) interactúan con el ligante a elevada temperatura y modifican su reología mediante un proceso similar al de la vía húmeda. Mientras que, las partículas gruesas se comportan como un árido elastomérico dentro del esqueleto mineral de la mezcla asfáltica, aunque superficialmente, también reaccionan con el ligante y se crea una interfase betún/caucho que cohesiona ambos materiales.
- La segunda técnica utiliza polvo de caucho de menor tamaño (todo pasa por el tamiz 0.5 [mm]) y en menor proporción. El polvo de caucho más fino actúa como un modificador del ligante añadido al mezclador. Se trata de un sistema que se puede considerar como intermedio entre la vía seca descrita anteriormente y la vía húmeda, siendo menos crítico que la primera técnica reseñada (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).

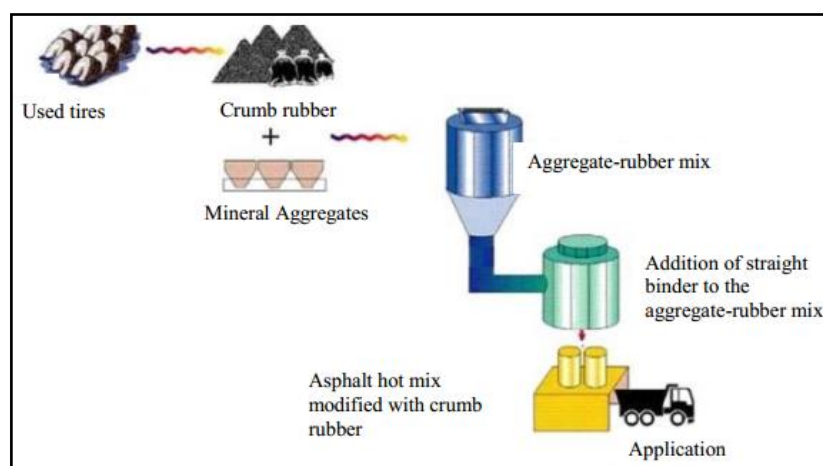


Figura 32: Esquema de la incorporación de caucho por vía seca para la fabricación de mezclas asfálticas, Dantas S. et al. 2006.

2.10.2 Proceso de digestión

La interacción a alta temperatura del ligante con las partículas de caucho, por un lado, se presenta como una reacción química que consiste en la degradación de las cadenas elastoméricas por efecto térmico, y por otro, un proceso de desvulcanización del caucho donde se produce la destrucción de enlaces azufre-azufre propio de la vulcanización, puesta de manifiesto por una disminución de azufre en la superficie de las partículas de caucho. Sin embargo, la interacción es principalmente un fenómeno físico, conocido como “digestión”, cuyo mecanismo principal consiste en el hinchamiento del caucho al captar las fracciones más ligeras, o aromáticas, del ligante asfáltico.

La Figura 33 muestra lo que ocurre en el proceso de digestión, donde alrededor de la partícula de caucho se va formando un “gel” o “capa blanda” que va desprendiéndose por el efecto de la agitación a la vez que se integra en el ligante. Llevando el fenómeno al extremo, si la

temperatura o la energía de agitación se prolongaran, la partícula de caucho llegaría a desaparecer en el ligante (Bermejo J. et al. 2014).

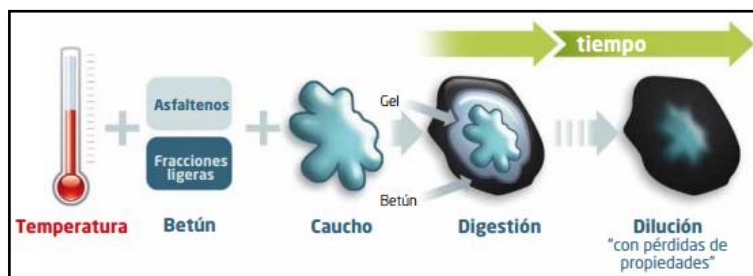


Figura 33: Evolución de la interacción betún-caucho, Bermejo J. et al. 2014.

De esta manera, una adecuada combinación de la temperatura de digestión asegura la integración del caucho en el ligante mejorando sus propiedades, mientras que cuando se prolonga en exceso, la mejora conseguida se reduce por la dilución del caucho en el betún, tal como se muestra en la Figura 34.

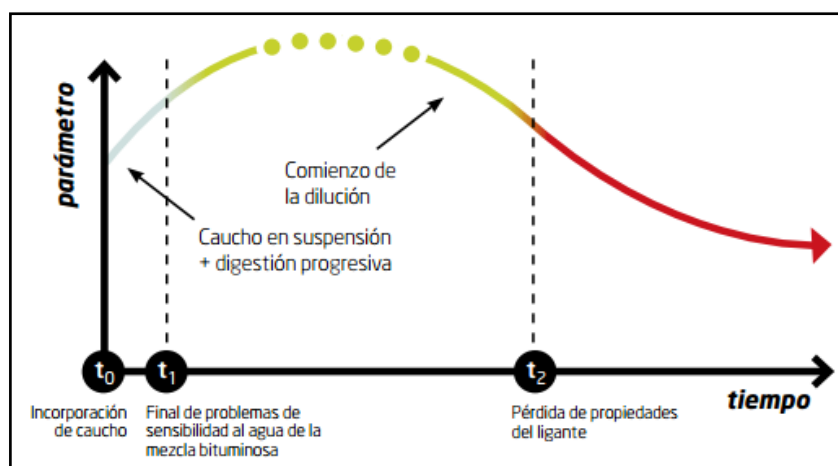


Figura 34: Evolución de propiedades modificadas, Bermejo J. et al. 2014.

Cabe destacar que, el proceso de digestión ocurre tanto para el caso de la incorporación por vía húmeda como para el caso de la incorporación por vía seca. Cuando el polvo de caucho se incorpora por vía húmeda, el hinchamiento de las partículas de caucho disminuye la distancia entre ellas y el ligante se vuelve más viscoso, por lo que el parámetro utilizado para controlar el proceso de digestión en este caso es la viscosidad, la cual debe chequearse durante la modificación del ligante. Sin embargo, cuando el polvo de caucho se incorpora por vía seca se produce una mezcla modificada en lugar de un ligante modificado, y el proceso de digestión se desarrolla sólo de forma superficial dado que la interacción del polvo de caucho con el ligante es limitada y por poco tiempo, razón por la cual, resulta fundamental tener especial cuidado que el tiempo y temperatura de mezclado sean adecuados para el que el proceso de digestión se complete, sobre todo teniendo en cuenta que en este caso no es posible controlar la viscosidad (Dantas S., Farias M., Pais J. & Pereira P., 2006).

En resumen, el proceso de digestión se ve favorecido a medida que aumenta la temperatura, aumenta el tiempo de mezclado, disminuye el tamaño máximo de las partículas de caucho, aumenta el contenido de aromáticos del betún y aumenta la energía de mezclado (Bermejo J. et al. 2014).

2.10.3 Evolución histórica

El uso de asfalto modificado con polvo de caucho (AMC) en mezclas asfálticas en caliente comienza aproximadamente en el año 1840, cuando surge la idea de utilizar el caucho natural como modificador del ligante, con el objetivo de mejorar el comportamiento mecánico de la mezcla (Huang B. et al. 2002). La idea toma fuerza cuando la Compañía de Reciclaje de Caucho en Estados Unidos comienza a comercializar un producto de caucho reciclado devulcanizado llamado “Ramflex” como un aditivo de partículas secas para mezclas asfálticas (Mandal T. & Bahia H., 2015).

En la década de los 60, el ingeniero Charles McDonald comienza a estudiar la incorporación del polvo de caucho al ligante convencional, denominándolo “Overflex”; el método de producción de este asfalto modificado fue patentado y es conocido como proceso McDonald o vía húmeda (Mandal T. & Bahia H., 2015). En 1964, el Departamento de Transporte de Arizona ADOT (Arizona Department Of Transportation) comienza a utilizar AMC en servicios de mantenimiento de pavimentos asfálticos (Dantas S. et al. 2003). Luego, en 1968 incorpora la primera membrana SAM (Stress Absorbing Membrane) como tratamiento superficial utilizando asfalto modificado con caucho. Hacia finales de los 60, la idea original de la vía seca es desarrollada por dos compañías suecas (Skega AB y AB Vaefgoerbaetringar) y el producto se comercializa bajo el nombre de “Rubit” (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).

En Europa durante los años 70, comienzan las pruebas de asfalto modificado con caucho de alta viscosidad en mezclas drenantes, especialmente en Bélgica y Francia, pero la falta de plantas de trituración y el desarrollo de asfaltos modificados con polímeros, como SBS y EVA, limitaron su empleo (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007). En 1972, ADOT incorpora la primera membrana SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer) con el objetivo de reducir el agrietamiento en los pavimentos asfálticos (Dantas S. et al. 2003). Años más tarde, en 1978 la tecnología sueca (vía seca) fue patentada para su uso en los Estados Unidos con el nombre comercial de “PlusRide” (Heitzman M., 1992).

No fue hasta finales de la década de los 80 que el uso del polvo de caucho en mezclas asfálticas en caliente se hizo popular, comenzando a utilizarse en Arizona y California, así como también en Sudáfrica. En cuanto a la incorporación por vía seca, en 1986 Takallou desarrolló un sistema alternativo al PlusRide (TAK genérico), empleando un tamaño más pequeño de las partículas (inferior a 1 [mm]) y una dotación aproximada del 2% (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).

En 1994, el Departamento de Transporte y Desarrollo de Louisiana LADOTD (Louisiana Department of Transportation and Development) inició un proyecto de investigación evaluando diferentes procedimientos para la incorporación del polvo de caucho, en el que el desempeño del pavimento con AMC se comparó con el de las canchas de prueba con mezclas asfálticas convencionales (Huang B. et al. 2002). Por otra parte, en España, específicamente en Cataluña, a principios de la década de los 90 se inicia la utilización de polvo de caucho por vía seca; las primeras experiencias se basaron en la tecnología genérica de Takallou, adaptadas a la práctica española. En el año 1996, se realizaron varios tramos de prueba por vía seca en Sevilla y Madrid con comportamiento dispar, en los que también se extendieron mezclas fabricadas por vía húmeda; el principal problema de estas aplicaciones fue la falta de tiempo suficiente para que se produjese la interacción del ligante con el polvo de caucho (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).

En el año 2000 comienza el estudio del polvo de caucho como modificador de ligantes asfálticos en Sudamérica, específicamente Brasil, México y Colombia dispusieron tramos de prueba

incorporando el caucho por vía húmeda en el caso de Brasil y por vía seca en todos los casos. El año 2002, Argentina se suma realizando canchas de prueba en una de las avenidas más importantes de la ciudad de Buenos Aires, arrojando muy buenos resultados considerando el alto nivel de tráfico al que estaba sometida (Ramírez N., 2006).

En Chile, existen tramos experimentales por vía húmeda entre los que destacan dos; el año 2004 se llevó a cabo el primero de ellos en la Región de Aysén en la ruta X-65, y el segundo, fue realizado el año 2005 en la provincia de Los Andes en la ruta 60 CH.

Hasta la fecha, han sido numerosas las investigaciones enfocadas al estudio de ligantes asfálticos modificados con polvo de caucho, en ellas, se ha evaluado el proceso de modificación, la viabilidad de su aplicación y las ventajas y desventajas asociadas, quedando demostrado que su utilización implica una evidente mejora en las propiedades reológicas del ligante y en el desempeño del pavimento obtenido. Las Figuras 35 y 36 presentan un resumen de la evolución histórica detallada anteriormente.

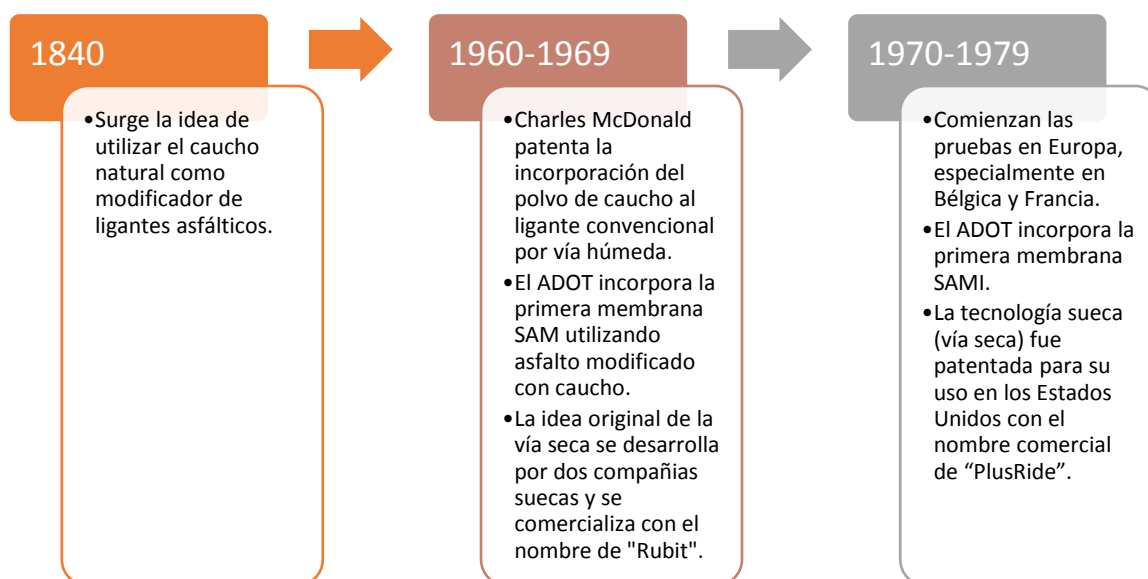


Figura 35: Evolución histórica del uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas, Elaboración propia.

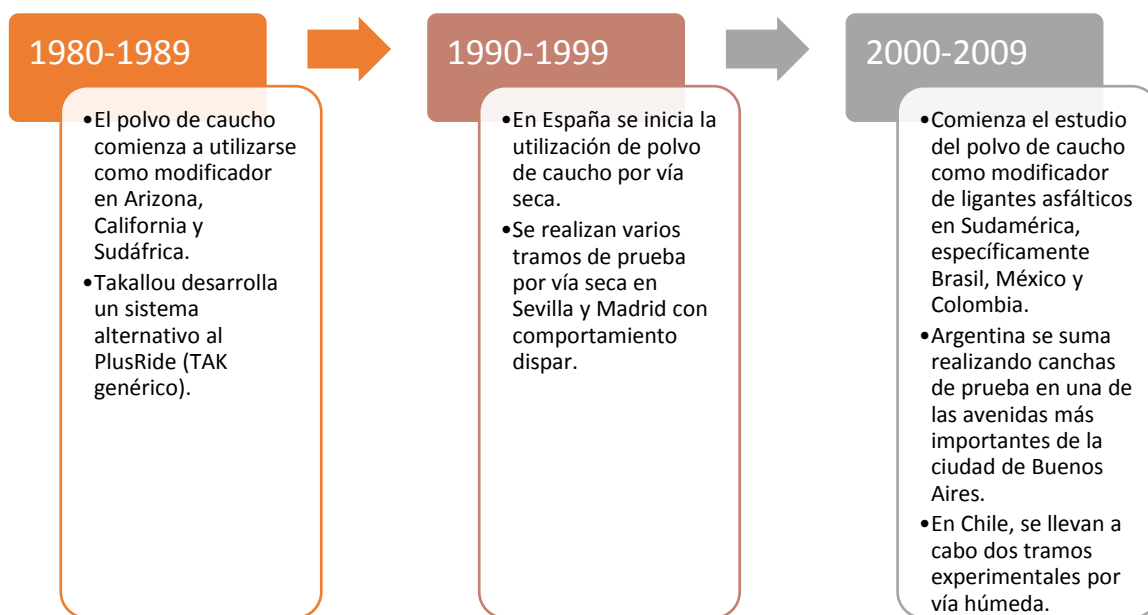


Figura 36: Evolución histórica del uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas, Elaboración propia.

2.10.4 Estudios relevantes

2.10.4.1 Experiencia en Suecia

En 2006, la Administración de Transporte de Suecia comenzó un proyecto para evaluar los pavimentos que utilizan AMC bajo las condiciones suecas, basándose en la experiencia de Arizona, donde la técnica de modificación con polvo de caucho es una técnica consolidada.

En 2007, el asfalto modificado con polvo de caucho se dispuso en tramos de prueba en diferentes carreteras de Suecia, comparando su desempeño con el de mezclas asfálticas convencionales. El objetivo de estos estudios es prevenir los fenómenos de agrietamiento, dado que la experiencia estadounidense ha demostrado que la carpeta asfáltica modificada con polvo de caucho puede absorber y distribuir uniformemente los esfuerzos a los que es sometida.

En cuanto al proceso de modificación, el método utilizado actualmente en Suecia es la incorporación por vía húmeda; la proporción del polvo de caucho en el ligante es de aproximadamente 17 a 20%, mientras que este ligante modificado representa un 8% de la mezcla asfáltica resultante. El proceso de mezclado se llevó a cabo a una temperatura de al menos 175 ° C y durante al menos 30 minutos; el polvo de caucho utilizado posee un tamaño de partículas que fluctúa entre los 0 y 2 [mm], su contenido de acero u otras impurezas es inferior al 0,01% y su contenido de fibra textil es inferior al 0,5% (Viman L., Nordgren T. & Wendel M., 2012).

De los estudios realizados en Suecia, el asfalto modificado con caucho ha mostrado una mejora en las propiedades de la mezcla asfáltica, aumentando su resistencia al envejecimiento y al agrietamiento por fatiga. Los resultados hasta ahora han demostrado que los pavimentos que utilizan AMC cumplen con los requisitos actuales en términos de estabilidad, flexibilidad, fatiga y durabilidad, y tienen propiedades algo mejores en términos de agrietamiento y resistencia al envejecimiento (Fornai D., Sangiorgi C., Mazzotta F., Bermejo J. M. & Saiz L., 2016).

2.10.4.2 Experiencia en Portugal

El primer trabajo con AMC en Portugal se realizó en agosto de 1999 y consistió en la rehabilitación de las carreteras EN 104 y EN 105, con una longitud total de 22 km. Para este trabajo se utilizaron 1700 toneladas de asfalto modificado con un alto porcentaje de caucho (18%) incorporado por vía húmeda.

De los estudios de laboratorio, se comprobó que la mezcla con AMC logra una mejor resistencia a la fatiga en comparación a la mezcla convencional; además, seis años después la resistencia a la fatiga de la mezcla con AMC se mantuvo cercana a los valores iniciales. Más tarde, se utilizó AMC en la construcción de diferentes carreteras y autopistas de Portugal, correspondientes a 700 km de longitud y 54000 toneladas de asfalto modificado con polvo de caucho. Desde la primera aplicación de mezclas asfálticas con AMC en Portugal, se han llevado a cabo varios estudios de investigación para evaluar su desempeño; también se ha abordado el efecto del procedimiento de fabricación del AMC y de las características de sus componentes (ligante y caucho) sobre las propiedades de la mezcla (Fornai D. et al. 2016).

En particular, en el estudio "Asphalt Rubber Mixtures in Portugal: Practical Application and Performance", los autores estudiaron el desempeño de muestras de AMC elaboradas por vía húmeda, "in situ" y en laboratorio; los resultados indican que se permiten niveles de deformación significativamente más altos, para un número dado de ciclos hasta la falla, en comparación a las mezclas asfálticas convencionales. Los autores consideraron que tanto las muestras de AMC en estado original como las envejecidas, mostraron un mejor desempeño que las mezclas asfálticas convencionales (Miranda H., Batista F., Neves J. Antunes M. & Fonseca P., 2006).

2.10.4.3 Experiencia en Alemania

En Alemania, se desarrolló un nuevo método de modificación con polvo de caucho con el objetivo de combinar las ventajas logísticas de la incorporación por vía seca con la calidad controlable de la incorporación por vía húmeda. Lo anterior, se logra mediante el tratamiento previo del polvo caucho con un agente que potencia su hinchamiento en condiciones controladas, a temperatura elevada y agregando un aditivo de cera que es líquido a la temperatura de tratamiento previo.

El agente hinchador consiste en una mezcla de fracciones de aceites minerales no aromáticos y aceites vegetales. La modificación del caucho se puede realizar mediante la adición directa a la planta de producción de la mezcla asfáltica y evita la logística exigente de la modificación por vía húmeda, en donde resulta indispensable esperar a que se complete el proceso de digestión; esto dado que el pretratamiento del polvo de caucho disminuye en gran medida los riesgos de una interacción insuficiente entre las partículas de caucho y el ligante asfáltico, y la calidad variable del AMC (Fornai D., Sangiorgi C., Mazzotta F., Bermejo J. M. & Saiz L., 2016).

Los resultados obtenidos comprueban que este nuevo método de modificación permite obtener propiedades del AMC que son comparables con las que presenta la modificación por vía húmeda. Además, implica ventajas en cuanto a la ventana de tiempo para el almacenamiento y su campo de aplicación se amplía significativamente.

Estudios realizados han confirmado que la combinación de este aditivo de cera disminuye la viscosidad del ligante, mejorando la manipulación y compactación de la mezcla asfáltica, además de disminuir las temperaturas de mezclado y colocación (Butz T., Muller J. & Riebeschl G., 2012).

2.10.4.4 Experiencia en Francia

En Francia, después de 10 años de experimentos aislados, se propuso el uso de mezclas de concreto asfáltico poroso (PAC) para resolver los problemas de hidroplaneo, proyección de agua, reducción de ruido y el efecto espejo en la noche. Los estudios realizados en el país han demostrado claramente las ventajas del AMC en mezclas porosas en términos de durabilidad, propiedades de drenaje constante, buen comportamiento ante el tráfico de camiones (resistencia al ahuellamiento y agrietamiento por fatiga), resistencia al esfuerzo de corte e insensibilidad al mal tiempo.

A lo largo de la historia se han creado diferentes productos enfocados a la reducción de ruido mediante mezclas PAC, tales como los llamados “Rugosoft” y “Nanosoft”. El primero de ellos combina una mayor resistencia al deslizamiento con una capacidad mejorada para absorber el ruido; por su parte, “Nanosoft” permite una mayor reducción del ruido, conservando excelentes propiedades antideslizantes, además de haber evaluado en su proceso la contribución de aditivos, como elastómeros específicos, caucho y otras variantes que mejoran la absorción de ondas de sonido (Fornai D. et al. 2016).

2.10.4.5 Experiencia en España

En España, el primer ligante asfáltico modificado con polvo de caucho de neumáticos fuera de uso a escala industrial se desarrolló en el año 1996; este ligante fue fabricado en central y se utilizó en tramos de prueba en Sevilla y Madrid. Posteriormente, la publicación del Plan de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006 impulsó nuevamente el empleo de polvo de caucho en la fabricación de mezclas asfálticas.

En 2002 se empezaron a utilizar dos equipos de fabricación “in situ” de asfalto modificado con caucho, uno de los cuales fabricaba ligantes del tipo BMAVC (Asfalto modificado con alto contenido de caucho). Con ellos se construyeron tramos en Cádiz, Madrid y Castellón. También se desarrolló un asfalto modificado con caucho estable que se utilizó en el tramo de Madrid. Ese mismo año se publicó la Orden Circular 5bis/02, en la que se prescribía la prioridad de empleo de los materiales procedentes del reciclaje de neumáticos en las mezclas asfálticas, siempre que su uso fuese técnica y económicamente viable. A partir del año 2004 se han construido numerosos tramos con mezclas asfálticas fabricadas con ligantes modificados con caucho (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2007).

SIGNUS Ecovalor, en colaboración con el departamento de Transporte de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid, realizaron una investigación destinada a definir los parámetros del proceso de producción de asfalto modificado con caucho que cumpla con los criterios especificados en la legislación española. Considerando ligantes españoles de referencia y distintos contenidos de caucho con una granulometría común en España, se llegó a la conclusión de que el proceso de modificación obtendrá buenos resultados si se realiza a una velocidad de mezclado de 4000 [rpm], a una temperatura de 185°C, durante un período de 60 minutos (Fornai D. et al. 2016).

2.10.4.6 Experiencia en Estados Unidos

Dado que Estados Unidos cuenta con una vasta experiencia en el tema y que existen numerosas investigaciones enfocadas al estudio de asfaltos modificados con polvo de caucho, se destaca una de las más recientes, la cual estudia el efecto del tamaño de las partículas de polvo de

caucho en las propiedades reológicas del ligante asfáltico, además de evaluar el efecto del ligante con tiempos de reacción “verde” y “reaccionado” para tres dosificaciones de caucho distintas (10%, 15% y 20%, en peso).

El proceso de modificación se llevó a cabo a una temperatura de 180°C y una velocidad de mezclado entre 4000 y 4500 [rpm]. En base a los resultados de este estudio, es posible afirmar que el tamaño de las partículas de caucho, su concentración y el tiempo de reacción, tienen gran influencia en la mejora de las propiedades reológicas de los ligantes modificados con polvo de caucho. En cuanto al tamaño de las partículas, se demostró que los ligantes modificados con caucho más grueso (0.595 [mm]) dan como resultado mejores propiedades reológicas en comparación a los ligantes modificados con caucho más fino (0.075 [mm]); en cuanto a la concentración de caucho, los ligantes modificados con 20% de caucho, independiente del tamaño de partículas, presentaron un mejor desempeño que los ligantes modificados con concentraciones de caucho más bajas; finalmente, en cuanto al tiempo de reacción, se comprobó que los ligantes verdes presentan un mejor desempeño en comparación a los ligantes reaccionados (Mandal T. & Bahia H., 2015).

Cabe destacar que, los detalles de esta investigación son presentados en extenso en el *Anexo 3: Experiencia en Estados Unidos. “Effect of Crumb Rubber on Rheological Properties of Asphalt Binder and Aggregate Packing of Asphalt Mixtures”* del presente documento.

2.10.4.7 Experiencia en Chile

Como se mencionó en la *Sección 2.10.3*, en Chile existen tramos experimentales de asfalto modificado con polvo de caucho incorporado por vía húmeda; el primero de ellos se llevó a cabo en la Región de Aysén en la ruta X-65 y el segundo, en la provincia de Los Andes, específicamente, en la ruta 60 CH.

2.10.4.7.1 Tramo Experimental Ruta X-65, km 22.279 - 22.770)

El tramo experimental emplazado en la Ruta X-65 de la Región de Aysén es el primer acercamiento que existe a la utilización de asfaltos modificados con caucho, y surge como una alternativa para reducir el agrietamiento térmico y deterioro que sufren los pavimentos asfálticos de la zona, debido a la variabilidad térmica a la que se ven sometidos con temperaturas que van desde los -20°C hasta los 25°C. Su ejecución estuvo a cargo de la Dirección Regional de Vialidad y abarca 500 metros de longitud; el ligante asfáltico utilizado fue un CA 60/80, mientras que la granulometría de polvo de caucho se presenta en la *Tabla 5*. En cuanto al proceso de modificación del ligante asfáltico, es importante destacar que, se utilizó un 18% de polvo de caucho, el cual fue incorporado por vía húmeda en terreno utilizando un estanque digestor junto a la planta asfáltica, provisto de un sistema de calefacción y agitación que permite mantener las condiciones de temperatura, tiempo y agitación necesarias para una correcta modificación (Ramírez N., 2006).

Tabla 5: Granulometría polvo de caucho tramo experimental Ruta X-65, Ramírez N. 2006.

TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA,
mm	ASTM	%
2.0	Nº 10	100
1.25	Nº 16	98
0,63	Nº 30	52
0,3	Nº 50	12
0,16	Nº 100	2
0,08	Nº 200	0.5

2.10.4.7.2 Tramo experimental ruta 60 CH, km 66.000 - 67.500)

El tramo experimental emplazado en la Ruta 60 CH de la Región de Valparaíso, específicamente en la provincia de Los Andes, corresponde a una rehabilitación del Camino Internacional a Mendoza, el cual se ve sometido a tránsito pesado y a una importante variación térmica con temperaturas que van desde los -4°C hasta los 30°C . De esta manera, la Dirección de Vialidad decide realizar un tramo de prueba utilizando asfalto-caucho sobre el hormigón existente como solución alternativa a la reflexión de grietas; el ligante asfáltico utilizado fue un CA 60/80 y la modificación con polvo de caucho se llevó a cabo en la planta asfaltera ubicada en Concón. Luego del proceso de modificación, el ligante fue transportado en camión durante dos horas hasta el lugar de emplazamiento del tramo de prueba, tras lo cual se observó un cambio en su viscosidad (Ramírez N., 2006).

2.10.5 Influencia del área superficial y tamaño de las partículas de caucho

Los ligantes asfálticos modificados con polvo de caucho han mostrado un mejor desempeño en comparación a los ligantes convencionales debido a la interacción entre ambos materiales. Esta interacción cambia las propiedades físicas y reológicas del ligante, lo que conduce a un aumento en la resistencia al ahuellamiento.

El proceso de interacción entre las partículas de caucho y el ligante es, en esencia, bastante complicado, dependiendo de las variables tanto del caucho como del ligante, tales como: tipo, dosificación, tamaño, grado, etc., además de las condiciones de mezclado como temperatura, velocidad y tiempo de mezcla. Se han realizado algunas investigaciones que identifican la influencia de estas variables individuales en la interacción, llegando a la conclusión de que el hinchamiento de las partículas de caucho debido a la absorción de las fracciones ligeras del ligante es el mecanismo principal de la interacción.

La capacidad de absorción/hinchamiento de una partícula de caucho está relacionada con la fuente, el grado de penetración del ligante y la naturaleza del polvo de caucho, siendo el área superficial y el tamaño de partículas, los dos aspectos más relevantes a considerar. Los resultados de las investigaciones realizadas indican lo siguiente:

1. Las partículas más finas se hinchan más rápido, desarrollando una modificación del ligante mayor que la que se logra con partículas de caucho más gruesas. Sin embargo, las partículas gruesas tienen un mayor potencial de hinchamiento en comparación a partículas más finas (Shen J., Amirkhania S., Xiao F. & Tang B., 2008).
2. El ángulo de fase aumenta con el incremento del área superficial y disminuye a medida que aumenta el diámetro promedio de las partículas de caucho. En otras palabras, partículas de caucho con mayor tamaño logran una mejora más importante en las propiedades elásticas del ligante asfáltico (Shen J. et al. 2008).
3. El módulo complejo G^* aumenta con el diámetro promedio de las partículas de caucho y disminuye a medida que aumenta el área superficial, es decir, partículas de caucho con mayor tamaño logran aumentar en mayor medida la resistencia al ahuellamiento (Shen J. et al. 2008).
4. El diámetro promedio de las partículas de caucho es un factor más influyente tanto para el ángulo de fase como para el módulo complejo, en comparación a la influencia del área superficial (Shen J. et al. 2008).

5. El aumento del tamaño de las partículas de caucho conduce a un aumento de la viscosidad y el porcentaje de recuperación; del mismo modo, puede esperarse una disminución del valor de Jnr (Singh D., Kumar P. & Jagadeesh A., 2018).
6. Se observó una mejora más evidente en la resistencia a la fatiga de ligantes asfálticos modificados con partículas de caucho de mayor tamaño (Singh D., Kumar P. & Jagadeesh A., 2018).
7. Las partículas de caucho más pequeñas pueden promover una mejor estabilidad de almacenamiento a alta temperatura en comparación a partículas de mayor tamaño; esto puede deberse a la mejor dispersión de las partículas más finas, lo que resulta en una mayor resistencia a la sedimentación (Singh D., Kumar P. & Jagadeesh A., 2018).

2.10.6 Estabilidad de almacenamiento

En la práctica, los ligantes asfálticos se almacenan a altas temperaturas para facilitar su manipulación durante el proceso de producción de la mezcla asfáltica. Teniendo en consideración que la mayoría de los asfaltos modificados tienden a separarse, resulta de vital importancia mantenerlo estable durante su tiempo de almacenamiento a altas temperaturas

La separación de fases en asfaltos modificados puede teorizarse según la ley de Stokes; este mecanismo depende de la velocidad terminal de la fase dispersa en el líquido newtoniano, correspondiente a la velocidad de desplazamiento de las partículas cuando la fuerza de gravedad es igual a la fuerza de arrastre. Según esta teoría, la velocidad terminal de las partículas es directamente proporcional con el cuadrado del radio de las partículas e inversamente proporcional con la viscosidad del medio.

Se puede considerar el mismo concepto sobre el asfalto modificado con caucho en el que hay partículas con distintos tamaños suspendidas en asfalto a altas temperaturas. Las partículas de caucho tienen una densidad relativamente más alta ($1.15 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$) que el asfalto (1.02 g/cm^3) y, en consecuencia, tienen la tendencia a descender debido a las fuerzas gravitacionales. Por su parte, el asfalto a altas temperaturas muestra un comportamiento de líquido newtoniano que opone resistencia al desplazamiento de las partículas de caucho. La manipulación de estas fuerzas permite reducir la velocidad terminal de las partículas de caucho y, en consecuencia, reducir su velocidad de sedimentación.

La estabilidad de almacenamiento del AMC se ha investigado en varios estudios que consideran diferentes parámetros, como el tamaño de las partículas de caucho, el tipo de asfalto y las condiciones de interacción. En base a estos resultados, se ha llegado a la conclusión de que la disminución del tamaño de las partículas de caucho, el aumento de la velocidad de mezclado o el aumento en el tiempo de interacción mejora la estabilidad de almacenamiento del asfalto modificado con polvo de caucho (Navarro F. J., Partal P., Martínez-Boza F. & Gallegos C., 2004) (Navarro F. J., Partal P., Martínez-Boza F. & Gallegos C., 2005) (Attia M. & Abdelrahman M., 2009). Los asfaltos compatibles con el agente modificador también han mostrado una mejor estabilidad de almacenamiento.

Asimismo, se estudió la posibilidad de mejorar la estabilidad de almacenamiento del AMC sólo mediante el control de la disolución de las partículas de caucho, regulando los parámetros de interacción (temperatura, velocidad de mezclado y tiempo) y la concentración de caucho (Ghavibazoo A., Abdelrahman M. & Ragab M., 2013). El análisis de los resultados indica que a una

temperatura de interacción intermedia (190°C), la disolución del caucho en el ligante asfáltico puede mejorar la estabilidad de almacenamiento de las muestras de AMC, teniendo como resultado un aumento de la viscosidad de la fase líquida del AMC y una disminución del tamaño de las partículas de caucho que, según la ley de Stokes, son los dos parámetros principales que definen la velocidad de sedimentación de las partículas en cualquier medio; bajo esta condición de interacción, el aumento de la concentración de caucho conduce a una mejora de la estabilidad de almacenamiento de las muestras, la que también puede atribuirse al aumento de la viscosidad de la fase líquida del AMC y su efecto sobre la velocidad de sedimentación de las partículas de caucho.

A una temperatura de interacción más alta (220°C), en cambio, ocurre una disolución significativa de las partículas de caucho. Las partículas restantes no siguen la misma tendencia debido a que están compuestas principalmente de negro de humo, que tiene una densidad mucho mayor (1.8 a 2.1 [g/cm³]) en comparación con la densidad del asfalto (1.02 [g/cm³]) y el caucho (1,15 ± 0,05 [g/cm³]); por lo tanto, la alta densidad de las partículas afecta su velocidad de sedimentación, la que ocurre independientemente de la viscosidad de la fase líquida del AMC. En esta etapa, las partículas de caucho restantes tienen un efecto modificador menor en la matriz de AMC total y, por lo tanto, muestran una mayor estabilidad de almacenamiento, la cual se degrada al aumentar la concentración de caucho en el ligante.

2.11 INTERACCIÓN ABLANDADOR — POLVO DE CAUCHO

Las investigaciones destinadas a evaluar la interacción existente entre aceites ablandadores y el polvo de caucho como modificadores de ligantes asfálticos, son casi nulas. Recientemente, el año 2018, fue publicada la investigación titulada “Evaluation of the effect of bio-oil on the high-temperature performance of rubber modified asphalt” (Lei Y., Wang H., Fini E., You Z., Yang X., Gao J, Dong S. & Jiang G., 2018), donde se analiza el efecto del bio-aceite en un ligante asfáltico previamente modificado con polvo de caucho reciclado. Los resultados sugieren que la adición de bio-aceite puede mejorar el desempeño a alta temperatura del asfalto modificado con polvo de caucho, no obstante, no se tienen antecedentes del efecto que se tiene en el desempeño a bajas temperaturas.

Sobre la base de los resultados de viscosidad, el barrido de temperatura y el ensayo MSCR, las principales conclusiones de este estudio se resumen a continuación:

1. El efecto del contenido de bio-aceite en la viscosidad del asfalto modificado con caucho puede estar asociado con la temperatura de ensayo y el tamaño de las partículas de caucho. Con la adición de bio-aceite en el asfalto-caucho, las viscosidades aumentaron en primera instancia y luego disminuyeron.
2. El bio-aceite puede mejorar el desempeño a altas temperaturas del asfalto modificado con caucho debido a la interacción física y química en el asfalto caliente. El tamaño de las partículas de caucho también afectó el desempeño, dado que la interacción entre las partículas de caucho más grandes y el bio-aceite mejoró las propiedades elásticas del asfalto modificado.
3. Aunque el bio-aceite puede aumentar las características viscosas del asfalto-caucho, el efecto también se relacionó con el tamaño de las partículas de caucho. La interacción entre el bio-aceite y el caucho más fino fue beneficiosa para aumentar el módulo de pérdida del asfalto y mejorar aún más su resistencia a la fatiga.

4. El proceso de envejecimiento primario puede promover un mayor hinchamiento de las partículas de caucho, aumentar el grado de mezcla entre el caucho y el bio-aceite, y mejorar la propiedad elástica del asfalto modificado con caucho.
5. En este estudio, no se observaron efectos adversos, a partir de la adición de bio-aceite, en el desempeño a alta temperatura del asfalto modificado con caucho.

Cabe destacar que, el *Anexo 4: Interacción Ablandador – Polvo de Caucho. “Evaluation of the Effect of bio-oil on the High-temperature Performance of Rubber Modified Asphalt”*. del presente documento, contiene un resumen más detallado de esta investigación especificando los materiales, el proceso de modificación y los ensayos considerados en este estudio, así como también, sus resultados y principales conclusiones.

2.12 ESPECIFICACIONES ASFALTOS MODIFICADOS

2.12.1 Cementos asfálticos modificados con polímeros

El Manual de Carreteras establece que, cuando se utilicen cementos asfálticos modificados con polímero, se debe cumplir con los requisitos establecidos en la *Tabla 6*.

Tabla 6: Especificaciones para cementos asfálticos modificados con polímeros, Manual de Carreteras Vol. 8, 2018.

ENSAYE	ESPECIFICACION		METODO
	CA 60-80	CA 80-100	
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	60 – 80	80 - 100	8.302.3
Punto de Ablandamiento, °C	Min. 60	Min. 60	8.302.16
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Min. 80	Min. 80	8.302.8
Ductilidad, 5°C, 5 cm/min, cm	Min. 50	Min. 50	8.302.8
Recuperación Elástica, 13 °C, 20cm, 1h, %	Min. 50	Min. 50	8.302.19
Índice de Penetración	Min. +2	Min. +2	8.302.21
Punto de Quiebre Fraass, °C	Máx. -17	Máx. -17	8.302.17
Punto de Inflamación, °C	Min. 235	Min. 235	8.302.9

2.12.2 Mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho

2.12.2.1 Requisitos del caucho triturado

El Manual de Carreteras establece especificaciones sobre mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho mediante el método de vía seca. Con respecto al polvo de caucho triturado, se debe cumplir con las exigencias de la Norma NCH 3258-12, Mezcla asfáltica – Polvo de caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso – Requisitos. Además, su granulometría debe estar comprendida dentro de alguna de las bandas de la *Tabla 7*.

.Cabe destacar que, el polvo de caucho a utilizar debe tener un contenido mínimo de 30% de caucho natural y una densidad relativa comprendida entre 1100 y 1250 [Kg/m³] (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2017).

Tabla 7: Bandas granulométricas polvo de caucho, Manual de Carreteras Vol. 5, 2018.

Tamiz	P - 1	P - 2	P - 3
mm	% que pasa		
2,3	100	-	-
1,25	60 - 100	100	-
0,63	30 - 80	40 - 100	100
0,315	15 - 60	10 - 70	30 - 60
0,16	0 - 40	2 - 40	0 - 30
0,08	0 - 20	0 - 20	0 - 18

2.12.2.2 Requisitos de preparación del asfalto-caucho

Se recomienda utilizar entre un 14% y 20% de caucho en masa con respecto a la mezcla total, a una temperatura de reacción de 180°C a 210°C, durante un tiempo de reacción (digestión) entre 1 y 4 horas.

2.12.2.3 Características del estanque mezclador

El estanque debe tener un sistema de calentamiento que permita mantener temperaturas entre 180°C y 210°C, y agitadores para mantener en permanente agitación la mezcla asfalto-caucho durante el período de “digestión” y el lapso adicional según sea necesario, de acuerdo con el funcionamiento integral de la planta.

2.12.2.4 Requisitos del ligante modificado con caucho

Los requisitos establecidos para el ligante asfáltico modificado con polvo de caucho dependen de las características del clima y se clasifican según los rangos de temperatura que se muestran en la *Tabla 8*.

Tabla 8: Tipo de clima según rango de temperatura, Laboratorio Nacional de Vialidad, 2017.

	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Temperatura Ambiente Máxima (Promedio Mensual)	43°C	43°C	27°C
Temperatura Ambiente Mínima (Promedio Mensual)	-1°C	-9°C	-9°C

De esta manera, la *Tabla 9* presenta los requisitos a cumplir para cada tipo de clima.

Tabla 9: Especificaciones para ligante asfalto-caucho por proceso húmeda, Laboratorio Nacional de Vialidad, 2017.

Ensayes	Especificación					
	Tipo I		Tipo II		Tipo III	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Viscosidad Brookfield, 175°C, Poises	1500	5000	1500	5000	15000	5000
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm	25	75	25	75	50	100
Penetración, 4°C, 200 g, 60 s, 0.1 mm	10		15		25	
Resiliencia, 25°C, %	25		20		10	
Punto de Ablandamiento, °C	57.2		54.4		51.7	
Punto de Inflamación, °C	232.2		232.2		232.2	
Ensaye después de acondicionamiento en Horno de Película Delgada						
Penetración Retenida, 4°C, %	75		75		75	

2.13 ESPECIFICACIÓN SUPERPAVE

Como se mencionó en la *Sección 0*, en la especificación Superpave, los ligantes son caracterizados de acuerdo con el desempeño esperado ante deterioros como el ahuellamiento, fatiga y agrietamiento térmico. En base a lo anterior, los grados del ligante se definen por PG XX-YY, donde XX e YY corresponden a las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente, a las que el ligante poseería propiedades físicas adecuadas para presentar un buen desempeño.

Además, Superpave establece que para niveles de tráfico más altos y/o velocidades de circulación más bajas, es necesario aumentar el grado de desempeño de alta temperatura. En AASHTO M 323, "Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design", se proporciona la *Tabla 10* como guía para la selección del grado PG de alta temperatura requerido.

En cuanto a la velocidad de circulación, la categoría "Standing" corresponde a una velocidad de circulación inferior a 20 [km/h], la categoría "Slow" corresponde a una velocidad de circulación entre 20 [km/h] y 70 [km/h] y, finalmente, la categoría "Standard" corresponde a una velocidad de circulación superior a 70 [km/h].

Tabla 10: Selección de grado PG de alta temperatura según velocidad y nivel de tráfico, AASHTO M323-12.

Design ESALs ^b (Million)	Adjustment to the High-Temperature Grade of the Binder ^a		
	Traffic Load Rate		
	Standing ^c	Slow ^d	Standard ^e
<0.3	— ^f	—	—
0.3 to <3	2	1	—
3 to <10	2	1	—
10 to <30	2	1	— ^f
≥30	2	1	1

De esta manera, cuando el volumen de tráfico de diseño excede los 10 millones de ESAL (Equivalent Simple Axial Load), Superpave sugiere que se considere un aumento en el grado PG de alta temperatura; mientras que cuando el volumen de tráfico de diseño supera los 30 millones de ESAL, el aumento de un grado ya no es opcional, sino que es necesario para cumplir con las especificaciones. Con respecto a la velocidad de circulación, Superpave recomienda aumentar el grado de alta de temperatura en un grado cuando se tiene una categoría "Slow" y en dos grados si se tiene una categoría "Standing". A modo de ejemplo, para una autopista en un clima PG 64, si el nivel de tráfico fuera superior a 30 millones de ESAL, se aumentaría el grado requerido a un PG 70; por otra parte, en plazas de peaje o en áreas urbanas donde el tráfico se mueve lentamente, se esperaría aumentar el grado PG requerido a un PG 76.

Debe tenerse en cuenta que cuando el grado de alta temperatura aumente en un grado, la rigidez del ligante va a ser de aproximadamente el doble, es decir, un ligante con grado PG 70, a una temperatura de 64°C, tendrá una rigidez dos veces mayor que un ligante PG 64; a su vez, un ligante PG 76 será cuatro veces más rígido que un ligante PG 64 a una temperatura de 64°C. La velocidad de circulación también tendrá un efecto en la rigidez del ligante asfáltico dado que, a 50[km/h] un ligante tendrá una rigidez aparente más baja que cuando está sometido a una velocidad de circulación de 100 [km/h], es decir, un pavimento que contiene un ligante PG 70 y está sometido a una velocidad de circulación de 50 [km/h], tendrá aproximadamente la misma rigidez que uno que contiene un ligante PG 64 y está sometido a una velocidad de circulación de 100 [km/h] (Federal Highway Administration, 2001).

2.14 ESPECIFICACIÓN MEDIANTE ENSAYO MULTIPLE STRESS CREEP AND RECOVERY

La metodología Superpave, es la especificación de ligantes asfálticos más utilizada en Estados Unidos, y su desarrollo está basado principalmente en el estudio de ligantes asfálticos tradicionales no modificados. No obstante, la constante búsqueda para obtener mejores estándares de calidad y, por ende, mejores índices de desempeño ante el importante aumento en las solicitudes de tránsito hacen necesaria la utilización de agentes modificadores en el ligante asfáltico. En base a esto, la aplicabilidad de la norma AASHTO M320-16 a ligantes asfálticos modificados ha sido cuestionada por la industria, bajo el argumento de que los ensayos Superpave Plus (a.k.a SHRP+), en la mayoría de los casos, no se relacionan con el desempeño, sino que sólo indican la presencia de un modificador en particular. De esta manera, este acápite se centra en explicar y validar el uso de la nueva especificación mediante el ensayo MSCR incorporada recientemente en el Manual de Carreteras

Ante el desafío de desarrollar un ensayo para determinar el grado de desempeño de ligantes asfálticos, que se base tanto en el desempeño como en el tipo de modificación, la Federal Highway Administration propuso el ensayo “Multiple Stress Creep and Recovery” (MSCR) como reemplazo a la especificación existente. Además, los resultados del MSCR también pueden ser utilizados como una alternativa a varios de los ensayos SHRP+, dado que permite caracterizar propiedades fundamentales de una manera más sencilla.

Tal como se mencionó en la *Sección 2.2.6.1*, el ensayo MSCR utiliza el reómetro de corte dinámico (DSR), el cual ha sido ampliamente aceptado por las agencias carreteras para su uso en la determinación de las propiedades reológicas de ligantes. A través de numerosas evaluaciones, el ensayo MSCR ha demostrado poder distinguir la diferencia en el potencial ahuellamiento entre varios ligantes, tanto modificados como no modificados. Los hallazgos indican que el valor de Jnr sería un buen reemplazo para los criterios de alta temperatura vigentes; de esta manera, los valores de Jnr para asfaltos sin modificar pueden compararse con la especificación actual, bajo el supuesto de que los criterios SHRP para ligantes no modificados representan su potencial ahuellamiento. Para definir a qué nivel de esfuerzo debe hacerse esta comparación, y tomando en cuenta que la especificación SHRP existente se basa en mediciones en el rango viscoelástico lineal, se realizó el ensayo MSCR a gran cantidad de ligantes asfálticos, llegando a la conclusión de que se comportan de una manera lineal, generalmente hasta un nivel de esfuerzo de 3.2 [kPa]. Este comportamiento se puede ver en la *Figura 37*, donde se presentan dos de los ligantes más típicos utilizados en América del Norte, con una clasificación PG 64-22 y una PG 70-22; en cada caso, la dependencia del esfuerzo en el ligante no llega a ser significativa hasta que se alcanza un nivel carga de 6,4 [kPa]. Como la especificación SHRP existente para asfaltos sin modificar ha sido validada para el desempeño a alta temperatura, se cree que el valor de Jnr a 3,2 [kPa], que normalmente está dentro del rango lineal para la mayoría de los ligantes asfálticos sin modificar, debe proporcionar una correlación razonable con el desempeño (Transportation Research Board, 2010).

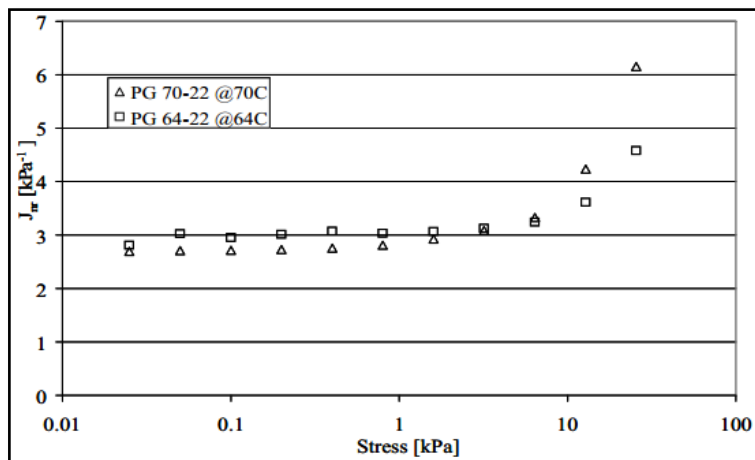


Figura 37: Valores de J_{nr} para ligantes con clasificación PG 64-22 y PG 70-22, Transportation Research Board, 2010.

Se realizó una evaluación de múltiples ligantes asfálticos sin modificar para determinar si existía una relación entre la especificación SHRP existente y el valor de J_{nr} a un nivel de esfuerzo de 3.2 [kPa]. Para cada ligante, se determinó el grado continuo SHRP correspondiente a la temperatura a la que el valor del parámetro $G^*/\sin(\delta)$ es igual a 2.2 [kPa], y el valor de J_{nr} 3.2 [kPa] a la misma temperatura. Estos datos se muestran en la *Tabla 11*, donde el valor de J_{nr} promedio fue de 4.2 [kPa⁻¹] y el coeficiente de variación del 12%. Como se puede apreciar en la *Figura 38*, la relación temperatura- J_{nr} es una función potencial, donde pequeñas variaciones en la temperatura implican grandes variaciones en el valor de J_{nr} . La *Figura 38* muestra los valores de J_{nr} de un ligante convencional PG 64-22, y deja en evidencia su sensibilidad a la temperatura, donde un cambio en el valor de J_{nr} de 4 [kPa⁻¹] a 8 [kPa⁻¹] reflejaría un cambio en la temperatura de sólo 5°C. Este análisis indica que, para ligantes convencionales, un valor de J_{nr} de 4 [kPa⁻¹] proporcionaría una rigidez equivalente a la especificación SHRP existente, es decir, un ligante tradicional con clasificación PG 64-22 sería equivalente a un ligante con un valor de J_{nr} de 4 [kPa⁻¹].

Tabla 11: Valor de J_{nr} para un nivel de esfuerzo de 3.2[kPa] y la temperatura en la que $G^*/\sin(\delta)$ es igual a 2.2, Transportation Research Board, 2010.

Sample ID	Name	Grade	True Grade	Temp [°C]	J_{nr} [3.2 kPa ⁻¹]
ALF 6727	Control	70-22	72.7-74.2	72.7	4.4
BBRS3	Straight	64-22	66.1-27.3	66.1	4.2
MN county rd 112	Neat Valero	58-28	60.8-33.4	60.8	3.7
MN county rd 112	AshlandM	58-28	60.7-31.4	60.7	4.3
Minn Road	Straight	58-28	61.8-30.8	61.8	3.0
Shandong	Straight	64-22	64.4-23.5	64.4	4.4
BBRS3	Straight	70-22	71.4-24.8	71.4	4.8
BBRS3	Straight	58-28	61.3-30	61.3	4.0
MD project	Straight	64-28	64.8-29.6	64.8	4.6
Citgo	Straight	70-22	71.6-26.9	71.6	4.6
Lion	Straight	64-22	66.7-24.1	66.7	4.5
Average					4.2
Coefficient of variation (%)					12

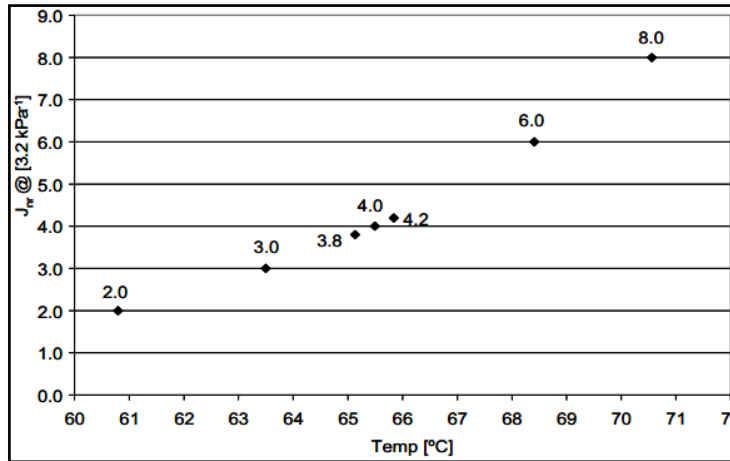


Figura 38: Gráfico Jnr vs Temperatura para ligante PG 64-22, Transportation Research Board, 2010.

Aunque las propiedades de los ligantes sin modificar en la nueva especificación MSCR son muy similares a la especificación SHRP, es probable que los ligantes modificados con polímeros tengan propiedades muy diferentes. La *Figura 39* grafica los valores de Jnr en función del esfuerzo para diferentes ligantes a su temperatura de grado PG SHRP. Los ligantes sin modificar, PG 64-22 y PG 58-28, exhiben un comportamiento lineal más allá del nivel de esfuerzo de 3.2 [kPa], sin embargo, los ligantes modificados con polímeros, SBS 70-28 y SBR 70-22, comienzan a mostrar un comportamiento no lineal a un nivel de esfuerzo mucho menor, de aproximadamente 0.8 [kPa]. Esto se debe a la naturaleza de dos fases de los ligantes modificados con polímeros, con la red de polímeros suspendida en el asfalto, que cuando se ensayan en el rango viscoelástico lineal de menor esfuerzo, parecen mucho más rígidos, pero a medida que aumenta el esfuerzo, las cadenas de polímero se extienden y comienzan a desenredarse, lo cual reduce su resistencia y parecen tener la misma flexibilidad en fluencia que los ligantes no modificados.

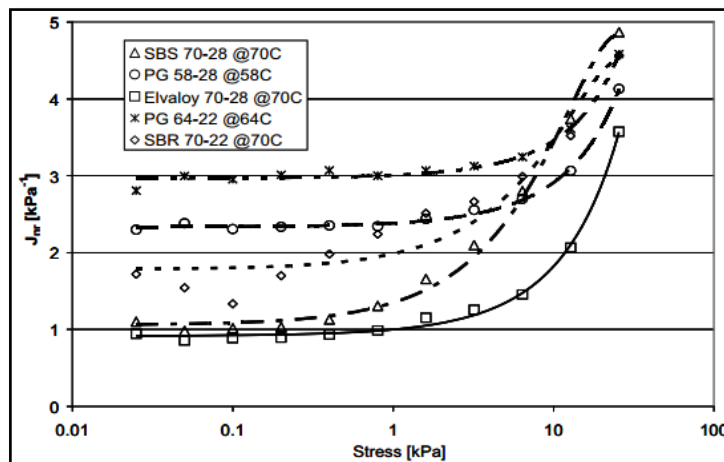


Figura 39: Gráfico Jnr vs Esfuerzo para ligantes convencionales y modificados, Transportation Research Board, 2010.

Normalmente, los ligantes modificados con polímeros se utilizan en carreteras con mucho tráfico y cargas pesadas. Bajo las especificaciones SHRP existentes, con niveles de tráfico más altos o velocidades de circulación más bajas, se utiliza el aumento de grado mencionado en la *Sección 2.13*, donde los criterios de especificación se mantendrían constantes, pero la temperatura de ensayo a la que se requiere el criterio se incrementa. Por ejemplo, un pavimento urbano con alto volumen de tráfico en un clima PG 64 requeriría un ligante PG 76 que se ensayaría a 76°C, 12 grados

por encima de la temperatura que probablemente experimentará el pavimento, por lo que el ensayo MSCR indicaría que los ligantes a estas altas temperaturas son muy sensibles al esfuerzo y es poco probable que sean más rígidos que un ligante sin modificar. En este sentido, lo recomendable sería realizar el ensayo MSCR a 64°C, la temperatura real a la que estará sometido el pavimento, donde el ligante mostrará una rigidez considerablemente mayor que el ligante convencional. Otro problema importante con la especificación SHRP es que los criterios de aumento de grado se basan en el concepto de que la superposición tiempo-temperatura es la misma para todos los ligantes.

El concepto de aumento de grado SHRP en realidad no es apropiado para una especificación de alta temperatura, ya que el ahuecamiento es un fenómeno de gran esfuerzo y deformación no lineal, y los ensayos a temperaturas muy por encima de la temperatura en la que se producirán los esfuerzos y deformaciones llevarán a resultados erróneos que no se correlacionarán con el desempeño. La *Figura 40* grafica los valores de Jnr a distintos niveles de esfuerzo para un ligante PG 76-22 modificado con SBS, ensayado a distintas temperaturas. Como se puede apreciar, a 76°C la sensibilidad al esfuerzo del ligante es bastante pronunciada, con un aumento del valor de Jnr de 1.36 [kPa⁻¹] a 0.1 [kPa] hasta 2.35 [kPa⁻¹] a 3.2 [kPa], correspondiente a un cambio del 73%. En la actualidad, este ligante probablemente se usaría en un clima PG 64 y nunca estaría expuesto a una temperatura de 76°C. A 64°C, el valor de Jnr va desde 0.32 [kPa⁻¹] a 0.1 [kPa] hasta 0.47 [kPa⁻¹] a 3.2 [kPa], correspondiente a un aumento de solo el 47%. Por lo tanto, en una carretera real, este ligante sería mucho menos sensible al esfuerzo y mucho más rígido que lo indicado al realizar ensayos a una temperatura de 76°C. Cualquier nueva especificación de alta temperatura debería eliminar el aumento de grado de temperatura y sólo hacer ensayos a la alta temperatura esperada del pavimento.

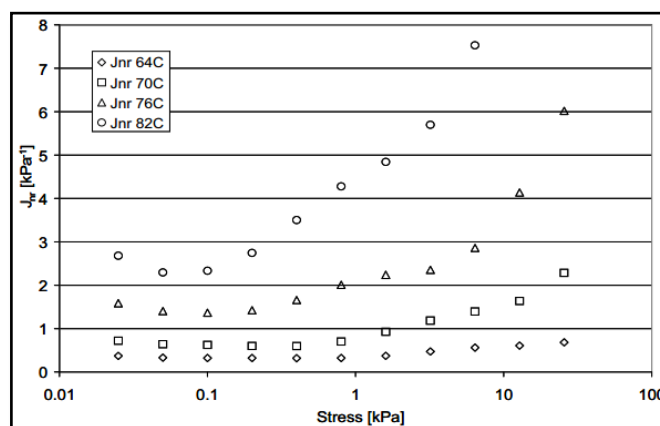


Figura 40: Gráfico Jnr vs Esfuerzo para ligante PG 76-22, Transportation Research Board, 2010.

En la especificación SHRP se utiliza el aumento de grado basado en la idea de que aumentar la temperatura de ensayo en 6°C y mantener el valor del criterio igual, básicamente duplicará la rigidez del ligante. Esto se desarrolló asumiendo que la susceptibilidad a la temperatura de todos los aglutinantes es muy similar, sin embargo, se ha demostrado que esto no es apropiado y no representará las propiedades reales a la temperatura esperada del pavimento (Transportation Research Board, 2010).

Con los cambios en el volumen de tráfico, la alta temperatura del pavimento no cambia, por lo que sería mejor cambiar los criterios utilizados para evaluar el ligante a esa temperatura alta. Es decir, en lugar de aumentar la temperatura de ensayo y mantener constantes los criterios de especificación, el valor requerido debe reducirse para proporcionar un ligante más resistente al

ahuellamiento. La especificación original basada en la viscosidad utilizaba un valor de viscosidad variable basado en el clima y la carga de tráfico del lugar de emplazamiento. Para una nueva especificación de alta temperatura, como la basada en el valor de J_{nr} , se deben utilizar los criterios SHRP existentes, pero con un requisito de J_{nr} variable basado en el volumen de tráfico y velocidad de circulación.

Anteriormente, se desarrolló una relación entre el valor de especificación RTFOT $|G^*|/\sin(\delta)$ de 2.2 [kPa] y el valor de J_{nr} a 3.2 [kPa] de 4 [kPa⁻¹] a la temperatura equivalente. Utilizando un valor de J_{nr} a 3.2 [kPa] de 4 [kPa⁻¹] como base para un grado de pavimentación estándar, se realizarán reducciones en el valor de J_{nr} en reemplazo de los aumentos de grado para una baja velocidad de circulación y un volumen de tráfico de más de 30 millones de ESAL. La **Tabla 12** muestra la relación entre el valor de J_{nr} y el ahuellamiento para tres mezclas estudiadas; en base a los resultados, es posible afirmar que una reducción del 50% en el valor de J_{nr} debería reducir el ahuellamiento en aproximadamente el 50%. El grado RTFOT en la especificación SHRP, $|G^*|/\sin(\delta)$ de 2.2 [kPa], ha demostrado ser equivalente a un valor de J_{nr} de 4 [kPa⁻¹] medido a 3.2 [kPa], por lo que una nueva especificación de alta temperatura comenzaría con un grado PG estándar que requeriría un valor de J_{nr} menor o igual a 4 [kPa⁻¹] a un nivel de esfuerzo de 3.2 [kPa], al que se haría referencia como un PG 64S-XX. El aumento de grado para tráfico lento requeriría reducir el valor de J_{nr} en un 50% a 2 [kPa⁻¹] o menos, lo que se denotaría como PG 64H-XX. Un segundo aumento de grado, para tráfico detenido, requeriría volver a reducir el valor de J_{nr} en un 50% a 1 [kPa⁻¹] o menos, al que se haría referencia como un PG 64V-XX. Cabe destacar que, en cada caso, el ligante se ensayaría a la temperatura recomendada del pavimento, y no a una temperatura que el pavimento nunca experimentará.

Tabla 12: Relación entre cambios en el valor de J_{nr} y cambios en el ahuellamiento para tres mezclas estudiadas, Transportation Research Board, 2010.

MS test site			ALF study			MnRoad		
J_{nr} at [3.2 kPa ⁻¹]	Rut [mm]	% Change in Rut with Change in J_{nr}	J_{nr} at [3.2 kPa ⁻¹]	Rut [mm]	% Change in Rut with Change in J_{nr}	J_{nr} at [3.2 kPa ⁻¹]	Rut [mm]	% Change in Rut with Change in J_{nr}
4	13.3		4	27.7		4	10.2	
2	6.4	51.7	2	17.0	38.7	2	5.7	44.2
1	3.0	53.5	1	11.6	31.6	1	3.4	39.7

3 EXPERIMENTACIÓN

3.1 MATERIALES

3.1.1 Ligante asfáltico

El ligante asfáltico utilizado en este estudio fue proporcionado por el Centro de Desarrollo e Investigación (CDI) y corresponde a un cemento asfáltico convencional CA-24, cuya clasificación PG se presenta a continuación:

Tabla 13: Grado PG alta temperatura ligante base - Estado original

Clasificación PG Estado Original											
Datos del Betún		Parámetro $G^*/\sin(\delta)$ [KPa]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]			
		58	64	70	76	82	88	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio	
Base	1	3.47	1.66	0.83				68.4	0.41	CUMPLE	68.6
	2	3.64	1.74	0.87				68.8			

Tabla 14: Grado PG alta temperatura ligante base - HPDR

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)											
Datos del Betún		Parámetro $G^*/\sin(\delta)$ [KPa]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]			
		58	64	70	76	82	88	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio	
Base	1	12.20	5.68	2.70	1.32			71.7	0.10	CUMPLE	71.8
	2	12.30	5.74	2.74	1.33			71.8			

Tabla 15: Grado PG temperatura intermedia ligante base

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia											
Datos del Betún		Parámetro $G^* \sin(\delta)$ [KPa]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000[KPa]			
		28	25	22	19	16	13		CV d2s%	Temp. Promedio	
Base	1				3890	5330			16.6	4.93	CUMPLE
	2				4350	6180			17.8		

Tabla 16: Grado PG baja temperatura ligante base

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura											
Datos del Betún		Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]									
		-6		-12		-18		-24		-30	
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m
Base	1			180.7025	0.318	371.8741	0.252				
	2			166.9370	0.327	379.4336	0.256				

Cabe destacar que, a partir de los datos de la *Tabla 16*, el grado exacto de baja temperatura es -23.98°C . Además, el ligante utilizado fue sometido al ensayo Multiple Stress Creep and Recovery, cuyos resultados se resumen en la *Tabla 17*.

Tabla 17: Resultados MSCR a 64°C - Ligante base

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	10.22	2.87	1.84	2.00	71.92	8.63
Muestra 2	9.84	3.11	1.87	1.74	68.43	-6868.00
Desviación Estándar	0.27	0.17	0.02	0.18	2.47	4862.51
Promedio	10.03	2.99	1.86	1.87	70.18	-3429.69

Dado que el valor promedio de Jnr a 3.2 [1/kPa] es menor a 2, el tipo de tránsito del ligante corresponde a la categoría H correspondiente a tránsito pesado.

De acuerdo con lo anterior, es posible afirmar que el ligante base utilizado en esta investigación tiene una clasificación PG 64H-22, cuyo informe completo se encuentra en el *Anexo 5: Caracterización PG ligante base* del presente documento.

3.1.2 Aditivo ablandador

El aditivo ablandador utilizado en esta investigación, al igual que el ligante asfáltico, fue proporcionado por el Centro de Desarrollo e Investigación (CDI) y se muestra en la *Figura 41*.

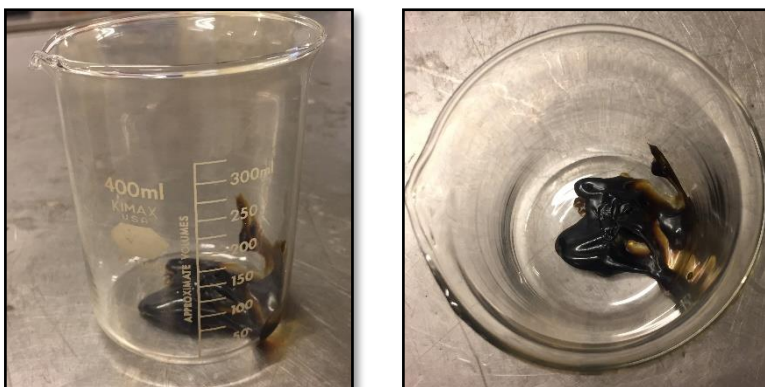


Figura 41: Aditivo ablandador, Elaboración propia.

3.1.3 Polvo de caucho

El polvo de caucho utilizado en este estudio fue proporcionado por la empresa Polambiente y su tamaño de partículas va desde 0.01 a 0.7 [mm] de diámetro. Su granulometría en peso se muestra en la *Figura 42*, donde se toman como referencia las bandas granulométricas P-2 estipuladas en el Manual de Carreteras, Sección 5.420.203 y previamente presentadas en la *Sección 2.12.2.1* de este documento.

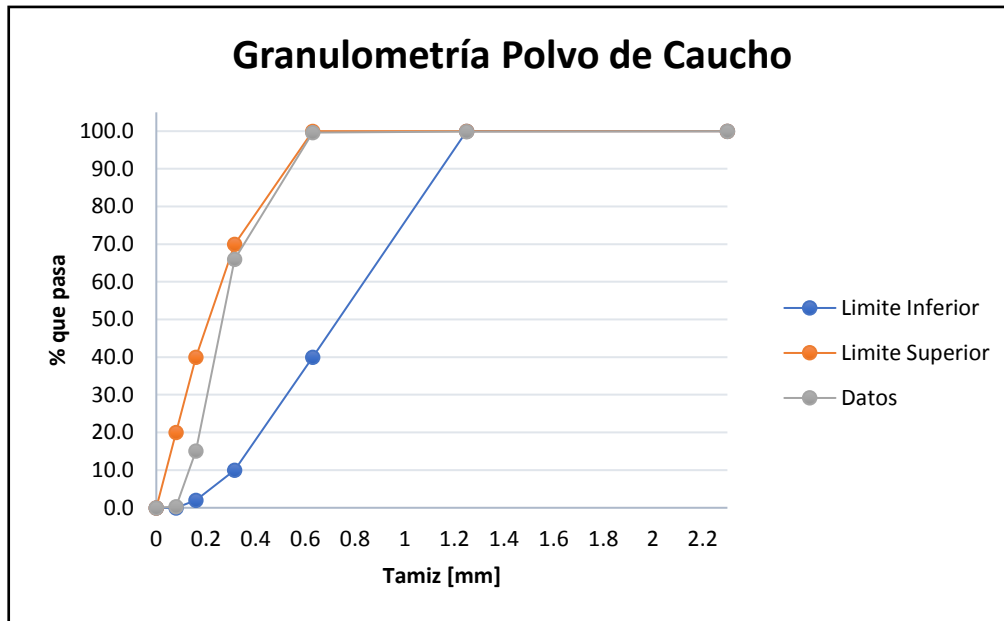


Figura 42: Granulometría en peso polvo de caucho, Elaboración propia.

Cabe destacar que, las partículas con tamaño superior al tamiz 30 (0.6 [mm]) fueron descartadas como material de trabajo en esta investigación. El detalle del proceso de tamizado se encuentra disponible en el *Anexo 6: Granulometría polvo de caucho*.

3.2 PROCESO DE MODIFICACIÓN

El proceso de modificación se divide en dos etapas. La primera de ellas consiste en obtener, a partir de un ligante convencional CA-24, un ligante que cumpla con la clasificación Superpave por grado de desempeño PG 58-28. En la segunda etapa se pretende conseguir, a partir del ligante obtenido en la primera etapa, ligantes que cumplan con las categorías Heavy (H), Very Heavy (V) y Extremely Heavy (E) de la clasificación por clima estipulados en la norma AASHTO M332-14, y recientemente por el Manual de Carreteras, para lo cual es necesario agregar distintas concentraciones de polvo de caucho. El resumen de este proceso se presenta en la *Figura 43*.

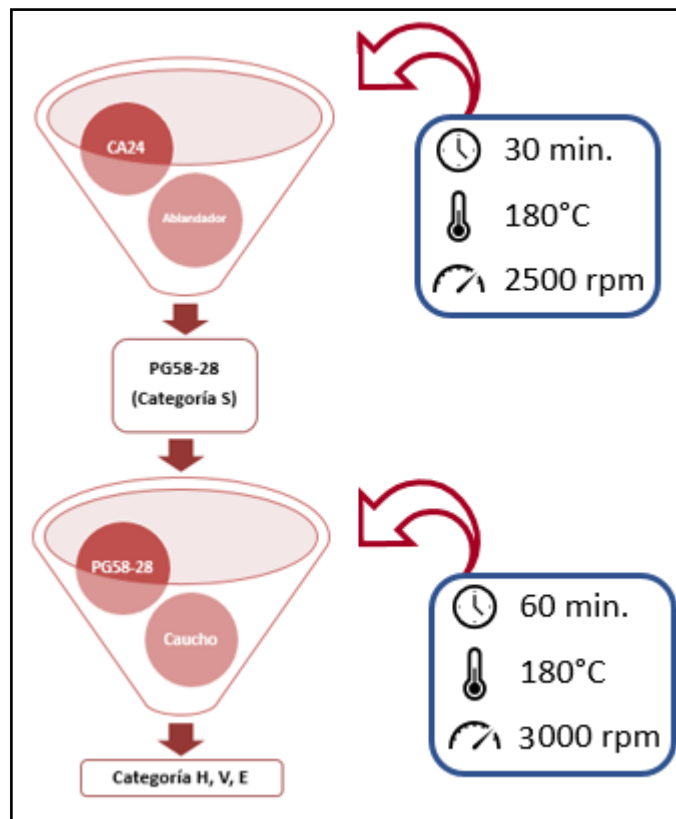


Figura 43: Resumen proceso de modificación con ablandador y polvo de caucho, Elaboración propia.

3.2.1 Modificación con ablandador

Para el proceso de modificación con ablandador se utiliza un mezclador de alto corte POLYTRON PT 10-35 GT y un vástago como el que se muestra en la *Figura 44*, de 30 [mm] de diámetro y 250 [mm] de longitud. Se recomienda que la mezcla ligante-ablandador se lleve a cabo a una temperatura de 180°C y una velocidad de 2500 [rpm], durante al menos 30 minutos (Golalipour A., 2013).



Figura 44: Vástago de mezclado POLYTRON-Aggregate Type PT-DA 30/2EC-F250, LEMCO.

Para mantener la mezcla a la temperatura deseada, se utiliza una placa calefactora Thermo Scientific Cimarec; el proceso de mezclado, como se puede apreciar en la *Figura 45*, se realiza

dentro de un baño de aceite de silicona con el objetivo de lograr una temperatura más homogénea dentro de la muestra.



Figura 45: Proceso de modificación con ablandador, Elaboración propia.

3.2.2 Modificación con polvo de caucho

Las propiedades del asfalto modificado con polvo de caucho son muy sensibles al proceso de mezcla; depende de factores externos como la temperatura, tiempo y velocidad de mezclado, y factores internos como cantidad y tamaño de las partículas de caucho, tipo de asfalto, tipo y pureza del polvo de caucho, etc. Un aspecto de gran importancia en la modificación con polvo de caucho por vía húmeda es el mecanismo de agitación, el cual debe ser de alto corte con el fin de lograr la digestión total del caucho en el ligante, evitando la turbulencia y la separación de fases del asfalto modificado (Campaña O., Galeas S. & Guerrero V., 2015).

El proceso de modificación con polvo de caucho en esta investigación se lleva a cabo por vía húmeda, utilizando el dispersor de polímeros en asfalto que se muestra en la *Figura 46*, que cuenta con sistema calefactor y control de temperatura integrado. En este caso, se considera una velocidad de mezclado de 3000 [rpm] a una temperatura de 180°C, durante un período de 60 minutos. El tiempo de reacción se seleccionó considerando que se ha comprobado que los ligantes verdes presentan un mejor desempeño en comparación a los ligantes reaccionados (Mandal T. & Bahia H., 2015). El caucho se incorpora al ligante asfáltico que ha sido previamente modificado con ablandador, bajo las condiciones mencionadas en la sección anterior.

Cabe destacar que, en primera instancia, se pretendía continuar el proceso de modificación con polvo de caucho utilizando el mezclador de la *Figura 45*, sin embargo, éste presentó fallas por el trabajo prolongado a altas temperaturas. Debido a lo anterior, se decide adquirir el dispersor de polímeros en asfalto de la *Figura 46*, y realizar un análisis de repetibilidad a las muestras ya modificadas para validar que no existan diferencias estadísticamente significativas entre los resultados.

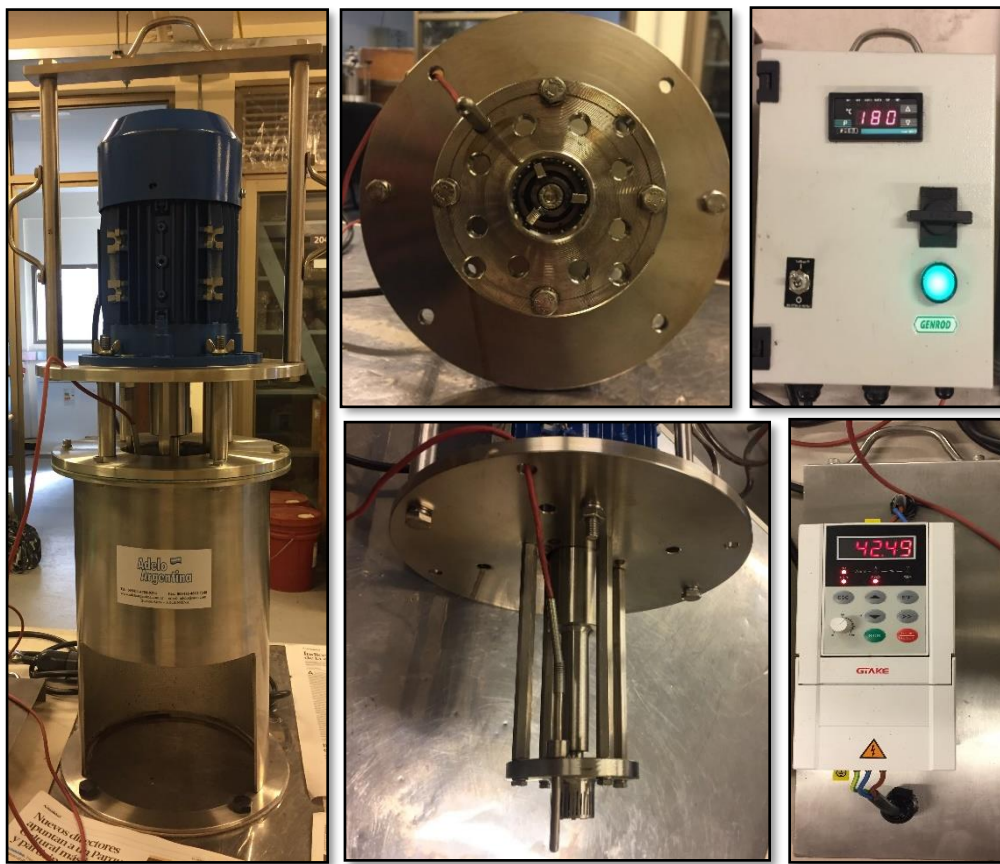


Figura 46: Dispensor de polímeros en asfalto, Elaboración propia

3.3 ENSAYOS Y PLAN DE TRABAJO

Los ensayos y métodos contemplados para las muestras obtenidas en ambos procesos de modificación se presentan en la *Tabla 18* y se detallan en los acápite siguientes:

Tabla 18: Matriz de ensayos etapa experimental, Elaboración propia

Ensayo	Tipo envejecimiento	Parámetro de evaluación	Método
Brookfield	Original – HPDR	Viscosidad Rotacional	ASTM D4402-15
Grado PG Alta Temperatura	Original – HPDR	$G^*/\sin\delta$	ASTM D7175-15
Grado PG Temperatura Intermedia	PAV	$G^*\cdot\sin\delta$	ASTM D7175-15
Grado PG Baja Temperatura	PAV	$G^*\cdot\sin\delta$	ASTM D6648-08
MSCR	HPDR	Jnr, %R	ASTM D7405-15

3.3.1 Modificación con ablandador

Se realizaron modificaciones con 3%, 5%, 7%, 12%, 14% y 15% de ablandador, con el fin de establecer una relación entre el contenido de ablandador y el grado PG resultante, que permita determinar los porcentajes de ablandador necesarios para obtener un ligante asfáltico con una clasificación PG 58-28, y de ser posible, un ligante con clasificación PG 52-34 que es la recomendada para la zona austral y cordillerana del país. Además, se realizaron dos modificaciones adicionales

con 7% de ablandador, con el propósito de evaluar la repetibilidad del proceso de modificación mediante un análisis de varianza ANOVA.

Cabe destacar que, la dosificación del ablandador es con relación al peso total del asfalto modificado, vale decir, la mezcla ligante-ablandador. De esta manera, se definen las composiciones porcentuales y en peso del aditivo ablandador, que se muestran en la *Tabla 19*.

Tabla 19: Cantidades de aditivo ablandador utilizadas.

Muestra	Ligante Asfáltico		Ablandador		Asfalto Modificado
	[gr]	[%]	[gr]	[%]	[gr]
O	200	100	0	0	200
A	200	97	6.2	3	206.2
B	200	95	10.5	5	210.5
C	200	93	15.1	7	215.1
D	200	88	27.3	12	227.3
E	200	86	32.6	14	232.6
F	200	85	35.3	15	235.3

3.3.1.1 Viscosidad rotacional

La viscosidad de las muestras se midió con el Viscosímetro rotacional Brookfield, como un indicador de que el proceso de modificación se llevó a cabo con éxito. En este sentido, se espera que exista una tendencia decreciente con el aumento del contenido de ablandador.

3.3.1.2 Caracterización PG

Para la clasificación PG de las muestras se utilizó el Reómetro de Corte Dinámico (DSR) y el Reómetro de Viga de Flexión (BBR) presentados en la *Figura 7* y *Figura 11*, respectivamente, de acuerdo con las condiciones de envejecimiento establecidas en el esquema presentado en la *Figura 17* y los procedimientos detallados en la *Sección 2.2* de este documento.

3.3.1.3 Multiple Stress Creep and Recovery

Luego de identificar los porcentajes de ablandador necesarios para lograr la clasificación PG objetivo, las muestras en cuestión fueron sometidas al ensayo Multiple Stress Creep and Recovery para conocer su valor de Jnr y, por ende, la categoría de la clasificación por clima correspondiente. Cabe destacar que, este es el punto de inicio para determinar los porcentajes de polvo de caucho necesarios para obtener las demás categorías de dicha clasificación.

Asimismo, se midieron los valores de Jnr de las tres muestras con 7% de ablandador con el fin de evaluar la repetibilidad del proceso de modificación, realizando un análisis de varianza ANOVA a este parámetro.

3.3.2 Modificación con polvo de caucho

Previo al proceso de modificación con caucho, se realizaron modificaciones con aditivo ablandador, utilizando el mezclador de la *Figura 46*, para evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de ambos equipos, mediante un análisis de varianza ANOVA.

Luego, se realizaron modificaciones con 3%, 5%, 7% y 10% de polvo de caucho, con el fin de establecer una relación entre el contenido de caucho y el valor de Jnr resultante, que permita determinar los porcentajes de polvo de caucho necesarios para obtener ligantes asfálticos que cumplan con las categorías Heavy (H), Very Heavy (V) y Extremely Heavy (E) de la clasificación por clima estipulados en la norma AASHTO M332-14. Además, se realizaron dos modificaciones adicionales con 7% de ablandador y 5% de caucho, con el propósito de evaluar la repetibilidad del proceso de modificación mediante un análisis de varianza ANOVA.

Cabe destacar que la dosificación del polvo de caucho, al igual que en el caso del ablandador, es con relación al peso total del asfalto modificado, vale decir, la mezcla ligante-ablandador-caucho. De esta manera, se definen las composiciones porcentuales y en peso del polvo de caucho, que se muestran en la *Tabla 20*.

Tabla 20: Cantidades de polvo de caucho utilizadas.

Muestra	Ligante-Ablandador		Polvo de Caucho		Asfalto Modificado
	[gr]	[%]	[gr]	[%]	
G	519.6	97	16.1	3	535.7
H	510.6	95	26.9	5	537.5
I	525.5	95	27.7	5	553.2
J	523.8	95	27.6	5	551.4
K	517.8	93	39	7	556.8
L	526.9	90	58.5	10	585.4

Es importante tener en cuenta que el ligante y el ablandador se mezclan de manera manual antes de ingresar al mezclador, por lo que la cantidad ligante-ablandador de la tabla anterior se calcula por diferencia, al medir la masa del recipiente antes y después de vaciar su contenido en el mezclador. Es por lo anterior que las cantidades de polvo de caucho se calculan en base a la cantidad de ligante-ablandador que efectivamente ingresa al mezclador y los valores mostrados difieren levemente entre las muestras.

3.3.2.1 Viscosidad rotacional

La viscosidad de las muestras se midió con el Viscosímetro rotacional Brookfield, como un indicador de que el proceso de modificación se llevó a cabo con éxito. En este sentido, se espera que exista una tendencia creciente con el aumento del contenido de polvo de caucho, producto de la red polimérica generada en el ligante modificado durante el proceso de digestión de las partículas de caucho. Cabe destacar que, la viscosidad fue medida para muestras en estado original y con envejecimiento primario.

Un segundo aspecto por considerar en el control de la viscosidad es que la mayoría de los asfaltos modificados con caucho que se comercializan, presentan viscosidades muy elevadas que

generan inconvenientes en las temperaturas de mezcla y compactación de las mezclas asfálticas (Potti J., 2004). De esta manera, los valores medidos sirven como punto de comparación frente a los ligantes convencionales y/o modificados del comercio.

En todos los casos, las mediciones fueron realizadas utilizando el spindle SC4-21, cuyo diámetro es de 16.76[mm], el que deja un espacio entre cilindros de 2.29 [mm] que supera holgadamente el tamaño máximo de las partículas de caucho consideradas en este estudio (0.6 [mm]). De esta manera, queda descartado algún tipo de interacción de las partículas de caucho, que pueda conllevar a resultados poco representativos.

3.3.2.2 *Multiple Stress Creep and Recovery*

Para el ensayo Multiple Stress Creep and Recovery de las muestras se utilizó el Reómetro de Corte Dinámico (DSR) con una separación entre platos de 2 [mm], considerando que existen investigaciones que afirman que las partículas de caucho de tamaño mayor al 25% de la separación entre platos, pueden interferir con las mediciones, dando como resultado propiedades que pueden no representar el nuevo asfalto modificado (Teymourpour P., Hanz A., Mandal T., Bahia H. & Rizzutto S., 2016). Cabe destacar que, se consideró la opción de utilizar una separación entre platos de 3 [mm], sin embargo, en la mayoría de los casos la muestra no lograba mantenerse dentro del plato base, o bien, en la posición de medición, la muestra no tenía total contacto con el plato superior; tal como se puede apreciar en la *Figura 47*.

La prueba con una separación entre platos de 2 [mm], en cambio, mostró un buen comportamiento y no produjo inconvenientes asociados a la filtración de ligante entre los platos. En la *Figura 48* se puede observar la muestra antes y después de bajar el plato superior hasta la posición de medición.

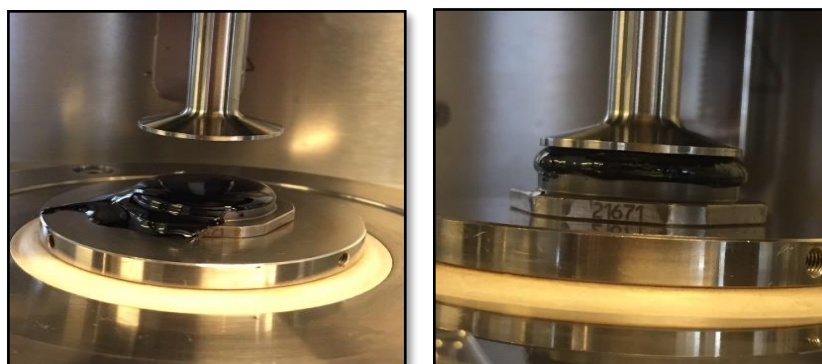


Figura 47: Prueba con separación entre platos DSR de 3[mm], Elaboración propia.

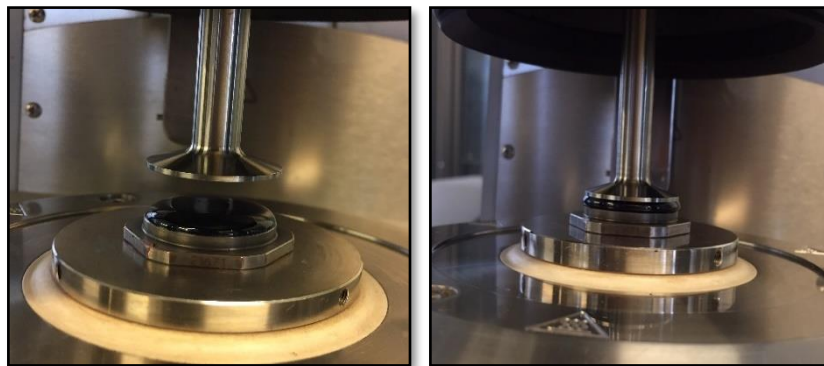


Figura 48: Prueba con separación entre platos DSR de 2 [mm], Elaboración propia.

La temperatura de ensayo corresponde al grado PG de alta temperatura del ligante previo a la modificación con polvo de caucho, es decir, para todos los casos (muestras G, H, I, J, K y L) el ensayo se realizó a la temperatura del grado PG para la mezcla ligante-ablandador. Cabe señalar que, las muestras fueron sometidas a envejecimiento primario inmediatamente después de concluido el proceso de modificación; esto considerando la separación de fases que experimenta el asfalto modificado, debido a la sedimentación de las partículas de caucho que ocurre a medida que disminuye la temperatura de la muestra en reposo.

Notar que, el análisis de varianza de las muestras sin polvo de caucho se realizó considerando los valores de Jnr de las modificaciones elaboradas con cada uno de los mezcladores (*Figura 45 y Figura 46*). Asimismo, el análisis de varianza de las tres muestras con 7% de ablandador y 5% de caucho, realizado para evaluar la repetibilidad del proceso de modificación, se llevó a cabo considerando el valor de Jnr de cada una de ellas.

3.3.3 Porcentajes finales

Una vez definidos los porcentajes finales de ablandador y polvo de caucho que permiten obtener las diferentes categorías de la clasificación por clima, se midió la viscosidad de las muestras para verificar la correcta ejecución del proceso de modificación. Asimismo, las muestras fueron sometidas al ensayo Multiple Stress Creep and Recovery para corroborar, a partir del valor de Jnr medido, que la categoría obtenida es la esperada. Finalmente, se llevó a cabo la caracterización de las muestras, para comparar la clasificación PG obtenida con el criterio de aumento de grado abordado en la *Sección 2.13*.

4 RESULTADOS

4.1 MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR

4.1.1 Viscosidad rotacional

La *Tabla 21* presenta los valores de viscosidad rotacional de las muestras elaboradas correspondientes a su estado original (sin envejecer), a una temperatura de 135°C y una velocidad de giro de 50 [rpm].

Tabla 21: Viscosidades modificación con ablandador.

Muestra	Ablandador [%]	Viscosidad [mPas]
O	0	560
A	3	450
B	5	380
C	7	330
D	12	268
E	14	230
F	15	205

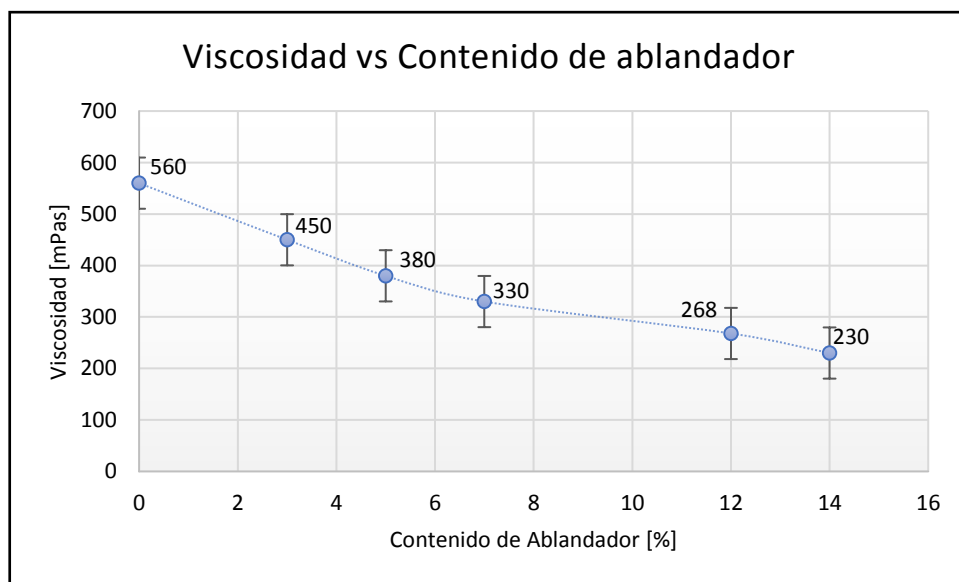


Figura 49: Gráfico Viscosidad vs Contenido de ablandador, Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la *Figura 49*, la tendencia es la esperada ya que la adición de aditivo ablandador produce una evidente disminución en la viscosidad rotacional del ligante asfáltico. Las barras de error representan la variabilidad de los datos e indican la incertidumbre de la medición realizada en cada caso; la variabilidad en el proceso de modificación con ablandador se aborda en la Sección 4.1.3 del presente documento.

Cabe destacar que, los valores tabulados y graficados corresponden al promedio de las lecturas tomadas para cada muestra. El detalle de las mediciones realizadas se encuentra en el *Anexo 7: Viscosidades modificación con ablandador* del presente documento.

4.1.2 Caracterización PG

El informe completo de las caracterizaciones PG realizadas a las muestras modificadas con ablandador se encuentra en el *Anexo 8: Caracterización PG modificación con ablandador* del presente documento. La *Tabla 22* presenta un resumen de la clasificación PG obtenida en cada una de las modificaciones con aditivo ablandador realizadas.

Tabla 22: Resumen clasificación PG para modificación con ablandador, Elaboración propia.

Contenido Ablandador	Grado PG exacto alta temperatura	Grado PG exacto baja temperatura	Grado PG
0	68.6	-24.0	64-22
3	66	-25.4	64-22
5	63.8	-27.6	58-22
7	61.3	-31.9	58-28
12	60	-31.1	58-28
14	56.8	-32.5	52-28
15	52.5	-33.5	52-28

Como se puede apreciar, la adición de aditivo ablandador produce una disminución en el grado PG, tanto de alta como baja temperatura, del ligante asfáltico. En base a los resultados, es posible concluir que una concentración del 7% de ablandador permite obtener una clasificación PG 58-28, por lo que se decidió estudiar el efecto del polvo de caucho en ligantes previamente modificados con dicha dosificación de ablandador. Cabe destacar que, a pesar de que el grado de baja temperatura se encuentra cercano al límite de 28[°C], se decide priorizar la alta temperatura ya que se tienen antecedentes de que el polvo de caucho utilizado en este estudio no sólo mejora el desempeño a alta temperatura, sino que también lo hace con el de baja temperatura (Schilling J., 2018).

Notar que, para el máximo contenido de aditivo considerado, vale decir, 15% de ablandador, se obtuvo una clasificación PG 52-28. De esta manera, se puede concluir que no es posible obtener un ligante con clasificación PG 52-34, dado que se requiere una concentración de ablandador muy elevada. En base a esto, y considerando que un ligante con esta clasificación PG no se obtiene de manera directa en el mercado, se recomienda trabajar con un ligante base con clasificación PG 58-28 y modificar con ablandador para obtener una clasificación PG 52-34, o bien, considerar la opción de utilizar otro aditivo.

4.1.3 Multiple Stress Creep and Recovery

La *Tabla 23* resume los valores de Jnr a 3.2 [1/kPa], como resultado del ensayo Multiple Stress Creep and Recovery a 58°C, realizado a las tres muestras con 7% de ablandador elaboradas con el fin de evaluar la repetibilidad del proceso de modificación.

Tabla 23: Resumen valores de Jnr para modificaciones con 7% de ablandador.

Jnr	Modificación 1	Modificación 2	Modificación 3
Ensayo 1	2.033	2.018	1.82
Ensayo 2	1.999	2.283	1.979
Ensayo 3			1.958

El detalle de estos resultados se presenta en el *Anexo 9: Resumen resultados MSCR y análisis de varianza para muestras con 7% de ablandador* del presente documento. Este anexo incluye, además los datos de entrada y resultados del análisis ANOVA realizado, quedando en evidencia que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores Jnr obtenidos.

Asimismo, el valor de Jnr promedio para la modificación con 7% de ablandador es 2.03; valor que está prácticamente en límite de las categorías “Standard” y “Heavy” según la Clasificación por Clima. Esto significa que el estudio del efecto del polvo de caucho se basará en determinar las concentraciones de caucho que permiten obtener los valores de Jnr para las categorías “Very Heavy” y “Extremely Heavy”.

El detalle de los resultados del ensayo MSCR de cada una de las modificaciones realizadas con 7% de ablandador se encuentran en el *Anexo 10: Resultados MSCR modificación con 7% de ablandador utilizando mezclador*.

4.2 MODIFICACIÓN CON POLVO DE CAUCHO

4.2.1 Viscosidad rotacional

Las *Tablas 24 y 25* presentan los valores de viscosidad rotacional de las muestras, modificadas con 7% de aditivo ablandador y diferentes dosificaciones de polvo de caucho, en estado original y con envejecimiento HPDR, respectivamente. El ensayo fue realizado a una temperatura de 135°C y una velocidad de giro de 20 [rpm], a excepción de la muestra con 10% de polvo de caucho con envejecimiento HPDR, donde la velocidad fue de 5 [rpm].

Tabla 24: Viscosidades modificación con ablandador y polvo de caucho – Estado original.

Polvo de Caucho [%]	Viscosidad [mPas]
0	340
3	490
5	710
	710
	740
7	960
10	1530

Tabla 25: Viscosidades modificación con ablandador y polvo de caucho - HPDR.

Polvo de Caucho [%]	Viscosidad [mPas]
0	580
3	930
5	1380
	1210
	1530
7	1740
10	3960

Recordar que se consideran tres muestras modificadas con 5% de polvo de caucho con el fin de realizar un análisis de varianza para evaluar la repetibilidad del proceso de modificación a partir de los resultados del ensayo MSCR. De igual manera, se presentan los resultados de estas muestras

para los ensayos restantes, como datos adicionales en el análisis de las variables respectivas en cada caso.

Como se puede apreciar en las Figuras 50 y 51, la tendencia es la esperada ya que la adición de polvo de caucho produce un evidente aumento en la viscosidad rotacional del ligante asfáltico, lo cual se puede atribuir a la generación de la red polimérica durante el proceso de digestión de las partículas de caucho. Las barras de error representan la variabilidad de los datos e indican la incertidumbre de la medición realizada en cada caso; la variabilidad en el proceso de modificación con ablandador se aborda en la Sección 4.2.2.3 4.1.3 del presente documento

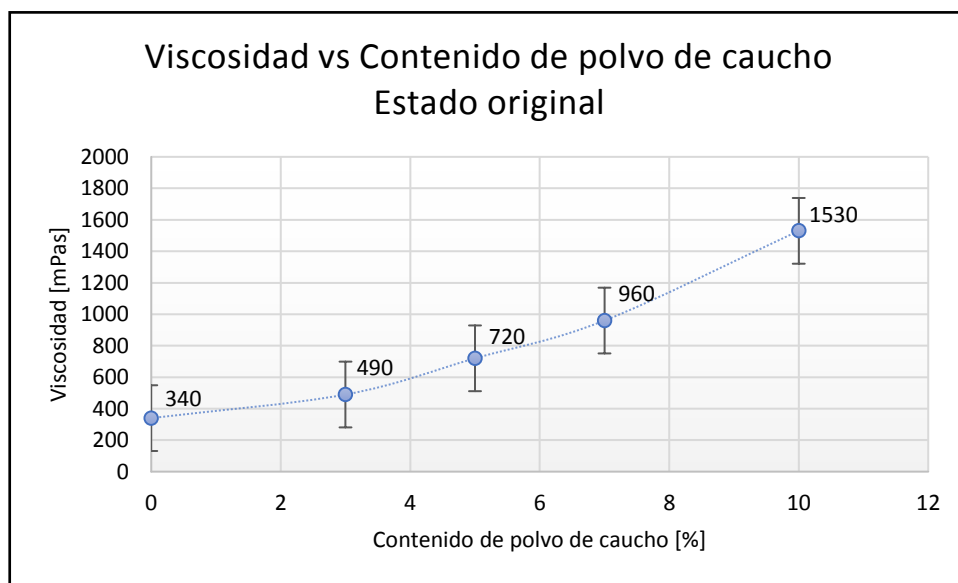


Figura 50: Gráfico Viscosidad vs Contenido de polvo de caucho (Estado original), Elaboración propia.

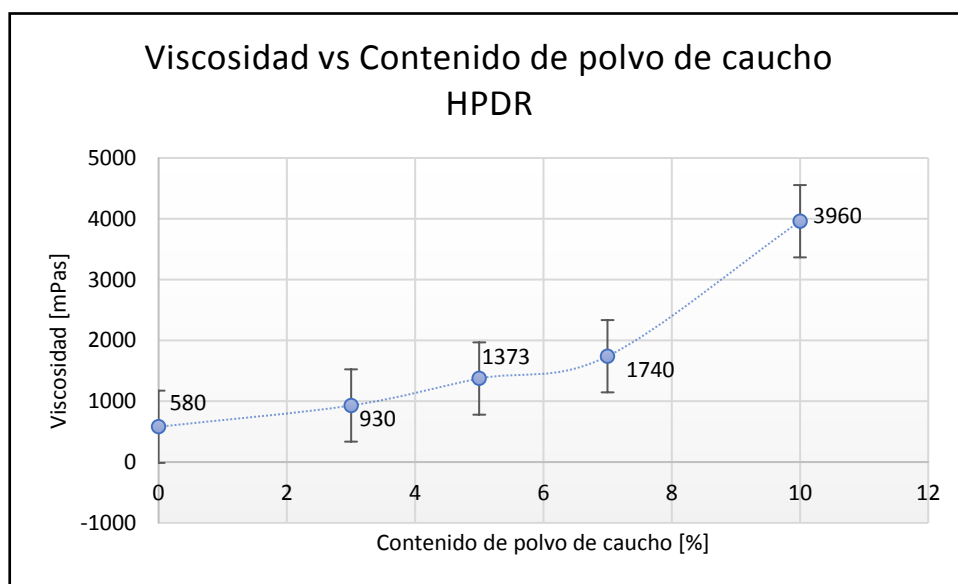


Figura 51: Gráfico Viscosidad vs Contenido de polvo de caucho (HPDR), Elaboración propia.

Cabe destacar que, los valores tabulados y graficados corresponden al promedio de las lecturas tomadas para cada muestra. El detalle de las mediciones realizadas se encuentra en el *Anexo 11: Viscosidades modificación con ablandador y polvo de caucho*.

4.2.2 Multiple Stress Creep and Recovery

4.2.2.1 Análisis de varianza en muestras con 7% de ablandador

Como se mencionó anteriormente, previo al proceso de modificación con caucho, se realizaron modificaciones con aditivo ablandador utilizando el mezclador de la *Figura 46* para evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de ambos equipos, mediante un análisis de varianza ANOVA.

Los resultados indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras modificadas con aditivo ablandador con ambos equipos utilizados en este estudio. Notar que, para evitar confusiones, se denominó “Mezclador” al equipo mostrado en la *Figura 45* y “Dispensor” al equipo mostrado en la *Figura 46*.

El detalle de los resultados del ensayo MSCR de cada una de las modificaciones realizadas con 7% de ablandador utilizando el equipo “Dispensor” se encuentran en el *Anexo 12: Resultados MSCR modificación con 7% de ablandador utilizando dispensor*. Por su parte, el detalle del análisis de varianza realizado a las muestras se presenta en el *Anexo 13: Análisis de repetibilidad en muestras con 7% de ablandador*.

4.2.2.2 Resultados MSCR para muestras con 7% de ablandador y distinta dosificación de polvo de caucho

A continuación, se presentan los resultados del ensayo Multiple Stress Creep and Recovery a 58°C, realizado a las distintas muestras detalladas en la *Sección 3.3.2*.

Tabla 26: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho.

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	31.04	15.75	0.68	0.87	49.24	27.73
Muestra 2	31.42	16.62	0.62	0.81	47.10	30.52
Desviación Estándar	0.27	0.61	0.04	0.04	1.51	1.97
Promedio	31.23	16.19	0.65	0.84	48.17	29.12

Tabla 27: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra H).

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	45.30	28.70	0.38	0.50	36.66	32.57
Muestra 2	42.78	27.26	0.41	0.54	36.28	32.11
Desviación Estándar	1.78	1.02	0.02	0.03	0.27	0.32
Promedio	44.04	27.98	0.39	0.52	36.47	32.34

Tabla 28: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra I).

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	48.16	31.75	0.34	0.47	34.06	37.50
Muestra 2	46.64	31.27	0.35	0.48	32.96	36.65
Desviación Estándar	1.07	0.34	0.01	0.01	0.78	0.60
Promedio	47.40	31.51	0.35	0.47	33.51	37.08

Tabla 29: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J).

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	48.61	31.95	0.34	0.47	34.26	38.84
Muestra 2	44.79	28.28	0.39	0.52	36.87	0.52
Muestra 3	48.77	32.04	0.34	0.47	34.30	39.76
Desviación Estándar	2.25	2.15	0.03	0.03	1.49	22.40
Promedio	47.39	30.76	0.36	0.49	35.14	26.37

Tabla 30: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador y 7% de polvo de caucho.

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	58.62	44.95	0.21	0.28	23.31	35.48
Muestra 2	56.10	42.70	0.22	0.29	23.88	32.86
Desviación Estándar	1.78	1.59	0.01	0.01	0.40	1.85
Promedio	57.36	43.83	0.21	0.29	23.59	34.17

Tabla 31: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador y 10% de polvo de caucho.

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	67.61	56.21	0.11	0.16	16.87	36.68
Muestra 2	68.19	57.39	0.11	0.15	15.83	37.94
Desviación Estándar	0.41	0.84	0.00	0.01	0.73	0.89
Promedio	67.90	56.80	0.11	0.15	16.35	37.31

El detalle de los resultados del ensayo MSCR de cada una de las modificaciones realizadas se encuentran en el *Anexo 14: Resultados MSCR modificación con polvo de caucho* del presente documento. Cabe destacar que, en todos los casos el ensayo MSCR fue realizado a la temperatura del grado PG de Alta Temperatura del ligante previo a la modificación con polvo de caucho, es decir, 58°C. En cuanto a la separación de platos, como se mencionó anteriormente, se utilizó una separación de 2 [mm]; además, se compararon los resultados para la modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho obteniendo un aumento del 30% en el valor de Jnr cuando se aumentó la separación entre platos de 1 [mm] a 2 [mm].

La *Figura 52* muestra el gráfico Deformación vs Tiempo, a partir de los resultados del ensayo MSCR, para el contenido de polvo de caucho en los distintos porcentajes considerados en este estudio. Como se puede apreciar, un aumento en el contenido de polvo de caucho produce una importante disminución en la deformación del ligante asfáltico, lo que podría indicar que existe una mejora en su desempeño frente al ahuellamiento.

Además, la *Figura 53* presenta el gráfico % Recuperación vs Jnr a 58°C como indicador de la presencia de respuesta elástica y la dependencia de los esfuerzos en cada una de las muestras analizadas. Como se puede ver, en su mayoría los puntos quedan graficados por debajo de la línea del gráfico, lo que indica que los asfaltos modificados con caucho no cumplen con el porcentaje de recuperación aceptable, a excepción de las modificaciones con 7% y 10% de polvo de caucho. Este resultado no implica ningún problema de desempeño negativo de los asfaltos modificados con polvo de caucho, sino que simplemente significa que para un rango dado de Jnr, el porcentaje de recuperación para un asfalto modificado con un polímero elastomérico sería ligeramente mayor.

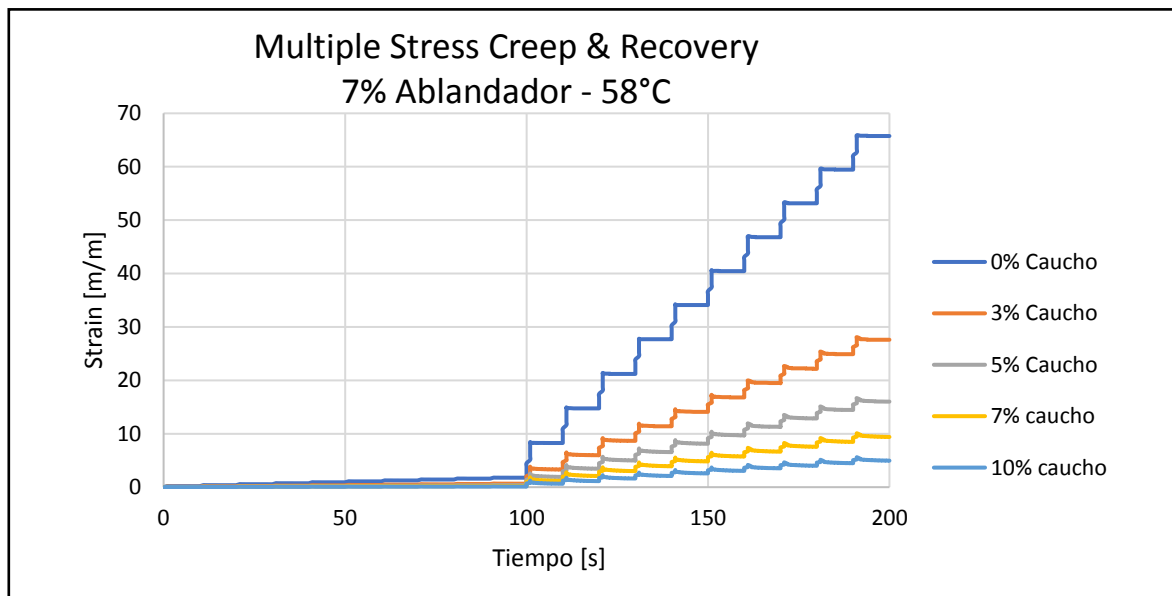


Figura 52: Gráfico Deformación a 58°C vs Tiempo para modificación con polvo de caucho, Elaboración propia.

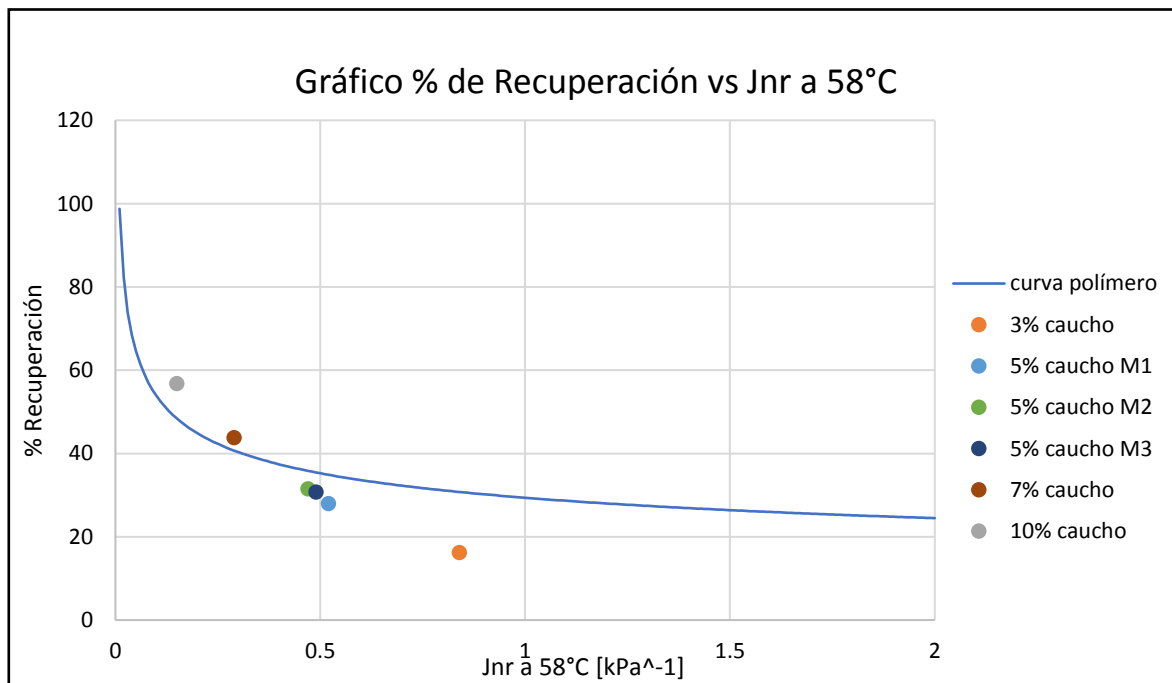


Figura 53: Gráfico % Recuperación vs Jnr a 58°C para modificación con polvo de caucho, Elaboración propia.

4.2.2.3 Análisis de repetibilidad modificación con polvo de caucho

El análisis de repetibilidad realizado a las tres muestras modificadas con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho se presenta en el *Anexo 15: Análisis de repetibilidad modificación con polvo de caucho* del presente documento. Los resultados indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de Jnr de las muestras analizadas, lo que valida el proceso de modificación utilizado.

4.3 PORCENTAJES FINALES

La *Tabla 32* resume los resultados del ensayo Multiple Stress Creep and Recovery a 58°C para los distintos porcentajes de contenido de polvo de caucho considerados en este estudio.

Tabla 32: Resumen valores de Jnr según contenido de caucho.

Contenido de Caucho [%]	Jnr 3,2 [1/kPa]
0	1.917
3	0.842
5	0.490
7	0.287
10	0.152

A partir de estos resultados, es posible generar la curva Jnr vs Contenido de polvo de caucho que permite determinar la concentración de caucho necesaria para obtener las categorías de la clasificación por clima restantes. Como se puede apreciar, cuando el contenido de polvo de caucho es nulo se tiene un valor de Jnr de 1.917 [kPa⁻¹], correspondiente a la categoría “Heavy”; por lo tanto, queda por determinar la concentración de polvo de caucho que permite alcanzar las categorías “Very Heavy” y “Extremely Heavy”.

Para el caso de la categoría “Heavy” se sabe que el valor objetivo de Jnr a un nivel de carga de 3.2 [kPa] es 1 [kPa⁻¹], mientras que, para la categoría “Extremely Heavy” el valor objetivo es 0.5 [kPa⁻¹]. Sin embargo, dada la variabilidad que presentan los datos, es necesario establecer un intervalo de confianza que entregue un rango de valores verosímiles para el parámetro. De esta manera, se corrigen dichos valores considerando una distribución normal y un nivel de confianza del 99.7%:

$$\text{Valor objetivo "Very Heavy"} = 1 - 3 \cdot \sigma = 1 - 3 \cdot 0.027 = 0.918 \text{ [kPa}^{-1}\text{]}$$

$$\text{Valor objetivo "Extremely Heavy"} = 0.5 - 3 \cdot \sigma = 0.5 - 3 \cdot 0.027 = 0.418 \text{ [kPa}^{-1}\text{]}$$

Las concentraciones de polvo de caucho que permiten obtener estos valores de Jnr se determinaron considerando los ajustes de la *Sección 4.3.1*.

4.3.1 Ajustes

Para definir los porcentajes finales de ablandador y polvo de caucho que permiten obtener las diferentes categorías de la clasificación por clima, se consideran ajustes del tipo lineal, cuadrático y cúbico de la curva generada a partir de los datos de la *Tabla 32*. Lo anterior, con el fin de obtener un rango de valores para la concentración de polvo de caucho necesaria para cada categoría.

4.3.1.1 Ajuste lineal

La Figura 54 muestra la representación gráfica de los datos considerando un ajuste lineal. De esta manera, se despeja el valor del contenido de caucho necesario en cada caso:

$$0.918[kPa^{-1}] = -0.1713 \cdot x + 1.5946 \rightarrow x = 3.946\%$$

$$0.418[kPa^{-1}] = -0.1713 \cdot x + 1.5946 \rightarrow x = 6.865\%$$

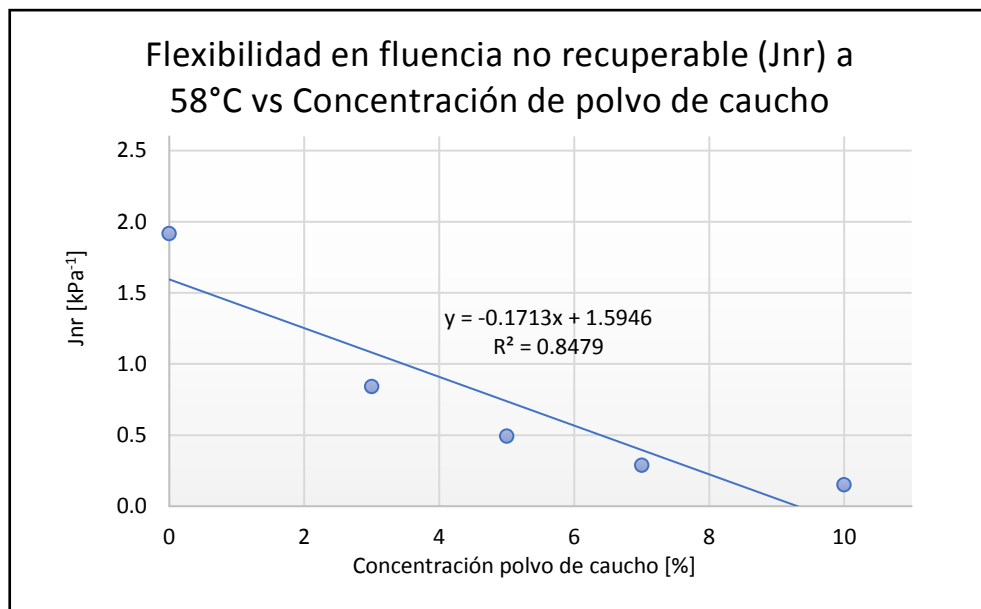


Figura 54: Gráfico Jnr a 58°C vs Concentración polvo de caucho - Ajuste lineal, Elaboración propia.

Finalmente, la Figura 55 presenta las concentraciones obtenidas, con sus respectivos intervalos de confianza, y los rangos para cada categoría de la clasificación por clima.

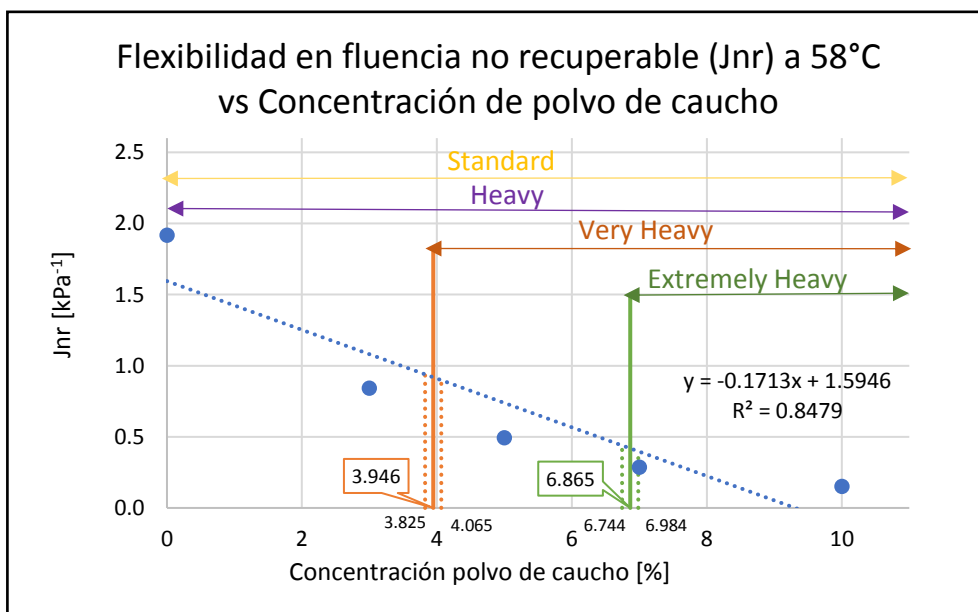


Figura 55: Rangos categorías Clasificación por Clima a 58°C - Ajuste lineal, Elaboración propia.

Como se puede apreciar, para un nivel de confianza del 95%, la categoría “Very Heavy” se logra con una concentración de polvo de caucho del 3.825% al 4.065%, mientras que, la categoría “Extremely Heavy” se logra con una concentración del 6.744% al 6.984% de polvo de caucho.

4.3.1.2 Ajuste cuadrático

La *Figura 56* muestra la representación gráfica de los datos considerando un ajuste cuadrático. De esta manera, se despeja el valor del contenido de caucho necesario en cada caso:

$$0.918[kPa^{-1}] = 0.022 \cdot x^2 - 0.3914 \cdot x + 1.8896 \rightarrow x = 2.981\%$$

$$0.418[kPa^{-1}] = 0.022 \cdot x^2 - 0.3914 \cdot x + 1.8896 \rightarrow x = 5.399\%$$

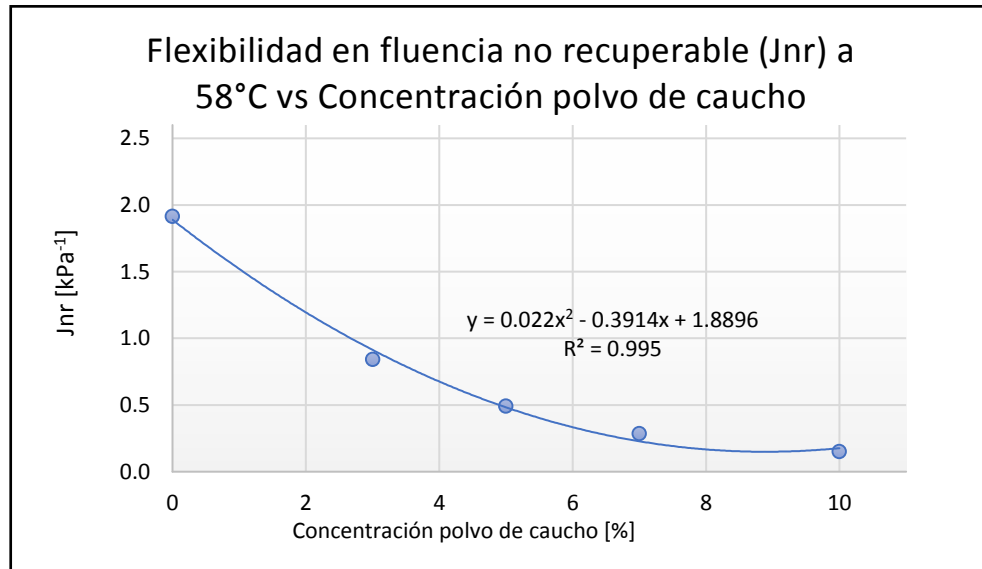


Figura 56: Gráfico Jnr a 58°C vs Concentración polvo de caucho - Ajuste cuadrático, Elaboración propia.

Finalmente, la *Figura 57* presenta las concentraciones obtenidas, con sus respectivos intervalos de confianza, y los rangos para cada categoría de la clasificación por clima.

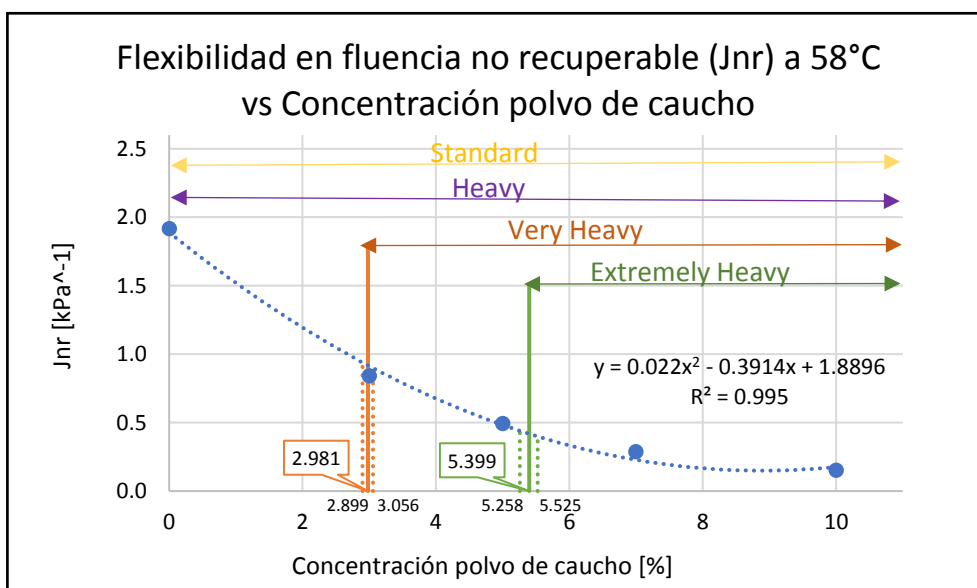


Figura 57: Rangos categorías Clasificación por Clima a 58°C - Ajuste cuadrático, Elaboración propia.

Como se puede apreciar, para un nivel de confianza del 95%, la categoría “Very Heavy” se logra con una concentración de polvo de caucho del 2.899% al 3.056%, mientras que, la categoría “Extremely Heavy” se logra con una concentración del 5.258% al 5.525% de polvo de caucho.

4.3.1.3 Ajuste cúbico

La *Figura 58* muestra la representación gráfica de los datos considerando un ajuste cúbico. De esta manera, se despeja el valor del contenido de caucho necesario en cada caso:

$$0.918[kPa^{-1}] = -0.0018 \cdot x^3 + 0.049 \cdot x^2 - 0.4866 \cdot x + 1.9157 \rightarrow x = 2.719\%$$

$$0.418[kPa^{-1}] = -0.0018 \cdot x^3 + 0.049 \cdot x^2 - 0.4866 \cdot x + 1.9157 \rightarrow x = 5.534\%$$

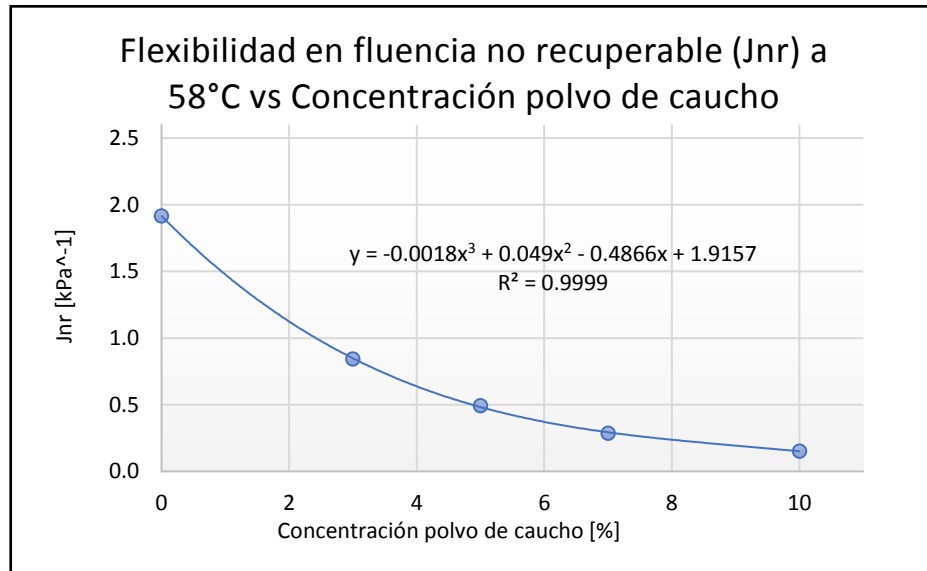


Figura 58: Gráfico Jnr a 58°C vs Concentración polvo de caucho - Ajuste cúbico, Elaboración propia.

Finalmente, la *Figura 59* presenta las concentraciones obtenidas, con sus respectivos intervalos de confianza, y los rangos para cada categoría de la clasificación por clima.

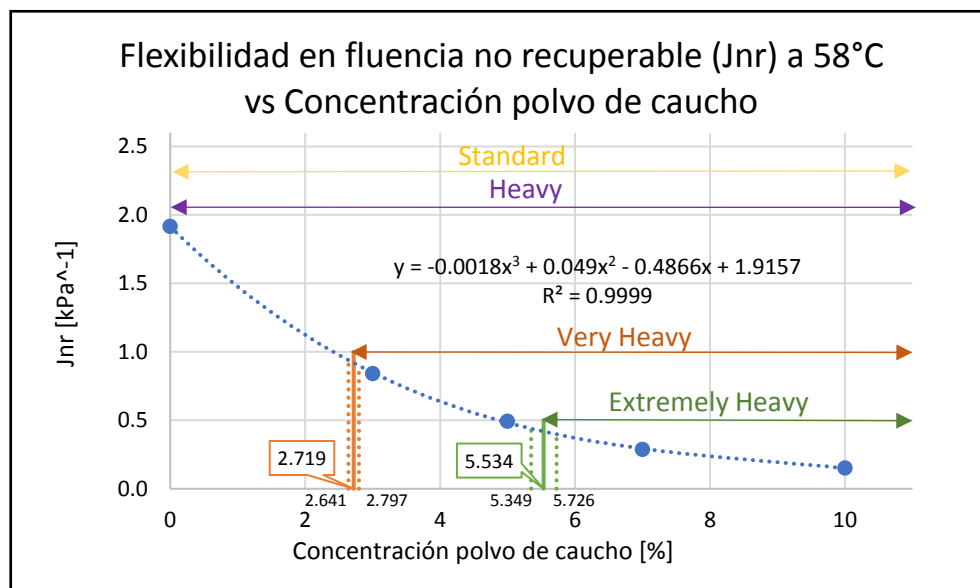


Figura 59: Rangos categorías Clasificación por Clima a 58°C - Ajuste cúbico, Elaboración propia.

Como se puede apreciar, para un nivel de confianza del 95%, la categoría “Very Heavy” se logra con una concentración de polvo de caucho del 2.641% al 2.797%, mientras que, la categoría “Extremely Heavy” se logra con una concentración del 5.349% al 5.726% de polvo de caucho.

De esta manera, las concentraciones obtenidas a partir de cada uno de los ajustes considerados entregan valores de referencia para definir los porcentajes finales con los que se decide trabajar en cada caso.

4.3.2 Caracterización PG de porcentajes de polvo de caucho elegidos

La *Tabla 33* resume el contenido de polvo de caucho necesario para obtener las categorías de la clasificación por clima según cada ajuste considerado.

Tabla 33: Resumen Contenido de polvo de caucho según ajuste lineal, cuadrático y cúbico.

	Jnr Objetivo [kPa ⁻¹]	Jnr Corregido [kPa ⁻¹]	Contenido Polvo de Caucho [%]		
			Ajuste Lineal	Ajuste Cuadrático	Ajuste Cúbico
Categoría "Very Heavy"	1	0.918	3.946	2.981	2.719
Categoría "Extremely Heavy"	0.5	0.418	6.865	5.399	5.534

De acuerdo con lo anterior, considerando que el ajuste lineal es demasiado conservador y el ajuste cúbico entrega un valor que podría no cumplir con la categoría esperada, se decide trabajar con valores intermedios; un 3% de polvo de caucho para la categoría “Very Heavy” y un 5.5% de polvo de caucho para lograr la categoría “Extremely Heavy”.

4.3.2.1 Modificación con 7% de ablandador utilizando dispersor de polímeros en asfalto

Dado que la modificación con ablandador en este caso se realiza utilizando el dispersor de polímeros en asfalto mostrado en la *Figura 46*, la clasificación PG puede diferir levemente de la presentada en la *Sección 4.1.2*. A pesar de que anteriormente se demostró que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de las muestras modificadas utilizando ambos equipos, se decide volver a caracterizar la muestra con 7% de ablandador, utilizando esta vez, el dispersor de polímeros en asfalto para el proceso de modificación.

De acuerdo con lo anterior, se presenta el resumen de los valores obtenidos para la nueva clasificación PG de la modificación con 7% de aditivo ablandador.

Tabla 34: Grado PG alta temperatura modificación con 7% de ablandador (dispersor) - Estado original.

Clasificación PG Estado Original										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]		
		52	58	64	70	76	82	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
7% Abl.	1	3.16	1.48	0.72				61.3	0.35	61.2
	2	3.11	1.44	0.70				61.0		

Tabla 35: Grado PG alta temperatura modificación con 7% de ablandador (dispersor) - HPDR.

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]		
		52	58	64	70	76	82	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
7% Abl.	1	10.70	4.96	2.33	1.12			64.5	0.11	64.6
	2	10.80	5.01	2.37	1.15			64.6		

Tabla 36: Grado PG temperatura intermedia modificación con 7% de ablandador (dispersor).

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia								
Datos del Betún		Parámetro G* sen(δ) [KPa]						
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]				Falla a 5000[KPa]		
		19	16	13		CV d2s%		Temp. Promedio
7% Abl.	1	2590	3780	5360		13.6		
	2	2590	3770	5360		13.6	0.00 CUMPLE	13.6

Tabla 37: Grado PG baja temperatura modificación con 7% de ablandador (dispersor).

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura											
Datos del Betún		Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]									
		-6		-12		-18		-24		-30	
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m
7% Abl.	1					292.880	0.3528	617.389	0.2666		
	2					288.860	0.3464	587.874	0.2795		

Cabe destacar que, a partir de los datos de la *Tabla 37*, el grado exacto de baja temperatura es -28.18°C. De acuerdo con lo anterior, es posible afirmar que utilizando el dispersor de polímeros en asfalto, el ligante modificado con 7% de ablandador tiene una clasificación PG 58H-28, cuyo informe completo se encuentra en el *Anexo 16: Caracterización PG modificación con 7% de ablandador utilizando dispersor de polímeros en asfalto* del presente documento.

4.3.2.2 Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho

La *Tabla 38* presenta los resultados del ensayo Multiple Stress Creep and Recovery a 58°C, realizado a la muestra modificada con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho. El detalle de los resultados se encuentra en el *Anexo 17: Resultados MSCR modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho*.

Tabla 38: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho - Categoría "Very heavy".

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	33.97	17.97	0.59	0.77	47.10	30.73
Muestra 2	33.53	18.77	0.60	0.80	44.01	34.54
Desviación Estándar	0.31	0.57	0.01	0.03	2.19	2.70
Promedio	33.75	18.37	0.59	0.78	45.56	32.64

Dado que el promedio del valor de la flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) resultante, a un nivel de carga de 3.2 [kPa], es 0.78 [kPa⁻¹]; se comprueba que el porcentaje de caucho en cuestión efectivamente permite lograr una categoría "Very Heavy" en la clasificación por clima (Jnr ≤ 1[kPa⁻¹]). A continuación, se presenta el resumen de los valores obtenidos para la clasificación PG de la modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho.

Tabla 39: Grado PG alta temperatura modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho - Estado original.

Clasificación PG Estado Original									
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 1,0 [KPa]		
		58	64	70	76		Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
7% + 3%	1	3.22	1.59	0.80			68.1		
	2	3.28	1.66	0.85			68.6	0.52 CUMPLE	68.4

Tabla 40: Grado PG alta temperatura modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho - HPDR.

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)									
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 2,2 [KPa]		
		58	64	70	76		Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
7% + 3%	1	8.74	4.49	2.31	1.21		70.5	0.20	70.4
	2	8.47	4.36	2.26	1.19		70.3		

Tabla 41: Grado PG temperatura intermedia modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho.

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia									
Datos del Betún		Parámetro G* sen(δ) [KPa]							
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 5000[KPa]		
		16	13				CV d2s%		Temp. Promedio
7% + 3%	1	3700	5440			13.7	3.17	CUMPLE	13.4
	2	3460	5060			13.1			

Tabla 42: Grado PG baja temperatura modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho.

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura									
Datos del Betún		Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]							
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]							
		-6		-12		-18		-24	
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m
7% + 3%	1					194.685	0.3181	372.703	0.2351
	2					193.418	0.3176	396.077	0.2389

Cabe destacar que, a partir de los datos de la *Tabla 42*, el grado exacto de baja temperatura es -29.32°C. De acuerdo con lo anterior, es posible afirmar que el ligante modificado con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho tiene una clasificación PG 64V-28, cuyo informe completo se encuentra en el *Anexo 18: Caracterización PG modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho*.

4.3.2.3 Modificación 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho

La *Tabla 43* presenta los resultados del ensayo Multiple Stress Creep and Recovery a 58°C, realizado a la muestra modificada con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho. El detalle de los resultados se encuentra en el *Anexo 19: Resultados MSCR modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho*.

Tabla 43: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho - Categoría "Extremely heavy".

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	45.66	29.85	0.35	0.47	34.62	35.27
Muestra 2	46.95	31.52	0.33	0.45	32.86	35.13
Desviación Estándar	0.91	1.18	0.01	0.02	1.24	0.10
Promedio	46.31	30.69	0.34	0.46	33.74	35.20

Dado que el promedio del valor de la flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) resultante, a un nivel de carga de 3.2 [kPa], es 0.46 [kPa⁻¹]; se comprueba que el porcentaje de caucho en cuestión efectivamente permite lograr una categoría "Extremely heavy" en la clasificación por clima (Jnr ≤ 0.5 [kPa⁻¹]). El resumen de los valores obtenidos para la clasificación PG de la modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho, se presenta a continuación:

Tabla 44: Grado PG alta temperatura modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho - Estado original.

Clasificación PG Estado Original									
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 1,0 [KPa]		
		58	64	70	76		Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
7% + 5.5%	1	4.15	2.11	1.10	0.59		70.9	0.20	70.8
	2	4.01	2.05	1.07	0.58		70.7		

Tabla 45: Grado PG alta temperatura modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho - HPDR.

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)									
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 2,2 [KPa]		
		58	64	70	76		Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
7% + 5.5%	1	11.70	6.27	3.38	1.85		74.3	0.57	74.0
	2	11.30	6.01	3.21	1.74		73.7		

Tabla 46: Grado PG temperatura intermedia modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho.

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia									
Datos del Betún		Parámetro G* sen(δ) [KPa]							
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 5000[KPa]		
					16	13		CV d2s%	Temp. Promedio
7% + 5.5%	1				4100	5860		14.3	14.1
	2				3850	5530		13.8	

Tabla 47: Grado PG baja temperatura modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho.

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura											
Datos del Betún		Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]									
		-6		-12		-18		-24		-30	
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m
7% + 5.5%	1			100.656	0.3649	221.636	0.3210	449.001	0.2354		
	2			95.900	0.3675	200.187	0.3328	447.488	0.2353		

Cabe destacar que, a partir de los datos de la *Tabla 47*, el grado exacto de baja temperatura es -29.76°C. De acuerdo con lo anterior, es posible afirmar que el ligante modificado con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho tiene una clasificación PG 70E-28, cuyo informe completo se encuentra en el *Anexo 20: Caracterización PG modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho*.

4.3.2.4 Resumen de resultados

La *Tabla 48* presenta un resumen de los valores de Jnr a 58°C y los grados PG de alta y baja temperatura para las categorías de la clasificación por clima obtenidas.

Tabla 48: Resumen resultados categorías Clasificación por Clima.

Categoría	Contenido Ablandador [%]	Contenido Caucho [%]	Jnr [1/kPa]	Grado PG Exacto Alta Temperatura	Grado PG Exacto Baja Temperatura	Grado PG resultante
Heavy	7	0	1.92	61.2	-28.18	58H-28
Very Heavy	7	3	0.78	68.4	-29.32	64V-28
Extremely Heavy	7	5.5	0.46	70.8	-29.76	70E-28

Las Figuras 60 y 61 grafican el comportamiento del ligante asfáltico conforme aumenta la flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr), mientras que, las Figuras 62 y 63 muestran el comportamiento que presenta el ligante asfáltico a medida que aumenta el contenido de polvo de caucho. La Figura 64 presenta un resumen de la Clasificación PG obtenida conforme aumenta el contenido de polvo de caucho.

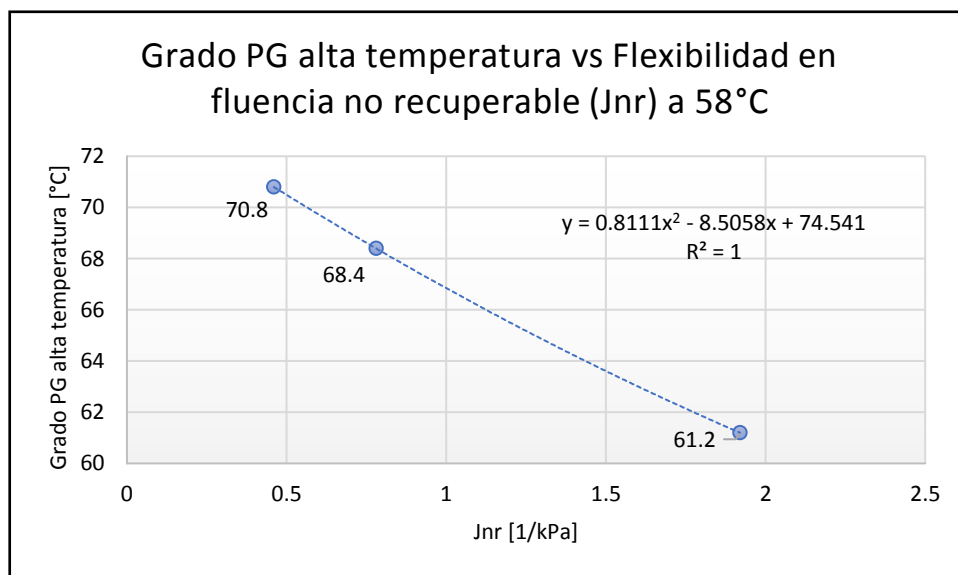


Figura 60: Curva Grado PG alta temperatura vs Flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) a 58°C, Elaboración propia.

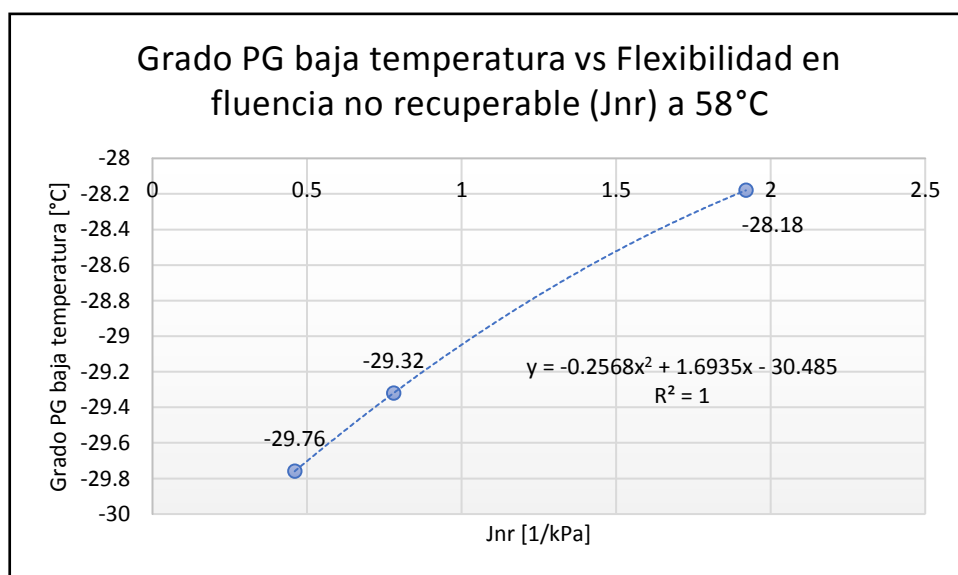


Figura 61: Curva Grado PG baja temperatura vs Flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) a 58°C, Elaboración propia.

Como se puede apreciar en los resultados, la incorporación de polvo de caucho permite mejorar en gran medida el desempeño a alta temperatura de los ligantes asfálticos, permitiendo

aumentar su resistencia a los principales deterioros a los que está expuesto durante su vida útil. Para el caso del desempeño a baja temperatura, en cambio, se observa que la incorporación de polvo de caucho al ligante asfáltico no tiene mayor efecto en el grado PG de baja temperatura, logrando una mejora de sólo 1.6[°C] cuando se modificó con 5.5% de polvo de caucho.

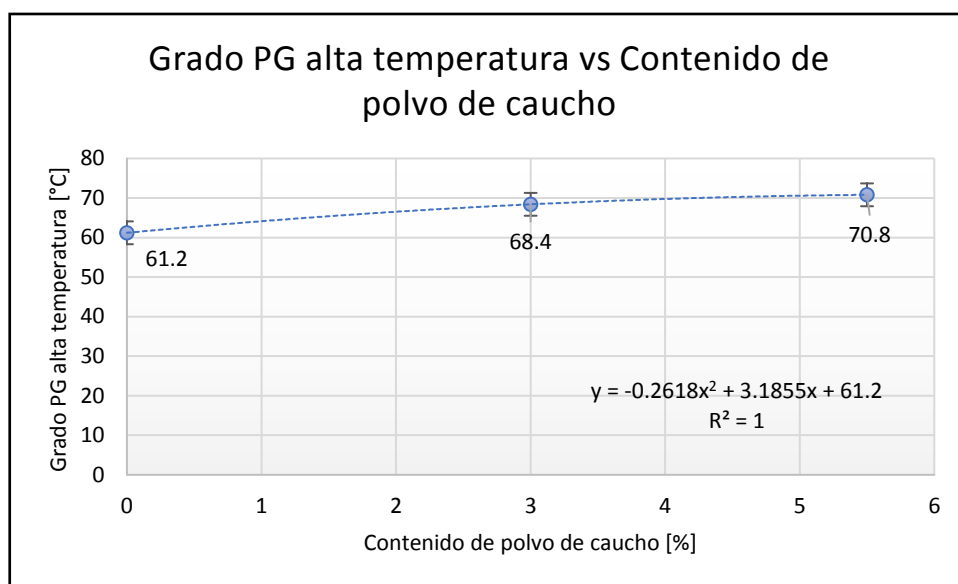


Figura 62: Curva Grado PG alta temperatura vs Contenido de polvo de caucho, Elaboración propia.

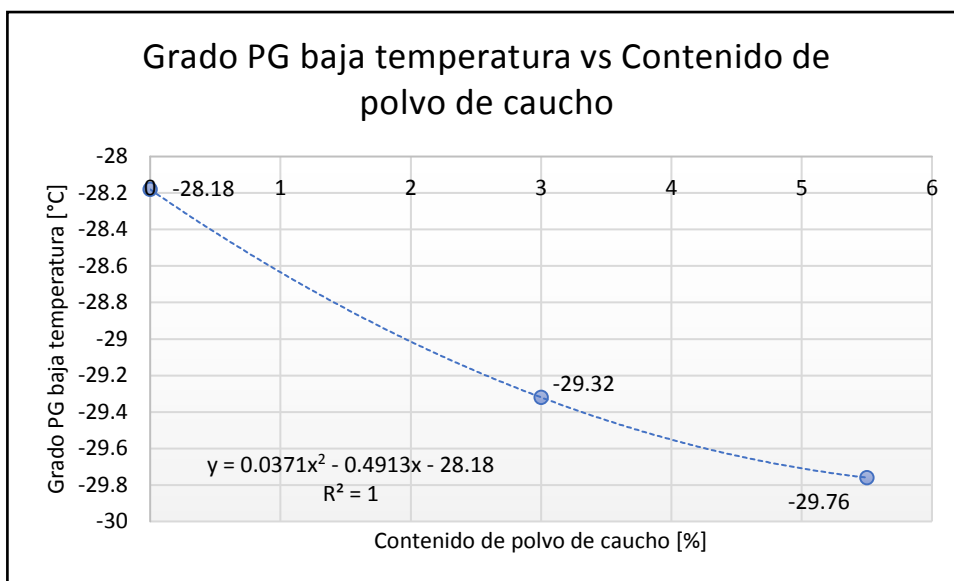


Figura 63: Grado PG baja temperatura vs Contenido de polvo de caucho, Elaboración propia.

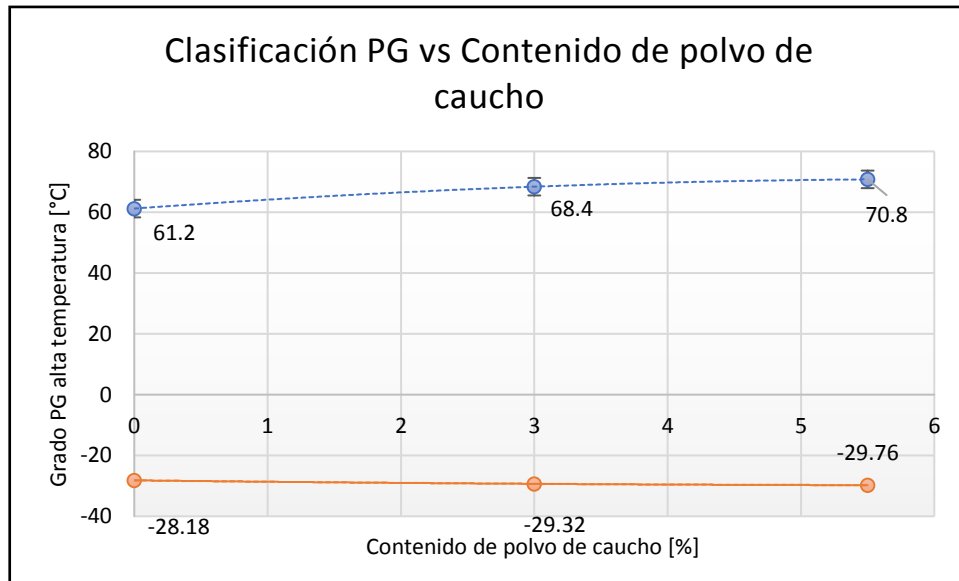


Figura 64: Curva resumen Clasificación PG vs Contenido de polvo de caucho, Elaboración propia.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se utilizó un ligante asfáltico convencional CA-24, con clasificación PG 64S-22 el cual fue sometido a un proceso de modificación con aditivo ablandador, en primera instancia, para obtener un ligante con clasificación PG 58-28 (independiente de su categoría en la clasificación por clima), de acuerdo con lo recomendado para las zonas norte y sur de nuestro país, según la zonificación Superpave realizada al territorio chileno. Tomando como base el ligante con clasificación PG 58H-28, se incorporó polvo de caucho en diferentes porcentajes con el fin de analizar su efecto en las propiedades reológicas del asfalto, y posteriormente definir las concentraciones necesarias para obtener las diferentes categorías de la clasificación por clima.

En base a los resultados obtenidos en la etapa de experimentación de este estudio, es posible llegar a las siguientes conclusiones:

- La adición de aditivo ablandador produce una evidente disminución en la viscosidad rotacional del ligante asfáltico, donde una concentración del 7% es suficiente para lograr disminuir la viscosidad del ligante asfáltico estudiado a casi la mitad.
- En cuanto a las caracterizaciones PG realizadas a las diferentes modificaciones con ablandador, se puede apreciar una disminución en el grado PG, tanto de alta como baja temperatura, del ligante asfáltico. En este sentido, existe una influencia mucho mayor en el grado PG de alta temperatura, en comparación al grado de baja temperatura; donde una dosificación del 15% permite disminuir la alta temperatura en 16[°C] (dos grados PG), mientras que, para el caso de la baja temperatura sólo se logra disminuir 9[°C], correspondiente a un grado PG.
- Considerando que una concentración del 7% de ablandador en el ligante asfáltico estudiado permite pasar de una clasificación PG 64H-22 a una clasificación PG 58H-28, se puede inferir que la modificación con aditivo ablandador no sólo permite disminuir el grado PG del ligante asfáltico, sino que también mantener su categoría en la clasificación por clima.
- Para obtener una clasificación PG 52-34 se requiere una concentración de ablandador muy elevada, por lo que se llega a la conclusión de que no es posible lograr dicha clasificación a partir del ablandador utilizado. Se recomienda trabajar con un ligante base con clasificación PG 58-28 y modificar con ablandador para obtener la clasificación en cuestión, o bien, considerar la opción de utilizar otro aditivo.
- El análisis de varianza ANOVA realizado a los valores de Jnr medidos para las tres muestras elaboradas con 7% de ablandador, demostraron que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados obtenidos, y que el proceso de modificación con aditivo ablandador tiene una repetibilidad aceptable, independiente del equipo utilizado en el proceso de modificación (*Figuras 45 y 46*).
- La adición de polvo de caucho al ligante asfáltico previamente modificado con aditivo ablandador provoca un aumento de la viscosidad rotacional, proporcional a la concentración de caucho, donde una dosificación del 5% es suficiente para lograr que la viscosidad aumente a más del doble de la viscosidad inicial.
- El polvo de caucho utilizado en este estudio posee un tamaño de partículas que varía entre los 0.01 y 0.6 [mm] de diámetro, a diferencia de otras investigaciones, en donde se utiliza un

tamaño de partículas uniforme. En este sentido, futuras investigaciones podrían orientarse al estudio de ligantes asfálticos modificados con ablandador y polvo de caucho con tamaño uniforme, de manera de poder comparar los resultados con los de esta investigación y concluir al respecto.

- El ensayo MSCR mostró como resultado que la deformación en el tiempo de los ligantes modificados con polvo de caucho disminuye considerablemente con el aumento de su concentración. Esto se condice con un mejor desempeño frente a la deformación permanente de la carpeta asfáltica y, por ende, un aumento en la resistencia al ahuellamiento.
- En cuanto a la curva % Recuperación vs Jnr a 58°C como indicador de la presencia de respuesta elástica se puede ver que, en su mayoría los puntos quedan graficados por debajo de la línea del gráfico, lo que indica que los asfaltos modificados con caucho no cumplen con el porcentaje de recuperación aceptable, a excepción de las modificaciones con 7% y 10% de polvo de caucho. Este resultado no implica ningún problema de desempeño negativo de los asfaltos modificados con polvo de caucho, sino que simplemente significa que para un rango dado de Jnr, el porcentaje de recuperación para un asfalto modificado con un polímero elastomérico sería ligeramente mayor. Cabe destacar que, el uso de esta curva no es obligatorio, sino que se presenta como una alternativa frente al requisito de Jnr-diff máximo del 75%, el cual se cumple para todos los porcentajes de polvo de caucho utilizados
- Los valores de Jnr aumentaron en un 30% cuando se aumentó la separación entre platos del Reómetro de Corte Dinámico de 1[mm] a 2[mm], probablemente debido a que el tamaño de las partículas del polvo de caucho utilizado supera el 25% de la separación entre platos recomendada por las normas asociadas a la utilización del DSR (1[mm]) y la interacción entre platos altera los resultados del ensayo MSCR. Por lo tanto, se sugiere utilizar la separación entre platos de 2[mm] cuando el tamaño de las partículas de caucho supere los 0.25 [mm].
- En base a los resultados del análisis de repetibilidad realizado, se puede concluir que el proceso de modificación con caucho tiene una repetibilidad aceptable.
- En cuanto a los valores de la flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) obtenidos, existe una tendencia descendiente con la incorporación de polvo de caucho, lo que indica una mejora en su desempeño a alta temperatura. Asimismo, las regresiones realizadas a la curva se ajustan apropiadamente a los resultados, lo que permite obtener estimaciones precisas de las concentraciones necesarias para lograr las categorías de la clasificación por clima deseadas. En base a estas regresiones, se determinó que las concentraciones necesarias para obtener las categorías “Very Heavy” y “Extremely Heavy” son 3% y 5.5% de polvo de caucho, respectivamente.
- Cuando se incorpora un 3% de polvo de caucho al ligante previamente modificado con 7% de ablandador, los valores de Jnr logran disminuir de 1.92 [kPa⁻¹] a 0.78 [kPa⁻¹] y, por ende, pasar de una categoría “Heavy” a una categoría “Very Heavy” según la clasificación por clima de la norma AASHTO M332-14. En cuanto a la caracterización PG asociada, se logra una clasificación PG 64-28, mejorando el desempeño a alta temperatura en 7.2[°C] (un grado PG) y manteniendo el desempeño a baja temperatura que presentó el ligante asfáltico previo a la modificación con polvo de caucho.

- Cuando se incorpora un 5.5% de polvo de caucho al ligante previamente modificado con 7% de ablandador, los valores de J_{nr} logran disminuir de $1.92 \text{ [kPa}^{-1}\text{]}$ a $0.46 \text{ [kPa}^{-1}\text{]}$ y, por ende, pasar de una categoría “Heavy” a una categoría “Extremely Heavy” según la clasificación por clima de la norma AASHTO M332-14. En cuanto a la caracterización PG asociada, se logra una clasificación PG 70-28, mejorando el desempeño a alta temperatura en dos grados PG y manteniendo el desempeño a baja temperatura que presentó el ligante asfáltico previo a la modificación con polvo de caucho.
- Los resultados obtenidos para el caso del desempeño a baja temperatura no son los esperados, dado que se tienen antecedentes de que el polvo de caucho utilizado en este estudio logra mejorar el desempeño a baja temperatura hasta en dos grados PG cuando se está en ausencia del aditivo ablandador (Schilling J., 2018). En este sentido, el hecho de que el desempeño a baja temperatura sufra una leve o casi nula mejora con la incorporación de polvo de caucho al ligante asfáltico, deja en evidencia algún tipo de interacción entre el aditivo ablandador y las partículas de caucho.
- La adición de polvo de caucho permite aumentar el Índice de Temperatura Útil (ITU) del ligante asfáltico previamente modificado con ablandador, lo que le confiere un mejor desempeño y compatibilidad con lugares de emplazamiento en zonas climáticas en las que existe un cambio más drástico en la temperatura del pavimento. De esta manera, es posible afirmar que la incorporación de polvo de caucho permite disminuir la susceptibilidad térmica del ligante asfáltico.

A modo de recomendación, se debe procurar que las condiciones de temperatura, tiempo de mezclado y velocidad de mezclado se mantengan, en lo posible, lo más cercanas a los valores previamente definidos, ya que una pequeña variación en cualquiera de las variables mencionadas puede significar un cambio importante en las propiedades reológicas del ligante asfáltico resultante.

Asimismo, sería de gran importancia que futuras investigaciones se enfoquen a estudiar la interacción que existe entre el ablandador y el polvo de caucho, y la manera en que ésta influye en las propiedades reológicas del asfalto modificado y su desempeño tanto a alta como a baja temperatura.

Por otro lado, ante la necesidad de obtener resultados precisos, es relevante estudiar más a fondo la posibilidad de que el uso de un tamaño de partículas de caucho superior a 0.25 [mm] genere alteraciones en los resultados cuando se utiliza una separación de platos de 1 [mm] en el Reómetro de Corte Dinámico. De comprobarse dicha alteración, sería recomendable considerar una futura modificación de la normativa vigente en la cual se considere una separación entre platos acorde a la granulometría del polvo de caucho utilizado.

Es trascendental seguir investigando el efecto del polvo de caucho en ligantes asfálticos, considerando las solicitaciones de carga y condiciones climáticas del lugar de emplazamiento a nivel país, así como también, elaborar un manual de empleo de caucho en mezclas asfálticas para Chile, que no sólo indique las condiciones de temperatura y tiempo de mezclado, sino que también establezca límites para el tamaño de partículas y concentración del polvo de caucho a utilizar.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se puede apreciar que el polvo de caucho tiene un efecto positivo en las propiedades del ligante asfáltico, logrando aumentar su resistencia al ahuellamiento, fatiga y agrietamiento térmico, y disminuir su susceptibilidad térmica.

6 REFERENCIAS

- AASHTO M323. (2012). *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. 444 N. Capitol St., NW, Suite 249, Washington, DC.
- AASHTO M332. (2014). *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) Test*. 444 N. Capitol St., NW, Suite 249, Washington, DC.
- AASHTO T350. (2014). *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. 444 N. Capitol St., NW, Suite 249, Washington, DC.
- AASHTO TP101. (2012). *Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*. 444 N. Capitol St., NW, Suite 249, Washington, DC.
- Arteaga L. (2017). *Comparación de Zonificaciones SUPERPAVE para Chile y Cuantificación de la Influencia del Cambio Climático en la Selección del Ligante Asfáltico*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (AMAAC). (2000). *Aditivos para Asfalto*. México.
- ASTM D2872. (2012). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D4402. (2015). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D6373. (2016). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D6521. (2018). *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D6648. (2008). *Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D6723. (2012). *Standard Test Method for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D7175. (2015). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D7405. (2015). *Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.

- Attia M. & Abdelrahman M. (2009). *Enhancing the Performance of Crumb Rubber-Modified Binders through varying the Interaction Conditions*. International Journal of Pavement Engineering, 10:6, 423-434.
- Beliczky L. & Fajen J. (2001). *Industria del Caucho, Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo (pp. 80.1-80.20)*. Madrid, España.
- Bennert T. (2013). Grade determination of crumb rubber-modified performance graded asphalt binder. No. C-08-20, *Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT)*. Rutgers University, Piscataway, NJ.
- Bermejo J., Gallego J. & Saiz L. (2014). *Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático*. Madrid, España.
- Butz T., Muller J. & Riebesehl G. (2012). Innovative Method for Producing Crumbed Rubber Modified Asphalt. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Istanbul.
- Campaña O., Galeas S. & Guerrero V. (2015). *Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores*. Revista Politécnica - Septiembre 2015, Vol. 36, No. 3.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (2007). *Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas*. Madrid, España.
- Dantas S., Farias M., Pais J. & Pereira P. (2006). *Influence of Crumb Rubber Gradation on Asphalt-Rubber Properties*. Proceedings of Asphalt Rubber Conference, pp. 2-14, Palm Springs, Calif, USA.
- Dantas S., Muniz M., Pais J. & Pereira P. (2003). Behaviour of Asphalt-Rubber Hot Mixes Obtained with High Crumb Rubber . *Proceedings of the Asphalt Rubber 2003 Conference, Brasilia, Brazil*.
- Delgadillo R. (2014). *Curso de Laboratorio Vial, Ingeniería Civil*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Delgadillo R., Segovia M., Wahr C., & Thenoux G. (2017). Zonificación Superpave para Chile. *Revista Ingeniería de Construcción Vol 32 N°1*.
- Departamento de Gestión Vial, Dirección de Vialidad. (2016). *Red Vial Nacional, Dimensionamiento y Características*.
- Dirección de Vialidad, MOP. (2017). *Manual de Carreteras, Volumen N°5, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción*. Santiago, Chile.
- Dirección de Vialidad, MOP. (2017). *Manual de Carreteras, Volumen N°8, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*. Santiago, Chile.
- Dirección de Vialidad, MOP. (2019). *Complemento N°1, Manual de Carreteras Vol. 8. "Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control"*, Santiago, Chile.
- Elizondo F., Salazar J. & Villegas E. (2010). *Análisis Reológico de Asfaltos Modificados*.
- Federación Española de la Recuperación y el Reciclaje (FER). (2013). *Experiencia española del Caucho NFU en las mezclas asfálticas*.
- Federal Highway Administration. (2001). *Superpave Mixture Design Guide*. Washington, DC.

- Fornai D., Sangiorgi C., Mazzotta F., Bermejo J. M. & Saiz L. (2016). A New Era for Rubber Asphalt Concretes for the Green Public Procurement in Road Construction. *1st European Road Infrastructure Congress*. Leeds, United Kingdom.
- Ghavibazoo A., Abdelrahman M. & Ragab M. (2013). *Effect of Crumb Rubber Modifier Dissolution on Storage Stability of Crumb Rubber-Modified Asphalt*. Transportation Research Record, no. 2370, pp. 109-115, National Research Council (U.S.).
- Golalipour A. (2013). *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders*. PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Heitzman M. (1992). *Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier*. Washington, D. C.: Transportation Research Record 1339.
- Huang B., Mohammad L., Graves P. & Abadie C. (2002). Louisiana Experience with Crumb Rubber-Modified Hot-Mix Asphalt Pavement. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, No.1789, 1-13.
- Laboratorio Nacional de Vialidad. (2017). *Curso Laboratorista Vial, Volumen IV*.
- Lee S.-J., Amirkhanian S., Putman B. & Kim K. (2007). Laboratory Study of the Effects of Compaction on the Volumetric and Rutting Properties of CRM Asphalt Mixtures. *Journal of Materials and Civil Engineering*, ASCE, Vol. 19, No.12, pp.1079-1089.
- Lei Y., Wang H., Fini E., You Z., Yang X., Gao J, Dong S. & Jiang G. (2018). Evaluation of the Effect of Bio-Oil on the High-Temperature Performance of Rubber Modified Asphalt. *Construction and Building Materials* 191, 692-701.
- Mandal T. & Bahia H. (2015). Effect of Crumb Rubber on Rheological Properties of Asphalt Binder and Aggregate Packing of Asphalt Mixtures. *Rubberized Asphalt. Asphalt Rubber 2015 Conference*. Las Vegas, Estados Unidos.
- Maxil R. & Salinas M. (2006). *Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros en el Asfalto*.
- Miranda H., Batista F., Neves J. Antunes M. & Fonseca P. (2006). *Asphalt Rubber Mixtures in Portugal: Fatigue Resistance*. 3rd European Pavement and Asset Management Conference, Portugal.
- National Cooperative Highway Research Program. (2017). *Relationship Between Chemical Makeup of Binders and Engineering Performance*.
- National Highway Institute. (2000). *Superpave Fundamentals Reference Manual*.
- Navarro F. J., Partal P., Martínez-Boza F. & Gallegos C. (2004). *Thermo-rheological Behaviour and Storage Stability of Groun Tire Rubber-Modified Bitumens*. Fuel 83, 2041-2049.
- Navarro F. J., Partal P., Martínez-Boza F. & Gallegos C. (2005). *Influence of Crumb Rubber Concentration on the Rheological Behavior of a Crumb Rubber Modified Bitumen*. Energy & Fuels, Vol. 19, No. 5.
- Organización Mundial de la Salud. (2013). *Lucha contra el Dengue*.
- Polambiente. (2017). *Catálogo de Productos*. Lampa, Chile.
- Potti J. (2004). Betún modificado con polvo de caucho de neumáticos fuera de uso. Otro tipo de reciclaje. *III Congresso Rodoviário Português*. Lisboa.

- Ramírez N. (2006). *Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en Mezclas Asfálticas en Caliente mediante Proceso Seco*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Rivano F. (2009). *El Cultivo de Caucho Natural*. Cirad-UR 64, Sistemas Sostenibles de Cultivos Perennes.
- Salomón D. (2016). *Asfaltos Modificados, Evaluación y Gestión Vial*.
- Schilling J. (2018). *Modificación con Caucho Reciclado de Neumático de un Ligante CA-24 y Caracterización mediante Ensayos de Desempeño*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Shen J., Amirkhanian S., Xiao F. & Tang B. (2008). *Influence of Surface Area and Size of Crumb Rubber on High Temperature Properties of Crumb Rubber Modified Binders*. Construction and Building Materials 23, 304-310.
- Singh D., Kumar P. & Jagadeesh A. (2018). *Influence of Particle and Interaction Effects of Different Sizes of Crumb Rubber on Rheological Performance Parameters of Binders*. J. Mater. Civil Eng. 30(5).
- Teymourpour P., Hanz A., Mandal T., Bahia H. & Rizzutto S. (2016). *Effect of Parallel Plate Gap Height on Repeatability in DSR Measurements of Crumb-Rubber Modified Binders*. Journal of Materials in Civil Engineering 28 (8), 04016047.
- Transportation Research Board. (2010). Development in Asphalt Binder Specification. *Transportation Research Circular Number E-C147*.
- Vázquez I. (2010). *Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros en los Asfaltos*.
- Viman L., Nordgren T. & Wendel M. (2012). Evaluation of Asphalt Rubber in Cold Climate. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Istanbul.
- Witoszek B., Hernández F., Benito C., & Alonso M. (2004). Diseño y desarrollo de un aglomerado asfáltico con polvo de caucho procedente del reciclado de los neumáticos usados incorporado por Vía Seca. *VI Congreso Nacional de Firms, León, España*.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO 1: ABLANDADORES

7.1.1 Tipos de ablandadores

Las propiedades de los ablandadores y su efecto modificador en los ligantes asfálticos, varía significativamente dependiendo de su fuente, composición y técnica de refinación. Este tipo de aditivos se pueden clasificar en tres categorías principales:

7.1.1.1 Aceites en base a petróleo

Los lubricantes corresponden al derivado del petróleo crudo al cual ya se le han eliminado los componentes más ligeros en la torre de destilación atmosférica (como lo son el gas, gasolina y diesel, entre otros). El aceite contiene componentes parafínicos, nafténicos y aromáticos, los cuales son separados por un disolvente de las moléculas aromáticas.

La composición química de este tipo de productos corresponde a la asociación de átomos de hidrógeno y carbono (hidrocarburos). La disposición de estos átomos es la que determina si el aceite es aromático, nafténico o parafínico, y la *Figura A- 1* muestra cada una de ellas.

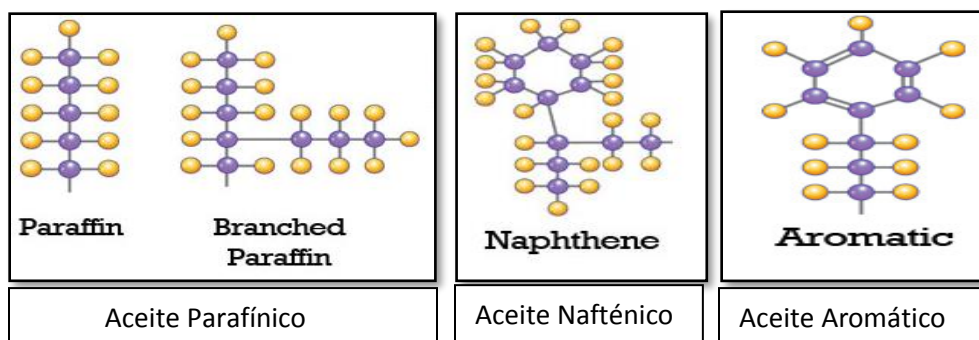


Figura A- 1: Estructura química de aceites parafínicos, nafténicos y aromáticos, Elaboración propia.

7.1.1.1.1 Aceites parafínicos

El aceite parafínico, en particular, contiene al menos un 18% aromático con un peso específico de 0.874 y su estructura química es recta o ramificada. Estos aceites contienen ceras que dan como resultado una mayor viscosidad a bajas temperaturas; durante el proceso de refinación, se eliminan los alcanos normales o ceras, el aceite se enfría hasta el punto donde éstas se solidifican y luego se filtran.

7.1.1.1.2 Aceites nafténicos

El aceite nafténico puede tener una estructura de anillos simple o compleja, que indica la proporción hidrógeno/carbono. Tiene un peso específico de 0.937 y un contenido aromático del 44%. Estos aceites ofrecen excelentes propiedades de solvencia y fluidez a temperatura fría.

7.1.1.1.3 Aceites aromáticos

El aceite aromático puede obtenerse a partir de procesos de producción parafínicos o nafténicos, en donde éste es extraído con solvente y luego es recuperado por destilación. Su estructura química contiene un anillo insaturado condensado estable de seis carbonos, posee el

mayor peso específico (0.97) y el mayor contenido de aromáticos correspondiente a un 70%. Los aromáticos tienen buena propiedad de solvencia, pero una estabilidad de oxidación relativamente pobre. Bio-aceites

Surgen como alternativa a los aceites en base a petróleo debido al incremento en el precio de estos últimos y la disminución de las reservas de petróleo en Estados Unidos. De esta manera, se entiende como un material renovable, amigable con el medio ambiente, que proporciona seguridad energética y resulta conveniente en términos económicos.

Estudios realizados, concluyen que la adición de bio-aceite a ligantes asfálticos, mejora su desempeño a baja temperatura, pero compromete su resistencia a alta temperatura. De ahí, es que surge la propuesta de mezclar bio-aceite con ligantes asfálticos modificados con polímeros tradicionales.

De acuerdo con el departamento de agricultura de Estados Unidos, los aceites vegetales pueden ser clasificados en tres categorías: aceites principales, aceites menores y aceites no comestibles.

- Los aceites principales son aquellos conocidos para el consumo humano o animal, como lo son aceites en base a: soya, palma, girasol, coco, oliva.
- Los aceites menores tienen el mismo uso, pero en una escala de producción más baja en comparación con los aceites principales, como lo son aceites en base a: semilla de mango, cacao en grano, semilla de uva, etc.
- Los aceites no comestibles se utilizan en aplicaciones industriales como para la fabricación de jabones, pinturas, barnices, plásticos, etc.

La estructura básica de grasas y aceites es un compuesto químico llamado “Triglicérido”, formado por una molécula de glicerol y tres ácidos grasos. El glicerol es un alcohol con tres grupos hidroxilos (-OH), mientras que los ácidos grasos son ácidos orgánicos monocarboxílicos (hidrocarburo con un grupo carboxilo -COOH en un extremo). Dependiendo de la longitud de la cadena de carbono que compone el ácido graso, la grasa resultante puede ser líquida (aceite) o sólida. La estructura de cada uno de estos compuestos se muestra en la *Figura A- 2*.

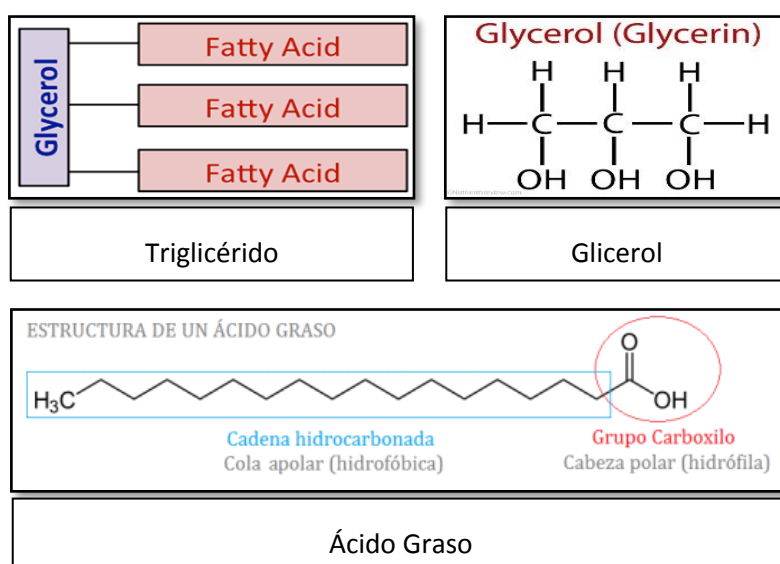


Figura A- 2: Estructura triglicérido, glicerol y ácido graso, Elaboración propia

7.1.1.2 Aceites en base a residuos refinados

Este tipo de aceite corresponde a la reutilización de aquellos que han sido usados en ciertas aplicaciones como lo son fábricas, automóviles, casas, etc., por lo tanto, su consumo resulta beneficioso en términos financieros y ambientales. Los principales son: residuos de aceites lubricantes, residuos de aceite de motor y residuos de aceite de cocina.

Estudios realizados, indican que:

- Los residuos de aceites lubricantes pueden ser usados como aditivos ablandadores sin afectar el desempeño de ligantes asfálticos, sin embargo, también presentan algunas desventajas.
- Los residuos de aceite de motor son modificadores económicos utilizados para aumentar el rango del grado PG, pero que incrementan significativamente la tasa de oxidación de los ligantes asfálticos.
- El aceite de cocina puede polimerizarse para ser usado como un aditivo en ligantes asfálticos, logrando reducir el PG dado a su mayor resistencia al agrietamiento térmico. Sin embargo, existe una menor resistencia al ahuellamiento.

7.1.2 Efecto de aceites ablandadores en ligantes asfálticos

Las investigaciones enfocadas directamente al estudio del efecto de aceites ablandadores en ligantes asfálticos son escasas, sin embargo, se destaca una en particular realizada para obtener el grado de doctor en la Universidad de Wisconsin – Madison titulada: *“Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders”* (Golalipour A., 2013). En general, se espera que la mejora en las propiedades a baja temperatura del ligante modificado, tenga como resultado una reducción del agrietamiento térmico debido a la disminución de su rigidez y el aumento del valor m.

7.1.2.1 Plan de Experimentación

7.1.2.1.1 Materiales

7.1.2.1.1.1 Ligantes asfálticos

Se utilizan dos ligantes asfálticos:

- Flint Hills (FH) PG 64-22, que posee un contenido relativamente alto de asfaltenos.
- Valero (VA) PG 64- 22, que posee un contenido relativamente bajo de asfaltenos.

7.1.2.1.1.2 Aceites ablandadores

Se utilizan dos lotes de muestras para realizar los ensayos. El primero está compuesto por el ligante base (FH) y nueve tipos de aceites modificadores, cuyas propiedades se resumen en la *Tabla A- 1*. Cabe destacar que, BO-1 y BO-2 son obtenidos en base a plantas, mientras que RW-1 y RW-2 son residuos de aceite de motor y aceite de cocina, respectivamente.

El factor limitante en la selección de la dosificación del modificador es la pérdida del grado de desempeño a alta temperatura debido a la disminución en la rigidez como resultado del proceso de modificación. De esta manera, las cantidades finales de modificador a incorporar al ligante se seleccionaron tomando en cuenta que el grado PG de alta temperatura del ligante modificado fuera

similar al del ligante base. Los porcentajes requeridos para cada modificador se presentan en la *Tabla A- 1*.

Tabla A- 1: Aceites modificadores utilizados en estudio, Gopalipour A., 2013.

Base Binder	Description				
	Flint Heal & Valero PG 64-22				
Oil Modifiers		Physical Properties			
		Viscosity, cSt @ 40°C	API Gravity	Density, gr/cm3	Flash Point, °C
	Petroleum-Aromatic (PA)	2036	9.5	1.00	215
	Petroleum-Paraffinic (PP-1)	92.2	15	0.96	215
	Petroleum-Paraffinic (PP-2)	290	26	0.89	300
	Petroleum-Paraffinic (PP-3)	48000	16.8	0.95	345
	Petroleum-Naphthenic (PN)	264	21	0.93	215
	Bio-Oil (BO-1)	N/A	20	N/A	225
	Bio-Oil (BO-2)	N/A	19	N/A	235
	Bio-Oil (BO-3)	90.9	N/A	0.91	165
	Refined Waste (RW-1)	65.3	32.8	N/A	N/A
	Refined Waste (RW-2)	N/A	N/A	N/A	N/A
Aging Levels	Original (OB), RTFO, PAV				
Mixing Condition	High Shear (HS)				

Tabla A- 2: Porcentajes requeridos para cada modificador, Gopalipour A., 2013.

Oil Modifier	Content (% wt)	True Grade (°C)
PA	10	58.60
PP-1	6	58.43
PP-2	9	58.55
PN	7	59.07
BO-1	5	59.87
BO-2	6	58.58
BO-3	4	59.45
RW-1	5	58.22
RW-2	4	58.64

7.1.2.1.2 Proceso de modificación

En este estudio se utiliza un mezclador de alto corte para garantizar una dispersión adecuada de los líquidos más pesados dado al flujo vigoroso que produce. La velocidad se mantuvo constante a aproximadamente 5000 rpm, que corresponde a la velocidad máxima posible sin que se derrame el material.

La temperatura de mezclado también se seleccionó cuidadosamente, ya que mezclar a bajas temperaturas puede no lograr la homogeneización deseada debido a la alta viscosidad del ligante base, mientras que mezclar a temperaturas muy altas puede conllevar a un envejecimiento excesivo del ligante. A partir de esto, se seleccionó una temperatura de mezcla de $150 \pm 5^\circ\text{C}$ en la que las viscosidades eran lo suficientemente bajas.

En cuanto al tiempo de mezclado, ensayos previos demostraron que el cambio en los valores $G^*/\sin\delta$, con el incremento del tiempo de mezclado, son leves. De esta manera, se considera innecesario someter al ligante a tiempos de mezclado muy largos dado el envejecimiento asociado a las altas temperaturas por lo que, en primera instancia, se considera prudente un tiempo de mezclado de 30 minutos.

7.1.2.2 Evaluación del efecto del aceite en el desempeño

7.1.2.2.1 Desempeño a alta temperatura

7.1.2.2.1.1 Ensayo DSR

Para evaluar el desempeño a alta temperatura de los ligantes modificados, se consideran los resultados del ensayo DSR para cada uno de ellos, los cuales se presentan en la *Figura A- 3*.

Como se puede apreciar, la adición del modificador efectivamente disminuye las propiedades del ligante a alta temperatura. Además, el criterio de alta temperatura (1 kPa), para todos los ligantes, se cumple a una temperatura de 58°C, y la dosificación de cada uno de ellos se determinó como aquella que reduce el grado PG del ligante base en sólo 6°C, es decir, un grado PG.

También queda en evidencia el efecto de los diferentes aceites en las propiedades mecánicas del ligante a altas temperaturas, donde el aceite RW-1 es el más efectivo reduciendo un grado PG con una dosificación de sólo el 4%. Mientras tanto, el aceite aromático es el menos efectivo ya que necesita una dosificación del 10% para lograr la misma disminución de desempeño.

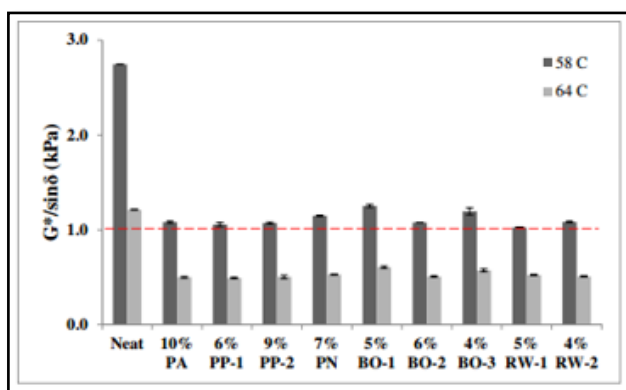


Figura A- 3: Resumen del grado PG de alta temperatura, Golalipour A.,2013.

En la *Figura A- 4* se aprecia el efecto de las distintas dosificaciones en los tipos de aceite sobre el comportamiento a altas temperaturas del ligante asfáltico en estado original. Estos resultados confirman que el efecto en el desempeño a alta temperatura del ligante es más significativo con el incremento del contenido de modificador, y que, además dicho efecto es diferente según el tipo de aceite utilizado. Por ejemplo, para una dosificación del 5%, el bio-aceite reduce el $G^*/\sin\delta$ del ligante base en un 25% más que el aceite aromático. También se podría decir que existe una relación exponencial entre el contenido de aceite y la rigidez de los ligantes modificados.

Luego, se sometieron las muestras a envejecimiento primario, para investigar sobre el efecto del modificador en el envejecimiento. Los resultados del ensayo DSR se presentan en la *Figura A- 5*.

Como se puede apreciar, la dosificación seleccionada para cada aceite también satisface el criterio para ligantes con envejecimiento primario a 58°C.

La comparación de la *Figura A- 3* y *Figura A- 5*, puede revelar que la susceptibilidad al envejecimiento del ligante base cambiará debido a la incorporación de aditivos. En la *Figura A- 6* se busca calcular la susceptibilidad al envejecimiento primario y en estado original, como un índice de envejecimiento.

Estos resultados muestran que el endurecimiento por envejecimiento cambia cuando el ligante es modificado con aditivos; lo cual varía para diferentes aceites. La diferencia en el índice de envejecimiento para los distintos aceites proviene de su diferente composición química:

- Los bio-aceites muestran la mayor susceptibilidad al envejecimiento, lo cual puede estar relacionado al mayor contenido volátil en este tipo de aceites.
- El endurecimiento por envejecimiento del ligante base permanece constante cuando es modificado con aceite aromático o nafténico, mientras que aumenta cuando se modifica con aceites parafínicos.
- La menor susceptibilidad al envejecimiento se observó para los aceites en base a residuos refinados.

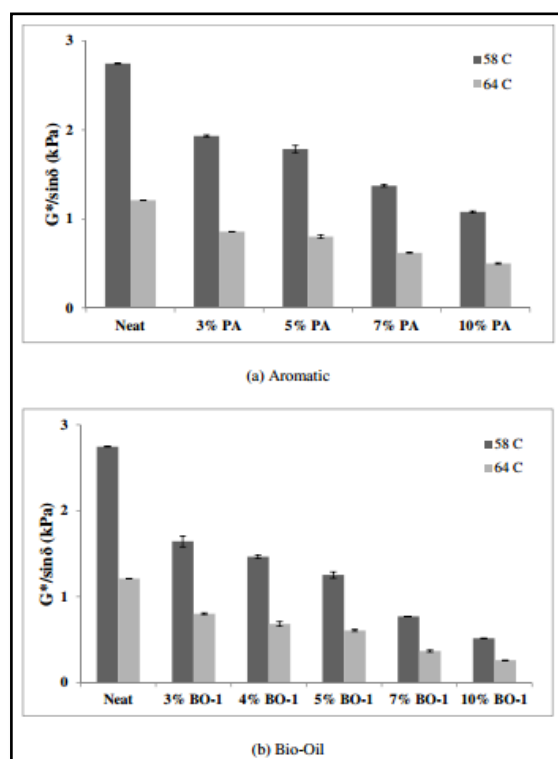


Figura A- 4: Resumen grado PG de alta temperatura para diferentes porcentajes de aceite, Golalipour A., 2013.

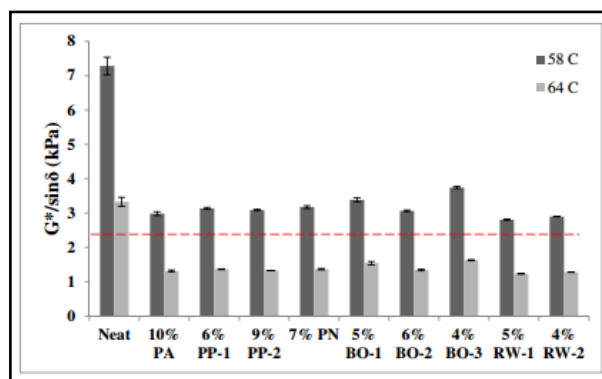


Figura A- 5: Resumen del grado PG de ligantes con envejecimiento HPDR, Golalipour A., 2013.

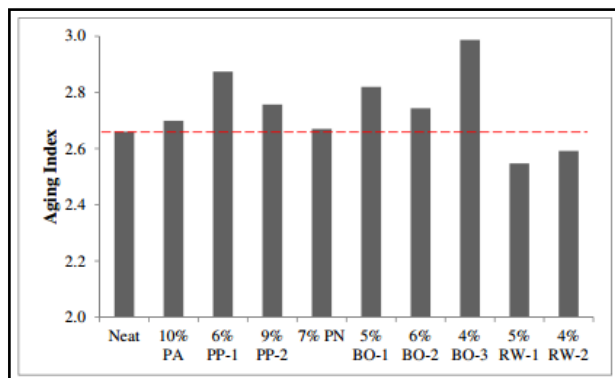


Figura A- 6: Índice de Envejecimiento de cada ligante asfáltico, Golalipour A., 2013.

7.1.2.2.1.2 Ensayo Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Los resultados de este ensayo se presentan en la *Figura A- 7*, donde se aprecia que la modificación con aceite tiene un efecto perjudicial sobre la resistencia al ahuellamiento ya que reduce la rigidez del ligante. También se puede ver que algunos de los bio-aceites muestran un rendimiento ligeramente mejor al tener valores de J_{nr} más bajos en comparación a otros.

Otro punto importante por destacar es que la modificación con aceite no tiene ningún efecto en el porcentaje de recuperación, a diferencia de modificadores como polímeros que la incrementan significativamente.

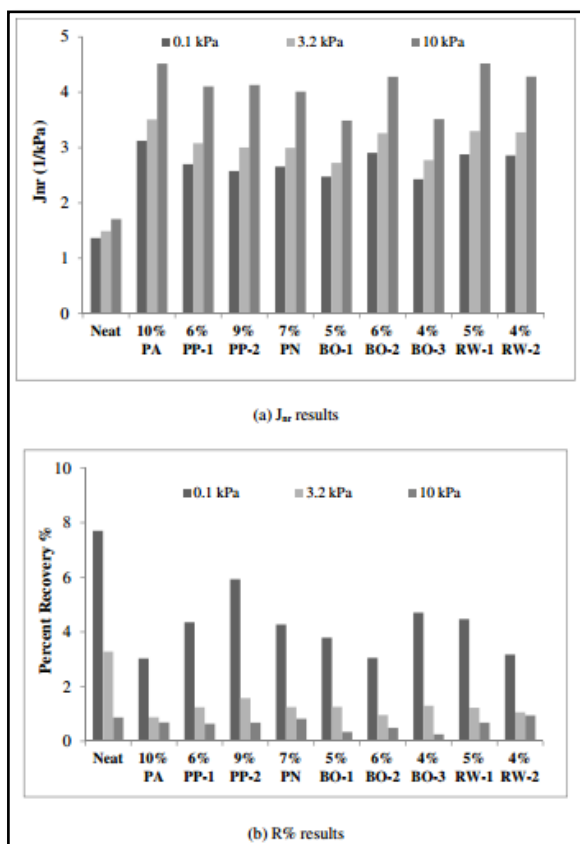


Figura A- 7: Resumen resultados MSCR para ligante base y ligantes modificados a su temperatura PG respectiva, Golalipour A., 2013.

7.1.2.2.2 Desempeño a temperatura intermedia

7.1.2.2.2.1 Ensayo DSR

Los resultados del ensayo DSR a temperatura intermedia de los ligantes modificados se resumen en la *Tabla A- 3*, los cuales confirman que todos los ligantes, tanto base como modificados, cumplen con el criterio de fatiga a su temperatura intermedia. También se puede ver que los valores de fracción viscosa están en un rango similar. Algunos de estos aceites como RW-1 y RW-2 reducen la rigidez del ligante con envejecimiento secundario, lo cual es beneficioso para la vida de fatiga.

7.1.2.2.2.2 Barrido de amplitud lineal (LAS)

El resumen de los resultados del barrido de amplitud lineal se presenta en la *Figura A- 8* y muestran que la mayoría de los aditivos aumentan la vida de fatiga y mejoran la resistencia a diferentes niveles de tensión. El ligante modificado con aceite parafínico PP-1 muestra el mejor rendimiento y es seguido por los aceites PN, RW-1 y BO-1.

Tabla A- 3: Resultados temperatura intermedia para ligantes modificados con aceite, Golalipour A., 2013.

Asphalt type	Oil Modifier type	Intermediate temperature (PAV aged)	
		Temp. (°C)	$ G^* \sin \delta$ (MPa)
FH (PG 64-22)	N/A	25	3.25
	PA	22	3.72
	PP-1	19	3.53
	PP-2	19	3.05
	PN	19	3.20
	BO-1	19	3.93
	BO-2	19	3.30
	BO-3	19	3.85
	RW-1	19	2.85
	RW-2	19	1.97

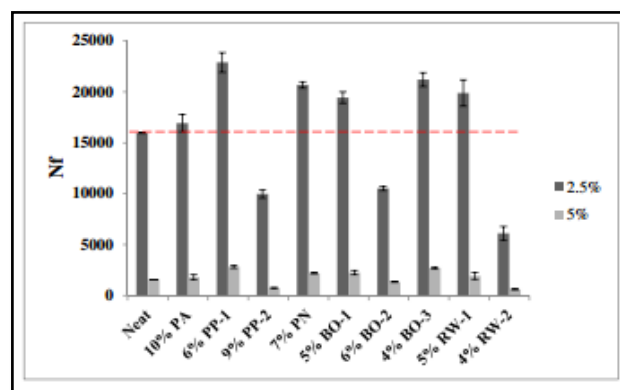


Figura A- 8: Resultados ensayo LAS a 25°C, Golalipour A., 2013

7.1.2.2.3 Desempeño a baja temperatura

7.1.2.2.3.1 Ensayo BBR

Los resultados del ensayo BBR para el ligante base y los ligantes modificados con envejecimiento secundario (PAV), se presentan en la *Figura A- 9*. Se puede inferir que la

modificación con aceite puede disminuir la rigidez y aumentar el valor m significativamente, lo cual resulta muy beneficioso para mejorar el desempeño a bajas temperaturas del ligante asfáltico. Se puede ver que, exceptuando el aceite aromático, todos los demás modificadores mejoran el desempeño a baja temperatura en un grado ya que se satisfacen los criterios de rigidez y de valor m a -18°C .

Aunque el aceite aromático disminuyó el grado PG de alta temperatura en un grado, no mejoró el desempeño a baja temperatura dado que no se cumple el criterio de rigidez. Esto se puede explicar por la alta susceptibilidad al envejecimiento luego del PAV, por lo tanto, aumentó la rigidez significativamente.

Asimismo, el efecto del envejecimiento se vuelve más claro con el aceite BO-1 que posee el índice de envejecimiento más alto entre todos los aceites; presenta la rigidez más baja a alta temperatura, pero a baja temperatura, ocupa el octavo lugar entre los ligantes estudiados debido a su alto nivel de endurecimiento por envejecimiento. Cabe destacar que, este tipo de aceite tiene uno de los valores m más altos, lo que indica una alta velocidad de relajación del esfuerzo debido a la contracción térmica.

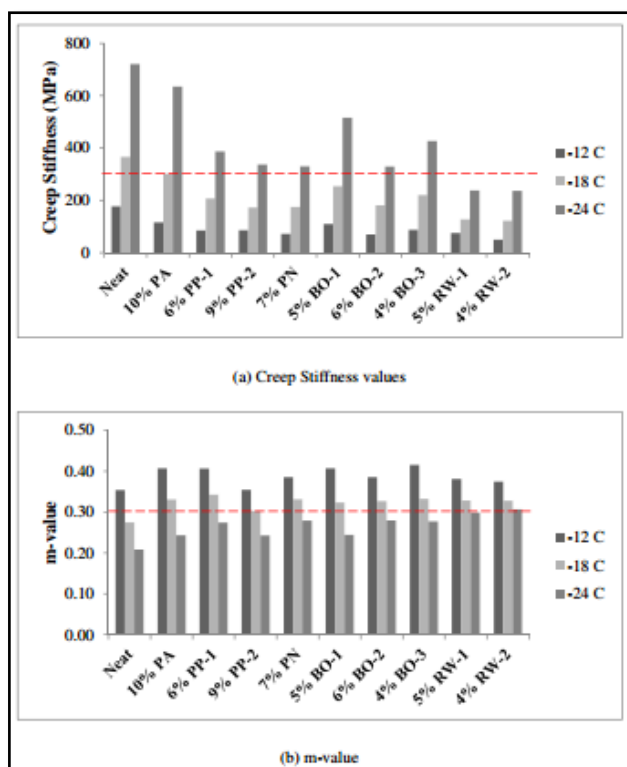


Figura A- 9: Resultados BBR a diferentes temperaturas, Golalipour A., 2013.

Otro factor importante por considerar es el efecto de la temperatura. Se puede ver que, al aumentar la temperatura en 6°C , la rigidez de los ligantes aumenta significativamente. Este tipo de comportamiento es más evidente para el aceite modificado BO-1 cuya rigidez aumenta en el doble cuando la temperatura baja de -18°C a -24°C . Esto indica que cuando la temperatura cae bruscamente, el esfuerzo térmico de este aceite también aumentará drásticamente, lo que hace que el pavimento tienda a agrietarse más fácilmente.

Se espera que la mejora en las propiedades a baja temperatura del ligante modificado con aceite tenga como resultado una reducción del agrietamiento térmico en el pavimento debido a la reducción general en la rigidez del ligante y al aumento del valor m .

Con el fin de comparar más claramente el efecto de la modificación del aceite sobre las propiedades a baja temperatura, la *Figura A- 10* muestra los resultados para algunos de los aceites estudiados, con el fin de analizar la influencia de la temperatura en el cambio de los parámetros medidos en el ensayo BBR, es decir, la rigidez y el valor m . Se aprecia claramente una tendencia similar a la observada a temperaturas más altas, en la cual la incorporación de aceites en el ligante disminuye la rigidez, así como también aumenta el valor m significativamente. Se cree que estos dos cambios son beneficiosos en términos del desempeño a baja temperatura del ligante. La adición de los aceites parafínicos, PP-1 y PP-2, y los aceites en base a residuos refinados (RW) tuvieron el efecto más significativo sobre la reducción de la rigidez de fluencia del ligante en comparación con los otros tres tipos de aceite. Sin embargo, considerando el valor m , se observa que los aceites PP-1 y BO-1 resultan ser los que presentan una mejora más significativa en la tasa del módulo de relajación.

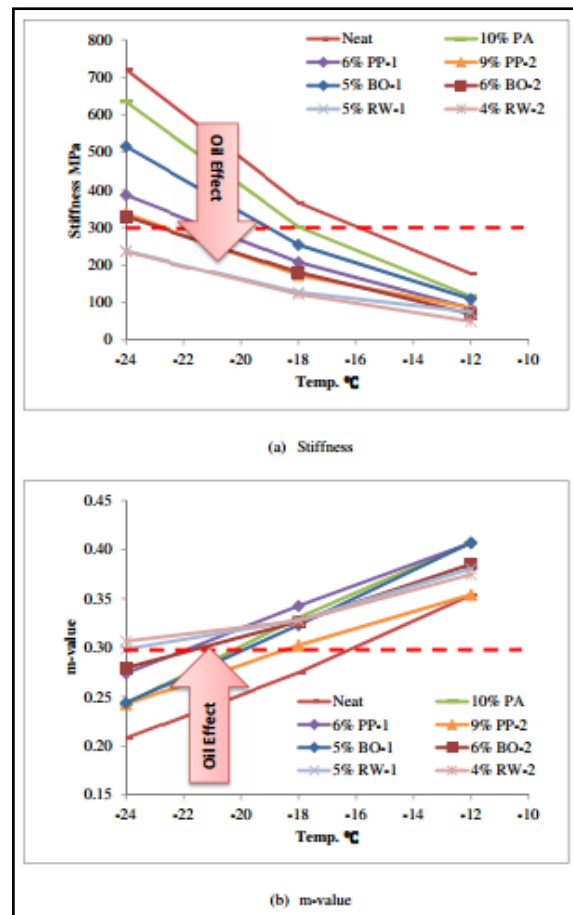


Figura A- 10: Efecto de la modificación con aceite en los resultados del ensayo BBR a diferentes temperaturas, Golalipour A., 2013.

7.1.2.2.3.2 Ensayo de fractura a baja temperatura (SENB)

En la *Figura A- 11* se presentan los resultados de este ensayo para el ligante base y los ligantes modificados con los diferentes aditivos. Los resultados demuestran que la modificación con aceite no mejora significativamente la carga máxima que el ligante es capaz de tomar dado a su menor rigidez. Esto también deja en evidencia la menor tenacidad del ligante modificado con aceite en comparación con el ligante base.

Por otro lado, se muestra que la adición de aditivo disminuye la rigidez a baja temperatura e incrementa la capacidad de deformación. Se observa que los aditivos aumentaron la resistencia a la fractura y la deformación hasta la falla. La carga de fractura no experimentó mayores cambios con la modificación con aceite, pero la energía de falla total y el desplazamiento a la carga máxima aumentaron significativamente.

Sin embargo, algunos aceites no pudieron mejorar las propiedades de fractura, probablemente debido a su mayor susceptibilidad al envejecimiento. Dado que el ensayo se realizó con material envejecido con PAV, la rigidez de algunos ligantes modificados con aceite aumentó enormemente, lo cual afectó su comportamiento dúctil.

En general, estos resultados indican una posible mejora en el desempeño a baja temperatura al agregar aceite (generalmente residuos refinados y basados en petróleo parafínico) debido al hecho de que la modificación con este tipo de modificador disminuye la rigidez del ligante y mejora su comportamiento dúctil. Por lo tanto, se concluye que el aceite resulta ser un buen candidato para mejorar las propiedades de baja temperatura, sin embargo, el tipo de aceite debe seleccionarse de manera óptima para limitar el efecto adverso sobre el rendimiento a altas temperaturas y la susceptibilidad al envejecimiento.

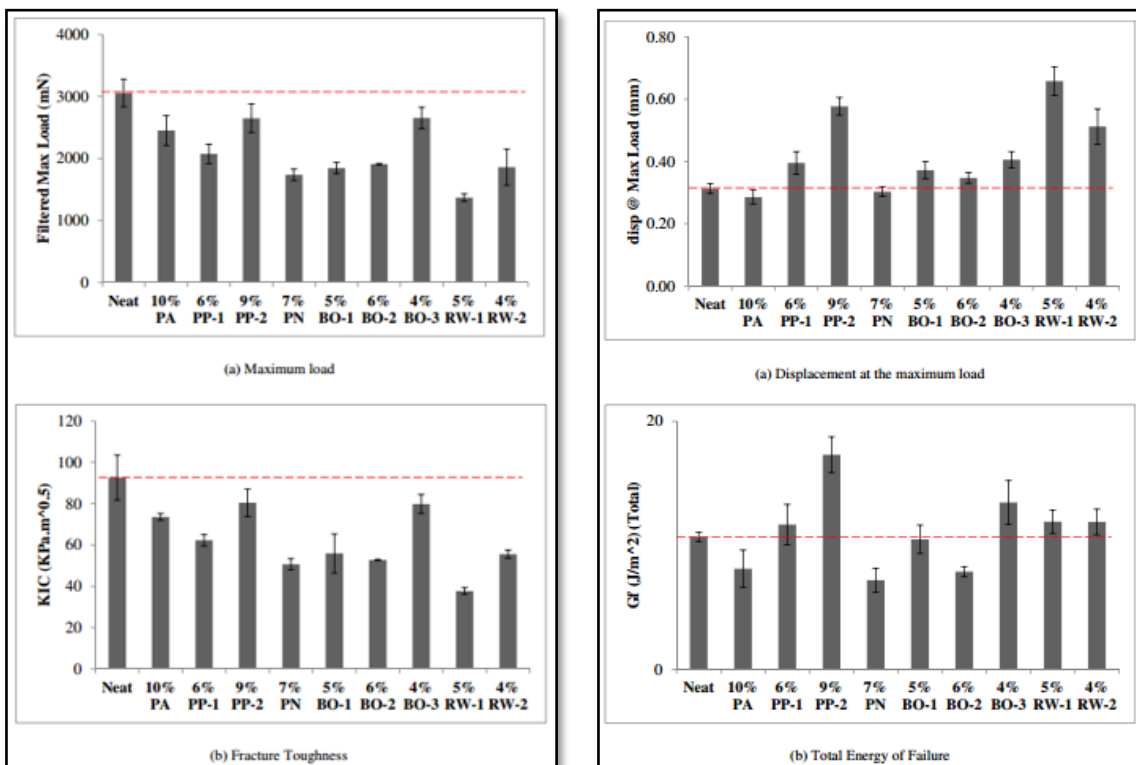


Figura A- 11: Resultados ensayo SENB a -12°C, Gopalipour A., 2013.

7.1.2.3 *Resumen de resultados*

- La modificación con aceite altera significativamente las propiedades reológicas del ligante asfáltico a diferentes temperaturas y frecuencias. Los resultados confirman que la modificación del aceite reduce la rigidez del ligante asfáltico, por lo tanto, afecta negativamente el desempeño a altas temperaturas y mejora el desempeño a baja temperatura.
- Los resultados de BBR mostraron que la adición de aceite reduce el módulo del ligante a bajas temperaturas de servicio, teniendo una mayor reducción si se utiliza un mezclador de alto corte.
- La modificación del aceite aumenta la movilidad molecular del ligante, por lo tanto, aumenta la susceptibilidad térmica y la dependencia del tiempo del material.
- El parámetro Superpave ($|G^*|/\sin\delta$) y el cumplimiento de la flexibilidad en fluencia no recuperable (J_{nr}) se emplearon para evaluar el rendimiento a alta temperatura de los ligantes. Los resultados muestran que la modificación del aceite es perjudicial para el rendimiento a altas temperaturas.
- La modificación con aceite afectó la susceptibilidad al envejecimiento del ligante, lo cual depende del tipo de aceite. Las diferencias se atribuyeron a la composición del aceite, lo que afecta a diferentes compuestos dentro del ligante base. Se observa un aumento en el endurecimiento por envejecimiento del ligante modificado con bioaceite, mientras que existe una disminución en el endurecimiento por envejecimiento cuando se incorpora aceite residual refinado.
- Los resultados indican que existe una relación lineal entre el contenido de aceite y el logaritmo de la rigidez. Análisis adicionales indican que esta relación lineal también se puede extender al valor m y al ángulo de fase.

7.1.2.4 *Conclusiones sobre el efecto de aceites ablandadores*

Este estudio indica que la adición de aceite podría cambiar el comportamiento reológico y térmico del ligante asfáltico. En base a los resultados, se concluye que la modificación con aceite puede mejorar las propiedades de baja temperatura del ligante debido a la reducción de la rigidez y al aumento del módulo de relajación. Los resultados también muestran que la modificación con aceite tiene un efecto positivo sobre la resistencia al agrietamiento del ligante en un amplio rango de temperaturas.

7.2 ANEXO 2: POLÍMEROS

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y la otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto, se produce una inversión de fases, estando la fase continua, constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos, como se mencionó anteriormente, es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas. Por su parte, la relación tensión/fatiga mostraría un comportamiento como el que se muestra cualitativamente en la *Figura A- 12*.

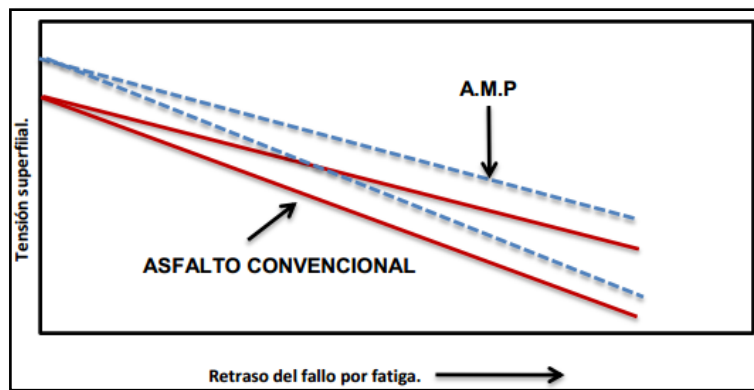


Figura A- 12: Relación tensión-fatiga en asfaltos convencionales y A.M.P, Vázquez I., 2010

7.2.1 Tipos de polímeros

7.2.1.1 Termo-endurecibles

Son cadenas de polímeros con enlaces altamente cruzados, que forman una estructura de red tridimensional. Dado que las cadenas no pueden girar ni deslizarse, estos polímeros poseen buena resistencia, rigidez y dureza, sin embargo, también tienen baja ductilidad, propiedades al impacto y una alta temperatura de transición vítrea.

Son polímeros que mediante la presión y la temperatura se reblandecen y pueden moldearse en su fase fluida una sola vez y antes de que la reacción de polimerización haya finalizado por completo. El producto final ya no se reblandece nuevamente por acción de la presión y la temperatura, dado que a elevadas temperaturas experimenta su descomposición. Una vez que han sufrido el proceso de calentamiento-fusión y formación-solidificación, se convierten en materiales rígidos que no vuelven a fundirse.

Ejemplos de este tipo de polímeros, se muestran en la *Figura A- 13*, y corresponden a:

- *Resina Epóxica*, utilizada comúnmente en pinturas y adhesivos
- *Poliuretano*, utilizado en espumas usadas principalmente como aislante térmico
- *Poliéster*, utilizado principalmente en la industria textil.

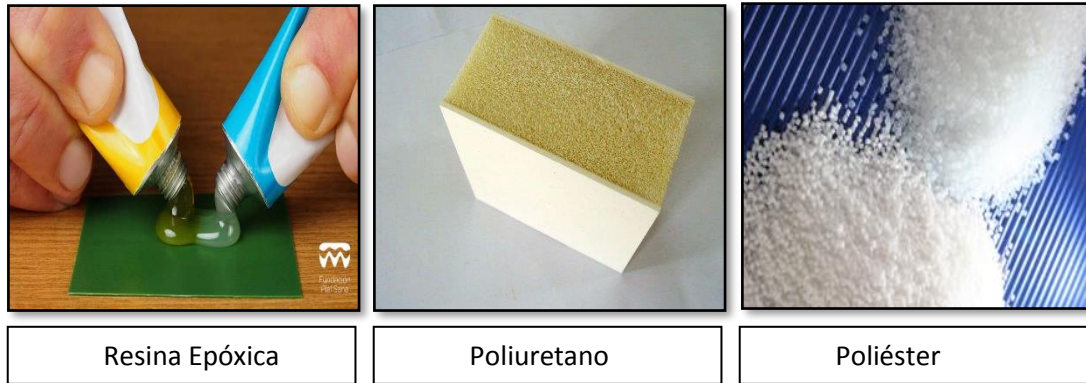


Figura A- 13: Ejemplos de polímeros termo-endurecibles, Elaboración propia.

7.2.1.2 Termoplásticos

Son aquellos materiales que están formados por polímeros que se encuentran unidos mediante fuerzas moleculares, formando estructuras lineales o ramificadas. En función del grado de las fuerzas intermoleculares que se producen entre las cadenas poliméricas, éstas pueden adoptar dos tipos diferentes de estructuras, amorfas o cristalinas, siendo posible la existencia de ambas estructuras en un mismo material termoplástico.

- Estructura Amorfa: Las cadenas poliméricas adquieren una estructura enredada y no pueden adoptar un estado de empaquetamiento compacto. Es la responsable directa de las propiedades elásticas de los materiales termoplásticos.
- Estructura Cristalina: Las cadenas poliméricas adquieren una estructura ordenada y compacta. Es la responsable directa de las propiedades mecánicas de resistencia frente a esfuerzos o cargas, así como la resistencia a las temperaturas de los materiales termoplásticos.

Si el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con estructuras amorfas, dicho material presentará una baja resistencia frente a cargas, pero una excelente elasticidad. Si, por el contrario, el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con una estructura cristalina, el material presentará gran resistencia frente a cargas y esfuerzos, pero una baja elasticidad volviéndose más frágil. De esta manera, encontramos dos tipos de polímeros termoplásticos:

7.2.1.2.1 Plastómeros

Al estirarlos fluyen sin recuperar su longitud inicial. Tienen deformación pseudo-plástica con poca elasticidad. Ejemplos de este tipo de termoplásticos, se muestran en la **Error! Reference source not found.**, y corresponden a:

- *Polietileno (PE)*: Es uno de los plásticos más comunes, el que es utilizado en todo tipo de bolsas, envases para alimentos, base para pañales desechables, etc.
- *Polipropileno (PP)*: Es uno de los plásticos con mayor crecimiento en los últimos años, el que es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones como empaque para alimentos, tejidos, equipos de laboratorio, entre otros.
- *Etileno-Vinil-Acetato (EVA)*: Es conocido como goma EVA y utilizado en juguetes, colchonetas, artículos para el hogar, etc.

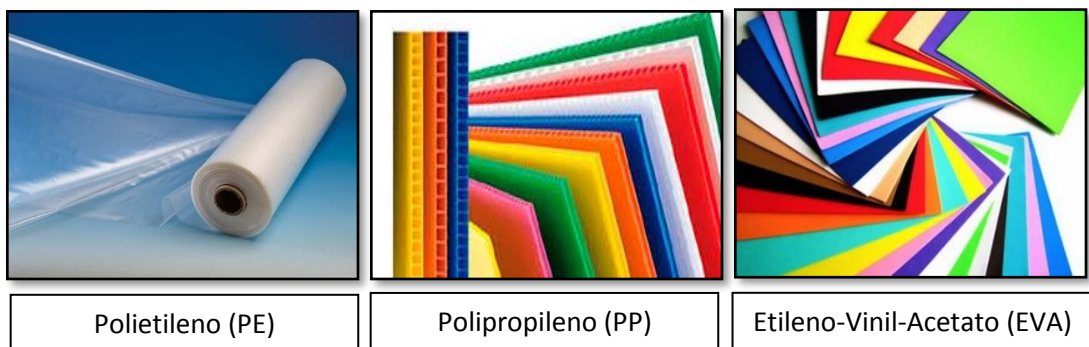


Figura A- 14: Ejemplos de Plastómeros, Elaboración Propia.

7.2.1.2.2 Elastómeros (o cauchos)

Tienen estructuras parcialmente reticuladas que le confieren propiedades elásticas. Un esfuerzo aplicado hace que se estiren y distorsionen los enlaces covalentes de las cadenas, permitiendo que éstas se alarguen elásticamente, por lo que, al eliminar el esfuerzo se recuperan de esta distorsión prácticamente de manera instantánea.

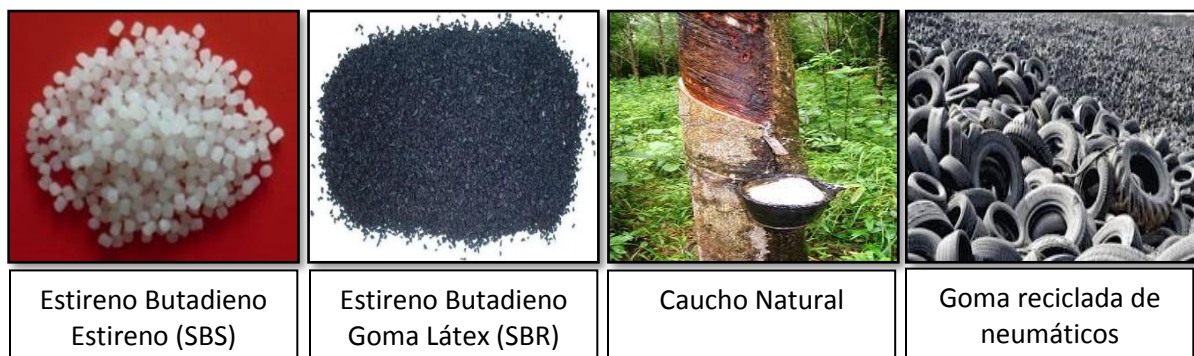


Figura A- 15: Ejemplos de Elastómeros, Elaboración propia.

Ejemplos de este tipo de termoplásticos, se muestran en la *Figura A- 15*, y corresponden a:

- Estireno Butadieno Estireno (SBS): Caucho duro que se utiliza como material de sellado y adhesivo en el proceso de fusión en caliente, además de usarse en la confección de suelas para zapatos, cubiertas de neumáticos, etc.
- Estireno Butadieno Goma Látex (SBR): Caucho sintético con mayor volumen de producción mundial, utilizado en la fabricación de cinturones, mangueras, guantes quirúrgicos, cubiertas de neumáticos, etc.
- Estireno Butadieno (SB): Copolímero transparente de alta resistencia al impacto, utilizado en productos de medicina, juguetes, entre otros.
- Poliisopreno (caucho, natural y sintético): Hidrocarburo elástico extraído a partir de la savia de varias plantas, pero que también puede ser producido sintéticamente. Es utilizado en la fabricación de guantes quirúrgicos, preservativos, suela de calzado, pero su uso mayoritario es en neumáticos, más del 50% de la producción mundial.
- Goma reciclada (de neumáticos): Posibles usos son la utilización en materiales de construcción, suelos de gimnasios o salas de juego, sistemas aislantes para vehículos, baldosas de caucho, canchas de césped artificial, etc.

7.2.2 Ventajas y desventajas del uso de polímeros en asfaltos

Las diferencias que existen entre asfaltos convencionales y asfaltos modificados con polímeros pueden apreciarse al comparar el desempeño de cada uno frente a diferentes factores que intervienen o influyen en el desempeño de la mezcla asfáltica. Múltiples investigaciones han demostrado que, para factores como permeabilidad, durabilidad, adhesión y susceptibilidad a volúmenes de tráfico y cambios climáticos, el asfalto modificado supera en todos los casos el desempeño de los asfaltos convencionales, a excepción del costo en donde obviamente se requiere de una inversión inicial superior.

Cabe destacar que, las mejoras obtenidas de la modificación con polímero dependen del grado de compatibilidad que exista entre el polímero utilizado y el ligante asfáltico a modificar. La primera diferencia significativa entre asfaltos modificados con polímeros compatibles e incompatibles se muestra en el envejecimiento; los asfaltos modificados compatibles presentan una mayor resistencia al envejecimiento, elevando la vida útil de un pavimento de dos a tres veces con un costo adicional de hasta un 25% sobre la mezcla asfáltica (Vázquez I., 2010).

Está comprobado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión en una amplia gama de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito, sin embargo, el incremento del volumen del tránsito y magnitud de las cargas, sumado a la necesidad de optimizar las inversiones provoca que, en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

Como se muestra en la *Figura A- 16*, la resistencia al ahuellamiento en asfaltos modificados mejora considerablemente en relación con el desempeño obtenido en el caso de asfaltos convencionales.

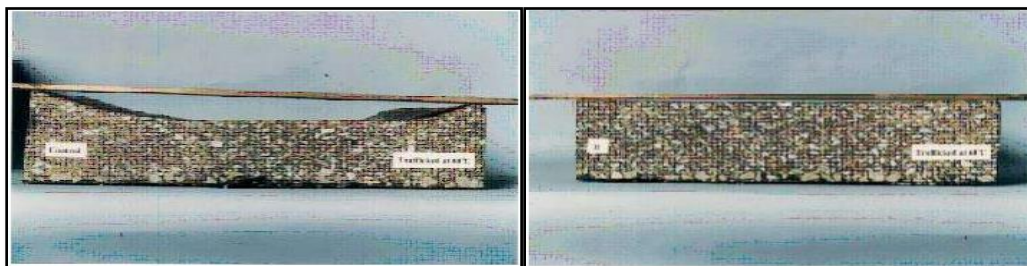


Figura A- 16: Ahuellamiento a 60°C en asfalto convencional y asfalto modificado, Vázquez I., 2010.

7.2.2.1 Ventajas del uso de polímeros en asfalto

Los asfaltos modificados con polímero presentan ventajas en diversos ámbitos en relación con el desempeño de asfaltos convencionales (Vázquez I., 2010), dentro de las cuales se pueden destacar:

7.2.2.1.1 Ventajas mecánicas

- Disminuyen la susceptibilidad a los tiempos de aplicación de carga.
- Aumentan la resistencia al ahuellamiento y agrietamiento en un rango más amplio de temperaturas, tensiones y tiempo de carga.
- Presentan mayor resistencia a la flexión en la cara inferior de las capas de mezclas asfálticas.
- Tienen una elevada resistencia mecánica, gran resistencia a la tracción, buen poder humectante y adhesión los agregados.

- Disminuyen la exudación del asfalto: por la mayor viscosidad de la mezcla, su menor tendencia a fluir y su mayor elasticidad.
- Presentan mayor elasticidad, debido a los polímeros de cadenas largas.
- Tienen mayor adherencia, debido a los polímeros de cadenas cortas.
- Mayor cohesión, ya que el polímero refuerza la cohesión de la mezcla.
- Mejor trabajabilidad y compactación, por la acción lubricante del polímero o de los aditivos incorporados para el mezclado.
- Presentan una mejor impermeabilización en los sellados bituminosos, pues absorbe mejor los esfuerzos tangenciales, evitando la propagación de las fisuras.
- Disminuyen el nivel de ruidos, sobre todo en mezclas abiertas.
- Permiten la reducción de hasta el 20% de los espesores por su mayor módulo.

7.2.2.1.2 Ventajas térmicas

- Disminuyen la susceptibilidad térmica.
- Disminuyen la fragilidad en climas fríos y aumentan la cohesión en climas cálidos.
- Varía su comportamiento de acuerdo con la temperatura en que se encuentren.
- Los elastómeros son deformables a temperatura ambiente.

7.2.2.1.3 Ventajas económicas

- El costo depende básicamente de su proceso de polimerización y la disponibilidad de los monómeros.
- Fácilmente disponible en el mercado.
- Reduce el costo de mantenimiento.

7.2.2.1.4 Ventajas en su vida útil

- Los asfaltos modificados con elastómeros se deterioran por la trituration o abrasión del agregado antes que por la falla del ligante asfáltico.
- El polímero elastómero proporciona una excelente resistencia al envejecimiento.
- Aumentan la vida útil de las mezclas asfálticas, aplazando trabajos de conservación.
- La rigidez de los asfaltos compuestos de látex, caucho natural, SBS y SBR ayudan a soportar los largos tiempos de carga sin deformaciones.

7.2.2.1.5 Ventajas físicas

- Mejoran la adherencia a los agregados.
- Mejoran el comportamiento tanto a bajas como a altas temperaturas, dado que el efecto principal que se obtiene al añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad – temperatura.
- Presentan un mayor intervalo de plasticidad.
- Tienen mayor cohesión.
- Presentan mayor resistencia a la acción del agua.

7.2.2.1.6 Ventajas ecológicas

- La mayoría de los polímeros están basados en un esqueleto de carbono por lo que son materiales orgánicos.

7.2.2.2 Desventajas del uso polímeros en asfalto

A pesar de las múltiples ventajas que presenta el uso de polímeros como modificadores del asfalto, existen ciertas desventajas que pueden ser limitantes a la hora de evaluar su factibilidad. De esta manera, se pueden destacar:

- Alto costo del polímero.
- Dificultades del mezclado: no todos los polímeros son compatibles con el asfalto base (existen aditivos correctores).
- Deben extremarse los cuidados en el momento de la elaboración de la mezcla.
- Los agregados no deben estar húmedos ni sucios.
- La temperatura mínima de distribución es de 145°C por su rápido endurecimiento.

Es evidente que la mayor desventaja corresponde al alto costo inicial del asfalto modificado, sin embargo, si se realiza un análisis del costos a largo plazo; se puede concluir que el elevado costo inicial se compensa con creces con la reducción del mantenimiento y el incremento de la vida útil del pavimento en cuestión (Maxil R. & Salinas M., 2006).

7.2.2.3 Diferencias entre el asfalto modificado con polímero y el asfalto convencional

A partir de lo anterior, se pueden destacar las siguientes diferencias entre asfaltos modificados con polímeros y asfaltos convencionales:

- Los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión, bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito, sin embargo, debido a la gran demanda de tráfico y condiciones climáticas, los asfaltos convencionales muchas veces no logran cumplir con las expectativas y se hace necesario recurrir a agentes modificadores.
- El ahuellamiento es un problema que no es posible eliminar incluso en asfaltos convencionales más duros.
- Una correcta selección del asfalto base, tipo de polímero, dosificación, elaboración y condiciones de almacenaje, permite que los asfaltos modificados con polímero logren un desempeño óptimo.

En la *Figura A- 17*, se muestra de manera cualitativa, la diferencia económica entre asfaltos convencionales y modificados con polímeros; se aprecia que a pesar de la mayor inversión inicial que presenta la modificación con polímeros, los costos de mantenimiento disminuyen considerablemente a partir de los primeros cinco años y durante el resto de la vida útil del pavimento.

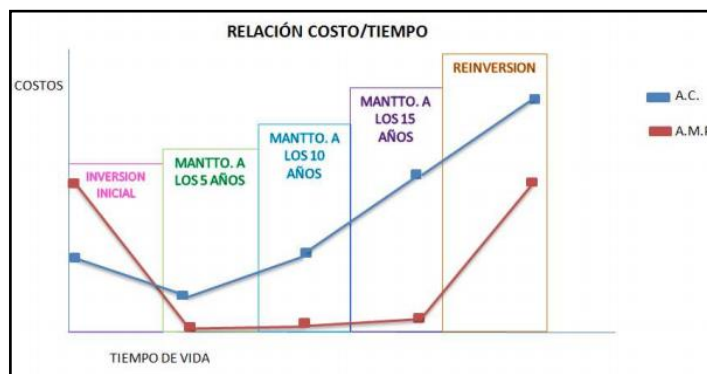


Figura A- 17: Relación costo/tiempo de asfaltos convencionales y modificados, Vázquez I., 2010.

7.3 ANEXO 3: EXPERIENCIA EN ESTADOS UNIDOS. “EFFECT OF CRUMB RUBBER ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ASPHALT BINDER AND AGGREGATE PACKING OF ASPHALT MIXTURES”

7.3.1.1.1 Plan de experimentación

7.3.1.1.1.1 Materiales

Se utiliza un ligante base con clasificación PG 64-22, el cual es modificado con dos tamaños de partículas de caucho diferentes (0.595 [mm] (o tamiz #30) y 0.075 (o tamiz #200)). Para cada tipo de tamaño de partículas, se utilizan tres concentraciones diferentes de polvo de caucho (10%, 15% y 20%) y dos tiempos de reacción (verde y reaccionado).

7.3.1.1.1.2 Preparación del asfalto modificado con caucho

Para el proceso de modificación se utiliza un mezclador de alto corte a una temperatura de $180 \pm 5^\circ\text{C}$. El ligante base se calienta previamente en horno a una temperatura de 150°C , para alcanzar el estado líquido; luego, utilizando un manto calefactor, se alcanza la temperatura deseada ($180 \pm 5^\circ\text{C}$). Posteriormente, se adiciona lentamente el polvo de caucho mezclando a una velocidad de 4000-4500 rpm durante el tiempo requerido en cada caso.

Los tiempos de reacción, verde y reaccionado, se determinaron midiendo la viscosidad a partir de un viscosímetro portátil a $180 \pm 2^\circ\text{C}$. El ligante verde corresponde al tiempo transcurrido antes de alcanzar la condición óptima identificada por la viscosidad más alta, ya que el ligante forma un compuesto homogéneo por la despolimerización parcial de las partículas de caucho, mientras que, el ligante reaccionado corresponde a la etapa posterior al “peak” de viscosidad. La *Figura A-18* muestra el cambio en la viscosidad de los ligantes a lo largo del tiempo.

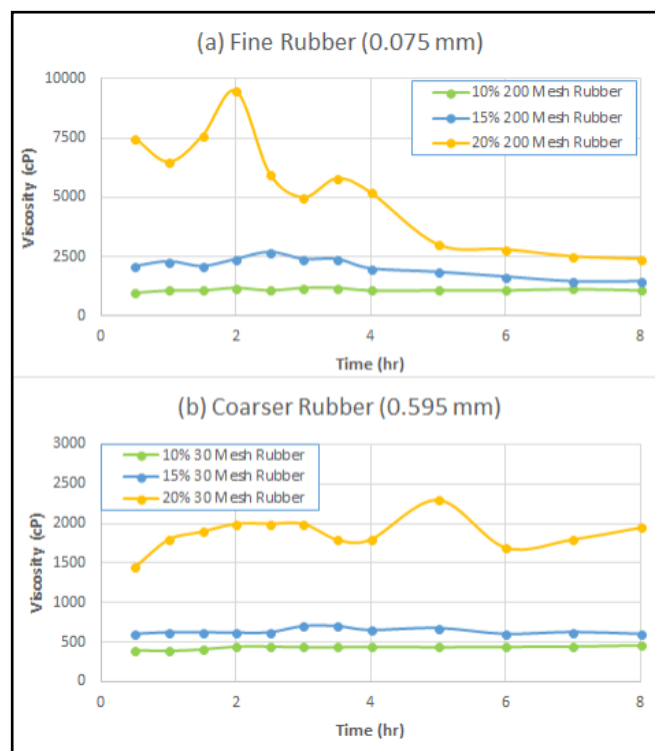


Figura A- 18:: Cambio de la viscosidad en función del tiempo de mezclado, Mandal T. & Bahia H., 2015.

A partir de los datos de viscosidad en el tiempo, es posible afirmar que para el caso de un contenido del 20% del caucho más grueso, las etapas verde y reaccionada se logran en un tiempo de reacción de 1 y 4 horas, respectivamente; mientras que, para el resto de los ligantes, las etapas verde y reaccionada se logran en un tiempo de reacción de 2 y 5 horas, respectivamente.

7.3.1.1.1.3 Ensayos

Los asfaltos modificados se analizaron a partir de los ensayos detallados en la *Tabla A- 4*, con el fin de determinar sus propiedades reológicas. Para medir viscosidad, se utilizó la geometría “Cup & Bob”, como un posible reemplazo del viscosímetro rotacional, debido a las preocupaciones relacionadas con la interferencia de las partículas de caucho que conllevan a mediciones inexactas o no representativas de la muestra (Mandal T. & Bahia H., 2015). El dispositivo de ensayo utilizado en este estudio tiene un diámetro interno de la “copa” (Rc) de 25 [mm] y un diámetro de “bob” (Rb) de 14 [mm], lo que se traduce en una separación de 5.5 [mm].

Tabla A- 4: Ensayos de laboratorio de los ligantes asfálticos, Mandal T. & Bahia H., 2015.

Test Method	Binder Type	Evaluation Parameters/Response	Test Temperatures (°C)	Testing Standard
Cup and Bob	Original	Viscosity	135	-NA-
Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	RTFO	J_{rr} Stress Sensitivity	70	AASHTO TP70
High Temperature (HT) Performance Grading	Original and RTFO	$G^*/\sin\delta$	2 Temperatures	AASHTO T315
Elastic Recovery (ER)-DSR	RTFO	Elastic Recovery	25	AASHTO TXXX-13
Linear Amplitude Sweep (LAS)	PAV	Fatigue	At Intermediate Temperature	AASHTO TP 101-12

Los ensayos de grado PG de alta temperatura y el MSCR se realizaron utilizando el sistema Superpave, de acuerdo con los estándares de prueba presentados en la **Error! Reference source not found.** El procedimiento para el ensayo de Recuperación Elástica sigue el método de ensayo estándar según la norma ASTM D7175-15, utilizando un reómetro de corte dinámico con la geometría de platos paralelos a una separación de 2 [mm]; la temperatura de ensayo se mantiene en 25°C durante 20 minutos, lo cual es necesario para alcanzar el equilibrio térmico; se aplica una velocidad de deformación constante de 0.023 [1/s] durante 2 minutos, seguido de un esfuerzo de corte nulo de forma constante durante 1 hora. La recuperación elástica al final de la etapa de relajación se calcula como se muestra en la *Ecuación 7-1*:

$$ER - DSR = \frac{\text{Recovered strain at the end of retastion step } (\varepsilon_2)}{\text{Strain at the end of loading step } (\varepsilon_1)}$$

El procedimiento para la prueba de barrido de amplitud lineal se rige según la norma AASHTO TP101-12, descrito con anterioridad en la *Sección 2.2.6.2*. Generalmente se realiza a una tensión de 2.5% y 5% para representar pavimentos delgados y gruesos, respectivamente. La vida de fatiga se calcula a partir de la *Ecuación 7-2*:

$$N_f = A \cdot (\gamma_{max})^{-B}$$

Donde N_f corresponde al número de ciclos hasta la falla por fatiga (es decir, volumen de tráfico), $\gamma_{m\acute{a}x}$ corresponde a la deformación máxima de tracción esperada bajo carga de tráfico, y A y B son los coeficientes representativos de la rigidez del material y la resistencia al daño.

7.3.1.1.2 Resultados

La Figura A- 19 muestra las viscosidades de todos los ligantes considerados en el estudio; la tendencia muestra que las viscosidades aumentan a mayor concentración de caucho y disminuyen con el aumento de la velocidad de corte. Las viscosidades para el caucho más grueso (0.595 [mm]), en todos los casos, son similares para los tiempos de reacción, pero diferentes para las velocidades de corte más bajas.

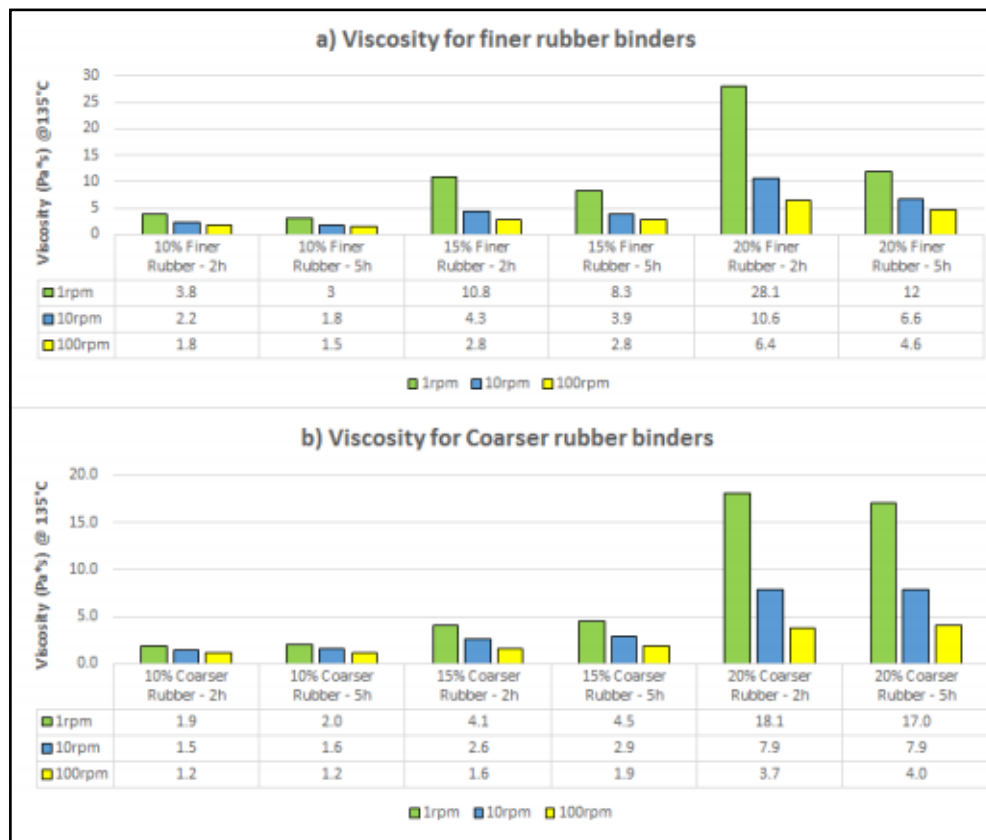


Figura A- 19: Viscosidades según velocidad de corte y contenido de caucho, Mandal T. & Bahia H., 2015.

Se determinó el grado PG de alta temperatura exacto de los ligantes en estado original y con envejecimiento HPDR. El parámetro $G^*/\sin\delta$ se obtuvo utilizando un reómetro de corte dinámico con una separación de platos de 2[mm]. La **Error! Not a valid bookmark self-reference.** muestra el grado PG exacto de cada ligante modificado con caucho; como era de esperarse, a mayor concentración de polvo de caucho, mayor es el grado PG resultante, debido al aumento de rigidez asociado al proceso de modificación.

El ensayo MSCR se realizó en ligantes modificados con envejecimiento HPDR, a una temperatura de 70 °C y niveles de esfuerzo de 0.1 [kPa] y 3.2 [kPa]. La norma AASHTO M332-14 evalúa el valor de J_{nr} a 3.2 [kPa] como una medida de resistencia al ahuellamiento; a partir de este valor, la efectividad de la modificación se basa en cuatro categorías: Standard ($S \leq 4$ [kPa⁻¹]), Heavy ($H \leq 2$ [kPa⁻¹]), Very Heavy ($V \leq 1$ [kPa⁻¹]) y Extremely Heavy ($E \leq 0.5$ [kPa⁻¹]).

Tabla A- 5: Grado PG exacto de los ligantes utilizados, Mandal T. & Bahia H., 2015.

Binder	10% - Green Binder	10% - Reacted Binder	15% - Green Binder	15% - Reacted Binder	20% - Green Binder	20% - Reacted Binder
0.075-mm Fine Rubber						
Unaged Binder	78.2	76.3	82	81.7	91.1	85.6
RTFO Aged Binder	78	73.6	78.7	78.8	89.8	83.2
0.595-mm Coarse Rubber						
Unaged Binder	77.2	76.7	80.4	81	87.3	87.5
RTFO Aged Binder	81	77.8	84.7	82.6	87.7	91.5



Figura A- 20: Porcentaje de recuperación y valores de Jnr según contenido de caucho y tiempo de reacción, Mandal T. & Bahia H., 2015.

La Figura A- 20 presenta el valor de Jnr y el Porcentaje de Recuperación (%R) para ligantes con envejecimiento HPDR; los resultados indican que todos los ligantes cumplen con la categoría “Heavy”, a excepción del ligante con 10% de caucho fino y tiempo de reacción de 5 horas. Para el

caso de los ligantes reaccionados, el porcentaje de recuperación fue menor y el valor de J_{nr} fue mayor.

El gráfico de Porcentaje de Recuperación vs J_{nr} , se utiliza para evaluar el grado de modificación elastomérica de asfaltos modificados; la norma AASHTO TP-70 proporciona criterios de especificación para el valor de J_{nr} como una función del porcentaje de recuperación. En la *Figura A- 21*, se presentan los resultados de los ensayos de ligantes con envejecimiento HPDR a niveles de esfuerzo de 3.2 kPa, los cuales indican que, para una combinación dada de tiempo de reacción y nivel de esfuerzo, todos los materiales responden de manera similar. Se aprecia que sólo los ligantes modificados con un 20% de caucho, tanto fino como grueso y para ambos tiempos de reacción, cumplen con el criterio de evaluación recomendado; por el contrario, los demás casos están graficados por debajo del límite estipulado.

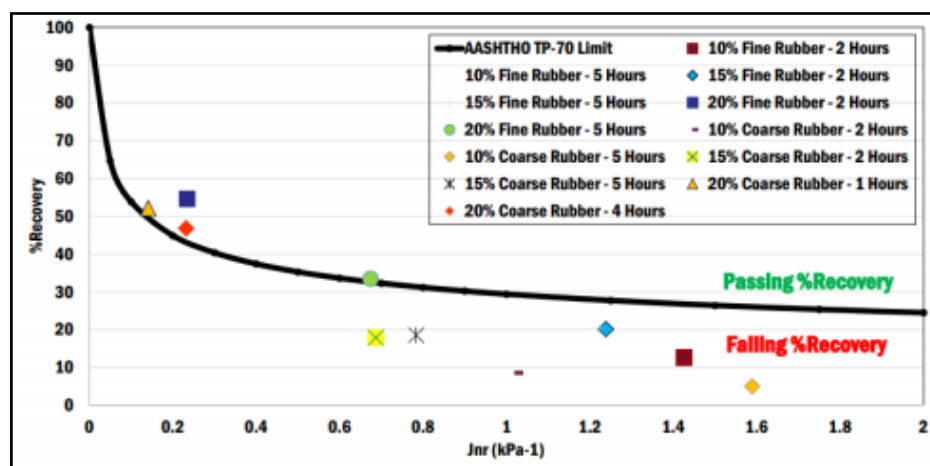


Figura A- 21: Gráfico J_{nr} vs Porcentaje de recuperación a 3.2 [kPa], Mandal T. & Bahia H., 2015.

La *Figura A- 22* muestra los resultados del ensayo de Recuperación Elástica a 25°C, donde los ligantes modificados con 20% de caucho presentan los valores más altos. Existe una tendencia a que los valores de Recuperación Elástica sean más bajos para el ligante reaccionado en comparación con el ligante verde, sin embargo, los efectos se observan sólo para el caso de 10% y 20% de caucho en ligantes reaccionados.

La *Figura A- 23*, muestra los resultados de la prueba LAS para dos niveles de deformación (2.5% y 5%); el color verde muestra la vida de fatiga estimada para una deformación del 2.5% en representación de una estructura fuerte del pavimento, mientras que, el color azul corresponde a una deformación del 5% en representación de una estructura del pavimento relativamente más débil. En general, se observa que el número de ciclos hasta la falla (N_f) disminuye con el tiempo de reacción (es decir, los ligantes verdes son mejores que los ligantes reaccionados), con la excepción de los ligantes modificados con 15% de caucho, donde el efecto es el mismo al aumentar el tiempo de mezclado. El efecto de la mezcla es más pronunciado para el caso de los ligantes modificados con 10% y 20% de caucho fino, donde el N_f cae en un 15% - 21% cuando se compara el reaccionado con el verde. También se observa que los ligantes modificados con el caucho más grueso se desempeñan mejor que los modificados con el caucho más fino, independiente de su concentración; esto podría deberse a la despolimerización más rápida de las partículas de caucho más finas (0.075 [mm]). La vida de fatiga desciende del 24% al 31% cuando los ligantes reaccionados se comparan con los ligantes verdes con contenido de caucho de 10% y 20%, mientras que para la concentración del 15% sólo se reduce en un 6%. Cabe destacar que, esta tendencia se observa para ambos niveles de deformación (2.5% y 5%).

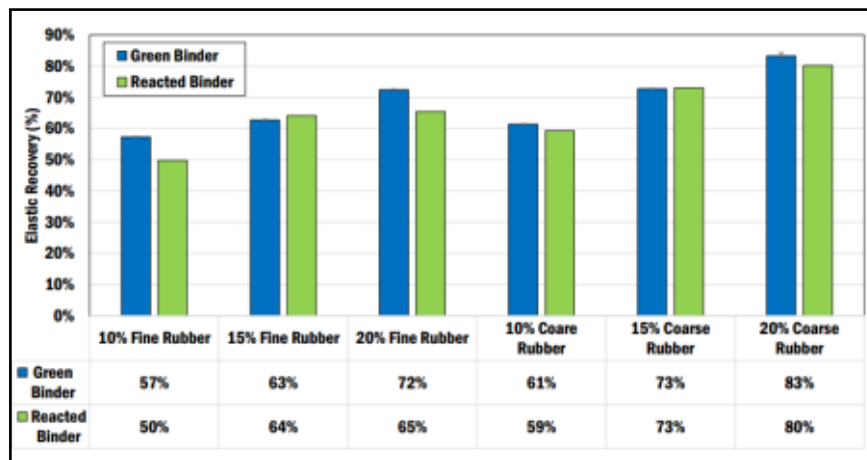


Figura A- 22 Resultados de recuperación elástica para ligantes modificados, Mandal T. & Bahía H., 2015.

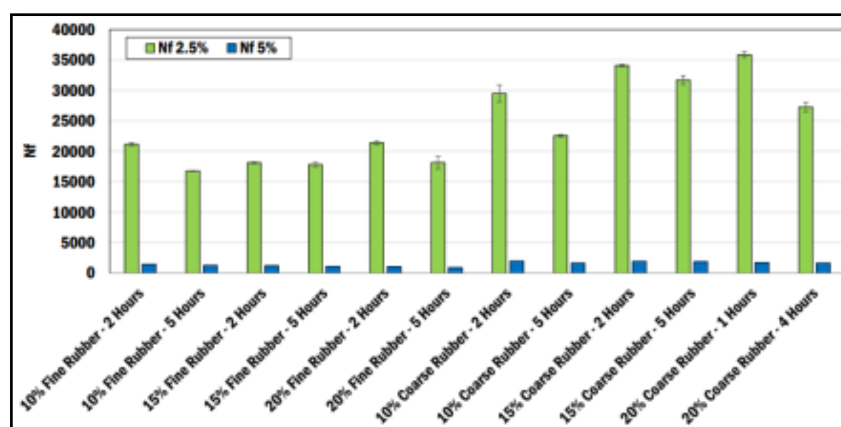


Figura A- 23: Resultados de prueba LAS para ligantes modificados, Mandal T. & Bahía H., 2015.

7.3.1.1.3 Conclusiones

En base a los resultados de este estudio, es posible afirmar que el tamaño de las partículas de caucho, su concentración y el tiempo de reacción, tienen gran influencia en la mejora de las propiedades reológicas de los ligantes modificados con polvo de caucho. En cuanto al tamaño de las partículas, se demostró que los ligantes modificados con caucho más grueso (0.595 [mm]) dan como resultado mejores propiedades reológicas en comparación a los ligantes modificados con caucho más fino (0.075 [mm]); en cuanto a la concentración de caucho, los ligantes modificados con 20% de caucho, independiente del tamaño de partículas, presentaron un mejor desempeño que los ligantes modificados con concentraciones de caucho más bajas; finalmente, en cuanto al tiempo de reacción, se comprobó que los ligantes verdes presentan un mejor desempeño en comparación a los ligantes reaccionados (Mandal T. & Bahía H., 2015).

7.4 ANEXO 4: INTERACCIÓN ABLANDADOR – POLVO DE CAUCHO. “EVALUATION OF THE EFFECT OF BIO-OIL ON THE HIGH-TEMPERATURE PERFORMANCE OF RUBBER MODIFIED ASPHALT”.

7.4.1 Materiales

7.4.1.1 Ligante asfáltico

El ligante asfáltico elegido para este estudio fue un asfalto, producto de la refinación del petróleo, con grado de penetración 80/100.

7.4.1.2 Polvo de caucho

El tamaño de las partículas de caucho también fue una variable a evaluar en este estudio, por lo tanto, para evaluar el efecto del tamaño de partículas en el desempeño a alta temperatura del asfalto modificado, se seleccionaron dos tamaños comunes; malla 20 (0.85 [mm]) y malla 80 (0.18 [mm]). El polvo de caucho utilizado, en ambos casos, se obtuvo a partir de la trituration a temperatura ambiente de neumáticos fuera de uso, y su composición se presenta en la *Tabla A- 6*.

Tabla A- 6: Composición polvo de caucho utilizado, Lei Y. et al. 2018.

Heating loss/%	Ash content/%	Metal content/%	Fiber content/%	Acetone extract/%	Rubber hydrocarbon content/%	Carbon black content/%
0.5	7.5	0.03	0	8	48	30

7.4.1.3 Bio-aceite

El bio-aceite utilizado tiene una densidad de 1.1 [g/cm³] y un pH de 2.6 a una temperatura de 25°C. Su composición elemental consta principalmente de Carbono (54 – 56%), Hidrógeno (5.5 – 7.2%), Oxígeno (35 – 45%) y Nitrógeno (0 – 0.2%).

7.4.2 Proceso de modificación

El proceso de preparación comienza con la modificación del ligante con un 20% de polvo de caucho durante 30 minutos a una temperatura de 170°C, seguido de 30 minutos a la misma temperatura para completar el proceso de digestión en las partículas de caucho. Posteriormente, se añadió el contenido de bio-aceite, en distintas proporciones, en el asfalto modificado con polvo de caucho (AMC) bajo las mismas condiciones de tiempo y temperatura. Para el ensayo Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR), el asfalto modificado se llevó al Horno de Película Delgada Rotatorio (HPDR). La *Figura A- 24* muestra el esquema del proceso de modificación del ligante.

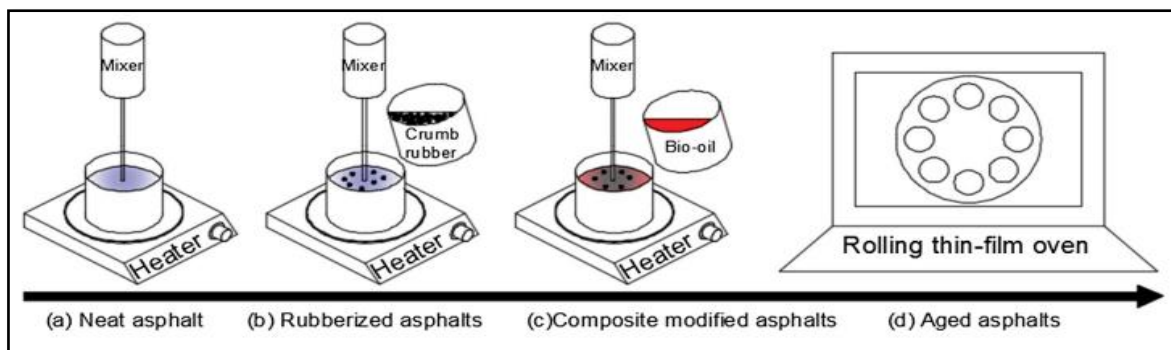


Figura A- 24: Esquema del proceso de modificación, Lei Y. et al. 2018.

Para simplificar el nombre del asfalto utilizado en este estudio, el ligante base se denominó NA, y los asfaltos modificados con polvo de caucho que contenían 0%, 5%, 10% y 15% de bio-aceite se denominaron RMA, R5B, R10B y R15B, respectivamente.

7.4.3 Ensayos y resultados

7.4.3.1 Viscosidad rotacional

La viscosidad de los asfaltos modificados fue medida con el viscosímetro rotacional Brookfield a temperaturas de 135°C y 175°C, y una velocidad rotacional de 20 rpm. A partir de los resultados presentados en la *Figura A- 25*, se puede apreciar que los ligantes modificados presentaron una viscosidad mayor que la del ligante base, lo que se atribuye al aumento de volumen de las partículas de caucho producto de la absorción de aromáticos, lo que disminuye la distancia promedio entre partículas y causa un aumento en la viscosidad. Con respecto al efecto del tamaño de partículas en la viscosidad, los asfaltos modificados con el polvo de caucho más grueso (malla 20) presentaron una mayor viscosidad en comparación a los asfaltos modificados con el polvo de caucho más fino (malla 80).

Con la adición de bio-aceite en el asfalto modificado con polvo de caucho, las viscosidades aumentaron en primera instancia y luego disminuyeron producto de la despolimerización; la viscosidad máxima se observó en R10B. Se puede inferir que el bio-aceite afecta la viscosidad del asfalto modificado con polvo de caucho y que algunas fracciones ligeras en el bio-aceite pueden ser absorbidas por las partículas de caucho (Lei Y. et al. 2018). Además, dado que las partículas poseen un área específica mayor, la interacción entre las partículas del polvo de caucho más fino (malla 80) y el bio-aceite ocurrió de manera más adecuada y eficiente en comparación con el polvo de caucho relativamente grueso (malla 20).

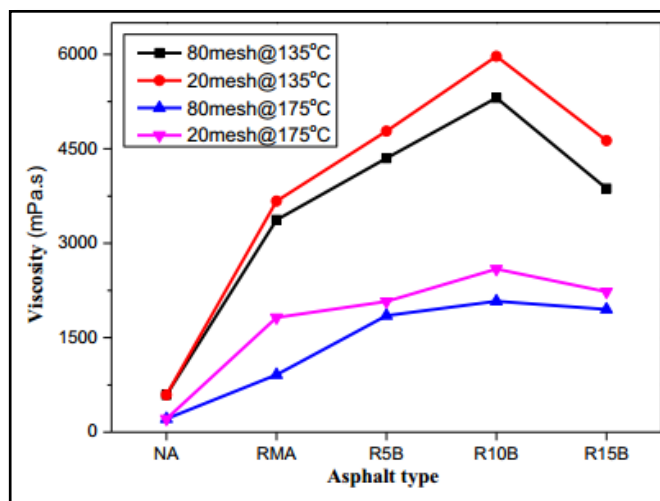


Figura A- 25: Efecto del bio-aceite en la viscosidad, Lei Y. et al. 2018.

7.4.3.2 Barrido de temperatura

7.4.3.2.1 Análisis del parámetro $G^*/\sin(\delta)$

En esta investigación, se determinó el parámetro $G^*/\sin(\delta)$ del asfalto modificado con polvo de caucho y bio-aceite, antes y después del envejecimiento HPDR. Como se muestra en la *Figura A- 26*, para el asfalto no envejecido, los valores del parámetro $G^*/\sin(\delta)$ del asfalto modificado con

polvo de caucho más grueso (malla 20) fueron mayores que los del asfalto modificado con polvo de caucho más fino (malla 80) para todas las temperaturas de ensayo, lo cual demostró que el tamaño de las partículas de caucho afecta el desempeño a alta temperatura del ligante asfáltico. Con la adición de bio-aceite, los valores del parámetro $G^*/\sin(\delta)$ del asfalto modificado con el polvo de caucho más fino aumentaron levemente, mientras que, para el caso del asfalto modificado con el polvo de caucho más grueso se aprecia una tendencia decreciente. A partir de lo anterior, es posible inferir que la mayor superficie de área del caucho más fino potenció la interacción entre componentes y mejoró el desempeño a alta temperatura del asfalto modificado; para el caso del polvo de caucho más grueso, parte del bio-aceite fue absorbida por las partículas de caucho mientras que el resto se disoció en el asfalto disminuyendo su rigidez, sin embargo, cuando el contenido de bio-aceite llegó al 15%, el exceso de éste envejeció en el asfalto caliente y aumentó el valor del parámetro $G^*/\sin(\delta)$.

Después del envejecimiento HPDR, el efecto del bio-aceite en el desempeño a alta temperatura del AMC se hizo más evidente, donde los valores del parámetro $G^*/\sin(\delta)$ aumentaron con el incremento del contenido de bio-aceite. Debido al envejecimiento HPDR, el bio-aceite se volvió susceptible al envejecimiento; parte de las fracciones ligeras del bio-aceite se volatilizaron y otra reaccionó con el asfalto o caucho, lo que resultó en una mayor rigidez y un mayor valor de $G^*/\sin(\delta)$. De esta manera, se llegó a la conclusión de que el bio-aceite podría mejorar el desempeño a alta temperatura del AMC debido al envejecimiento causado por la reacción física y química en el asfalto caliente (Lei Y. et al. 2018).

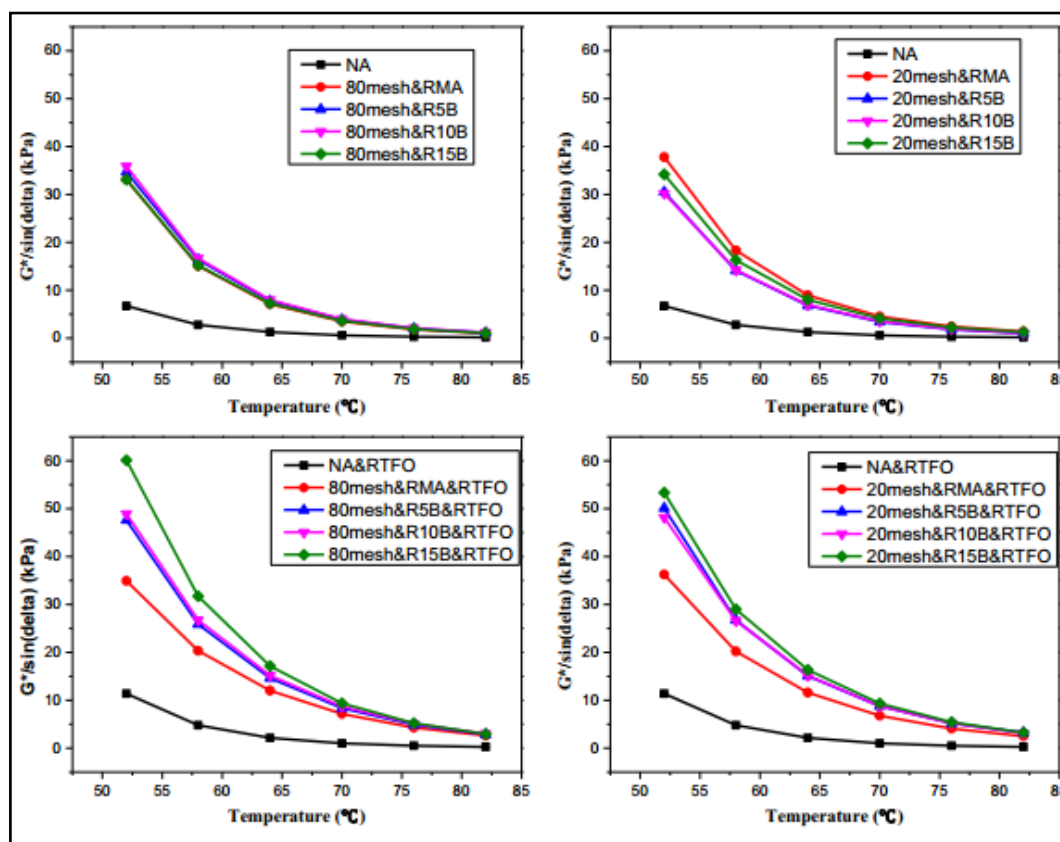


Figura A- 26: Valores del parámetro $G^*/\sin(\delta)$ antes y después del envejecimiento HPDR, Lei Y. et al. 2018.

7.4.3.2.2 Otros parámetros del asfalto modificado envejecido

En esta sección se analizaron otros parámetros del barrido de temperatura, como el ángulo de fase, módulo de almacenamiento y módulo de pérdida. A partir de la *Figura A- 27(a)*, se puede apreciar que los ángulos de fase del asfalto modificado con el polvo de caucho más fino (malla 80) aumentaron con el contenido de bio-aceite, lo que implica su influencia en las características viscosas del asfalto. Mientras tanto, la *Figura A- 27(b)* evidencia que para el caso del asfalto modificado con el polvo de caucho más grueso (malla 20) la influencia del bio-aceite no fue significativa en el ángulo de fase. Cuando la temperatura de ensayo cambió de 52°C a 64°C, los ángulos de fase del asfalto modificado con el caucho más fino fueron más bajos que los del asfalto modificado con caucho más grueso, sin embargo, cuando el contenido de bio-aceite excedió el 10%, los ángulos de fase del asfalto modificado con caucho fino superaron en magnitud a los del asfalto modificado con caucho grueso; esto se atribuye a que debido a la absorción del bio-aceite residual por el caucho más fino (malla 80), la despolimerización ocurre antes, disminuyendo la rigidez del asfalto y aumentando el valor del ángulo de fase correspondiente.

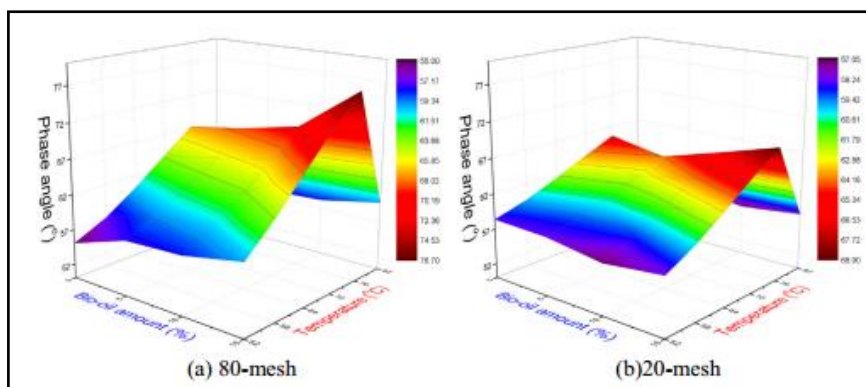


Figura A- 27: Relación entre el ángulo de fase y el contenido de bio-aceite, Lei Y. et al. 2018.

La *Figura A- 28* muestra que la adición de bio-aceite produce un aumento en el módulo de almacenamiento del AMC, siendo mayor en el caso del caucho más fino, lo que significa que es más propicio para aumentar las propiedades elásticas del asfalto. Cuando la temperatura de ensayo aumentó de 58°C a 70°C, la adición de bio-aceite hizo que el módulo de almacenamiento del asfalto modificado con caucho grueso fuera más alto que el del asfalto modificado con caucho fino, excepto para el caso del R15M; por lo tanto, la interacción entre las partículas de caucho más grandes y el bio-aceite aumenta las propiedades elásticas del asfalto a temperaturas relativamente altas.

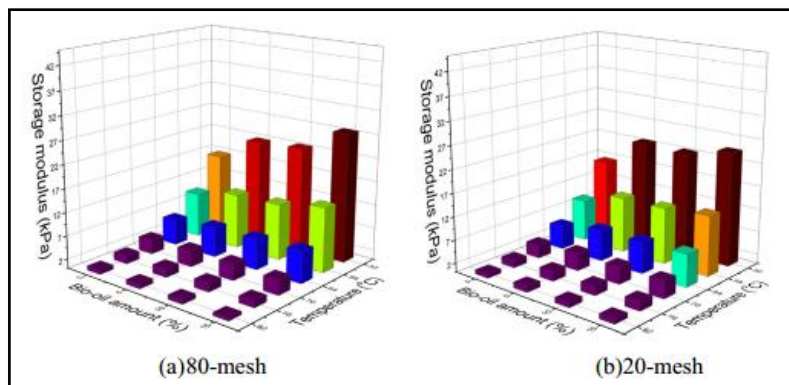


Figura A- 28: Relación entre el módulo de almacenamiento y el contenido de bio-aceite, Lei Y. et al. 2018.

El módulo de pérdida es un parámetro que caracteriza las características viscosas de los ligantes asfálticos, por lo que puede utilizarse para evaluar su resistencia a la fatiga. Como se muestra en la *Figura A- 28* y *Figura A- 29*, el bio-aceite no sólo mejoró el módulo de almacenamiento del AMC, sino que también aumentó el módulo de pérdida, indicando que la incorporación de bio-aceite también aumenta la proporción de componentes viscosos. En ausencia de bio-aceite, el módulo de pérdida del AMC con caucho grueso fue mayor que el del AMC con caucho fino a temperaturas que aumentaron de 52°C a 64°C, pero cuando la temperatura de ensayo subió de 70°C a 82°C la relación se invirtió. Cuando el contenido de bio-aceite excedió el 10%, el módulo de pérdida del asfalto modificado con caucho fino fue mayor que el del asfalto modificado con caucho grueso, excepto para R15B a 82°C. Según los datos, se puede inferir que la interacción entre el bio-aceite y las partículas de caucho más pequeñas aumentó el módulo de pérdida del asfalto y mejoró aún más la resistencia a la fatiga del asfalto, debido a que el bio-aceite promovió el hinchamiento y despolimerización de las partículas de caucho.

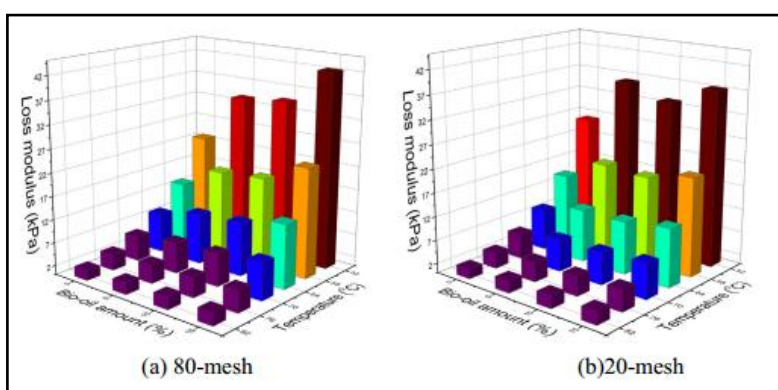


Figura A- 29: Relación entre el módulo de pérdida y el contenido de bio-aceite, Lei Y. et al. 2018.

7.4.3.3 Ensayo Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

7.4.3.3.1 Análisis de la deformación recuperable (%R)

Como se muestra en la *Figura A- 30*, en asfaltos no envejecidos, la adición de bio-aceite tiene poco efecto sobre el %R del AMC a un nivel de esfuerzo de 0.1 kPa. Con el envejecimiento primario, el %R aumentó significativamente, lo que indica que mejoró las propiedades elásticas del asfalto al promover aún más el hinchamiento de las partículas de caucho y aumentar el grado de mezcla entre el caucho y el bio-aceite en el asfalto caliente.

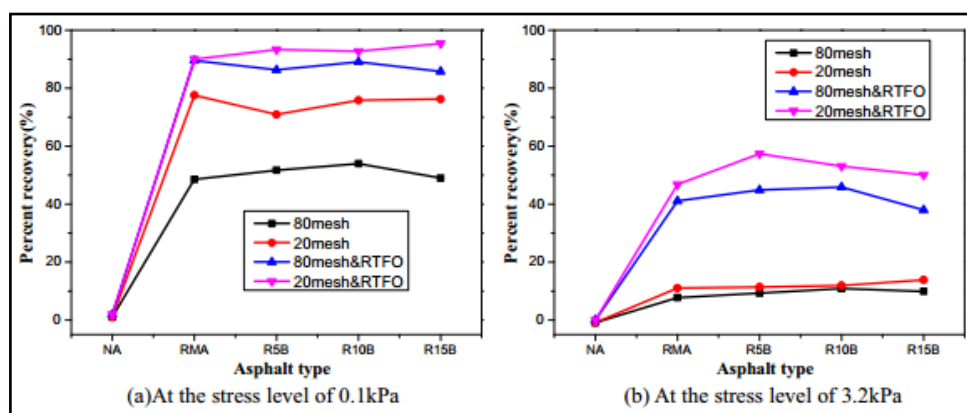


Figura A- 30: Porcentaje de recuperación (%R) para niveles de esfuerzo de 0.1 kPa y 3.2 kPa, Lei Y. et al. 2018.

Con respecto a los asfaltos no envejecidos a un nivel de esfuerzo de 3.2 kPa, la adición de bio-aceite nuevamente tuvo poca influencia en la recuperación elástica. Después del envejecimiento primario, con el contenido de bio-aceite el %R de los asfaltos modificados con polvo de caucho aumentó en primera instancia y luego disminuyó. Para el caso del asfalto modificado con caucho más grueso, un contenido del 5% de bio-aceite exhibió el %R más alto, mientras que para el AMC con caucho fino el %R más alto se obtuvo con un contenido de bio-aceite del 10%.

La *Figura A- 31* muestra los valores de R_{diff} para los diferentes contenidos de bio-aceite, en estado original y con envejecimiento primario. Para el asfalto modificado con caucho (no envejecido), el valor de R_{diff} mostró una leve tendencia a la baja con el aumento del contenido de bio-aceite. Después del envejecimiento primario, el valor de R_{diff} disminuyó significativamente, lo que indicó que el proceso de envejecimiento primario mejora la estabilidad elástica del asfalto modificado con caucho; en otras palabras, el envejecimiento primario promovió el proceso de digestión del polvo de caucho en el asfalto caliente.

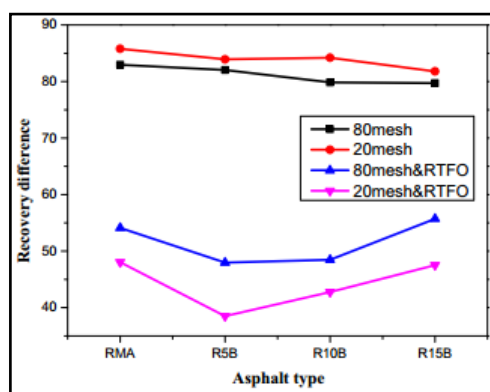


Figura A- 31: Diferencia entre el %R a 0.1 kPa y 3.2 kPa, Lei Y. et al. 2018.

7.4.3.3.2 Análisis de la deformación en fluencia no recuperable (J_{nr})

Como se puede ver de la *Figura A- 32*, la influencia del bio-aceite en el valor de J_{nr} , para ambos niveles de esfuerzo, fue pequeña. Con el envejecimiento primario, los valores de J_{nr} disminuyeron, pero a un nivel de esfuerzo de 0.1 kPa los resultados fueron similares. Por lo tanto, si el nivel de esfuerzo es suficientemente alto, es probable que el contenido de caucho contribuya positivamente en la resistencia al ahuellamiento del AMC, en mayor medida que el tamaño de las partículas de caucho o la incorporación de bio-aceite.

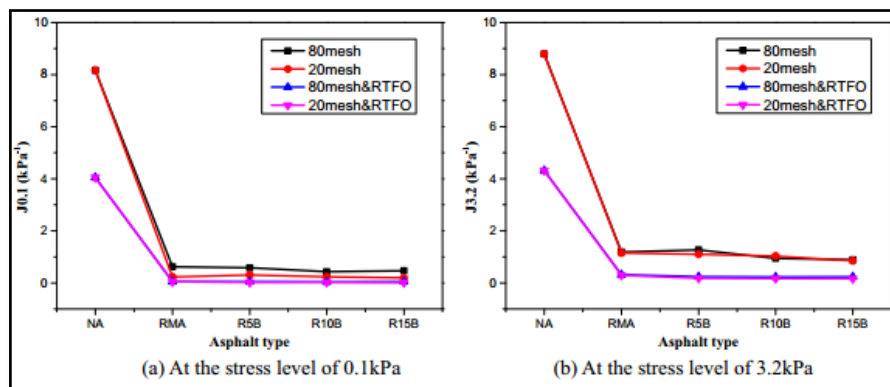


Figura A- 32: Valores de J_{nr} a niveles de esfuerzo de 0.1 kPa y 3.2 kPa, Lei Y. et al. 2018.

7.4.4 Análisis

7.4.4.1 Efecto del bio-aceite en parámetros relacionados con el desempeño a alta temperatura

Para analizar cuantitativamente el efecto del contenido de bio-aceite en el desempeño a alta temperatura del asfalto modificado con caucho, se propuso un índice de sensibilidad basado en los parámetros de caracterización del desempeño y representado por la siguiente ecuación:

$$S_i = \frac{\sum_{i=1}^n COV_i}{n}$$

donde, S_i es el índice de sensibilidad, COV_i es el coeficiente de variación de los parámetros de las muestras que contienen diferentes porcentajes de bio-aceite, y n representa el número de temperaturas de ensayo o niveles de esfuerzo.

Como se muestra en la *Figura A- 33*, con la incorporación de bio-aceite, el índice de sensibilidad del asfalto modificado con caucho más grueso (malla 20) fue mayor que el del asfalto modificado con caucho fino para cuatro parámetros, J_{nr} , $\%R$, $G^*/\sin(\delta)$ y módulo de almacenamiento, lo que indica que la influencia del bio-aceite en el desempeño a alta temperatura del asfalto modificado con polvo de caucho más fino fue menos significativa, en comparación a las partículas más grandes que con la adición de bio-aceite, lograron hincharse completamente y mejorar las propiedades reológicas del asfalto.

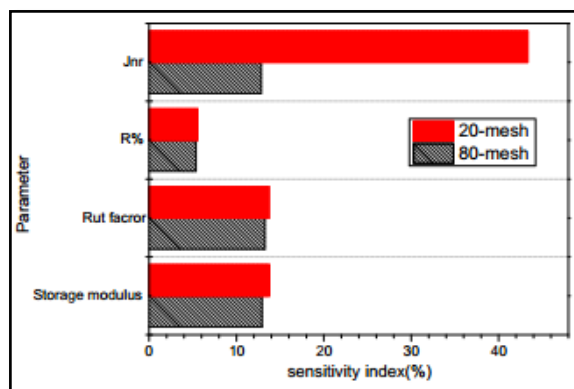


Figura A- 33: Índice de sensibilidad, Lei Y. et al. 2018.

7.4.4.2 Interacción entre el bio-aceite y el polvo de caucho

De acuerdo con los resultados de este estudio, se puede decir que la influencia de la adición de bio-aceite en el asfalto modificado con caucho aumenta luego del envejecimiento primario, donde el bio-aceite tiende a envejecer en el asfalto caliente, manifestándose como volatilización física de las fracciones ligeras y reacción química con componentes del asfalto. Se puede inferir que la disolución del caucho es inducida por el bio-aceite, ayudando a la digestión de las partículas y mejorando el desempeño a alta temperatura del asfalto modificado. En resumen, los resultados indicaron que, con la adición de bio-aceite, no se observaron efectos adversos en el desempeño a alta temperatura del asfalto modificado con caucho.

7.4.5 Conclusiones

Sobre la base de los resultados de viscosidad, el barrido de temperatura y el ensayo MSCR, las principales conclusiones de este estudio se resumen a continuación:

6. El efecto del contenido de bio-aceite en la viscosidad del asfalto modificado con caucho puede estar asociado con la temperatura de ensayo y el tamaño de las partículas de caucho. Con la adición de bio-aceite en el asfalto-caucho, las viscosidades aumentaron en primera instancia y luego disminuyeron. Además, en ambos casos, el asfalto-caucho que contiene 10% de bio-aceite exhibió la mayor viscosidad.
7. El bio-aceite puede mejorar el desempeño a altas temperaturas del asfalto modificado con caucho debido a la interacción física y química en el asfalto caliente. El tamaño de las partículas de caucho también afectó el desempeño, dado que la interacción entre las partículas de caucho más grandes y el bio-aceite mejoró las propiedades elásticas del asfalto modificado.
8. Aunque el bio-aceite puede aumentar las características viscosas del asfalto-caucho, el efecto también se relacionó con el tamaño de las partículas de caucho. La interacción entre el bio-aceite y el caucho más fino fue beneficiosa para aumentar el módulo de pérdida del asfalto y mejorar aún más su resistencia a la fatiga.
9. El proceso de envejecimiento primario puede promover un mayor hinchamiento de las partículas de caucho, aumentar el grado de mezcla entre el caucho y el bio-aceite, y mejorar la propiedad elástica del asfalto modificado con caucho.
10. En este estudio, no se observaron efectos adversos, a partir de la adición de bio-aceite, en el desempeño a alta temperatura del asfalto modificado con caucho.

7.5 ANEXO 5: CARACTERIZACIÓN PG LIGANTE BASE

INFORME DE ENSAYO ASFALTO BASE ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	25-06-2018
Hora de ensayo	17:03
Viscosidad [Pa·s]	0.56
Viscosidad [Poise]	5.6
Tasa corte [1/s]	46.5
Tensión corte [N/m ²]	258.5
Torque [%]	55.6
Velocidad de giro [rpm]	50.0
Temperatura [° C]	134.9
Nº de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	26-06-2018
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	320

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	Anton Paar, MCR-301
Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de Ensayo	25-06-2018
Hora de ensayo	15:40:00

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	100.1
Temperatura Mínima Registrada [°C]	89.3
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:49:00
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	25-06-2018
Hora de ensayo	16:53:00

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	19.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	27-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	9:43

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.44	1.65	0.83	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	82.5	84.5	86.1	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.61	1.73	0.86	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	82.5	84.5	86.1	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	58	64	70	-	-	Temp. [°C]	T° Prom.
Base	M1	3.47	1.66	0.83	-	-	68.4	68.6
	M2	3.64	1.74	0.87	-	-	68.8	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	-	

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	26-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	10:25

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	11.80	5.56	2.66	1.31	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	75.0	78.0	80.8	83.2	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-
Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	11.90	5.62	2.71	1.32	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	75.1	78.1	80.8	83.2	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	58	64	70	76	-	Temp. [°C]	T° Prom.
Base	M1	12.20	5.68	2.70	1.32	-	71.7	71.8
	M2	12.30	5.74	2.74	1.33	-	71.8	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-		

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	29-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	13:58

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	19	16	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	5760	8120	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	42.4	41.0	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	19	16	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	6620	9870	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	41.1	38.8	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G* sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]							Falla a 5000 [KPa]
	Muestra	19	16	-	-	-	-	T° Falla
Base	M1	3890	5330	-	-	-	-	16.6
	M2	4350	6180	-	-	-	-	17.8
Condición		CUMPLE	FALLA				-	
Temperatura promedio [°C]								17.2

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-12.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	03-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	194438.8
Última Verificación Conformidad	03-12-2018
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-11.8	-18.0	
Mínima T° [°C]	-12.0	-18.1	
Máx. Carga [mN]	983.1	982.2	
Mín. Carga [mN]	707.5	707.4	
Carga contacto t=0[mN]	35.5	34.5	
Carga 0,5 s [mN]	707.5	707.4	
Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-11.9	-17.9	
Mínima T° [°C]	-12.0	-18.2	
Máx. Carga [mN]	984.1	983.2	
Mín. Carga [mN]	705.3	712.7	
Carga contacto t=0[mN]	36.3	36.3	
Carga 0,5 s [mN]	705.3	712.7	

Temperatura [°C]	-12.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	983.0	981.9	981.9	981.0	980.6	979.5
Deflexión [mm]	0.2482	0.2948	0.3591	0.4429	0.5563	0.7092
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	323.1378	271.7163	223.0736	180.7025	143.8201	112.6859
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	322.5274	272.5063	223.2671	180.3601	143.6559	112.8167
Diferencia [%]	-0.1889	0.2907	0.0868	-0.1895	-0.1142	0.1161
Valor m Estimado	0.2589	0.277	0.298	0.3181	0.338	0.359
Coeficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	979.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	272.3					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.3					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0158					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0793					

Temperatura [°C]	-12.0
------------------	-------

Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	303.9	255.0	207.7	166.9	132.4	103.0
Deflexión [mm]	0.2641	0.3147	0.3860	0.4803	0.6052	0.7762
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	303.9020	255.0113	207.6944	166.9370	132.3945	102.9689
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	303.6483	255.2349	207.8911	166.9220	132.1212	103.0892
Diferencia [%]	-0.0835	0.0877	0.0947	-0.0090	-0.2064	0.1169
Valor m Estimado	0.2669	0.286	0.306	0.3270	0.348	0.368
Coefficiente de Regresión R2	1.00000					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	275.5					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	6.9					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0056					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0885					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	981.7	981.3	981.2	980.4	979.2	978.1
Deflexión [mm]	0.1363	0.1560	0.1821	0.2151	0.2576	0.3122
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	587.5074	513.3030	439.6868	371.8741	310.1622	255.5564
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	586.8051	514.3539	439.7332	371.4575	310.0427	255.6975
Diferencia [%]	-0.1196	0.2047	0.0106	-0.1120	-0.0385	0.0552
Valor m Estimado	0.2018	0.217	0.235	0.2521	0.269	0.287
Coefficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	978.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	271.3					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.3					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0042					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0555					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	982.5	982.3	980.6	981.2	980.4	979.9
Deflexión [mm]	0.1321	0.1518	0.1784	0.2110	0.2546	0.3079
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	606.7010	528.1235	448.3766	379.4336	314.8965	259.5580
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	606.4443	528.2835	449.2460	378.0807	314.8965	259.5580
Diferencia [%]	-0.0423	0.0303	0.1939	-0.3566	0.2200	-0.0442
Valor m Estimado	0.2127	0.226	0.241	0.2563	0.271	0.286
Coefficiente de Regresión R2	0.99998					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980.0					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	267.3					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	2.9					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0092					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0509					

Tipo	Fecha de Investigación	N° Análisis	T °C	S [MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
Base	12-07-2018	1	-12.0	180.7025	0.3181	CUMPLE	CUMPLE
		2	-12.0	166.9370	0.3270	CUMPLE	CUMPLE
		3	-18.0	371.8741	0.2521	FALLA	FALLA
		4	-18.0	379.4336	0.2563	FALLA	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 64-22 es 25 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \text{ sen } \delta \leq 5000$ [KPa] en 17,2 [°C].

3.10. Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	64-22
---------------	-------

Grado PG Exacto – Baja Temperatura

Tabla A- 7: Grado PG Exacto Baja Temperatura - Ligante Base

T [°C]	S [MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	S _{prom}	m _{prom}	T° exacta (S)	T° exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG
-12	180.7025	0.318077	CUMPLE	CUMPLE	173.81975	0.32253	-15.75	-13.98	-13.98	-23.98	-22
-12	166.937	0.326983	CUMPLE	CUMPLE							
-18	371.4575	0.252081	NO CUMPLE	NO CUMPLE	375.44555	0.2542					
-18	379.4336	0.256314	NO CUMPLE	NO CUMPLE							

Resultados MSCR a 64°C – Ligante Base

Tabla A- 8: Resultados MSCR a 64°C Ligante Base - Muestra 1.

Nº Ciclos	ε ₀	ε _c	ε _r	ε ₁	ε ₁₀	ε _r (Carga,N)	ε _r (Carga,N)	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.229	0.208	0.229	0.208	0.021	9.170	10.219	2.080	1.840
2	0.208	0.428	0.406	0.220	0.198	0.022	10.000		1.980	
3	0.406	0.621	0.599	0.215	0.193	0.022	10.233		1.930	
4	0.599	0.808	0.786	0.209	0.187	0.022	10.526		1.870	
5	0.786	0.991	0.969	0.205	0.183	0.022	10.732		1.830	
6	0.969	1.170	1.150	0.201	0.181	0.020	9.950		1.810	
7	1.150	1.350	1.330	0.200	0.180	0.020	10.000		1.800	
8	1.330	1.520	1.500	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
9	1.500	1.690	1.670	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
10	1.670	1.860	1.840	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
11	1.840	8.520	8.330	6.680	6.490	0.190	2.844	2.869	2.028	1.999
12	8.330	15.000	14.800	6.670	6.470	0.200	2.999		2.022	
13	14.800	21.500	21.300	6.700	6.500	0.200	2.985		2.031	
14	21.300	28.000	27.800	6.700	6.500	0.200	2.985		2.031	
15	27.800	34.400	34.200	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
16	34.200	40.800	40.600	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
17	40.600	47.100	46.900	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
18	46.900	53.400	53.300	6.500	6.400	0.100	1.538		2.000	
19	53.300	59.800	59.600	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
20	59.600	66.000	65.800	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
Rdiff								71.924	Jnr-diff	8.628

Tabla A- 9: Resultados MSCR a 64°C Ligante Base - Muestra 2

Nº Ciclos	ε ₀	ε _c	ε _r	ε ₁	ε ₁₀	ε _r (Carga,N)	ε _r (Carga,N)	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.271	0.251	0.271	0.251	0.020	7.380	9.835	2.510	1.870
2	0.251	0.494	0.474	0.243	0.223	0.020	8.230		2.230	
3	0.474	0.698	0.678	0.224	0.204	0.020	8.929		2.040	
4	0.678	0.888	0.868	0.210	0.190	0.020	9.524		1.900	
5	0.868	1.070	1.050	0.202	0.182	0.020	9.901		1.820	
6	1.050	1.240	1.220	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
7	1.220	1.410	1.390	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
8	1.390	1.570	1.550	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
9	1.550	1.730	1.710	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
10	1.710	1.890	1.870	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
11	1.870	7.860	7.680	5.990	5.810	0.180	3.005	3.105	1.816	1.742
12	7.680	13.600	13.500	5.920	5.820	0.100	1.689		1.819	
13	13.500	19.300	19.200	5.800	5.700	0.100	1.724		1.781	
14	19.200	25.000	24.800	5.800	5.600	0.200	3.448		1.750	
15	24.800	30.600	30.400	5.800	5.600	0.200	3.448		1.750	
16	30.400	36.200	36.000	5.800	5.600	0.200	3.448		1.750	
17	36.000	41.700	41.500	5.700	5.500	0.200	3.509		1.719	
18	41.500	47.100	46.900	5.600	5.400	0.200	3.571		1.688	
19	46.900	52.500	52.300	5.600	5.400	0.200	3.571		1.688	
20	52.300	57.800	57.600	5.500	5.300	0.200	3.636		1.656	
Rdiff								68.428	Jnr-diff	-6.868

7.6 ANEXO 6: GRANULOMETRÍA POLVO DE CAUCHO

Tabla A- 10: Granulometría polvo de caucho

							P2	
TAMIZ		MASA _{inicial} [g]	MASA _{final} [g]	RETENIDO[g]	PASA[g]	% que pasa	L _{inf} [%]	L _{sup} [%]
Base	0	355.7	356.2	0.5	0	0.0	0.0	0.0
200	0.08	317.2	339.5	22.3	0.5	0.3	0	20
100	0.16	323.7	400.3	76.6	22.8	15.1	2	40
50	0.315	344.2	395	50.8	99.4	66.0	10	70
30	0.63	377.3	377.6	0.3	150.2	99.7	40	100
16	1.25	401.6	401.8	0.2	150.5	99.9	100	100
8	2.3	468.4	468.5	0.1	150.7	100.0	100	100

7.7 ANEXO 7: VISCOSIDADES MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR

7.7.1 Ligante base – 0% de ablandador

Tabla A- 11: Viscosidades Ligante Base

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
556	050.0	055.6	258.5	046.5	134.9	575	00:08:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 17:03:11
555	050.0	055.5	258.1	046.5	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 17:06:11
557	050.0	055.7	259.0	046.5	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 17:09:11

Tabla A- 12: Viscosidades Ligante Base - Valores Promedio

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
560	050.0	055.6	258.5	046.5	134.9

7.7.2 Modificación con 3% de ablandador

Tabla A- 13: Viscosidades Modificación con 3% de ablandador

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
452	050.0	045.2	210.2	046.5	135.0	575	00:33:00,4	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	11-06-2018 13:47:37
450	050.0	045.0	209.3	046.5	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	11-06-2018 13:50:38
451	050.0	045.1	209.7	046.5	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	11-06-2018 13:53:38

Tabla A- 14: Viscosidades Modificación con 3% de ablandador - Valores Promedio

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
450	050.0	045.1	209.7	046.5	135.0

7.7.3 Modificación con 5% de ablandador

Tabla A- 15: Viscosidades Modificación con 5% de ablandador

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
384	050.0	038.4	178.6	046.5	134.9	575	00:33:00,4	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	12-07-2018 15:13:57
384	050.0	038.4	178.6	046.5	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	12-07-2018 15:16:57
383	050.0	038.3	178.1	046.5	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	12-07-2018 15:19:57

Tabla A- 16: Viscosidades Modificación con 5% de ablandador - Valores Promedio

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
380	050.0	038.4	178.4	046.5	134.9

7.7.4 Modificación con 7% de ablandador

Tabla A- 17: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
335	050.0	033.5	155.8	046.5	134.9	575	00:33:00,4	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	14-06-2018 12:05:14
334	050.0	033.4	155.3	046.5	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	14-06-2018 12:08:14
335	050.0	033.5	155.8	046.5	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	14-06-2018 12:11:14

Tabla A- 18: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador - Valores Promedio

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
330	050.0	033.5	155.6	046.5	134.9

7.7.5 Modificación con 14% de ablandador

Tabla A- 19: Viscosidades Modificación con 14% de ablandador

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
227	050.0	022.7	105.6	046.5	134.9	575	00:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	08-11-2018 15:17:08
227	050.0	022.7	105.6	046.5	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	08-11-2018 15:20:08
228	050.0	022.8	106.0	046.5	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	08-11-2018 15:23:08

Tabla A- 20: Viscosidades Modificación con 14% de ablandador - Valores Promedio

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
230	050.0	022.7	105.7	046.5	134.9

7.7.6 Modificación con 15% de ablandador

Tabla A- 21: Viscosidades Modificación con 15% de ablandador

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
205	050.0	020.5	095.3	046.5	134.9	575	00:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 11:51:50
205	050.0	020.5	095.3	046.5	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 11:54:50
205	050.0	020.5	095.3	046.5	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 11:57:51

Tabla A- 22: Viscosidades Modificación con 15% de ablandador - Valores Promedio

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m2]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
205	050.0	020.5	095.3	046.5	134.9

7.8 ANEXO 8: CARACTERIZACIÓN PG MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR

7.8.1 Modificación con 3% de Ablandador

INFORME DE ENSAYO ASFALTO 3% ABLANDADOR ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	11-06-2018
Hora de ensayo	12:52
Viscosidad [Pa·s]	0.45
Viscosidad [Poise]	4.5
Tasa corte [1/s]	46.5
Tensión corte [N/m ²]	209.7
Torque [%]	45.1
Velocidad de giro [rpm]	50.0
Temperatura [°C]	135.0
N° de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	11-06-2018
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	316

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	Anton Paar, MCR-301
Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de Ensayo	11-06-2018
Hora de ensayo	15:16:00

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	100.1
Temperatura Mínima Registrada [°C]	87.5
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:07:07
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	11-06-2018
Hora de ensayo	16:27:44

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	19.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	13-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	11:33

Muestra	M1			
Temperatura [°C]	58	64	70	
Módulo Complejo (G*) [KPa]	2.68	1.26	0.61	
Ángulo de Fase (δ) [°]	83.4	85.2	86.6	
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	

Muestra	M2			
Temperatura [°C]	58	64	70	
Módulo Complejo (G*) [KPa]	2.54	1.25	0.63	
Ángulo de Fase (δ) [°]	83.5	85.3	86.7	
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]						
	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	58	64	70	-	Temp. [°C]	T°Prom.
3% Abl.	M1	2.70	1.27	0.61	-	66.0	66.0
	M2	2.56	1.25	0.63	-	66.0	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-		

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	12-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	13:49

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	7.81	3.75	1.84	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	76.4	79.3	81.9	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	7.11	3.42	1.68	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	76.4	79.3	81.9	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]						
	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	58	64	70	-	Temp. [°C]	T°Prom.
3% Abl.	M1	8.03	3.82	1.86	-	68.6	68.2
	M2	7.31	3.48	1.70	-	67.8	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	14-12-2018
Hora de ensayo [hrs]	11:59

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	19	16	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	5640	8610	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	41.8	39.3	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	19	16	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	5930	9080	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	42.1	39.6	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G* sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]				Falla a 5000 [KPa]			
	Muestra	19	16	-	-	-	-	T° Falla
3%	M1	3760	5450	-	-	-	-	16.7
Abl.	M2	3980	5780	-	-	-	-	17.2
Condición	CUMPLE	FALLA						
Temperatura promedio [°C]								17.0

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-12.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	11-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	194438.8
Última Verificación Conformidad	11-12-2018
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-11.9	-18.0	
Mínima T° [°C]	-12.0	-18.1	
Máx. Carga [mN]	980.9	981.8	
Mín. Carga [mN]	714.1	718.8	
Carga contacto t=0[mN]	34.9	34.8	
Carga 0,5 s [mN]	714.1	718.8	

Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-11.9	-17.9	
Mínima T° [°C]	-12.0	-18.0	
Máx. Carga [mN]	981.3	981.5	
Mín. Carga [mN]	713.9	719.3	
Carga contacto t=0[mN]	35.0	36.2	
Carga 0,5 s [mN]	713.9	719.3	

Temperatura [°C]	-12.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	980.9	975.9	979.6	979.7	978.6	976.0
Deflexión [mm]	0.2736	0.3336	0.4207	0.5345	0.6907	0.9151
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	292.4608	238.6668	189.9541	149.5480	115.5906	87.0107
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	291.4116	239.7598	190.5616	149.1677	114.9992	87.3163
Diferencia [%]	-0.3587	0.4580	0.3198	-0.2542	-0.5116	0.3513
Valor m Estimado	0.3004	0.320	0.342	0.3643	0.386	0.408
Coefficiente de Regresión R2	0.99996					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	977.5					

Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	263.4
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.8
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0554
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0581

Temperatura [°C]	-12.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	977.8	979.7	977.6	978.7	978.3	977.6
Deflexión [mm]	0.2823	0.3433	0.4256	0.5354	0.6843	0.8933
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	282.5447	232.8499	187.4210	149.1384	116.6323	89.2859
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	281.7022	233.7992	187.8298	148.7926	116.2233	89.5160
Diferencia [%]	-0.2982	0.4077	0.2181	-0.2319	-0.3506	0.2577
Valor m Estimado	0.2873	0.306	0.326	0.3463	0.367	0.387
Coeficiente de Regresión R2	0.99997					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	977.5					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	263.6					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.9					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0270					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0784					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	981.3	980.5	980.1	978.2	978.4	977.6
Deflexión [mm]	0.1469	0.1698	0.2000	0.2387	0.2882	0.3526
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	544.8441	471.2263	399.8642	334.3681	276.9570	226.1734
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	544.2011	472.2643	399.6142	334.3657	276.6480	226.3384
Diferencia [%]	-0.1180	0.2203	-0.0625	-0.0007	-0.1116	0.0730
Valor m Estimado	0.2182	0.233	0.249	0.2653	0.281	0.298
Coeficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	978.2					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	259.4					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.4					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0105					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0554					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	981.1	980.8	979.8	979.5	979.6	978.7
Deflexión [mm]	0.1396	0.1609	0.1893	0.2252	0.2725	0.3338
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	573.2029	497.3481	422.2898	354.8160	293.2596	239.1675
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	572.3637	498.3835	422.7685	354.1663	293.0068	239.3943
Diferencia [%]	-0.1464	0.2082	0.1134	-0.1831	-0.0862	0.0948
Valor m Estimado	0.2120	0.228	0.246	0.2645	0.283	0.301
Coeficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	978.7					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	259.4					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.8					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0043					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0559					

Tipo	Fecha de Investigación	Nº Análisis	T °C	S [MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
3% Abl.	11-12-2018	1	-12.0	149.5480	0.3640	CUMPLE	CUMPLE
		2	-12.0	149.1384	0.3460	CUMPLE	CUMPLE
		3	-18.0	334.3680	0.2650	FALLA	FALLA
		4	-18.0	354.8160	0.2640	FALLA	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 64-22 es 25 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \text{ sen } \delta \leq 5000$ [KPa] en 17 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	64-22
---------------	-------

Resumen Caracterización PG

A continuación, se presenta el resumen de los valores obtenidos para la clasificación PG de la modificación con 3% de aditivo ablandador.

Tabla A- 23: Grado PG alta temperatura modificación con 3% de ablandador - Estado original

Clasificación PG Estado Original											
Datos del Betún		Parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ [KPa]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]			
		58	64	70	76	82	88	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio	
3% Abl.	1	2.70	1.27	0.61				66.0	0.00	CUMPLE	66.0
	2	2.56	1.25	0.63				66.0			

Tabla A- 24: Grado PG alta temperatura modificación con 3% de ablandador - HPDR

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)											
Datos del Betún		Parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ [KPa]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]			
		58	64	70	76	82	88	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio	
3% Abl.	1	8.03	3.82	1.86				68.6	0.83	CUMPLE	68.2
	2	7.31	3.48	1.70				67.8			

Tabla A- 25: Grado PG temperatura intermedia modificación con 3% de ablandador

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia											
Datos del Betún		Parámetro $G^* \text{ sen}(\delta)$ [KPa]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]				Falla a 5000[KPa]				Temp. Promedio	
		19	16							CV d2s%	
3% Abl.	1	3760	5450			16.7				2.09	CUMPLE
	2	3980	5780			17.2					

Tabla A- 26: Grado PG baja temperatura modificación con 3% de ablandador

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura											
Datos del Betún		Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]									
		-6		-12		-18		-24		-30	
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m
3% Abl.	1			149.5480	0.364	334.368	0.265				
	2			149.1384	0.346	354.816	0.264				

Grado PG Exacto – Baja Temperatura

Tabla A- 27: Grado PG exacto baja temperatura - Modificación con 3% de ablandador

T [°C]	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	S _{prom}	m _{prom}	T° exacta (S)	T° exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG
-12	189.9541	0.342327	CUMPLE	CUMPLE	169.54625	0.344295	-16.47	-15.35	-15.35	-25.35	-22
-12	149.1384	0.346263	CUMPLE	CUMPLE							
-18	354.816	0.264467	NO CUMPLE	NO CUMPLE	344.59205	0.2648725					
-18	334.3681	0.265278	NO CUMPLE	NO CUMPLE							

Cabe destacar que, a partir de los datos de la tabla anterior, el grado exacto de baja temperatura es -25.35°C. De acuerdo con esto, es posible afirmar que el ligante modificado con 3% de ablandador tiene una clasificación PG 64-22.

7.8.2 Modificación con 5% de ablandador

INFORME DE ENSAYO ASFALTO 5% ABLANDADOR ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	12-07-2018
Hora de ensayo	14:35
Viscosidad [Pa·s]	0.38
Viscosidad [Poise]	3.8
Tasa corte [1/s]	46.5
Tensión corte [N/m ²]	178.4
Torque [%]	38.4
Velocidad de giro [rpm]	50.0
Temperatura [° C]	134.9
Nº de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	20-12-2018
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	298

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	Anton Paar, MCR-301
Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensaye [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de Ensayo	19-12-2018
Hora de ensayo	11:36:00
Cambio de masa por calentamiento [%]	0.254

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensaye [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	100.2
Temperatura Mínima Registrada [°C]	89.1
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:05:14
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	13-07-2018
Hora de ensayo	14:12:00

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	19.0
Diámetro de plato de ensaye [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	17-12-2018
Hora de ensayo [hrs]	11:51

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	2.01	0.96	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	83.1	84.2	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	2.02	0.98	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	84.1	85.8	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]						
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]
	Muestra	58	64	-	-	-	Temp.°C T°Prom.
5% Abl.	M1	2.02	0.96	-	-	-	63.7
	M2	2.03	0.98	-	-	-	63.9
Condición		CUMPLE	FALLA	-	-	-	-

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	20-12-2018
Hora de ensayo [hrs]	11:22

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	6.28	2.94	1.39	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	77.5	80.3	82.8	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	6.70	3.22	1.58	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	76.8	79.7	82.2	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]						
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]
	Muestra	58	64	70	-	-	Temp.°C T°Prom.
5% Abl.	M1	6.43	2.98	1.40	-	-	66.4
	M2	6.89	3.27	1.59	-	-	67.3
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	-

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	11-12-2018
Hora de ensayo [hrs]	14:40

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	19	16	13	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	4580	6990	10100	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	41.7	39.3	37.2	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	1.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	19	16	13	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	5100	7810	11500	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	41.9	39.5	37.300	-	-	-
	1.0	1.0	1.0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro $G^* \sin(\delta)$ [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000 [KPa]	
	Muestra	19	16	13	-	-	-	T° Falla
5% Abl.	M1	3050	4420	6130	-	-	-	14.9
	M2	3410	4970	6970	-	-	-	15.9
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA		-	-	
Temperatura promedio [°C]								15.4

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-12.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	13-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	197708.6
Última Verificación Conformidad	13-12-2018
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-11.7	-17.9	
Mínima T° [°C]	-11.9	-18.0	
Máx. Carga [mN]	981.8	984.0	
Mín. Carga [mN]	708.2	715.5	
Carga contacto t=0[mN]	35.2	35.2	
Carga 0,5 s [mN]	708.2	715.5	
Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-11.9	-17.8	
Mínima T° [°C]	-12.0	-17.9	
Máx. Carga [mN]	985.2	982.6	
Mín. Carga [mN]	706.0	715.1	
Carga contacto t=0[mN]	35.0	35.7	
Carga 0,5 s [mN]	706.0	715.1	

Temperatura [°C]	-12.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	979.7	978.4	978.9	978.8	977.2	976.1
Deflexión [mm]	0.3555	0.4280	0.5295	0.6617	0.8406	1.0942
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	224.8074	186.5082	150.8309	120.6749	94.8339	72.7810
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	224.1675	187.1693	151.2471	120.4127	94.4474	72.9862
Diferencia [%]	-0.2846	0.3545	0.2759	-0.2173	-0.4075	0.2819
Valor m Estimado	0.2772	0.297	0.318	0.3397	0.361	0.383
Coeficiente de Regresión R2	0.99997					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	976.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	268.6					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	6.1					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0043					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.1135					

Temperatura [°C]	-12.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	985.1	984.0	982.8	982.5	980.6	980.3
Deflexión [mm]	0.3385	0.4114	0.5123	0.6479	0.8342	1.0951
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	237.4078	195.1575	156.5077	123.7147	95.9028	73.0319
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	236.8026	195.9225	156.6862	123.4150	95.7407	73.1502
Diferencia [%]	-0.2549	0.3920	0.1140	-0.2422	-0.1691	0.1620
Valor m Estimado	0.2915	0.311	0.333	0.3553	0.377	0.399
Coeficiente de Regresión R2	0.99998					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	274.9					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.3					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0299					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0918					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	983.0	981.7	981.7	981.7	979.9	979.4
Deflexión [mm]	0.1557	0.1830	0.2215	0.2695	0.3308	0.4152
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	515.0650	437.5706	361.5247	297.2190	241.6474	192.4554
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	514.4561	437.7871	362.6037	297.0501	240.6884	192.8896
Diferencia [%]	-0.1182	0.0495	0.2985	-0.0568	-0.3969	0.2256
Valor m Estimado	0.2495	0.264	0.280	0.2956	0.311	0.327
Coeficiente de Regresión R2	0.99998					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	979.7					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	264.2					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.7					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0272					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0449					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	981.6	981.4	980.2	980.2	979.9	978.3
Deflexión [mm]	0.1614	0.1898	0.2281	0.2775	0.3438	0.4301
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	496.1904	421.8646	350.6197	288.1980	232.5328	185.5618
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	495.3972	422.9265	350.9345	287.4951	232.5294	185.6815
Diferencia [%]	-0.1599	0.2517	0.0898	-0.2439	-0.0014	0.0645
Valor m Estimado	0.2432	0.260	0.278	0.2969	0.315	0.334
Coeficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	979.3					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	264.2					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.2					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0207					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0517					

Tipo	Fecha de Investigación	Nº Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
5% Abl.	13-12-2018	1	-12.0	120.6749	0.3397	CUMPLE	CUMPLE
		2	-12.0	123.7147	0.3553	CUMPLE	CUMPLE
		3	-18.0	297.2190	0.2956	CUMPLE	FALLA
		4	-18.0	288.1980	0.2969	CUMPLE	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 58-22 es 22 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \text{ sen } \delta \leq 5000$ [KPa] en 15.4 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	58-22
---------------	-------

Resumen Caracterización PG

A continuación, se presenta el resumen de los valores obtenidos para la clasificación PG de la modificación con 5% de aditivo ablandador.

Tabla A- 28: Grado PG alta temperatura modificación con 5% de ablandador - Estado original

Clasificación PG Estado Original										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]		
		58	64	70	76	82	88	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
5% Abl.	1	2.02	0.96					63.7	0.22	63.8
	2	2.03	0.98					63.9		

Tabla A- 29: Grado PG 53% de ablandador - HPDR

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]		
		52	58	64	70	76	82	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
5% Abl.	1		6.43	2.98	1.40			66.4	0.95	66.9
	2		6.89	3.27	1.59			67.3		

Tabla A- 30: Grado PG temperatura intermedia modificación con 5% de ablandador

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia										
Datos del Betún		Parámetro G* sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000[KPa]		
		19	16	13				Temp. [°C]		Temp. Promedio
5% Abl.	1	3050	4420	6130				14.9	4.59	15.4
	3	3410	4970	6970				15.9		

Tabla A- 31: Grado PG baja temperatura modificación con 5% de ablandador

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura											
Datos del Betún			Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]									
		-6		-12		-18		-24		-30	
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m
5% Abl.	1			120.6749	0.340	297.219	0.296				
	2			123.7147	0.355	288.198	0.297				

Grado PG Exacto – Baja Temperatura

Tabla A- 32: Grado PG exacto baja temperatura - Modificación con 5% de ablandador

T [°C]	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	S _{prom}	m _{prom}	T° exacta (S)	T° exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG
-12	123.7147	0.355337	CUMPLE	CUMPLE	122.1948	0.3474995		-17.56	-17.56	-27.56	-22
-12	120.6749	0.339662	CUMPLE	CUMPLE							
-18	297.219	0.295614	CUMPLE	NO CUMPLE	292.7085	0.296254					
-18	288.198	0.296894	CUMPLE	NO CUMPLE							

Cabe destacar que, a partir de los datos de la tabla anterior, el grado exacto de baja temperatura es -27.56°C. De acuerdo con esto, es posible afirmar que el ligante modificado con 5% de ablandador tiene una clasificación PG 58-22.

7.8.3 Modificación con 7% de ablandador

INFORME DE ENSAYO 7% ABLANDADOR ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	14-06-2018
Hora de ensayo	12:05
Viscosidad [Pa·s]	0.335
Viscosidad [Poise]	3.3
Tasa corte [1/s]	46.5
Tensión corte [N/m ²]	155.6
Torque [%]	33.5
Velocidad de giro [rpm]	50.0
Temperatura [°C]	134.9
N° de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	14-06-2018
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	308

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de Ensayo	14-06-2018
Hora de ensayo	13:30:00

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	100.3
Temperatura Mínima Registrada [°C]	90.6
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:05:56
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	14-06-2018
Hora de ensayo	14:53:00

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	19.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	18-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	14:19

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	1.47	0.70	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	84.9	86.4	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	1.51	0.74	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	84.9	86.5	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	58	64	-	-	-	Temp. [°C]	T° Prom.
7% Abl.	M1	1.48	0.70	-	-	-	61.1	61.3
	M2	1.51	0.74	-	-	-	61.5	
Condición		CUMPLE	FALLA	-	-	-	-	-

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	15-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	14:08

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	4.48	2.16	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	78.5	81.1	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	-	-	-	-
Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	4.38	2.12	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	78.5	81.2	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	58	64	-	-	-	Temp. [°C]	T° Prom.
7% Abl.	M1	4.57	2.19	-	-	-	64.0	63.9
	M2	4.47	2.14	-	-	-	63.8	
Condición		CUMPLE	FALLA	-	-	-	-	-

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	25-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	13:52

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	19	16	13	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	4430	6790	10000	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	42.7	40.4	38.2	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	1.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	19	16	13	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	4380	6610	9670	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	43.4	41.2	39.2	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	1.0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro $G^* \sin(\delta)$ [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]							Falla a 5000 [KPa]
	Muestra	19	16	13	-	-	-	T° Falla
7% Abl.	M1	3000	4390	6200	-	-	-	14.9
	M2	3010	4350	6100	-	-	-	14.8
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA		-	-	
Temperatura promedio [°C]								14.9

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-18.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	04-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	198059.0
Última Verificación Conformidad	04-12-2018
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-17.9	-23.9	
Mínima T° [°C]	-18.0	-24.0	
Máx. Carga [mN]	981.2	980.6	
Mín. Carga [mN]	709.1	710.3	
Carga contacto t=0[mN]	35.3	32.5	
Carga 0,5 s [mN]	709.1	710.3	

Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-18.0	-23.8	
Mínima T° [°C]	-18.1	-23.9	
Máx. Carga [mN]	983.9	983.4	
Mín. Carga [mN]	710.7	713.2	
Carga contacto t=0[mN]	36.7	35.8	
Carga 0,5 s [mN]	710.7	713.2	

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	979.5	980.1	980.3	979.1	978.7	977.6
Deflexión [mm]	0.1918	0.2289	0.2798	0.3438	0.4292	0.5443
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	416.7016	349.4000	285.8281	232.3430	186.0192	146.5251
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	415.9086	350.1482	286.5399	231.8700	185.5369	146.8056
Diferencia [%]	-0.1903	0.2141	0.2490	-0.2036	-0.2592	0.1914
Valor m Estimado	0.2665	0.281	0.297	0.3135	0.330	0.346
Coefficiente de Regresión R2	0.99998					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	978.3					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	269.2					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.1					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0314					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0518					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	981.1	981.0	981.7	982.1	981.2	979.6
Deflexión [mm]	0.1885	0.2254	0.2745	0.3398	0.4283	0.5450
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	424.6877	355.1091	291.7575	235.7949	186.9320	146.6443
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	423.5695	356.8600	291.6263	235.1142	187.0056	146.7418
Diferencia [%]	-0.2633	0.4931	-0.0450	-0.2887	0.0394	0.0665
Valor m Estimado	0.264	0.281	0.301	0.3205	0.340	0.360
Coeficiente de Regresión R2	0.99997					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980.6					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	269.9					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.3					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0292					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0520					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	980.5	980.3	979.7	978.4	978.1	976.8
Deflexión [mm]	0.1118	0.1266	0.1462	0.1701	0.2013	0.2436
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	715.8339	631.8599	546.7926	469.3739	396.3930	327.1767
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	713.9810	633.6985	548.5126	468.4302	394.6913	328.1138
Diferencia [%]	-0.2589	0.2910	0.3146	-0.2010	-0.4293	0.2864
Valor m Estimado	0.181	0.199	0.218	0.2374	0.257	0.276
Coeficiente de Regresión R2	0.99994					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	977.3					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	267.0					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.2					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0031					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0478					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	982.9	983.1	982.6	982.3	981.9	980.1
Deflexión [mm]	0.1100	0.1250	0.1457	0.1722	0.2045	0.2492
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	728.9636	641.4057	550.3698	465.2733	391.8213	320.9042
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	728.5020	641.5878	550.7042	466.4593	389.8901	321.5909
Diferencia [%]	-0.0633	0.0284	0.0607	0.2549	-0.4929	0.2140
Valor m Estimado	0.193	0.211	0.230	0.2491	0.2683	0.287
Coeficiente de Regresión R2	0.99996					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	981.0					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	267.8					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	2.3					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0131					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0429					

Tipo	Fecha de Investigación	N° Análisis	T °C	S [MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
7% Abl.	04-12-2018	1	-18.0	232.3430	0.3135	CUMPLE	CUMPLE
		2	-18.0	235.7949	0.3205	CUMPLE	CUMPLE
		3	-24.0	469.3739	0.2374	FALLA	FALLA
		4	-24.0	465.2733	0.2491	FALLA	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 58-28 es 19 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 14,9 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	58-28
---------------	-------

Resumen Clasificación PG

A continuación, se presenta el resumen de los valores obtenidos para la clasificación PG de la modificación con 7% de aditivo ablandador.

Tabla A- 33: Grado PG alta temperatura modificación con 7% de ablandador - Estado original

Clasificación PG Estado Original										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]		
		58	64	70	76	82	88	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
7% Abl.	1	1.48	0.70					61.1	0.46	61.3
	2	1.51	0.738					61.5		

Tabla A- 34: Grado PG alta temperatura modificación con 7% de ablandador - HPDR

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]		
		58	64	70	76	82	88	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
7% Abl.	2	4.57	2.19					64.0	0.22	63.9
	3	4.47	2.14					63.8		

Tabla A- 35: Grado PG temperatura intermedia modificación con 7% de ablandador

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia										
Datos del Betún		Parámetro G* sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]			Falla a 5000[KPa]					
		19	16	13	Temp. [°C]	CV d2s%				Temp. Promedio
7% Abl.	1	3000	4390	6200	14.9	0.48	CUMPLE			14.9
	2	3010	4350	6100	14.8					

Tabla A- 36: Grado PG baja temperatura modificación con 7% de ablandador

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura											
Datos del Betún		Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]									
		-6		-12		-18		-24		-30	
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m
7% Abl.	1					232.343	0.314	469.374	0.237		
	2					235.795	0.321	465.273	0.249		

Grado PG Exacto – Baja Temperatura

Tabla A- 37: Grado PG exacto baja temperatura - Modificación con 7% de ablandador

T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	Sprom	mprom	T° exacta (S)	T°exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG
-18	232.343	0.313515	CUMPLE	CUMPLE	234.06895	0.3170175	-19.70	-19.38	-19.38	-29.38	-28
-18	235.7949	0.32052	CUMPLE	CUMPLE							
-24	469.3739	0.2374	NO CUMPLE	NO CUMPLE	467.3236	0.2432525					
-24	465.2733	0.249105	NO CUMPLE	NO CUMPLE							

Cabe destacar que, a partir de los datos de la tabla anterior, el grado exacto de baja temperatura es -29.38°C. De acuerdo con esto, es posible afirmar que el ligante modificado con 7% de ablandador tiene una clasificación PG 58-28.

7.8.4 Modificación con 12% de ablandador

INFORME DE ENSAYO 12% ABLANDADOR ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	03-12-2018
Hora de ensayo	13:10
Viscosidad [Pa·s]	0.268
Viscosidad [Poise]	2.68
Tasa corte [1/s]	46.5
Tensión corte [N/m ²]	124.5
Torque [%]	26.8
Velocidad de giro [rpm]	50.0
Temperatura [°C]	134.9
N° de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	04-12-2018
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	288

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	Anton Paar, MCR-301
Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	46.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de Ensayo	03-12-2018
Hora de ensayo	15:20:00
Cambio de masa por calentamiento [%]	-0.44

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	52.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	100.1
Temperatura Mínima Registrada [°C]	89.9
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:32:50
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	03-12-2018
Hora de ensayo	18:39:48

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	19.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi
Fecha de Ensayo	25-10-2018
Hora de ensayo [hrs]	14:39

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	46	52	58	64	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	5.52	2.60	1.25	0.62	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	79.8	82.2	84.2	85.9	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.000	12.000	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	46	52	58	64	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	5.63	2.64	1.26	0.63	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	79.9	82.3	84.3	85.9	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	12.0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	46	52	58	64	-	-	Temp. [°C] T°Prom.
12% Abl.	M1	5.61	2.62	1.25	0.62	-	-	59.9
	M2	5.72	2.66	1.27	0.63	-	-	60.0
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	10-12-2018
Hora de ensayo [hrs]	11:12

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	52	58	64	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	6.62	3.12	1.490	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	76.2	79.2	81.9	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	52	58	64	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	6.60	3.15	1.520	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	76.2	79.1	81.8	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	52	58	64	-	-	Temp. [°C]	T°Prom.
12% Abl.	M1	6.81	3.17	1.51	-	-	61.0	61.1
	M2	6.79	3.20	1.5	-	-	61.1	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-		

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	07-12-2018
Hora de ensayo [hrs]	11:42

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	19	16	13	10	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	2800	4370	6510	9530	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	43.9	41.6	39.5	37.5	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	19	16	13	10	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	2620	4050	6040	8890	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	43.8	41.6	39.5	37.5	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G* sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000 [KPa]	
	Muestra	19	16	13	10	-	-	T° Falla
12% Abl.	M1	1940	2900	4150	5810	-	-	11.3
	M2	1820	2690	3840	5410	-	-	10.7
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	
Temperatura promedio [°C]								11.0

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-18.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	14-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	196266.2
Última Verificación Conformidad	14-12-2018
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-17.9	-23.8	
Mínima T° [°C]	-18.0	-23.9	
Máx. Carga [mN]	982.1	980.1	
Mín. Carga [mN]	712.0	713.4	
Carga contacto t=0[mN]	35.0	34.0	
Carga 0,5 s [mN]	712.0	713.4	

Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-18.0	-24.0	
Mínima T° [°C]	-18.1	-24.1	
Máx. Carga [mN]	981.6	980.3	
Mín. Carga [mN]	713.0	717.9	
Carga contacto t=0[mN]	35.9	35.9	
Carga 0,5 s [mN]	713.0	717.9	

Temperatura [°C]	-18.0						
Muestra	M1						
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0	
Carga [mN]	981.0	981.4	980.2	980.0	979.3	977.9	
Deflexión [mm]	0.2649	0.3196	0.3948	0.4940	0.6272	0.8064	
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	302.1147	250.5060	202.5323	161.8568	127.3911	98.9367	
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	301.6672	251.0755	202.6760	161.6064	127.2837	99.0251	
Diferencia [%]	-0.1481	0.2274	0.0710	-0.1547	-0.0843	0.0894	
Valor m Estimado	0.2840	0.300	0.318	0.3356	0.353	0.371	
Coeficiente de Regresión R2	0.99999						
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	978.7						
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	266.7						
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.3						
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0301						
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0739						

Temperatura [°C]	-18.0
------------------	-------

Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	980.7	980.7	979.8	979.5	978.0	976.9
Deflexión [mm]	0.2476	0.2993	0.3706	0.4640	0.5888	0.7604
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	323.0968	267.2945	215.6777	172.2201	135.5232	104.8125
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	322.4550	268.0106	216.0061	171.9519	135.1994	104.9953
Diferencia [%]	-0.1986	0.2679	0.1523	-0.1558	-0.2389	0.1744
Valor m Estimado	0.286	0.302	0.320	0.3380	0.356	0.374
Coeficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	977.9					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	264.8					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.4					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0376					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0623					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	979.7	980.0	979.1	978.6	978.7	977.1
Deflexión [mm]	0.1358	0.1566	0.1851	0.2204	0.2660	0.3293
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	588.7962	510.4594	431.4952	362.2830	300.2325	242.0808
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	587.5442	511.3159	433.1069	361.9789	298.5064	242.8882
Diferencia [%]	-0.2126	0.1678	0.3735	-0.0840	-0.5749	0.3335
Valor m Estimado	0.212	0.230	0.249	0.2685	0.288	0.307
Coeficiente de Regresión R2	0.99994					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	977.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	264.4					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	2.3					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0139					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0491					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	980.0	979.6	978.9	978.0	977.2	977.8
Deflexión [mm]	0.0979	0.1141	0.1358	0.1630	0.1999	0.2503
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	816.7808	700.2979	588.2733	489.4076	398.8508	318.7691
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	814.3032	703.1175	589.8901	487.8328	397.6744	319.5516
Diferencia [%]	-0.3033	0.4026	0.2748	-0.3218	-0.2949	0.2455
Valor m Estimado	0.224	0.243	0.264	0.2844	0.3052	0.326
Coeficiente de Regresión R2	0.99995					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	977.6					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	259.7					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	2.6					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0054					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0275					

Tipo	Fecha de Investigación	Nº Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
12% Abl.	14-12-2018	1	-18.0	161.8568	0.3356	CUMPLE	CUMPLE
		2	-18.0	172.2201	0.3380	CUMPLE	CUMPLE
		3	-24.0	362.2830	0.2685	FALLA	FALLA
		4	-24.0	489.4076	0.2844	FALLA	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 58-28 es 19 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \text{ sen } \delta \leq 5000$ [KPa] en 11 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	58-28
---------------	-------

Resumen Caracterización PG

A continuación, se presenta el resumen de los valores obtenidos para la clasificación PG de la modificación con 12% de aditivo ablandador.

Tabla A- 38: Grado PG alta temperatura modificación con 12% de ablandador - Estado original

Clasificación PG Estado Original										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]		
		46	52	58	64	70	76	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
12% Abl.	1	5.61	2.62	1.25	0.62			59.9	0.12	60.0
	2	5.72	2.66	1.27	0.63			60.0		

Tabla A- 39: Grado PG alta temperatura modificación con 12% de ablandador - HPDR

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]		
		52	58	64	70	76	82	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
12% Abl.	1	6.81	3.17	1.51				61.0	0.12	61.1
	2	6.79	3.20	1.53				61.1		

Tabla A- 40: Grado PG temperatura intermedia modificación con 12% de ablandador

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia										
Datos del Betún		Parámetro G* sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000[KPa]		
		19	16	13	10			CV d2s%	Temp. Promedio	
12% Abl.	1	1940	2900	4150	5810		11.3	3.86	CUMPLE	11.0
	2	1820	2690	3840	5410		10.7			

Tabla A- 41: Grado PG baja temperatura modificación con 12% de ablandador

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura											
Datos del Betún		Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]									
		-6		-12		-18		-24		-30	
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m
12% Abl.	1					161.8568	0.336	362.2830	0.268		
	2					172.2201	0.338	489.4076	0.284		

Grado PG Exacto – Baja Temperatura

Tabla A- 42: Grado PG exacto baja temperatura - Modificación con 12% de ablandador

T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	Sprom	mprom	T° exacta (S)	T°exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG
-18	161.8568	0.335564	CUMPLE	CUMPLE	167.03845	0.3367775	-21.08	-21.66	-21.08	-31.08	-28
-18	172.2201	0.337991	CUMPLE	CUMPLE							
-24	362.283	0.268481	NO CUMPLE	NO CUMPLE	425.8453	0.276455					
-24	489.4076	0.284429	NO CUMPLE	NO CUMPLE							

Cabe destacar que, a partir de los datos de la tabla anterior, el grado exacto de baja temperatura es -31.08°C. De acuerdo con esto, es posible afirmar que el ligante modificado con 12% de ablandador tiene una clasificación PG 58-28.

7.8.5 Modificación con 14% de ablandador

INFORME DE ENSAYO 14% ABLANDADOR ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	08-11-2018
Hora de ensayo	16:51
Viscosidad [Pa·s]	0.23
Viscosidad [Poise]	2.3
Tasa corte [1/s]	46.5
Tensión corte [N/m ²]	105.7
Torque [%]	22.7
Velocidad de giro [rpm]	50.0
Temperatura [°C]	134.9
N° de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	08-11-2018
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	294

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	Anton Paar, MCR-301
Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	46.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de Ensayo	08-11-2018
Hora de ensayo	9:59:00
Cambio de masa por calentamiento [%]	-0.532

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	46.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	102.0
Temperatura Mínima Registrada [°C]	95.3
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:11:12
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	08-11-2018
Hora de ensayo	14:12:01

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	13.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	26-10-2018
Hora de ensayo [hrs]	15:42

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	46	52	58	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.82	1.78	0.85	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	81.4	83.3	84.8	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	46	52	58	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.85	1.81	0.87	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	81.6	83.7	85.4	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]							Falla a 1,0 [KPa]
	Muestra	46	52	58	-	-	-	Temp. [°C] T°Prom.
14%	M1	3.86	1.79	0.85	-	-	-	56.7
	M2	3.89	1.82	0.87	-	-	-	56.9
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	-	

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	08-11-2018
Hora de ensayo [hrs]	12:47

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	46	52	58	64	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	11.10	5.13	2.36	1.11	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	73.7	76.9	79.9	82.6	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	46	52	58	64	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	11.00	5.09	2.35	1.09	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	73.8	76.9	80.0	82.6	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]							Falla a 2,2 [KPa]
	Muestra	46	52	58	64	-	Temp. [°C]	T°Prom.
14%	M1	11.50	5.27	2.40	1.12	-	58.7	58.7
	M2	11.40	5.23	2.38	1.10	-	58.6	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-		

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	09-11-2018
Hora de ensayo [hrs]	16:40

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	-	-	13	10	7	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	-	-	5000	7420	10900	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	-	-	40.7	38.7	36.8	-
Amplitud de deformación [%]	-	-	1.0	1.0	1.0	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	-	-	13	10	7	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	-	-	4650	7320	10800	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	-	-	41.2	38.8	36.8	-
Amplitud de deformación [%]	-	-	1.0	1.0	1.0	-

Tipo Betún	Parámetro $G^* \sin(\delta)$ [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]							Falla a 5000 [KPa]
	Muestra	-	-	13	10	7	-	T° Falla
14%	M1	-	-	3260	4640	6510	-	9.3
	M2	-	-	3060	5490	6490	-	9.3
Condición		-	-	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-
Temperatura promedio [°C]								9.3

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-18.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	10-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	198344.9
Última Verificación Conformidad	10-12-2018
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-17.9	-23.9	
Mínima T° [°C]	-18.0	-23.9	
Máx. Carga [mN]	983.0	980.8	
Mín. Carga [mN]	713.1	716.1	
Carga contacto t=0[mN]	36.0	35.1	
Carga 0,5 s [mN]	713.1	716.1	

Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-18.0	-23.9	
Mínima T° [°C]	-18.0	-24.0	
Máx. Carga [mN]	980.9	980.4	
Mín. Carga [mN]	714.3	715.4	
Carga contacto t=0[mN]	37.0	33.7	
Carga 0,5 s [mN]	714.3	715.4	

Temperatura [°C]	-18.0						
Muestra	M1						
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0	
Carga [mN]	982.5	981.2	981.8	980.8	979.5	976.4	
Deflexión [mm]	0.2933	0.3579	0.4483	0.5658	0.7242	0.9424	
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	273.3110	223.6805	178.6685	141.4175	110.3479	84.5267	
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	272.6423	224.4025	179.0258	141.1568	109.9984	84.7168	
Diferencia [%]	-0.2447	0.3228	0.1999	-0.1843	-0.3166	0.2249	
Valor m Estimado	0.3021	0.317	0.334	0.3513	0.368	0.385	
Coefficiente de Regresión R2	0.99998						
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	978.7						
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	265.6						
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.1						
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0477						
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0662						

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	979.6	979.1	979.0	978.7	977.5	975.8
Deflexión [mm]	0.3052	0.3725	0.4659	0.5881	0.7530	0.9840
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	261.0929	215.2135	171.8407	135.4961	105.5048	81.1263
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	261.0929	215.2135	171.8407	135.4961	105.5048	81.1263
Diferencia [%]	-0.2832	0.3641	0.2493	-0.2093	-0.3895	0.2713
Valor m Estimado	0.299	0.316	0.334	0.3519	0.370	0.388
Coeficiente de Regresión R2	0.99997					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	976.9					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	262.6					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.5					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0400					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0770					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	979.6	979.3	979.6	978.6	977.2	975.6
Deflexión [mm]	0.1520	0.1783	0.2132	0.2574	0.3156	0.3930
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	525.6642	448.1231	374.7849	310.1254	252.5914	202.5051
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	524.3824	449.7251	375.3095	309.4419	252.0669	202.8615
Diferencia [%]	-0.2438	0.3575	0.1400	-0.2204	-0.2076	0.1760
Valor m Estimado	0.236	0.252	0.270	0.2871	0.305	0.322
Coeficiente de Regresión R2	0.99997					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	976.9					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	260.8					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.4					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0213					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0494					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	980.0	979.7	978.3	977.9	977.4	975.7
Deflexión [mm]	0.1624	0.1892	0.2249	0.2712	0.3298	0.4063
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	492.3438	422.5145	354.9318	294.2056	241.8034	195.9234
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	491.9169	423.1651	354.7903	294.2884	241.4982	196.0625
Diferencia [%]	-0.0867	0.1540	-0.0399	0.0281	-0.1262	0.0710
Valor m Estimado	0.232	0.247	0.262	0.2775	0.2930	0.308
Coeficiente de Regresión R2	1.00000					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	976.7					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	261.3					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.6					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0113					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0583					

Tipo	Fecha de Investigación	Nº Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
14%	14-12-2018	1	-18.0	141.4175	0.3513	CUMPLE	CUMPLE
		2	-18.0	135.7803	0.3519	CUMPLE	CUMPLE
		3	-24.0	310.1254	0.2871	FALLA	FALLA
		4	-24.0	294.2056	0.2775	CUMPLE	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 52-28 es 19 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 9.3 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	52-28
---------------	-------

Resumen Caracterización PG

A continuación, se presenta el resumen de los valores obtenidos para la clasificación PG de la modificación con 14% de aditivo ablandador.

Tabla A- 43: Grado PG alta temperatura modificación con 14% de ablandador - Estado original

Clasificación PG Estado Original										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]		
		46	52	58	64	70	76	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
14% Abl.	1	3.86	1.79	0.85				56.7	0.25	CUMPLE
	2	3.89	1.82	0.87				56.9		

Tabla A- 44: Grado PG alta temperatura modificación con 14% de ablandador - HPDR

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]		
		46	52	58	64	70	76	Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio
14% Abl.	1	11.50	5.27	2.40	1.12			58.7	0.12	CUMPLE
	2	11.40	5.23	2.38	1.10			58.6		

Tabla A- 45: Grado PG temperatura intermedia modificación con 14% de ablandador

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia										
Datos del Betún		Parámetro G* sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000[KPa]		
		13	10	7				CV d2s%	Temp. Promedio	
14% Abl.	1	3260	4640	6510	9.3			0.00	CUMPLE	9.3
	2	3060	4590	6490	9.3					

Tabla A- 46: Grado PG baja temperatura modificación con 14% de ablandador

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura										
Datos del Betún		Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]								
		-6		-12		-18		-24		-30
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S
14% Abl.	1					141.4175	0.351	310.1254	0.287	
	2					135.7803	0.352	294.2056	0.277	

Grado PG Exacto – Baja Temperatura

Tabla A- 47: Grado PG exacto baja temperatura modificación con 14% de ablandador

T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	S _{prom}	m _{prom}	T° exacta (S)	T°exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG
-18	135.7803	0.351882	CUMPLE	CUMPLE	138.5989	0.351612	-23.92	-22.47	-22.47	-32.47	-28
-18	141.4175	0.351342	CUMPLE	CUMPLE							
-24	310.1254	0.287137	NO CUMPLE	NO CUMPLE	302.1655	0.282307					
-24	294.2056	0.277477	CUMPLE	NO CUMPLE							

Cabe destacar que, a partir de los datos de la tabla anterior, el grado exacto de baja temperatura es -32.47°C. De acuerdo con esto, es posible afirmar que el ligante modificado con 14% de ablandador tiene una clasificación PG 52-28.

7.8.6 Modificación con 15% de ablandador

INFORME DE ENSAYO 15% ABLANDADOR ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	25-06-2018
Hora de ensayo	11:51
Viscosidad [Pa·s]	0.21
Viscosidad [Poise]	2.1
Tasa corte [1/s]	46.5
Tensión corte [N/m ²]	95.3
Torque [%]	20.5
Velocidad de giro [rpm]	50.0
Temperatura [°C]	134.9
N° de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	26-06-2018
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	292

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	Anton Paar, MCR-301
Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	52.0
Diámetro de plato de ensaye [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de Ensayo	20-06-2018
Hora de ensayo	16:10:00

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	52.0
Diámetro de plato de ensaye [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	100.5
Temperatura Mínima Registrada [°C]	88.2
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:52:31
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	20-06-2018
Hora de ensayo	16:00:00

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	19.0
Diámetro de plato de ensaye [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	22-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	14:57

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	52	58	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	1.07	0.54	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	84.7	85.8	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	52	58	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	1.03	0.51	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	85.6	87.0	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	52	58	-	-	-	Temp. [°C]	T°Prom.
15%	M1	1.07	0.54	-	-	-	52.6	52.5
	M2	1.03	0.51	-	-	-	52.3	
Condición		CUMPLE	FALLA	-	-	-	-	-

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	25-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	9:49

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	52	58	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.19	1.49	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	79.6	82.4	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	52	58	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.22	1.49	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	79.4	82.1	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	52	58	-	-	-	Temp. [°C]	T°Prom.
15%	M1	3.24	1.50	-	-	-	55.0	55.1
	M2	3.27	1.50	-	-	-	55.1	
Condición		CUMPLE	FALLA	-	-	-	-	-

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	29-06-2018
Hora de ensayo [hrs]	9:31

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	19	16	13	10	7	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	2150	1660	5050	7560	11200	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	45.6	43.4	41.3	39.3	37.3	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	19	16	13	10	7	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	1780	2820	4250	6320	9310	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	45.9	43.6	41.5	39.5	37.5	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	-

Tipo Betún	Parámetro $G^* \text{ sen}(\delta)$ [KPa]								
	Temperatura de Ensayo [°C]							Falla a 5000 [KPa]	
	Muestra	19	16	13	10	7	-	-	T° Falla
15%	M1	1530	2290	3340	4790	6770	-	-	9.6
	M2	1280	1940	2820	4020	5670	-	-	8.1
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	
Temperatura promedio [°C]									8.9

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-18.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	07-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	201093.7
Última Verificación Conformidad	07-12-2018
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-17.9	-23.9	
Mínima T° [°C]	-18.1	-24.1	
Máx. Carga [mN]	980.9	982.7	
Mín. Carga [mN]	711.6	715.7	
Carga contacto t=0[mN]	34.7	35.1	
Carga 0,5 s [mN]	711.6	715.7	

Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-18.1	-23.9	
Mínima T° [°C]	-18.3	-24.0	
Máx. Carga [mN]	982.3	983.1	
Mín. Carga [mN]	712.2	717.0	
Carga contacto t=0[mN]	35.7	36.2	
Carga 0,5 s [mN]	712.2	717.0	

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	980.0	979.8	979.3	978.6	976.9	976.2
Deflexión [mm]	0.3107	0.3808	0.4782	0.6042	0.7773	1.0077
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	257.3763	209.9018	167.0693	132.1328	102.5327	79.0326
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	256.9000	210.4830	167.3282	131.6741	102.5677	79.0860
Diferencia [%]	-0.1851	0.2769	0.1550	-0.3472	0.0341	0.0676
Valor m Estimado	0.3104	0.324	0.338	0.3531	0.368	0.382
Coefficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	977.0					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	265.4					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.5					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0553					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0680					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	981.0	981.3	980.9	979.7	979.6	977.8
Deflexión [mm]	0.3204	0.3940	0.4968	0.6312	0.8107	1.0571
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	249.7876	203.2170	161.0923	126.6310	98.5801	75.4676
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	249.3828	203.6256	161.3166	126.5452	98.2953	75.6031
Diferencia [%]	-0.1621	0.2010	0.1392	-0.0677	-0.2889	0.1795
Valor m Estimado	0.316	0.329	0.343	0.3574	0.372	0.386
Coeficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	978.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	266.6					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.1					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0468					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0737					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	982.0	981.9	981.1	980.2	978.1	978.0
Deflexión [mm]	0.1633	0.1933	0.2335	0.2854	0.3514	0.4382
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	490.7105	414.4212	342.7357	280.1691	227.0573	182.0793
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	490.2585	415.1461	342.5744	280.1020	226.9263	182.1633
Diferencia [%]	-0.0921	0.1749	-0.0471	-0.0239	-0.0577	0.0461
Valor m Estimado	0.259	0.271	0.284	0.2971	0.310	0.324
Coeficiente de Regresión R2	1.00000					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	978.5					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	262.8					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.7					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0207					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0506					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	982.4	983.1	982.3	981.3	980.1	979.2
Deflexión [mm]	0.1644	0.1935	0.2323	0.2812	0.3475	0.4338
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	487.4264	414.5054	344.9960	284.7355	230.1029	184.1474
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	486.4289	415.7560	345.5821	283.7320	230.0963	184.3128
Diferencia [%]	-0.2046	0.3017	0.1699	-0.3524	-0.0029	0.0898
Valor m Estimado	0.242	0.258	0.276	0.2934	0.3112	0.329
Coeficiente de Regresión R2	0.99998					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	979.9					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	262.9					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.2					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0163					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0545					

Tipo	Fecha de Investigación	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
15% Abl.	11-07-2018	1	-18.0	132.1328	0.353	CUMPLE	CUMPLE
		2	-18.0	126.6310	0.357	CUMPLE	CUMPLE
		3	-24.0	280.1691	0.297	CUMPLE	FALLA
		4	-24.0	284.7355	0.293	CUMPLE	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 52-28 es 10 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \text{ sen } \delta \leq 5000$ [KPa] en 8,9 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	52-28
---------------	-------

Resumen Caracterización PG

A continuación, se presenta el resumen de los valores obtenidos para la clasificación PG de la modificación con 15% de aditivo ablandador.

Tabla A- 48: Grado PG alta temperatura modificación con 15% de ablandador - Estado original

Clasificación PG Estado Original										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 1,0 [KPa]			
		52	58				Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio	
15% Abl.	1	1.07	0.54				52.6	0.40	CUMPLE	52.5
	2	1.03	0.51				52.3			

Tabla A- 49: Grado PG alta temperatura modificación con 15% de ablandador - HPDR

Clasificación PG Envejecimiento Primario (HPDR)										
Datos del Betún		Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 2,2 [KPa]			
		52	58				Temp. [°C]	CV d2s%	Temp. Promedio	
15% Abl.	1	3.24	1.50				55.0	0.13	CUMPLE	55.1
	2	3.27	1.50				55.1			

Tabla A- 50: Grado PG temperatura intermedia modificación con 15% de ablandador

Clasificación PG Envejecimiento Secundario (PAV) a Temperatura Intermedia										
Datos del Betún		Parámetro G* sen(δ) [KPa]								
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 5000[KPa]			
		19	16	13	10	7		CV d2s%	Temp. Promedio	
15% Abl.	1	1530	2290	3340	4790	6770	9.6	11.98	CUMPLE	8.9
	2	1280	1940	2820	4020	5670	8.1			

Tabla A- 51: Grado PG baja temperatura modificación con 15% de ablandador

Clasificación PG Estado Envejecido Secundario (PAV) a Baja Temperatura											
Datos del Betún		Parámetros S [KPa] ó valor-m a 60[s]									
Tipo Betún	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]									
		-6		-12		-18		-24		-30	
		S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m	S	valor-m
15% Abl.	1					132.1328	0.353	280.1691	0.297		
	2					126.6310	0.357	284.7355	0.293		

Grado PG Exacto – Baja Temperatura

Tabla A- 52: Grado PG exacto baja temperatura modificación con 15% de ablandador

T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	Sprom	mprom	T° exacta (S)	T°exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG					
-18	132.1328	0.353052	CUMPLE	CUMPLE	129.3819	0.355201		-23.52	-23.52	-33.52	-28					
-18	126.631	0.35735	CUMPLE	CUMPLE												
-24	284.7355	0.293395	CUMPLE	NO CUMPLE	282.4523	0.295246										
-24	280.1691	0.297097	CUMPLE	NO CUMPLE												

Cabe destacar que, a partir de los datos de la tabla anterior, el grado exacto de baja temperatura es -33.52°C. De acuerdo con esto, es posible afirmar que el ligante modificado con 15% de ablandador tiene una clasificación PG 52-28.

7.9 ANEXO 9: RESUMEN RESULTADOS MSCR Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA MUESTRAS CON 7% DE ABLANDADOR

7.9.1 Resultados MSCR a 58°C – Modificación con 7% de ablandador

Tabla A- 53: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador (Muestra C-1)

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	11.39	2.99	1.75	2.03	73.80	16.16
Muestra 2	10.72	2.72	1.84	2.00	74.60	8.63
Desviación Estándar	0.48	0.19	0.06	0.02	0.57	5.33
Promedio	11.05	2.85	1.80	2.02	74.20	12.39

Tabla A- 54: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador (Muestra C-2)

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	12.12	2.53	1.83	2.02	79.09	10.26
Muestra 2	11.03	2.40	2.14	2.28	78.26	6.69
Desviación Estándar	0.77	0.10	0.22	0.19	0.59	2.53
Promedio	11.58	2.47	1.99	2.15	78.68	8.48

Tabla A- 55: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador (Muestra C-3)

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	11.87	3.32	1.47	1.82	72.02	23.79
Muestra 2	11.47	2.91	1.76	1.98	74.63	12.46
Muestra 3	10.90	2.95	1.86	1.96	72.98	1.96
Desviación Estándar	0.49	0.23	0.20	0.09	1.32	10.92
Promedio	11.41	3.06	1.70	1.92	73.21	12.74

7.9.2 Análisis de varianza ANOVA – Modificación con ablandador

La Tabla A- 56 presenta los datos de entrada para el Análisis de Varianza ANOVA con un nivel de significancia de 0.05 (α).

Tabla A- 56: Datos de entrada para análisis de varianza.

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	2	4.032	2.016	0.000578
Column 2	2	4.301	2.1505	0.035113
Column 3	3	5.757	1.919	0.007461

Tabla A- 57: Resultados análisis de varianza modificación con ablandador.

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.064338	2	0.032169	2.54239	0.193861	6.944272
Within Groups	0.050613	4	0.012653			
Total	0.114951	6				

Los resultados de la

Tabla A- 57 indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de Jnr obtenidos, dado que el valor de la probabilidad es mayor al valor de α . Recordar que un valor de significancia de 0.05 indica un riesgo del 5% de concluir que existe una diferencia cuando no la hay realmente.

7.10 ANEXO 10: RESULTADOS MSCR MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR UTILIZANDO MEZCLADOR

7.10.1 Modificación 1

Tabla A- 58: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 1 - Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.234	0.212	0.234	0.212	0.022	9.402	11.390	2.120	1.750
2	0.212	0.429	0.406	0.217	0.194	0.023	10.599		1.940	
3	0.406	0.612	0.589	0.206	0.183	0.023	11.165		1.830	
4	0.589	0.788	0.765	0.199	0.176	0.023	11.558		1.760	
5	0.765	0.959	0.936	0.194	0.171	0.023	11.856		1.710	
6	0.936	1.130	1.100	0.194	0.164	0.030	15.464		1.640	
7	1.100	1.290	1.270	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
8	1.270	1.450	1.430	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
9	1.430	1.610	1.590	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
10	1.590	1.770	1.750	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
11	1.750	8.160	7.960	6.410	6.210	0.200	3.120	2.985	1.941	2.033
12	7.960	14.500	14.300	6.540	6.340	0.200	3.058		1.981	
13	14.300	21.100	20.900	6.800	6.600	0.200	2.941		2.063	
14	20.900	27.800	27.600	6.900	6.700	0.200	2.899		2.094	
15	27.600	34.500	34.300	6.900	6.700	0.200	2.899		2.094	
16	34.300	41.200	41.000	6.900	6.700	0.200	2.899		2.094	
17	41.000	47.800	47.600	6.800	6.600	0.200	2.941		2.063	
18	47.600	54.300	54.100	6.700	6.500	0.200	2.985		2.031	
19	54.100	60.700	60.500	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
20	60.500	67.000	66.800	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
Rdiff								73.795	Jnr-diff	16.161

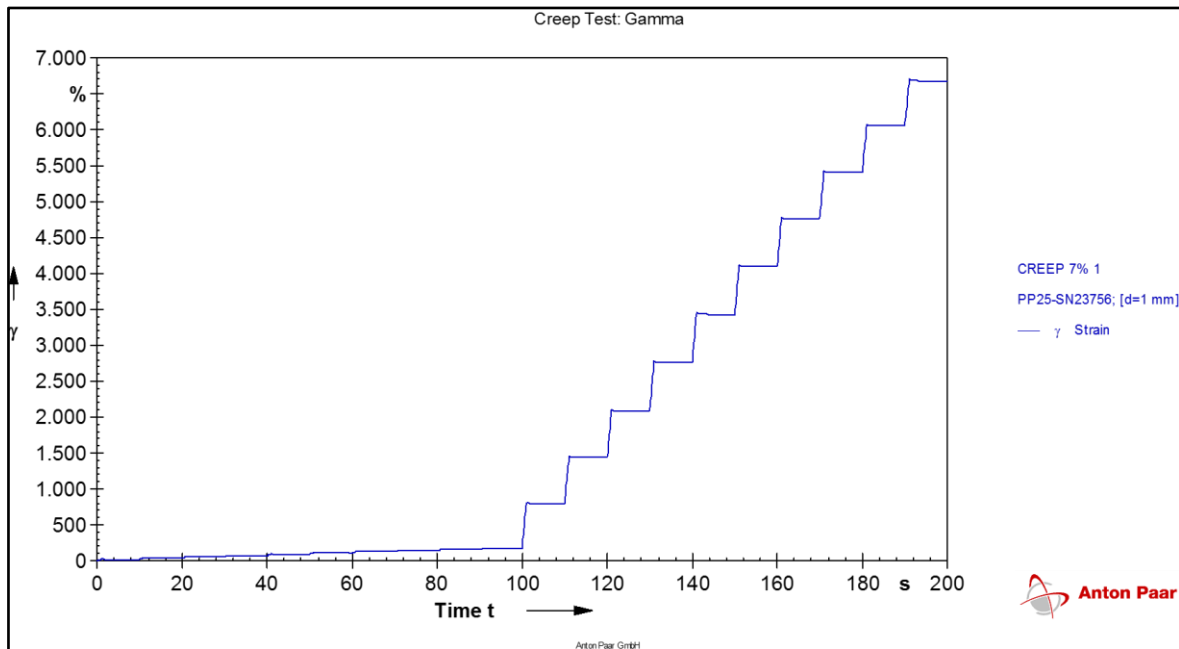


Figura A- 34: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% de ablandador utilizando mezclador – Modificación 1 - Muestra 1

Tabla A- 59: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 1 - Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.239	0.217	0.239	0.217	0.022	9.205	10.716	2.170	1.840
2	0.217	0.442	0.420	0.225	0.203	0.022	9.778		2.030	
3	0.420	0.634	0.612	0.214	0.192	0.022	10.280		1.920	
4	0.612	0.819	0.797	0.207	0.185	0.022	10.628		1.850	
5	0.797	1.000	0.978	0.203	0.181	0.022	10.837		1.810	
6	0.978	1.180	1.150	0.202	0.172	0.030	14.851		1.720	
7	1.150	1.350	1.330	0.200	0.180	0.020	10.000		1.800	
8	1.330	1.520	1.500	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
9	1.500	1.690	1.670	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
10	1.670	1.860	1.840	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
11	1.840	8.460	8.270	6.620	6.430	0.190	2.870	2.722	2.009	1.999
12	8.270	14.900	14.700	6.630	6.430	0.200	3.017		2.009	
13	14.700	21.400	21.200	6.700	6.500	0.200	2.985		2.031	
14	21.200	27.800	27.700	6.600	6.500	0.100	1.515		2.031	
15	27.700	34.300	34.100	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
16	34.100	40.700	40.500	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
17	40.500	47.100	46.900	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
18	46.900	53.400	53.300	6.500	6.400	0.100	1.538		2.000	
19	53.300	59.800	59.600	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
20	59.600	66.000	65.800	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
Rdiff								74.600	Jnr-diff	8.628

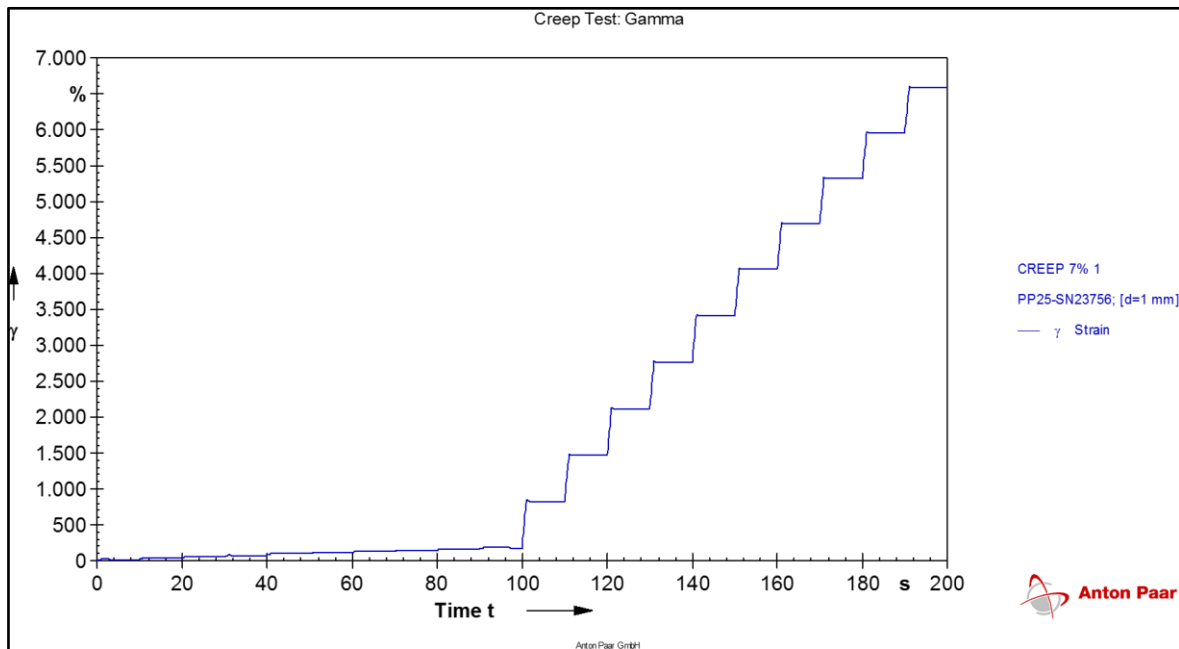


Figura A- 35: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% de ablandador utilizando mezclador – Modificación 1 - Muestra 2

7.10.2 Modificación 2

Tabla A- 60: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 2 - Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.244	0.222	0.244	0.222	0.022	9.016	12.121	2.220	1.830
2	0.222	0.447	0.425	0.225	0.203	0.022	9.778		2.030	
3	0.425	0.637	0.615	0.212	0.190	0.022	10.377		1.900	
4	0.615	0.820	0.798	0.205	0.183	0.022	10.732		1.830	
5	0.798	0.998	0.976	0.200	0.178	0.022	11.000		1.780	
6	0.976	1.170	1.150	0.194	0.174	0.020	10.309		1.740	
7	1.150	1.350	1.320	0.200	0.170	0.030	15.000		1.700	
8	1.320	1.520	1.490	0.200	0.170	0.030	15.000		1.700	
9	1.490	1.690	1.660	0.200	0.170	0.030	15.000		1.700	
10	1.660	1.860	1.830	0.200	0.170	0.030	15.000		1.700	
11	1.830	8.510	8.330	6.680	6.500	0.180	2.695	2.534	2.031	2.018
12	8.330	15.000	14.800	6.670	6.470	0.200	2.999		2.022	
13	14.800	21.500	21.300	6.700	6.500	0.200	2.985		2.031	
14	21.300	27.900	27.800	6.600	6.500	0.100	1.515		2.031	
15	27.800	34.400	34.200	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
16	34.200	40.800	40.700	6.600	6.500	0.100	1.515		2.031	
17	40.700	47.300	47.100	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
18	47.100	53.700	53.600	6.600	6.500	0.100	1.515		2.031	
19	53.600	60.200	60.000	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
20	60.000	66.600	66.400	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
Rdiff								79.091	Jnr-diff	10.263

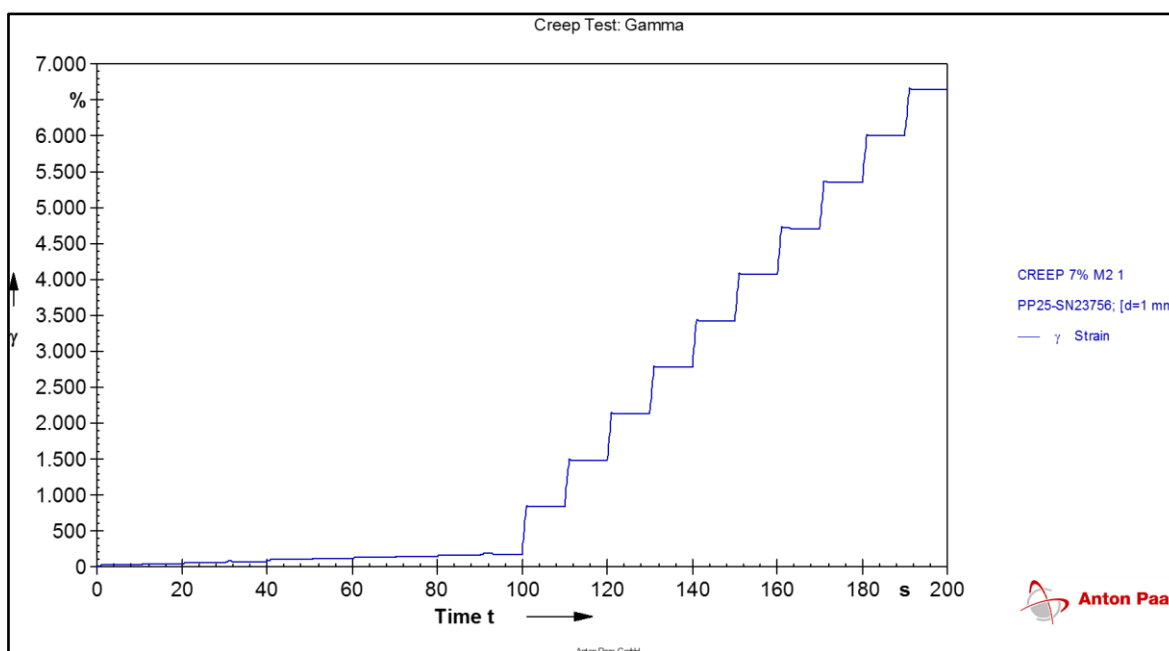


Figura A- 36: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 2 - Muestra 1

Tabla A- 61: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 2 - Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.295	0.270	0.295	0.270	0.025	8.475	11.029	2.700	2.140
2	0.270	0.539	0.513	0.269	0.243	0.026	9.665		2.430	
3	0.513	0.765	0.739	0.252	0.226	0.026	10.317		2.260	
4	0.739	0.979	0.953	0.240	0.214	0.026	10.833		2.140	
5	0.953	1.190	1.160	0.237	0.207	0.030	12.658		2.070	
6	1.160	1.390	1.360	0.230	0.200	0.030	13.043		2.000	
7	1.360	1.590	1.560	0.230	0.200	0.030	13.043		2.000	
8	1.560	1.780	1.750	0.220	0.190	0.030	13.636		1.900	
9	1.750	1.970	1.950	0.220	0.200	0.020	9.091		2.000	
10	1.950	2.160	2.140	0.210	0.190	0.020	9.524		1.900	
11	2.140	9.760	9.570	7.620	7.430	0.190	2.493	2.398	2.322	2.283
12	9.570	17.300	17.100	7.730	7.530	0.200	2.587		2.353	
13	17.100	24.900	24.700	7.800	7.600	0.200	2.564		2.375	
14	24.700	32.400	32.300	7.700	7.600	0.100	1.299		2.375	
15	32.300	39.800	39.700	7.500	7.400	0.100	1.333		2.313	
16	39.700	47.100	46.900	7.400	7.200	0.200	2.703		2.250	
17	46.900	54.300	54.100	7.400	7.200	0.200	2.703		2.250	
18	54.100	61.400	61.200	7.300	7.100	0.200	2.740		2.219	
19	61.200	68.400	68.200	7.200	7.000	0.200	2.778		2.188	
20	68.200	75.400	75.200	7.200	7.000	0.200	2.778		2.188	
Rdiff								78.259	Jnr-diff	6.688

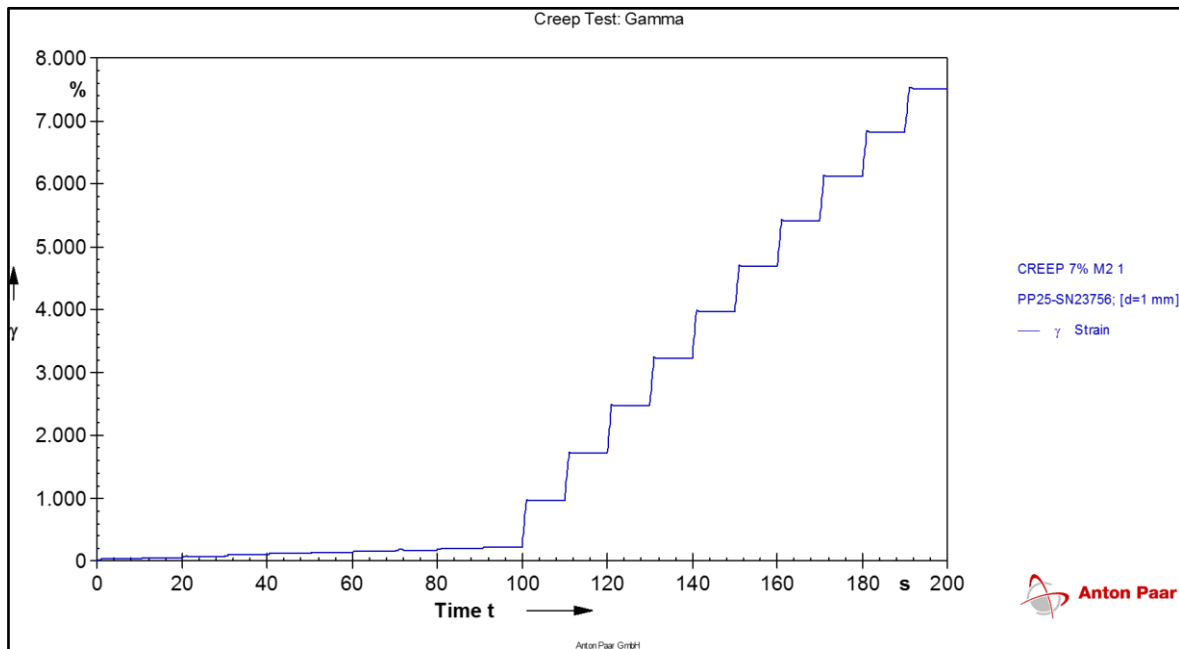


Figura A- 37: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 2 - Muestra 2

7.10.3 Modificación 3

Tabla A- 62: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 3 - Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.161	0.143	0.161	0.143	0.018	11.180	11.870	1.430	1.470
2	0.143	0.306	0.286	0.163	0.143	0.020	12.270		1.430	
3	0.286	0.452	0.432	0.166	0.146	0.020	12.048		1.460	
4	0.432	0.598	0.578	0.166	0.146	0.020	12.048		1.460	
5	0.578	0.745	0.725	0.167	0.147	0.020	11.976		1.470	
6	0.725	0.893	0.873	0.168	0.148	0.020	11.905		1.480	
7	0.873	1.040	1.020	0.167	0.147	0.020	11.976		1.470	
8	1.020	1.190	1.170	0.170	0.150	0.020	11.765		1.500	
9	1.170	1.340	1.320	0.170	0.150	0.020	11.765		1.500	
10	1.320	1.490	1.470	0.170	0.150	0.020	11.765		1.500	
11	1.470	7.400	7.200	5.930	5.730	0.200	3.373	3.321	1.791	1.820
12	7.200	13.200	13.000	6.000	5.800	0.200	3.333		1.813	
13	13.000	19.000	18.800	6.000	5.800	0.200	3.333		1.813	
14	18.800	24.900	24.700	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
15	24.700	30.800	30.600	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
16	30.600	36.600	36.400	6.000	5.800	0.200	3.333		1.813	
17	36.400	42.500	42.300	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
18	42.300	48.300	48.100	6.000	5.800	0.200	3.333		1.813	
19	48.100	54.100	53.900	6.000	5.800	0.200	3.333		1.813	
20	53.900	59.900	59.700	6.000	5.800	0.200	3.333		1.813	
Rdiff								72.022	Jnr-diff	23.788

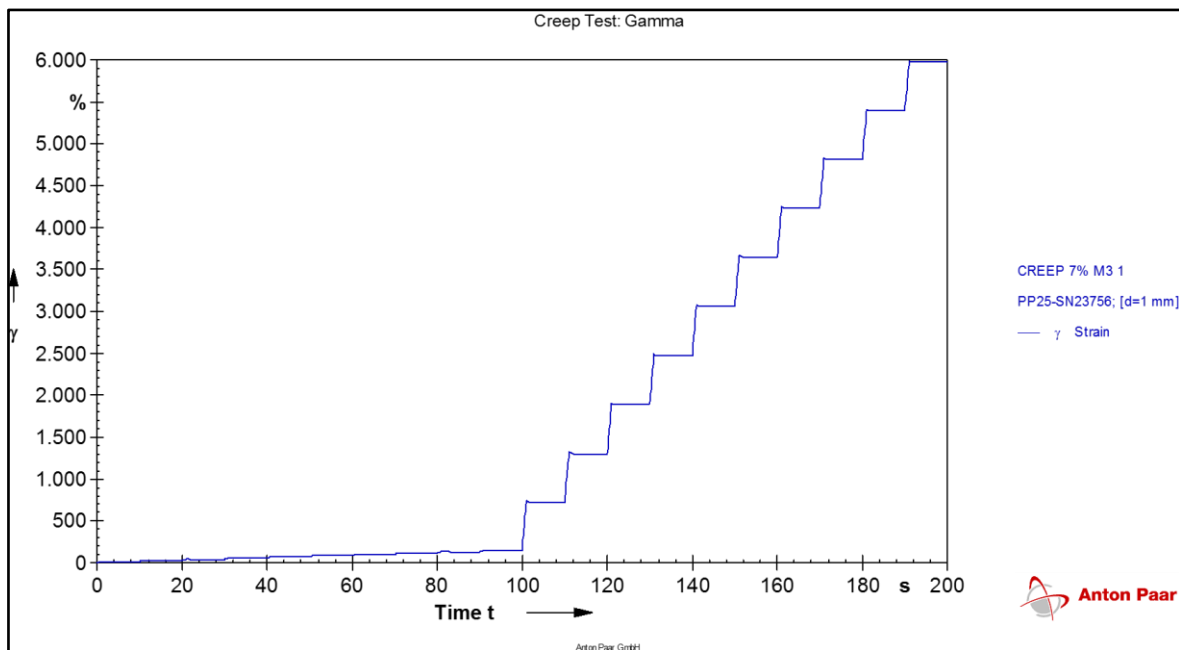


Figura A- 38: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 3 - Muestra 1

Tabla A- 63: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 3 - Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.213	0.192	0.213	0.192	0.021	9.859	11.468	1.920	1.760
2	0.192	0.399	0.377	0.207	0.185	0.022	10.628		1.850	
3	0.377	0.580	0.558	0.203	0.181	0.022	10.837		1.810	
4	0.558	0.757	0.736	0.199	0.178	0.021	10.553		1.780	
5	0.736	0.932	0.910	0.196	0.174	0.022	11.224		1.740	
6	0.910	1.100	1.080	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
7	1.080	1.280	1.250	0.200	0.170	0.030	15.000		1.700	
8	1.250	1.450	1.420	0.200	0.170	0.030	15.000		1.700	
9	1.420	1.610	1.590	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
10	1.590	1.780	1.760	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
11	1.760	8.340	8.140	6.580	6.380	0.200	3.040	2.910	1.994	1.979
12	8.140	14.800	14.600	6.660	6.460	0.200	3.003		2.019	
13	14.600	21.200	21.000	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
14	21.000	27.600	27.400	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
15	27.400	34.000	33.800	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
16	33.800	40.300	40.100	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
17	40.100	46.600	46.400	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
18	46.400	52.800	52.700	6.400	6.300	0.100	1.562		1.969	
19	52.700	59.100	58.900	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
20	58.900	65.300	65.100	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
Rdiff								74.625	Jnr-diff	12.464

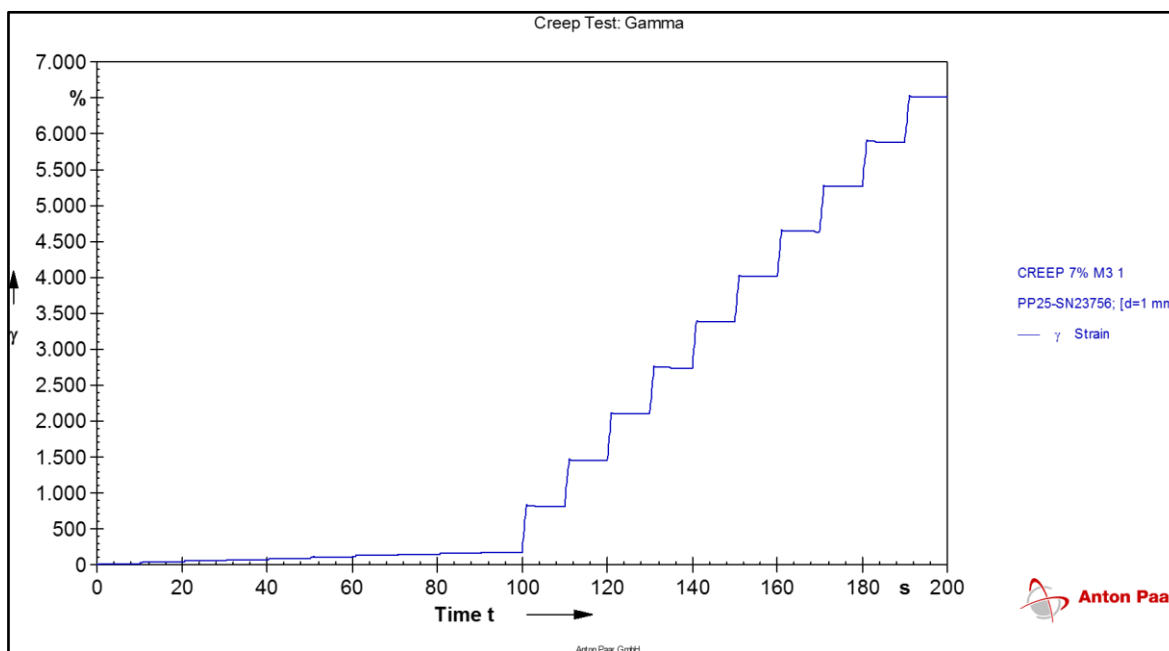


Figura A- 39: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 3 - Muestra 2

Tabla A- 64: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 3 - Muestra 3

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.256	0.232	0.256	0.232	0.024	9.375	10.904	2.320	1.860
2	0.232	0.467	0.443	0.235	0.211	0.024	10.213		2.110	
3	0.443	0.664	0.640	0.221	0.197	0.024	10.860		1.970	
4	0.640	0.852	0.828	0.212	0.188	0.024	11.321		1.880	
5	0.828	1.030	1.010	0.202	0.182	0.020	9.901		1.820	
6	1.010	1.210	1.190	0.200	0.180	0.020	10.000		1.800	
7	1.190	1.380	1.360	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
8	1.360	1.550	1.530	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
9	1.530	1.720	1.700	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
10	1.700	1.890	1.860	0.190	0.160	0.030	15.789		1.600	
11	1.860	8.480	8.280	6.620	6.420	0.200	3.021	2.947	2.006	1.958
12	8.280	14.900	14.700	6.620	6.420	0.200	3.021		2.006	
13	14.700	21.300	21.100	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
14	21.100	27.700	27.500	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
15	27.500	34.000	33.900	6.500	6.400	0.100	1.538		2.000	
16	33.900	40.300	40.100	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
17	40.100	46.500	46.300	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
18	46.300	52.600	52.400	6.300	6.100	0.200	3.175		1.906	
19	52.400	58.700	58.500	6.300	6.100	0.200	3.175		1.906	
20	58.500	64.700	64.500	6.200	6.000	0.200	3.226		1.875	
Rdiff								72.976	Jnr-diff	5.242

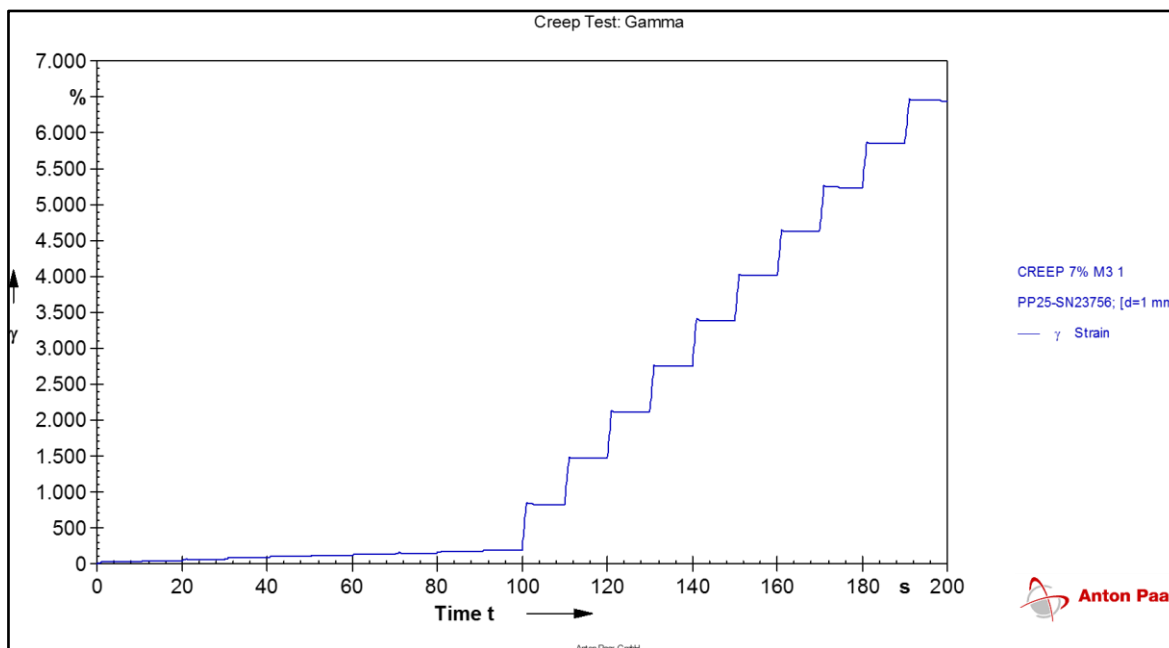


Figura A- 40: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando mezclador – Modificación 3 - Muestra 3

7.11 ANEXO 11: VISCOSIDADES MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR Y POLVO DE CAUCHO

7.11.1 Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho

Tabla A- 65: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho - Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
490	020.0	019.6	091.1	018.6	135.0	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	17-01-2019 16:46:57
490	020.0	019.6	091.1	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	17-01-2019 16:49:57
490	020.0	019.6	091.1	018.6	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	17-01-2019 16:52:57

Tabla A- 66: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho - Estado Original

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
490	020.0	019.6	091.1	018.6	135.0

Tabla A- 67: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho - HPDR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
930	020.0	037.2	173.0	018.6	135.0	575	01:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	18-01-2019 12:58:35
928	020.0	037.1	172.5	018.6	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	18-01-2019 13:01:35
928	020.0	037.1	172.5	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	18-01-2019 13:04:36

Tabla A- 68: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho - HPDR

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
930	020.0	037.1	172.7	018.6	135.0

7.11.2 Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho

7.11.2.1 Muestra H

Tabla A- 69: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra H) - Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
713	020.0	028.5	132.5	018.6	134.9	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	16-01-2019 12:41:33
710	020.0	028.4	132.1	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	16-01-2019 12:44:34
710	020.0	028.4	132.1	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	16-01-2019 12:47:34

Tabla A- 70: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra H) - Estado Original

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
710	020.0	028.4	132.2	018.6	134.9

Tabla A- 71: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra H)- HPDR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
1385	020.0	055.4	257.6	018.6	135.0	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	16-01-2019 14:58:01
1385	020.0	055.4	257.6	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	16-01-2019 15:01:01
1375	020.0	055.0	255.8	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	16-01-2019 15:04:02

Tabla A- 72: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra H) - HPDR

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
1380	020.0	055.3	257.0	018.6	134.9

7.11.2.2 Muestra I

Tabla A- 73: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra I)- Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
713	020.0	028.5	132.5	018.6	134.9	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	17-01-2019 10:10:14
710	020.0	028.4	132.1	018.6	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	17-01-2019 10:13:15
710	020.0	028.4	132.1	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	17-01-2019 10:16:15

Tabla A- 74: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra I)- Estado Original

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
710	020.0	028.4	132.2	018.6	134.9

Tabla A- 75: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra I)- HPDR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
1213	020.0	048.5	225.5	018.6	134.9	575	01:33:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	19-02-2019 12:53:35
1213	020.0	048.5	225.5	018.6	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	19-02-2019 12:56:35
1205	020.0	048.2	224.1	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	19-02-2019 12:59:35

Tabla A- 76: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra I)-
HPDR

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
1210	020.0	048.4	225.1	018.6	134.9

7.11.2.3 Muestra J

Tabla A- 77: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J)- Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
740	020.0	029.6	137.6	018.6	135.0	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	18-01-2019 10:17:43
738	020.0	029.5	137.2	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	18-01-2019 10:20:43
733	020.0	029.3	136.2	018.6	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	18-01-2019 10:23:43

Tabla A- 78: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J)-
Estado Original

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
740	020.0	029.5	137.0	018.6	135.0

Tabla A- 79: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J)- HPDR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
1535	020.0	061.4	285.5	018.6	134.9	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	18-01-2019 14:45:59
1520	020.0	060.8	282.7	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	18-01-2019 14:49:00
1520	020.0	060.8	282.7	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	18-01-2019 14:52:00

Tabla A- 80: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J)-
HPDR

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
1530	020.0	061.0	283.7	018.6	134.9

7.11.3 Modificación con 7% de ablandador y 7% de polvo de caucho

Tabla A- 81: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 7% de polvo de caucho - Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
963	020.0	038.5	179.0	018.6	134.9	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	19-02-2019 16:42:51
960	020.0	038.4	178.6	018.6	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	19-02-2019 16:45:51
953	020.0	038.1	177.2	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	19-02-2019 16:48:52

Tabla A- 82: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 7% de polvo de caucho - Estado Original

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
960	020.0	038.3	178.3	018.6	134.9

Tabla A- 83: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 7% de polvo de caucho - HPDR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
1743	020.0	069.7	324.1	018.6	135.0	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	20-02-2019 12:24:15
1733	020.0	069.3	322.2	018.6	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	20-02-2019 12:27:15
1733	020.0	069.3	322.2	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	20-02-2019 12:30:15

Tabla A- 84: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 7% de polvo de caucho - HPDR

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
1740	020.0	069.4	322.9	018.6	134.9

7.11.4 Modificación con 7% de ablandador con 10% de polvo de caucho

Tabla A- 85: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 10% de polvo de caucho - Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
1535	020.0	061.4	285.5	018.6	134.9	575	01:03:00,4	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	20-02-2019 16:12:21
1533	020.0	061.3	285.0	018.6	135.0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	20-02-2019 16:15:21
1533	020.0	061.3	285.0	018.6	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	20-02-2019 16:18:21

Tabla A- 86: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 10% de polvo de caucho - Estado Original

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
1530	020.0	061.3	285.2	018.6	134.9

Tabla A- 87: Viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 10% de polvo de caucho - HPDR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
4010	005.0	040.1	186.5	004.7	134.9	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	20-02-2019 19:22:25
3940	005.0	039.4	183.2	004.7	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	20-02-2019 19:25:25
3940	005.0	039.4	183.2	004.7	134.9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	20-02-2019 19:28:26

Tabla A- 88: Valores promedio viscosidades Modificación con 7% de ablandador y 10% de polvo de caucho - HPDR

Viscosidad [mPas]	Veloc. [rpm]	% Par	Esf.Cortante [N/m ²]	G.Velocidad [1/seg]	Temperatura [°C]
039.6	005.0	039.6	184.3	004.7	134.9

7.12 ANEXO 12: RESULTADOS MSCR MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR UTILIZANDO DISPERSOR

7.12.1 Modificación 1

Tabla A- 89: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispersor – Modificación 1 - Muestra 1

Nº Ciclos	ε ₀	ε _c	ε _r	ε ₁	ε ₁₀	ε _r (Carga,N)	ε _r (Carga,N)	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.206	0.184	0.206	0.184	0.022	10.680	10.844	1.840	1.750
2	0.184	0.387	0.365	0.203	0.181	0.022	10.837		1.810	
3	0.365	0.566	0.543	0.201	0.178	0.023	11.443		1.780	
4	0.543	0.743	0.720	0.200	0.177	0.023	11.500		1.770	
5	0.720	0.918	0.895	0.198	0.175	0.023	11.616		1.750	
6	0.895	1.090	1.070	0.195	0.175	0.020	10.256		1.750	
7	1.070	1.260	1.240	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
8	1.240	1.430	1.410	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
9	1.410	1.600	1.580	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
10	1.580	1.770	1.750	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
11	1.750	8.400	8.220	6.650	6.470	0.180	2.707	2.712	2.022	1.995
12	8.220	14.900	14.700	6.680	6.480	0.200	2.994		2.025	
13	14.700	21.300	21.100	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
14	21.100	27.700	27.600	6.600	6.500	0.100	1.515		2.031	
15	27.600	34.100	34.000	6.500	6.400	0.100	1.538		2.000	
16	34.000	40.500	40.300	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
17	40.300	46.900	46.700	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
18	46.700	53.200	53.000	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
19	53.000	59.500	59.300	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
20	59.300	65.800	65.600	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
Rdiff								74.988	Jnr-diff	14.018

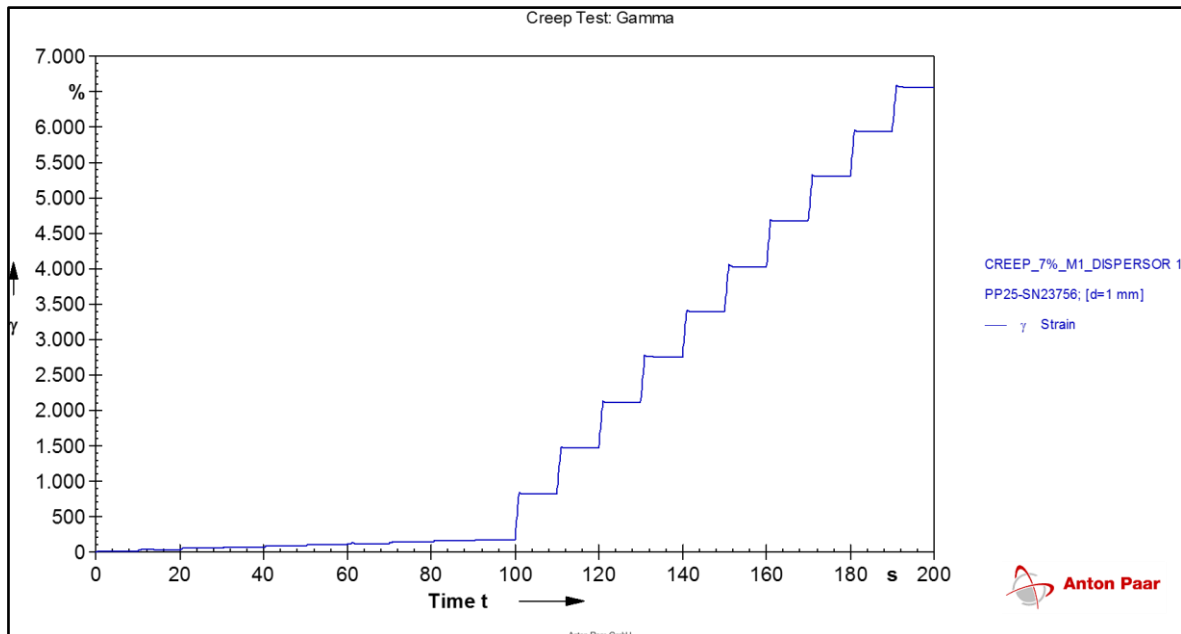


Figura A- 41: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispersor – Modificación 1 - Muestra 1

Tabla A- 90: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 1 - Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.210	0.189	0.210	0.189	0.021	10.000	10.326	1.890	1.790
2	0.189	0.396	0.375	0.207	0.186	0.021	10.145		1.860	
3	0.375	0.580	0.559	0.205	0.184	0.021	10.244		1.840	
4	0.559	0.761	0.740	0.202	0.181	0.021	10.396		1.810	
5	0.740	0.941	0.919	0.201	0.179	0.022	10.945		1.790	
6	0.919	1.120	1.100	0.201	0.181	0.020	9.950		1.810	
7	1.100	1.290	1.270	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
8	1.270	1.470	1.450	0.200	0.180	0.020	10.000		1.800	
9	1.450	1.640	1.620	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
10	1.620	1.810	1.790	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
11	1.790	8.500	8.320	6.710	6.530	0.180	2.683	2.698	2.041	2.003
12	8.320	15.000	14.800	6.680	6.480	0.200	2.994		2.025	
13	14.800	21.500	21.300	6.700	6.500	0.200	2.985		2.031	
14	21.300	27.900	27.800	6.600	6.500	0.100	1.515		2.031	
15	27.800	34.400	34.200	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
16	34.200	40.800	40.600	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
17	40.600	47.100	46.900	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
18	46.900	53.500	53.300	6.600	6.400	0.200	3.030		2.000	
19	53.300	59.800	59.600	6.500	6.300	0.200	3.077		1.969	
20	59.600	66.000	65.900	6.400	6.300	0.100	1.562		1.969	
Rdiff								73.868	Jnr-diff	11.924

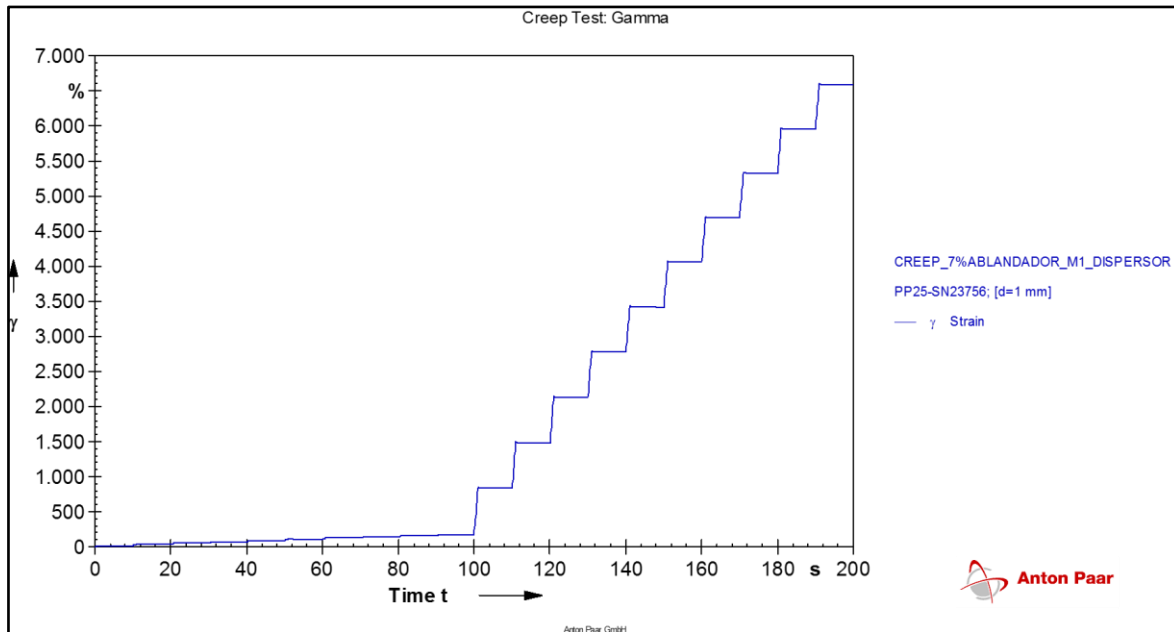


Figura A- 42: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 1 - Muestra 2

7.12.2 Modificación 2

Tabla A- 91: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 2 - Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.192	0.172	0.192	0.172	0.020	10.417	11.478	1.720	1.650
2	0.172	0.363	0.342	0.191	0.170	0.021	10.995		1.700	
3	0.342	0.531	0.510	0.189	0.168	0.021	11.111		1.680	
4	0.510	0.697	0.676	0.187	0.166	0.021	11.230		1.660	
5	0.676	0.862	0.841	0.186	0.165	0.021	11.290		1.650	
6	0.841	1.030	1.000	0.189	0.159	0.030	15.873		1.590	
7	1.000	1.190	1.170	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
8	1.170	1.350	1.330	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
9	1.330	1.510	1.490	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
10	1.490	1.670	1.650	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
11	1.650	7.870	7.680	6.220	6.030	0.190	3.055	2.920	1.884	1.858
12	7.680	13.900	13.700	6.220	6.020	0.200	3.215		1.881	
13	13.700	19.900	19.700	6.200	6.000	0.200	3.226		1.875	
14	19.700	25.800	25.700	6.100	6.000	0.100	1.639		1.875	
15	25.700	31.800	31.600	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
16	31.600	37.700	37.500	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
17	37.500	43.600	43.400	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
18	43.400	49.500	49.300	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
19	49.300	55.400	55.200	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
20	55.200	61.200	61.100	6.000	5.900	0.100	1.667		1.844	
Rdiff								74.563	Jnr-diff	12.595

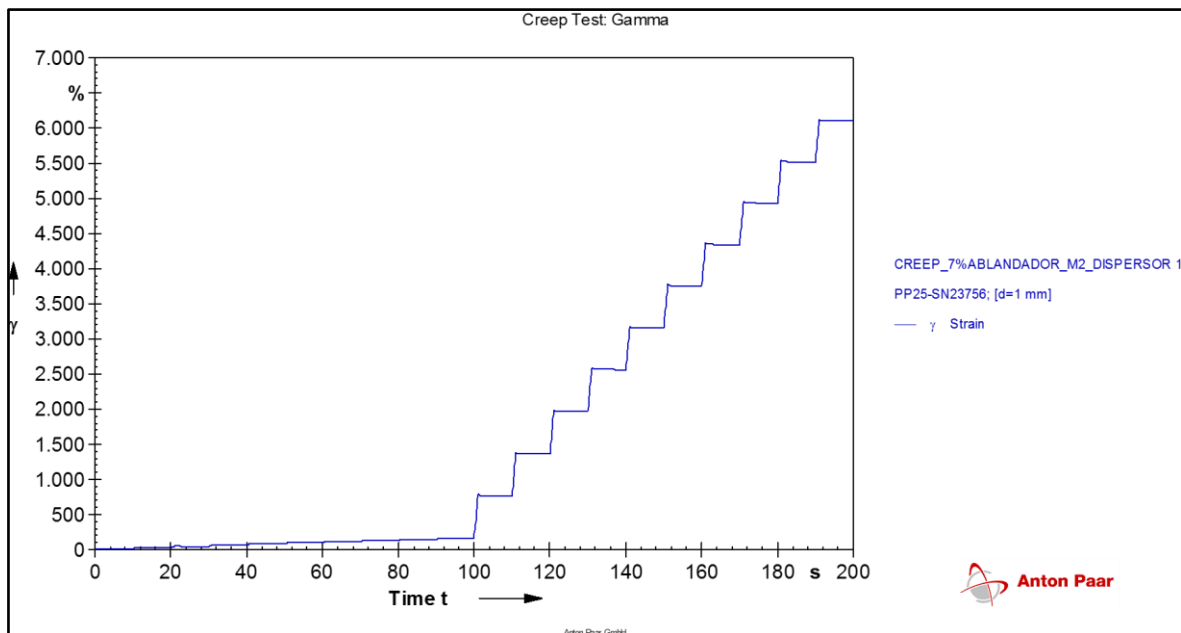


Figura A- 43: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 2 - Muestra 1

Tabla A- 92: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 2 - Muestra 2

Nº Ciclos	ε0	εc	εr	ε1	ε10	εr(Carga,N)	εr(Carga,N)	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.199	0.179	0.199	0.179	0.020	10.050	10.872	1.790	1.690
2	0.179	0.375	0.354	0.196	0.175	0.021	10.714		1.750	
3	0.354	0.549	0.527	0.195	0.173	0.022	11.282		1.730	
4	0.527	0.720	0.698	0.193	0.171	0.022	11.399		1.710	
5	0.698	0.889	0.868	0.191	0.170	0.021	10.995		1.700	
6	0.868	1.060	1.040	0.192	0.172	0.020	10.417		1.720	
7	1.040	1.220	1.200	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
8	1.200	1.390	1.370	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
9	1.370	1.550	1.530	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
10	1.530	1.710	1.690	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
11	1.690	8.030	7.850	6.340	6.160	0.180	2.839	3.016	1.925	1.888
12	7.850	14.200	14.000	6.350	6.150	0.200	3.150		1.922	
13	14.000	20.300	20.100	6.300	6.100	0.200	3.175		1.906	
14	20.100	26.400	26.200	6.300	6.100	0.200	3.175		1.906	
15	26.200	32.400	32.200	6.200	6.000	0.200	3.226		1.875	
16	32.200	38.500	38.300	6.300	6.100	0.200	3.175		1.906	
17	38.300	44.500	44.300	6.200	6.000	0.200	3.226		1.875	
18	44.300	50.400	50.300	6.100	6.000	0.100	1.639		1.875	
19	50.300	56.400	56.200	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
20	56.200	62.300	62.100	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
Rdiff								72.257	Jnr-diff	11.705

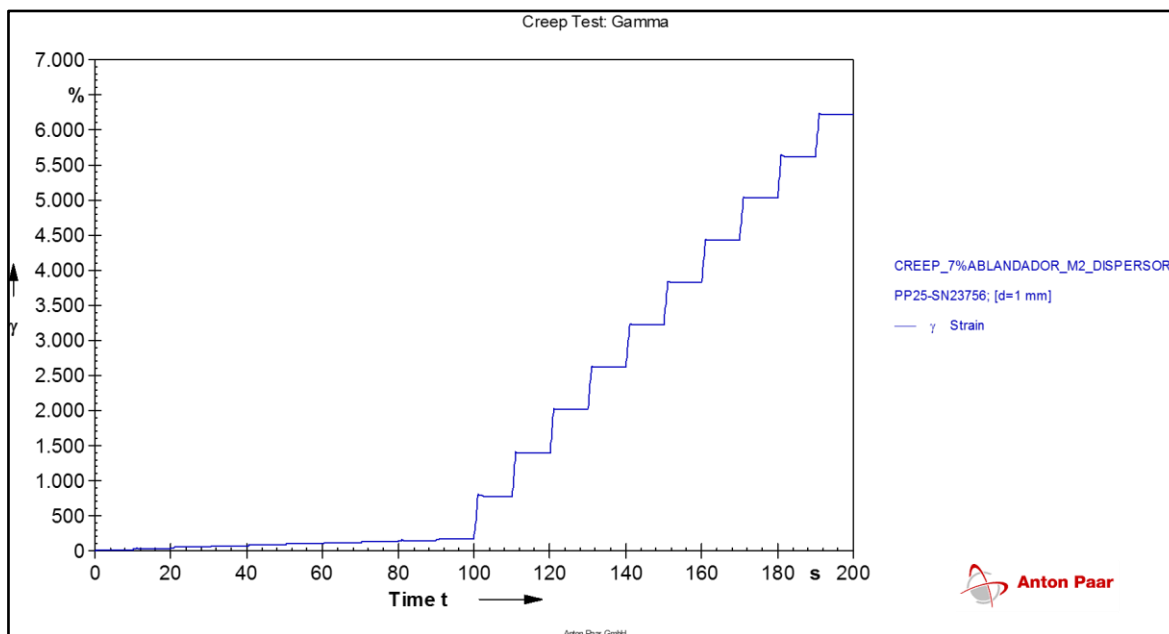


Figura A- 44: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 2 - Muestra 2

7.12.3 Modificación 3

Tabla A- 93: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 3 - Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.199	0.177	0.199	0.177	0.022	11.055	12.507	1.770	1.670
2	0.177	0.374	0.350	0.197	0.173	0.024	12.183		1.730	
3	0.350	0.545	0.521	0.195	0.171	0.024	12.308		1.710	
4	0.521	0.714	0.689	0.193	0.168	0.025	12.953		1.680	
5	0.689	0.880	0.856	0.191	0.167	0.024	12.565		1.670	
6	0.856	1.050	1.020	0.194	0.164	0.030	15.464		1.640	
7	1.020	1.210	1.180	0.190	0.160	0.030	15.789		1.600	
8	1.180	1.370	1.350	0.190	0.170	0.020	10.526		1.700	
9	1.350	1.530	1.510	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
10	1.510	1.690	1.670	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
11	1.670	8.070	7.870	6.400	6.200	0.200	3.125	3.149	1.938	1.923
12	7.870	14.300	14.100	6.430	6.230	0.200	3.110		1.947	
13	14.100	20.500	20.300	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
14	20.300	26.700	26.500	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
15	26.500	32.900	32.700	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
16	32.700	39.000	38.800	6.300	6.100	0.200	3.175		1.906	
17	38.800	45.200	45.000	6.400	6.200	0.200	3.125		1.938	
18	45.000	51.300	51.100	6.300	6.100	0.200	3.175		1.906	
19	51.100	57.300	57.100	6.200	6.000	0.200	3.226		1.875	
20	57.100	63.400	63.200	6.300	6.100	0.200	3.175		1.906	
Rdiff								74.825	Jnr-diff	15.138

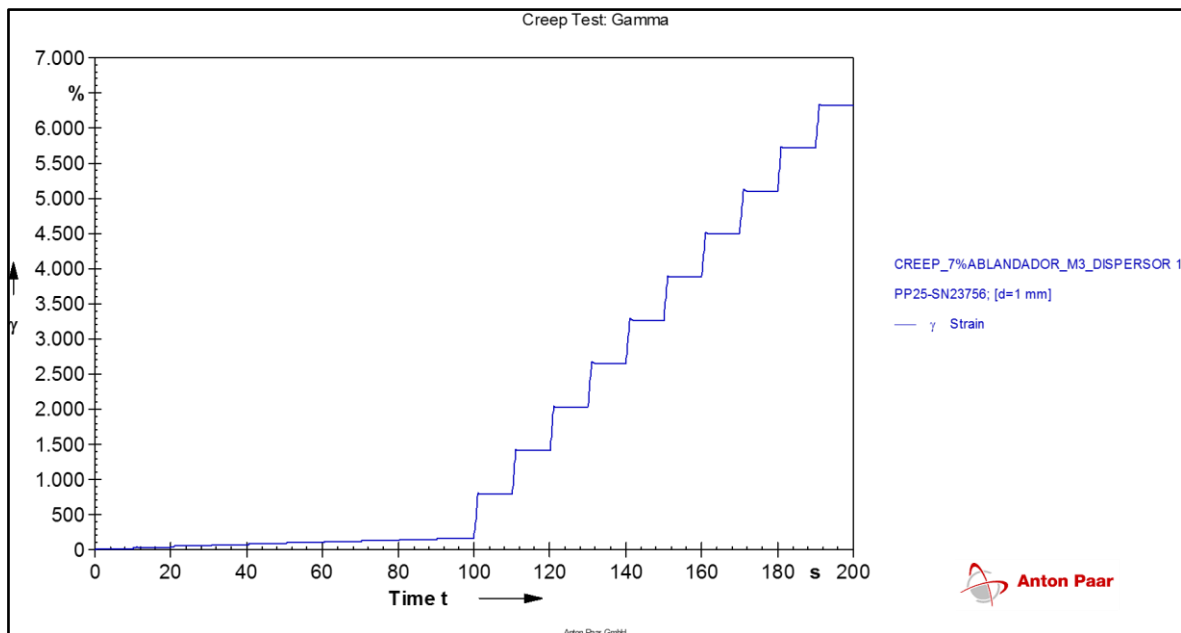


Figura A- 45: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 3 - Muestra 1

Tabla A- 94: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 3 - Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.177	0.157	0.177	0.157	0.020	11.299	12.049	1.570	1.540
2	0.157	0.334	0.312	0.177	0.155	0.022	12.429		1.550	
3	0.312	0.489	0.467	0.177	0.155	0.022	12.429		1.550	
4	0.467	0.644	0.622	0.177	0.155	0.022	12.429		1.550	
5	0.622	0.798	0.776	0.176	0.154	0.022	12.500		1.540	
6	0.776	0.952	0.929	0.176	0.153	0.023	13.068		1.530	
7	0.929	1.100	1.080	0.171	0.151	0.020	11.696		1.510	
8	1.080	1.260	1.240	0.180	0.160	0.020	11.111		1.600	
9	1.240	1.410	1.390	0.170	0.150	0.020	11.765		1.500	
10	1.390	1.560	1.540	0.170	0.150	0.020	11.765		1.500	
11	1.540	7.600	7.400	6.060	5.860	0.200	3.300	3.136	1.831	1.833
12	7.400	13.500	13.300	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
13	13.300	19.400	19.200	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
14	19.200	25.200	25.100	6.000	5.900	0.100	1.667		1.844	
15	25.100	31.100	30.900	6.000	5.800	0.200	3.333		1.813	
16	30.900	37.000	36.800	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
17	36.800	42.900	42.700	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
18	42.700	48.700	48.500	6.000	5.800	0.200	3.333		1.813	
19	48.500	54.600	54.400	6.100	5.900	0.200	3.279		1.844	
20	54.400	60.400	60.200	6.000	5.800	0.200	3.333		1.813	
Rdiff								73.973	Jnr-diff	19.034

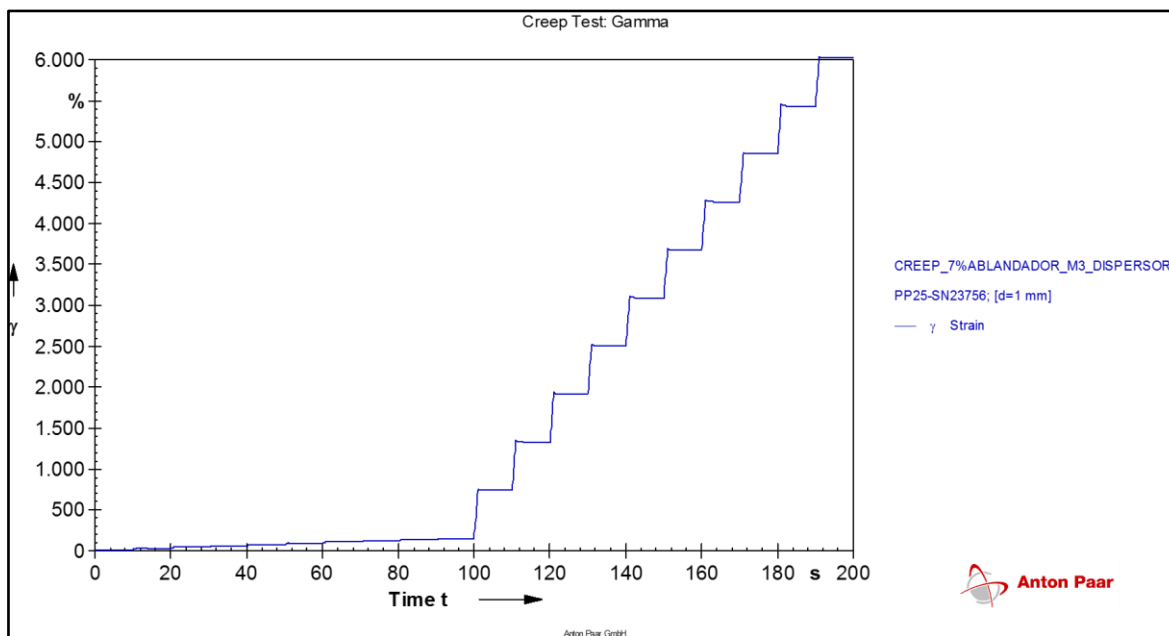


Figura A- 46: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador utilizando dispesor – Modificación 3 - Muestra 2

7.13 ANEXO 13: ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD EN MUESTRAS CON 7% DE ABLANDADOR

A continuación, se presentan los resultados del ensayo Multiple Stress Creep and Recovery a 58°C, realizado a las tres muestras elaboradas con 7% de ablandador utilizando el nuevo mezclador.

Tabla A- 95: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador (1)

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	10.84	2.72	1.75	2.00	74.99	14.02
Muestra 2	10.33	2.70	1.79	2.00	73.87	11.92
Desviación Estándar	0.37	0.01	0.03	0.01	0.79	1.48
Promedio	10.59	2.71	1.77	2.00	74.43	12.97

Tabla A- 96: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador (2)

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	11.48	2.92	1.65	1.86	74.56	12.60
Muestra 2	10.87	3.02	1.69	1.89	72.26	11.71
Desviación Estándar	0.43	0.07	0.03	0.02	1.63	0.63
Promedio	11.18	2.97	1.67	1.87	73.41	12.15

Tabla A- 97: Resultados MSCR a 58°C - Modificación con 7% de ablandador (3)

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	Jnr 0,1 [1/kPa]	Jnr 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	12.51	3.15	1.67	1.92	74.83	15.14
Muestra 2	12.05	3.14	1.54	1.83	73.97	19.03
Desviación Estándar	0.32	0.01	0.09	0.06	0.60	2.75
Promedio	12.28	3.14	1.61	1.88	74.40	17.09

La *Tabla A- 98* resume los valores de Jnr para las modificaciones con 7% de Ablandador elaboradas con cada mezclador.

Tabla A- 98: Resumen Valores de Jnr para modificaciones con 7% de ablandador

Jnr	Mezclador	Dispersor
Modificación 1	2.033	1.995
	1.999	2.003
Modificación 2	2.018	1.858
	2.283	1.888
Modificación 3	1.82	1.923
	1.979	1.833
	1.958	

La *Tabla A- 99* presenta los datos de entrada para el Análisis de Varianza ANOVA con un nivel de significancia de 0.05 (α).

Tabla A- 99: Datos de entrada para análisis de varianza.

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	7	14.09	2.012857	0.019158
Column 2	6	11.5	1.916667	0.004979

Los resultados de la *Tabla A- 100* indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de Jnr obtenidos, dado que el valor de la probabilidad es mayor al valor de α .

Tabla A- 100: Resultados análisis de varianza equipos.

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0.029893	1	0.029893	2.351356	0.153417	4.844336
Within Groups	0.139844	11	0.012713			
Total	0.169737	12				

7.14 ANEXO 14: RESULTADOS MSCR MODIFICACIÓN CON POLVO DE CAUCHO

7.14.1 Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho

Tabla A- 101: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 3% de polvo de caucho – Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.103	0.075	0.103	0.075	0.028	27.087	31.037	0.751	0.683
2	0.075	0.177	0.147	0.102	0.072	0.030	29.441		0.719	
3	0.147	0.248	0.217	0.101	0.070	0.031	30.693		0.700	
4	0.217	0.317	0.286	0.100	0.069	0.031	31.000		0.690	
5	0.286	0.385	0.354	0.099	0.068	0.031	31.313		0.680	
6	0.354	0.452	0.421	0.098	0.067	0.031	31.633		0.670	
7	0.421	0.519	0.488	0.098	0.067	0.031	31.633		0.670	
8	0.488	0.584	0.553	0.096	0.065	0.031	32.292		0.650	
9	0.553	0.650	0.618	0.097	0.065	0.032	32.990		0.650	
10	0.618	0.714	0.683	0.096	0.065	0.031	32.292		0.650	
11	0.683	3.990	3.440	3.307	2.757	0.550	16.631	15.754	0.862	0.872
12	3.440	6.770	6.230	3.330	2.790	0.540	16.216		0.872	
13	6.230	9.570	9.040	3.340	2.810	0.530	15.868		0.878	
14	9.040	12.400	11.900	3.360	2.860	0.500	14.881		0.894	
15	11.900	15.200	14.700	3.300	2.800	0.500	15.152		0.875	
16	14.700	18.000	17.500	3.300	2.800	0.500	15.152		0.875	
17	17.500	20.800	20.200	3.300	2.700	0.600	18.182		0.844	
18	20.200	23.500	23.000	3.300	2.800	0.500	15.152		0.875	
19	23.000	26.300	25.800	3.300	2.800	0.500	15.152		0.875	
20	25.800	29.100	28.600	3.300	2.800	0.500	15.152		0.875	
Rdiff								49.243	Jnr-diff	27.732

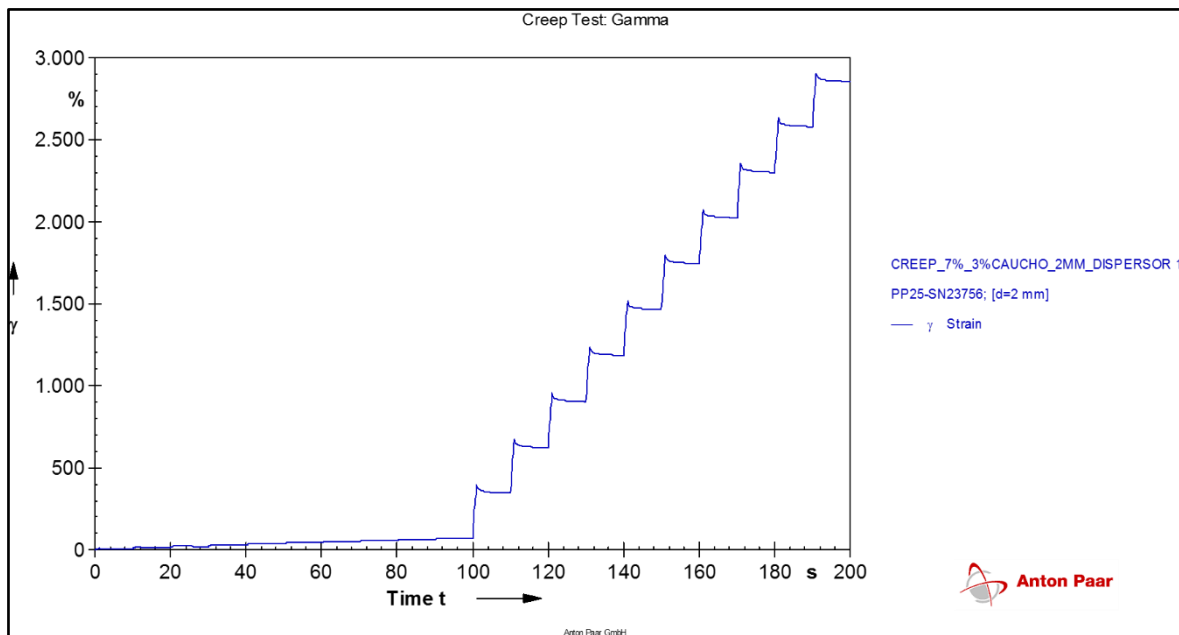


Figura A- 47: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 3% de polvo de caucho – Muestra 1

Tabla A- 102: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 3% de polvo de caucho – Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.092	0.066	0.092	0.066	0.026	28.122	31.424	0.662	0.622
2	0.066	0.158	0.130	0.092	0.064	0.028	30.501		0.638	
3	0.130	0.221	0.193	0.091	0.063	0.028	30.769		0.630	
4	0.193	0.284	0.256	0.091	0.063	0.028	30.769		0.630	
5	0.256	0.346	0.318	0.090	0.062	0.028	31.111		0.620	
6	0.318	0.408	0.379	0.090	0.061	0.029	32.222		0.610	
7	0.379	0.469	0.440	0.090	0.061	0.029	32.222		0.610	
8	0.440	0.531	0.501	0.091	0.061	0.030	32.967		0.610	
9	0.501	0.591	0.562	0.090	0.061	0.029	32.222		0.610	
10	0.562	0.652	0.622	0.090	0.060	0.030	33.333		0.600	
11	0.622	3.700	3.170	3.078	2.548	0.530	17.219	16.622	0.796	0.812
12	3.170	6.250	5.720	3.080	2.550	0.530	17.208		0.797	
13	5.720	8.820	8.300	3.100	2.580	0.520	16.774		0.806	
14	8.300	11.400	10.900	3.100	2.600	0.500	16.129		0.813	
15	10.900	14.000	13.500	3.100	2.600	0.500	16.129		0.813	
16	13.500	16.600	16.100	3.100	2.600	0.500	16.129		0.813	
17	16.100	19.200	18.700	3.100	2.600	0.500	16.129		0.812	
18	18.700	21.900	21.300	3.200	2.600	0.600	18.750		0.813	
19	21.300	24.500	24.000	3.200	2.700	0.500	15.625		0.844	
20	24.000	27.100	26.600	3.100	2.600	0.500	16.129		0.813	
Rdiff								47.104	Jnr-diff	30.516

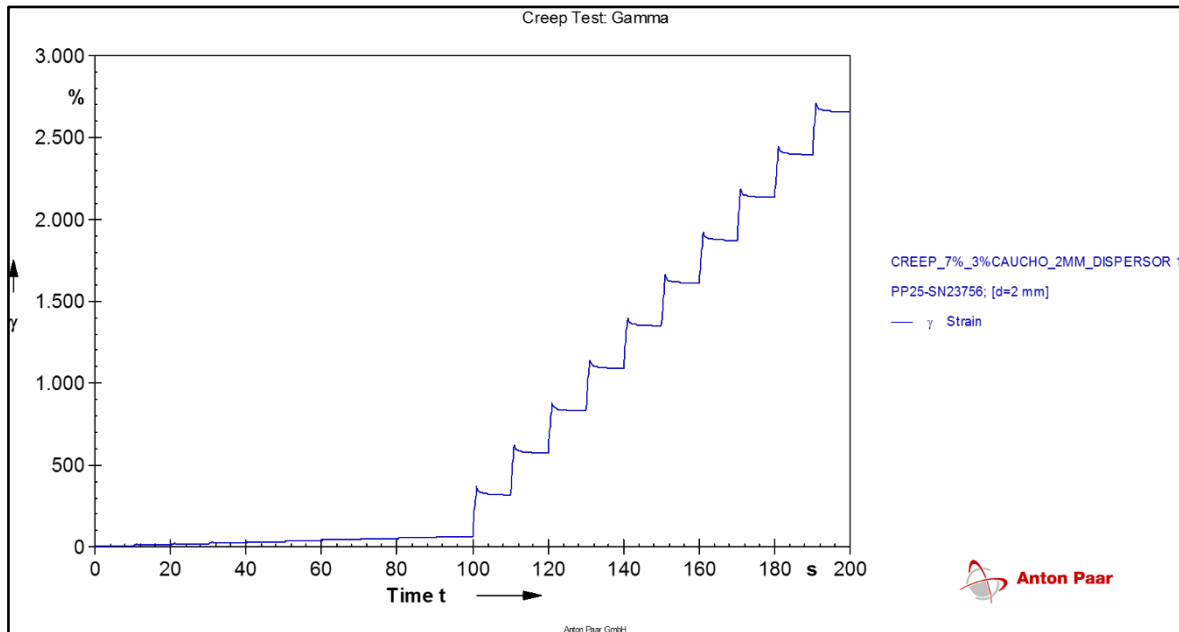


Figura A- 48: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 3% de polvo de caucho – Muestra 2

7.14.2 Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra H)

Tabla A- 103: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% polvo de caucho (Muestra H) – Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.073	0.044	0.073	0.044	0.028	38.981	45.301	0.443	0.380
2	0.044	0.116	0.085	0.072	0.041	0.031	42.678		0.411	
3	0.085	0.156	0.125	0.071	0.040	0.031	43.909		0.396	
4	0.125	0.195	0.163	0.070	0.038	0.032	45.714		0.380	
5	0.163	0.233	0.201	0.070	0.038	0.032	45.714		0.380	
6	0.201	0.270	0.238	0.069	0.037	0.032	46.377		0.370	
7	0.238	0.306	0.274	0.068	0.036	0.032	47.059		0.360	
8	0.274	0.342	0.310	0.068	0.036	0.032	47.059		0.360	
9	0.310	0.377	0.345	0.067	0.035	0.032	47.761		0.350	
10	0.345	0.412	0.380	0.067	0.035	0.032	47.761		0.350	
11	0.380	2.640	1.990	2.260	1.610	0.650	28.761	28.695	0.503	0.504
12	1.990	4.250	3.580	2.260	1.590	0.670	29.646		0.497	
13	3.580	5.840	5.180	2.260	1.600	0.660	29.204		0.500	
14	5.180	7.450	6.790	2.270	1.610	0.660	29.075		0.503	
15	6.790	9.060	8.410	2.270	1.620	0.650	28.634		0.506	
16	8.410	10.700	10.000	2.290	1.590	0.700	30.568		0.497	
17	10.000	12.300	11.600	2.300	1.600	0.700	30.435		0.500	
18	11.600	13.900	13.300	2.300	1.700	0.600	26.087		0.531	
19	13.300	15.500	14.900	2.200	1.600	0.600	27.273		0.500	
20	14.900	17.100	16.500	2.200	1.600	0.600	27.273		0.500	
Rdiff								36.656	Jnr-diff	32.566

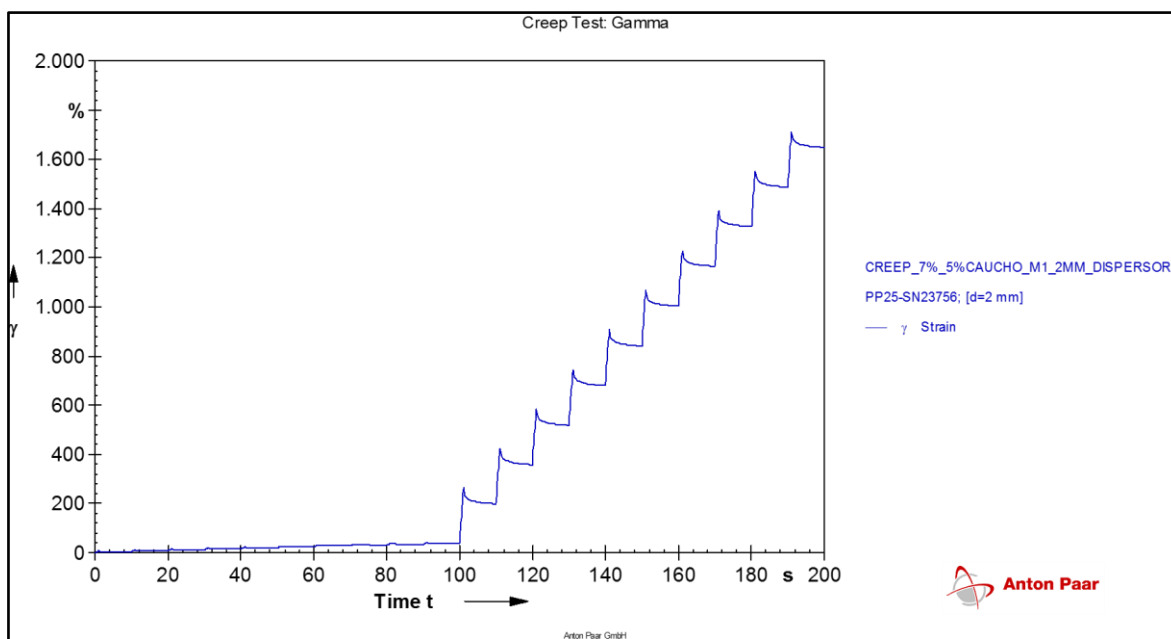


Figura A- 49: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra H) – Muestra 1

Tabla A- 104: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% polvo de caucho (Muestra H) – Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.074	0.047	0.074	0.047	0.028	37.197	42.778	0.466	0.409
2	0.047	0.120	0.090	0.073	0.044	0.030	40.327		0.438	
3	0.090	0.163	0.133	0.073	0.043	0.030	41.322		0.426	
4	0.133	0.204	0.174	0.071	0.041	0.030	42.254		0.410	
5	0.174	0.245	0.214	0.071	0.040	0.031	43.662		0.400	
6	0.214	0.285	0.254	0.071	0.040	0.031	43.662		0.400	
7	0.254	0.325	0.293	0.071	0.039	0.032	45.070		0.390	
8	0.293	0.364	0.332	0.071	0.039	0.032	45.070		0.390	
9	0.332	0.402	0.371	0.070	0.039	0.031	44.286		0.390	
10	0.371	0.440	0.409	0.069	0.038	0.031	44.928		0.380	
11	0.409	2.770	2.120	2.361	1.711	0.650	27.531	27.257	0.535	0.540
12	2.120	4.490	3.830	2.370	1.710	0.660	27.848		0.534	
13	3.830	6.200	5.540	2.370	1.710	0.660	27.848		0.534	
14	5.540	7.920	7.260	2.380	1.720	0.660	27.731		0.538	
15	7.260	9.650	9.000	2.390	1.740	0.650	27.197		0.544	
16	9.000	11.400	10.700	2.400	1.700	0.700	29.167		0.531	
17	10.700	13.100	12.500	2.400	1.800	0.600	25.000		0.563	
18	12.500	14.900	14.200	2.400	1.700	0.700	29.167		0.531	
19	14.200	16.600	16.000	2.400	1.800	0.600	25.000		0.563	
20	16.000	18.300	17.700	2.300	1.700	0.600	26.087		0.531	
Rdiff								36.281	Jnr-diff	32.113

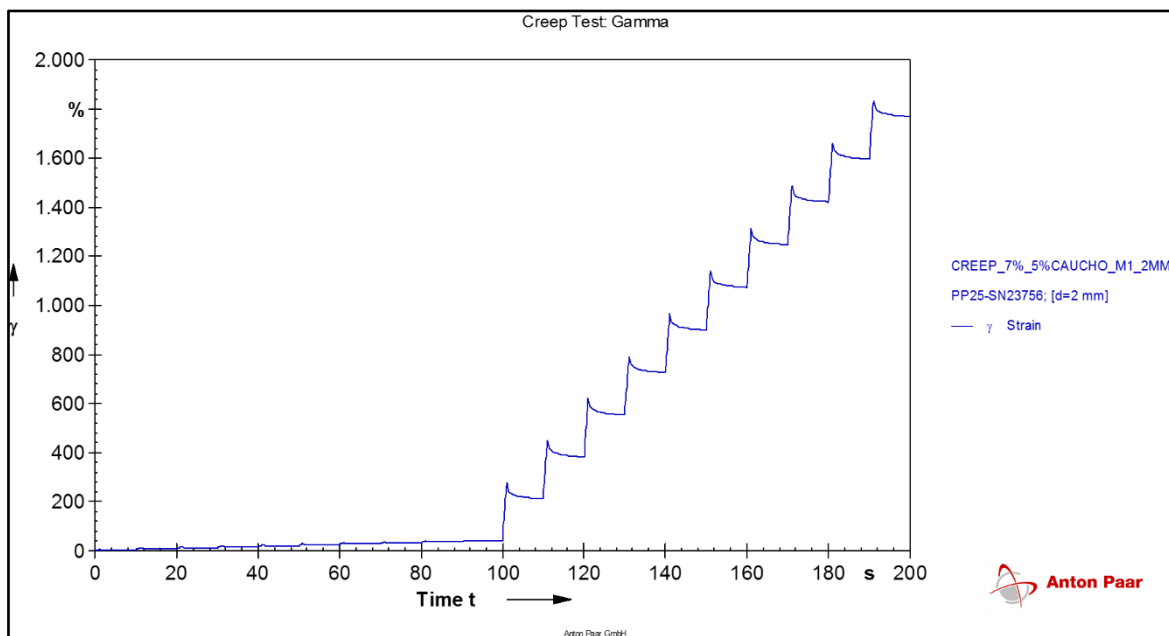


Figura A- 50: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra H) – Muestra 2

7.14.3 Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra I)

Tabla A- 105: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% polvo de caucho (Muestra I) – Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_C	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.068	0.040	0.068	0.040	0.028	41.090	48.155	0.400	0.340
2	0.040	0.107	0.077	0.067	0.037	0.030	45.075		0.368	
3	0.077	0.143	0.112	0.066	0.035	0.031	46.828		0.352	
4	0.112	0.178	0.147	0.066	0.035	0.031	46.970		0.350	
5	0.147	0.212	0.180	0.065	0.033	0.032	49.231		0.330	
6	0.180	0.245	0.213	0.065	0.033	0.032	49.231		0.330	
7	0.213	0.278	0.246	0.065	0.033	0.032	49.231		0.330	
8	0.246	0.310	0.277	0.064	0.031	0.033	51.563		0.310	
9	0.277	0.342	0.309	0.065	0.032	0.033	50.769		0.320	
10	0.309	0.373	0.340	0.064	0.031	0.033	51.563		0.310	
11	0.340	2.510	1.830	2.170	1.490	0.680	31.336	31.754	0.466	0.468
12	1.830	4.000	3.280	2.170	1.450	0.720	33.180		0.453	
13	3.280	5.470	4.750	2.190	1.470	0.720	32.877		0.459	
14	4.750	6.950	6.230	2.200	1.480	0.720	32.727		0.463	
15	6.230	8.440	7.730	2.210	1.500	0.710	32.127		0.469	
16	7.730	9.940	9.230	2.210	1.500	0.710	32.127		0.469	
17	9.230	11.400	10.700	2.170	1.470	0.700	32.258		0.459	
18	10.700	12.900	12.300	2.200	1.600	0.600	27.273		0.500	
19	12.300	14.500	13.800	2.200	1.500	0.700	31.818		0.469	
20	13.800	16.000	15.300	2.200	1.500	0.700	31.818		0.469	
Rdiff								34.058	Jnr-diff	37.500

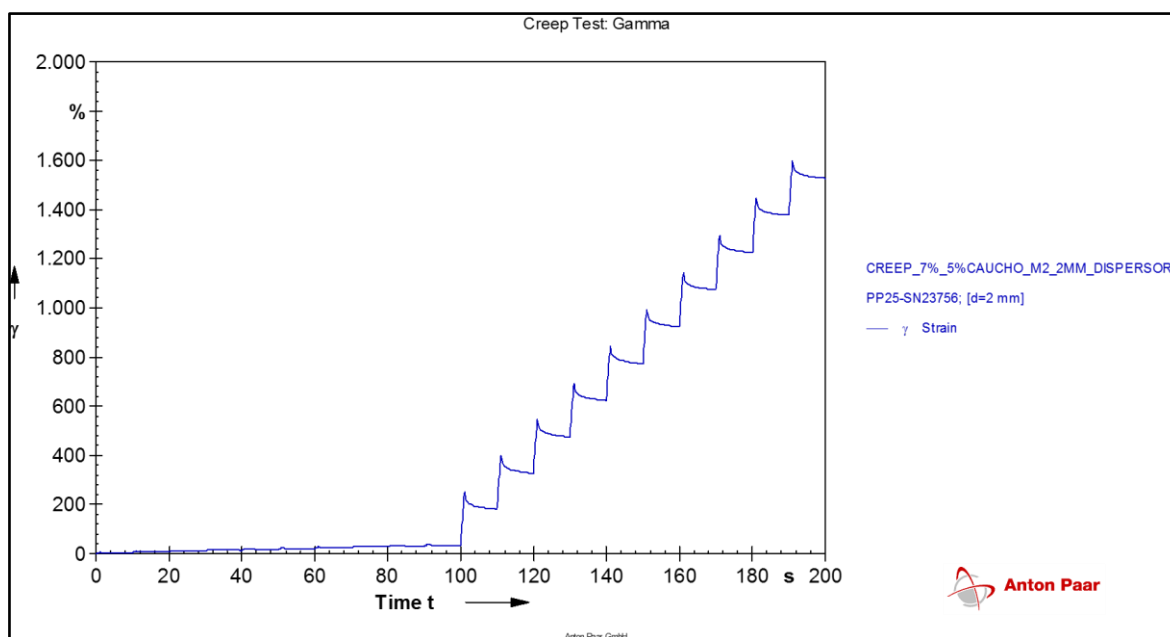


Figura A- 51: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra I) – Muestra 1

Tabla A- 106: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% polvo de caucho (Muestra 1) – Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.067	0.040	0.067	0.040	0.027	40.179	46.639	0.402	0.351
2	0.040	0.107	0.078	0.067	0.037	0.029	44.012		0.374	
3	0.078	0.144	0.114	0.066	0.036	0.030	45.181		0.364	
4	0.114	0.180	0.149	0.066	0.035	0.031	46.970		0.350	
5	0.149	0.215	0.184	0.066	0.035	0.031	46.970		0.350	
6	0.184	0.249	0.218	0.065	0.034	0.031	47.692		0.340	
7	0.218	0.283	0.252	0.065	0.034	0.031	47.692		0.340	
8	0.252	0.317	0.285	0.065	0.033	0.032	49.231		0.330	
9	0.285	0.350	0.318	0.065	0.033	0.032	49.231		0.330	
10	0.318	0.383	0.351	0.065	0.033	0.032	49.231		0.330	
11	0.351	2.560	1.880	2.209	1.529	0.680	30.783	31.267	0.478	0.480
12	1.880	4.090	3.390	2.210	1.510	0.700	31.674		0.472	
13	3.390	5.610	4.910	2.220	1.520	0.700	31.532		0.475	
14	4.910	7.140	6.430	2.230	1.520	0.710	31.839		0.475	
15	6.430	8.670	7.970	2.240	1.540	0.700	31.250		0.481	
16	7.970	10.200	9.510	2.230	1.540	0.690	30.942		0.481	
17	9.510	11.700	11.000	2.190	1.490	0.700	31.963		0.466	
18	11.000	13.300	12.600	2.300	1.600	0.700	30.435		0.500	
19	12.600	14.800	14.100	2.200	1.500	0.700	31.818		0.469	
20	14.100	16.400	15.700	2.300	1.600	0.700	30.435		0.500	
Rdiff								32.959	Jnr-diff	36.654

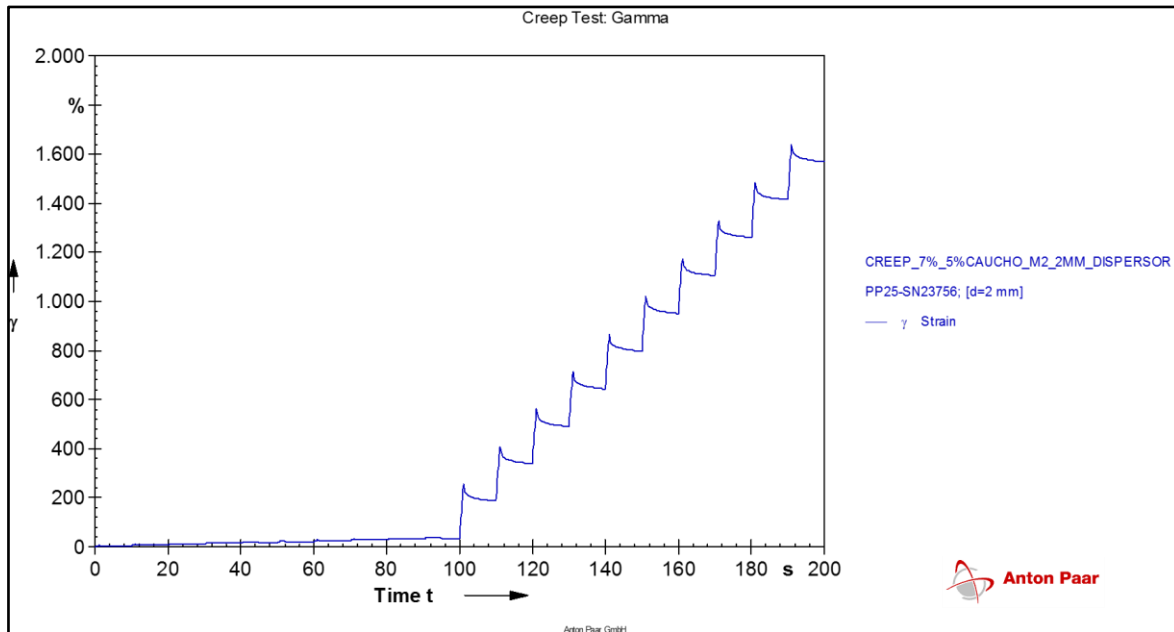


Figura A- 52: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra 1) – Muestra 2

7.14.4 Modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J)

Tabla A- 107: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% polvo de caucho (Muestra J) – Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_C	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.069	0.040	0.069	0.040	0.029	41.691	48.606	0.400	0.339
2	0.040	0.108	0.077	0.068	0.037	0.031	45.882		0.368	
3	0.077	0.144	0.112	0.067	0.035	0.032	47.619		0.352	
4	0.112	0.178	0.146	0.066	0.034	0.032	48.485		0.340	
5	0.146	0.212	0.180	0.066	0.034	0.032	48.485		0.340	
6	0.180	0.245	0.212	0.065	0.032	0.033	50.769		0.320	
7	0.212	0.277	0.245	0.065	0.033	0.032	49.231		0.330	
8	0.245	0.309	0.276	0.064	0.031	0.033	51.563		0.310	
9	0.276	0.341	0.308	0.065	0.032	0.033	50.769		0.320	
10	0.308	0.372	0.339	0.064	0.031	0.033	51.563		0.310	
11	0.339	2.510	1.830	2.171	1.491	0.680	31.322	31.953	0.466	0.471
12	1.830	4.010	3.280	2.180	1.450	0.730	33.486		0.453	
13	3.280	5.490	4.770	2.210	1.490	0.720	32.579		0.466	
14	4.770	6.980	6.260	2.210	1.490	0.720	32.579		0.466	
15	6.260	8.480	7.770	2.220	1.510	0.710	31.982		0.472	
16	7.770	10.000	9.290	2.230	1.520	0.710	31.839		0.475	
17	9.290	11.500	10.800	2.210	1.510	0.700	31.674		0.472	
18	10.800	13.000	12.300	2.200	1.500	0.700	31.818		0.469	
19	12.300	14.600	13.900	2.300	1.600	0.700	30.435		0.500	
20	13.900	16.100	15.400	2.200	1.500	0.700	31.818		0.469	
Rdiff								34.260	Jnr-diff	38.837

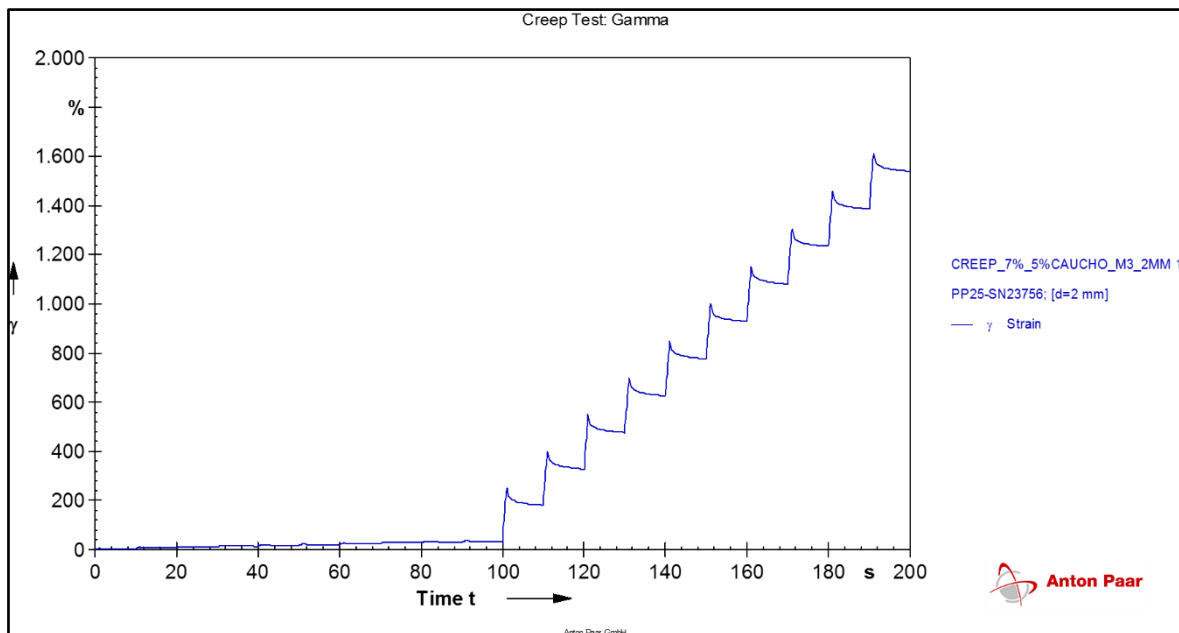


Figura A- 53: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J) – Muestra 1

Tabla A- 108: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% polvo de caucho (Muestra J) – Muestra 2

Nº Ciclos	ε0	εc	εr	ε1	ε10	εr(Carga,N)	εr(Carga,N)	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.074	0.045	0.074	0.045	0.028	38.535	44.792	0.453	0.388
2	0.045	0.118	0.088	0.073	0.042	0.031	41.953		0.422	
3	0.088	0.159	0.128	0.072	0.041	0.031	43.357		0.405	
4	0.128	0.199	0.167	0.071	0.039	0.032	45.070		0.390	
5	0.167	0.237	0.206	0.070	0.039	0.031	44.286		0.390	
6	0.206	0.275	0.243	0.069	0.037	0.032	46.377		0.370	
7	0.243	0.312	0.280	0.069	0.037	0.032	46.377		0.370	
8	0.280	0.349	0.317	0.069	0.037	0.032	46.377		0.370	
9	0.317	0.385	0.353	0.068	0.036	0.032	47.059		0.360	
10	0.353	0.421	0.388	0.068	0.035	0.033	48.529		0.350	
11	0.388	2.680	2.030	2.292	1.642	0.650	28.360	28.277	0.513	0.516
12	2.030	4.330	3.650	2.300	1.620	0.680	29.565		0.506	
13	3.650	5.960	5.290	2.310	1.640	0.670	29.004		0.513	
14	5.290	7.600	6.940	2.310	1.650	0.660	28.571		0.516	
15	6.940	9.250	8.600	2.310	1.660	0.650	28.139		0.519	
16	8.600	10.900	10.300	2.300	1.700	0.600	26.087		0.531	
17	10.300	12.600	11.900	2.300	1.600	0.700	30.435		0.500	
18	11.900	14.200	13.600	2.300	1.700	0.600	26.087		0.531	
19	13.600	15.900	15.200	2.300	1.600	0.700	30.435		0.500	
20	15.200	17.500	16.900	2.300	1.700	0.600	26.087		0.531	
Rdiff								36.870	Jnr-diff	32.990

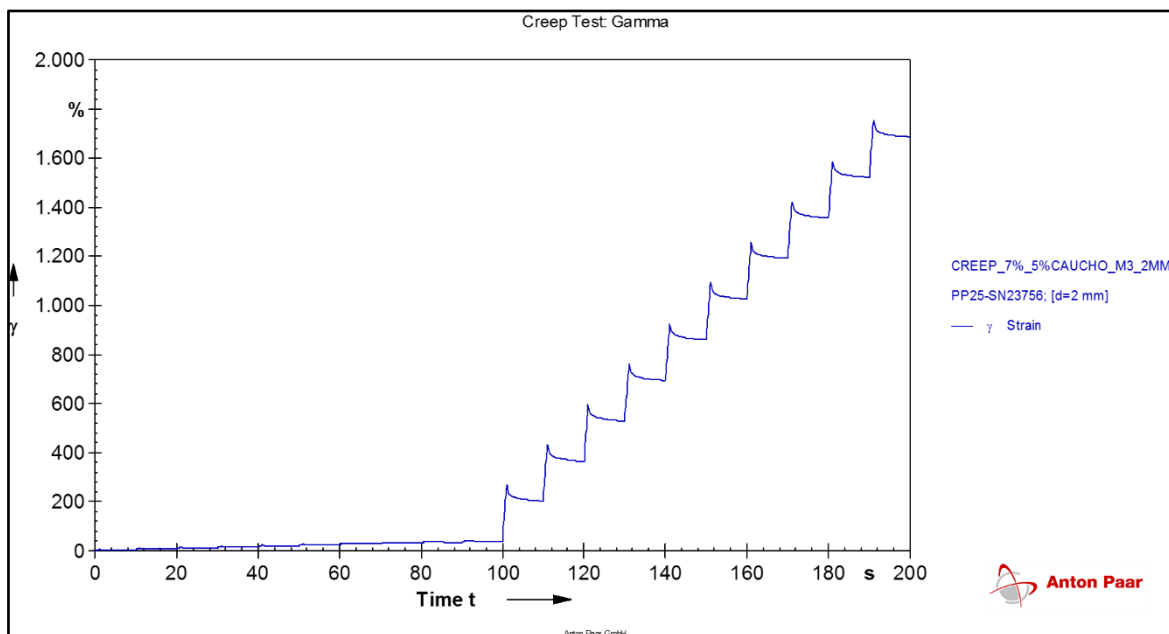


Figura A- 54: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J) – Muestra 2

Tabla A- 109: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% polvo de caucho (Muestra J) – Muestra 3

Nº Ciclos	ε0	εc	εr	ε1	ε10	εr(Carga,N)	εr(Carga,N)	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.069	0.040	0.069	0.040	0.029	41.908	48.774	0.402	0.339
2	0.040	0.108	0.077	0.068	0.037	0.031	45.575		0.369	
3	0.077	0.144	0.112	0.067	0.035	0.032	47.833		0.349	
4	0.112	0.179	0.147	0.067	0.035	0.032	47.761		0.350	
5	0.147	0.213	0.180	0.066	0.033	0.033	50.000		0.330	
6	0.180	0.246	0.213	0.066	0.033	0.033	50.000		0.330	
7	0.213	0.278	0.245	0.065	0.032	0.033	50.769		0.320	
8	0.245	0.310	0.277	0.065	0.032	0.033	50.769		0.320	
9	0.277	0.341	0.308	0.064	0.031	0.033	51.563		0.310	
10	0.308	0.372	0.339	0.064	0.031	0.033	51.563		0.310	
11	0.339	2.530	1.840	2.191	1.501	0.690	31.492	32.043	0.469	0.474
12	1.840	4.050	3.330	2.210	1.490	0.720	32.579		0.466	
13	3.330	5.560	4.840	2.230	1.510	0.720	32.287		0.472	
14	4.840	7.080	6.360	2.240	1.520	0.720	32.143		0.475	
15	6.360	8.600	7.890	2.240	1.530	0.710	31.696		0.478	
16	7.890	10.100	9.410	2.210	1.520	0.690	31.222		0.475	
17	9.410	11.700	10.900	2.290	1.490	0.800	34.934		0.466	
18	10.900	13.200	12.500	2.300	1.600	0.700	30.435		0.500	
19	12.500	14.700	14.000	2.200	1.500	0.700	31.818		0.469	
20	14.000	16.200	15.500	2.200	1.500	0.700	31.818		0.469	
Rdiff								34.304	Jnr-diff	39.758

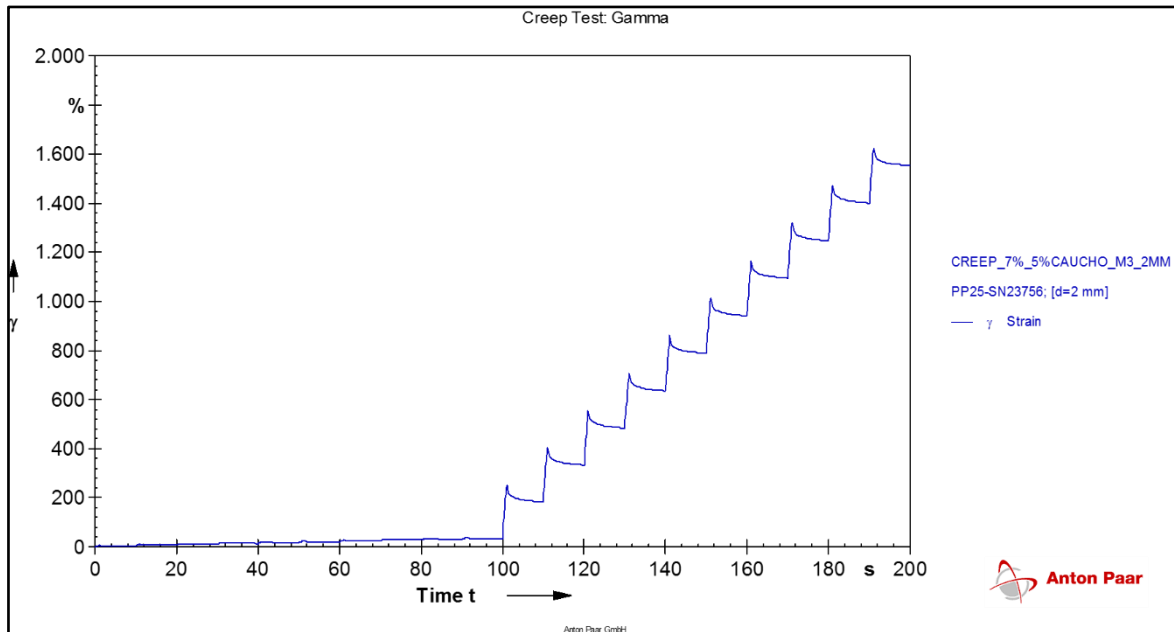


Figura A- 55: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 5% de polvo de caucho (Muestra J) – Muestra 3

7.14.5 Modificación con 7% de ablandador y 7% de polvo de caucho

Tabla A- 110: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 7% polvo de caucho – Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.053	0.026	0.053	0.026	0.026	50.000	58.616	0.263	0.209
2	0.026	0.078	0.050	0.052	0.023	0.028	54.932		0.233	
3	0.050	0.101	0.072	0.051	0.022	0.029	56.809		0.222	
4	0.072	0.122	0.093	0.050	0.021	0.029	58.167		0.210	
5	0.093	0.143	0.113	0.050	0.020	0.030	59.761		0.202	
6	0.113	0.163	0.133	0.050	0.020	0.030	60.000		0.200	
7	0.133	0.183	0.153	0.050	0.020	0.030	60.000		0.200	
8	0.153	0.202	0.171	0.049	0.018	0.031	63.265		0.180	
9	0.171	0.221	0.190	0.050	0.019	0.031	62.000		0.190	
10	0.190	0.239	0.209	0.049	0.019	0.030	61.224		0.190	
11	0.209	1.850	1.160	1.641	0.951	0.690	42.048	44.953	0.297	0.283
12	1.160	2.790	2.060	1.630	0.900	0.730	44.785		0.281	
13	2.060	3.700	2.950	1.640	0.890	0.750	45.732		0.278	
14	2.950	4.600	3.850	1.650	0.900	0.750	45.455		0.281	
15	3.850	5.500	4.750	1.650	0.900	0.750	45.455		0.281	
16	4.750	6.400	5.650	1.650	0.900	0.750	45.455		0.281	
17	5.650	7.300	6.550	1.650	0.900	0.750	45.455		0.281	
18	6.550	8.200	7.450	1.650	0.900	0.750	45.455		0.281	
19	7.450	9.110	8.360	1.660	0.910	0.750	45.181		0.284	
20	8.360	10.000	9.270	1.640	0.910	0.730	44.512		0.284	
Rdiff								23.309	Jnr-diff	35.481

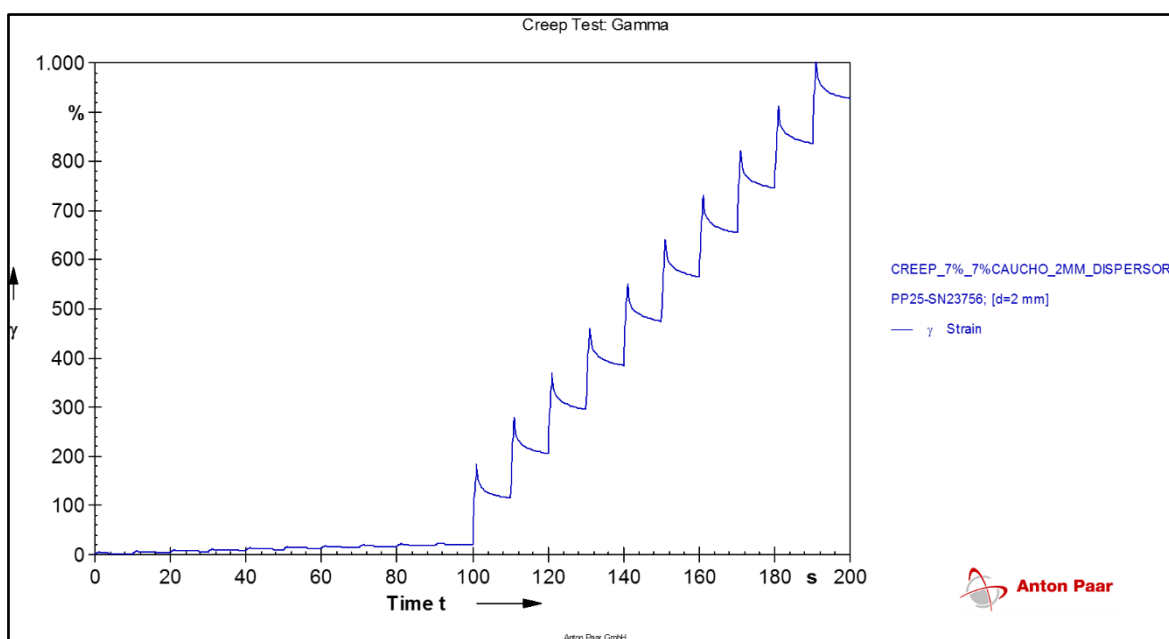


Figura A- 56: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 7% polvo de caucho – Muestra 1

Tabla A- 111: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 7% polvo de caucho – Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.052	0.027	0.052	0.027	0.025	48.069	56.098	0.269	0.219
2	0.027	0.078	0.051	0.051	0.024	0.027	52.353		0.243	
3	0.051	0.102	0.074	0.051	0.023	0.028	54.724		0.230	
4	0.074	0.124	0.096	0.050	0.022	0.028	55.622		0.221	
5	0.096	0.146	0.118	0.050	0.022	0.028	56.338		0.217	
6	0.118	0.167	0.139	0.049	0.021	0.028	57.143		0.210	
7	0.139	0.188	0.159	0.049	0.020	0.029	59.184		0.200	
8	0.159	0.208	0.179	0.049	0.020	0.029	59.184		0.200	
9	0.179	0.228	0.199	0.049	0.020	0.029	59.184		0.200	
10	0.199	0.248	0.219	0.049	0.020	0.029	59.184		0.200	
11	0.219	1.850	1.190	1.631	0.971	0.660	40.466	42.704	0.303	0.291
12	1.190	2.810	2.120	1.620	0.930	0.690	42.593		0.291	
13	2.120	3.750	3.050	1.630	0.930	0.700	42.945		0.291	
14	3.050	4.670	3.970	1.620	0.920	0.700	43.210		0.288	
15	3.970	5.600	4.890	1.630	0.920	0.710	43.558		0.288	
16	4.890	6.520	5.820	1.630	0.930	0.700	42.945		0.291	
17	5.820	7.450	6.740	1.630	0.920	0.710	43.558		0.288	
18	6.740	8.370	7.670	1.630	0.930	0.700	42.945		0.291	
19	7.670	9.300	8.600	1.630	0.930	0.700	42.945		0.291	
20	8.600	10.200	9.530	1.600	0.930	0.670	41.875		0.291	
Rdiff								23.877	Jnr-diff	32.862

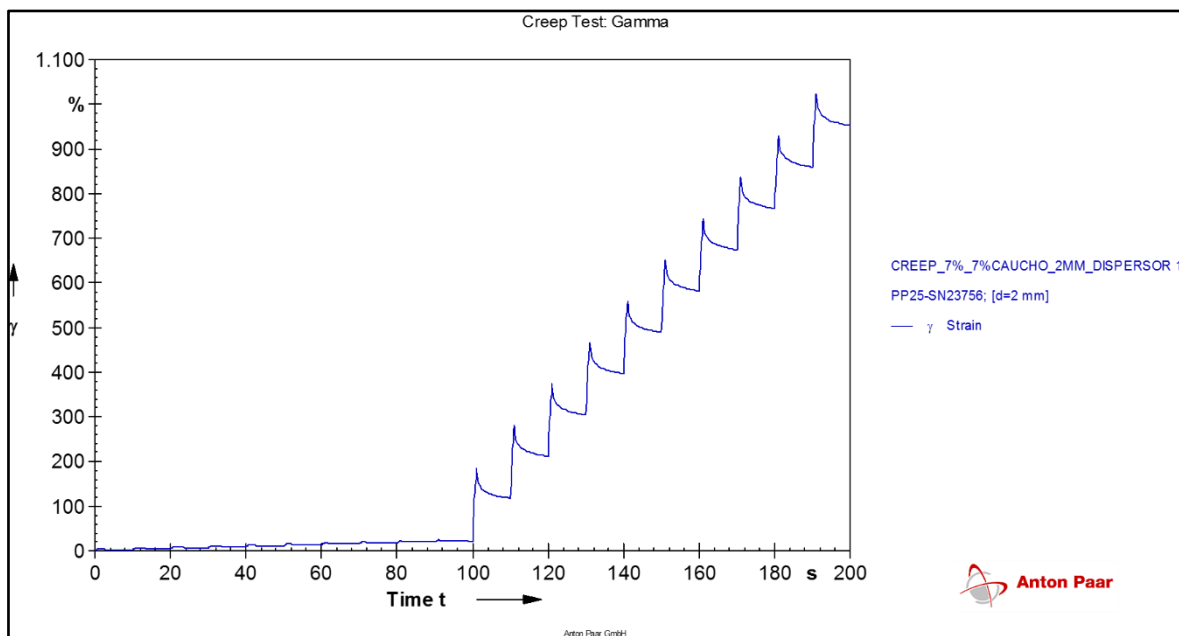


Figura A- 57: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 7% polvo de caucho – Muestra 2

7.14.6 Modificación con 7% de ablandador y 10% de polvo de caucho

Tabla A- 112: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 10% polvo de caucho – Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.036	0.015	0.036	0.015	0.021	58.402	67.614	0.151	0.114
2	0.015	0.051	0.028	0.036	0.013	0.023	63.408		0.131	
3	0.028	0.064	0.040	0.035	0.012	0.023	65.537		0.122	
4	0.040	0.076	0.052	0.035	0.012	0.024	67.330		0.115	
5	0.052	0.087	0.063	0.035	0.011	0.024	68.376		0.111	
6	0.063	0.098	0.074	0.035	0.011	0.024	69.253		0.107	
7	0.074	0.108	0.084	0.034	0.011	0.024	69.388		0.105	
8	0.084	0.119	0.094	0.035	0.010	0.025	70.977		0.101	
9	0.094	0.129	0.104	0.035	0.010	0.025	72.046		0.097	
10	0.104	0.139	0.114	0.035	0.010	0.025	71.429		0.100	
11	0.114	1.260	0.660	1.146	0.546	0.600	52.356	56.211	0.171	0.156
12	0.660	1.790	1.160	1.130	0.500	0.630	55.752		0.156	
13	1.160	2.300	1.660	1.140	0.500	0.640	56.140		0.156	
14	1.660	2.800	2.150	1.140	0.490	0.650	57.018		0.153	
15	2.150	3.290	2.650	1.140	0.500	0.640	56.140		0.156	
16	2.650	3.780	3.140	1.130	0.490	0.640	56.637		0.153	
17	3.140	4.280	3.630	1.140	0.490	0.650	57.018		0.153	
18	3.630	4.770	4.120	1.140	0.490	0.650	57.018		0.153	
19	4.120	5.260	4.610	1.140	0.490	0.650	57.018		0.153	
20	4.610	5.750	5.100	1.140	0.490	0.650	57.018		0.153	
							Rdiff	16.865	Jnr-diff	36.678

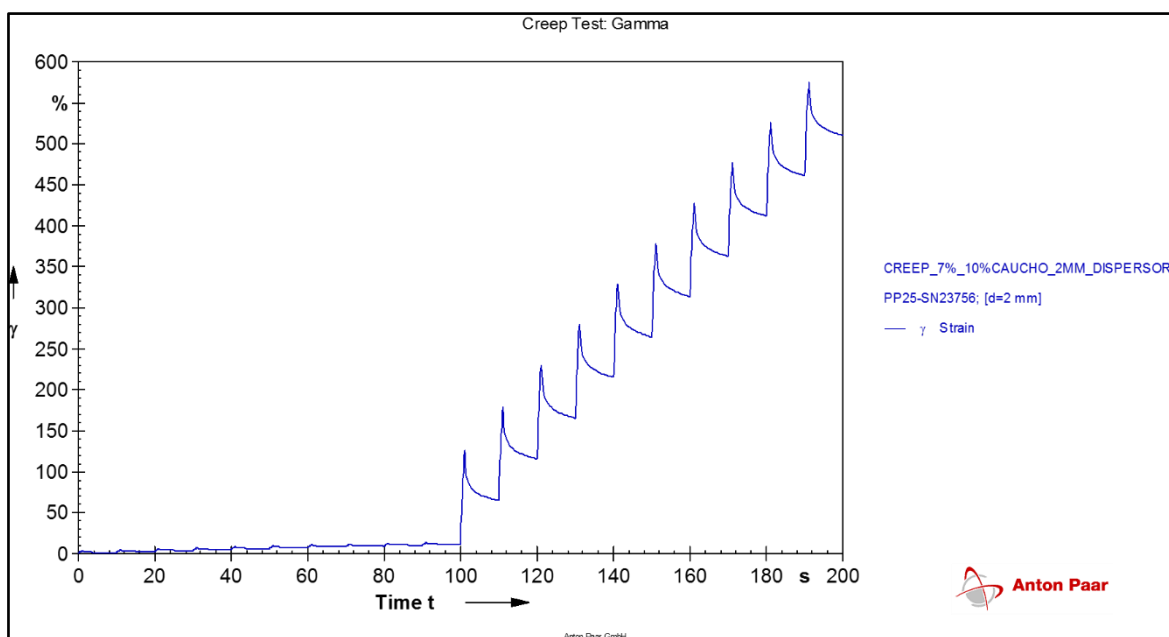


Figura A- 58: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 10% polvo de caucho – Muestra 1

Tabla A- 113: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 10% polvo de caucho – Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.034	0.014	0.034	0.014	0.020	59.302	68.188	0.140	0.107
2	0.014	0.048	0.026	0.034	0.012	0.022	64.118		0.122	
3	0.026	0.060	0.038	0.034	0.011	0.023	66.372		0.114	
4	0.038	0.071	0.048	0.034	0.011	0.023	67.953		0.108	
5	0.048	0.082	0.059	0.034	0.010	0.023	69.048		0.104	
6	0.059	0.092	0.069	0.034	0.010	0.023	69.552		0.102	
7	0.069	0.102	0.079	0.033	0.010	0.023	70.303		0.098	
8	0.079	0.112	0.089	0.033	0.010	0.024	70.783		0.097	
9	0.089	0.122	0.098	0.034	0.009	0.024	71.940		0.094	
10	0.098	0.131	0.107	0.033	0.009	0.024	72.508		0.091	
11	0.107	1.210	0.617	1.103	0.510	0.593	53.762	57.393	0.159	0.148
12	0.617	1.720	1.100	1.103	0.483	0.620	56.210		0.151	
13	1.100	2.200	1.570	1.100	0.470	0.630	57.273		0.147	
14	1.570	2.670	2.030	1.100	0.460	0.640	58.182		0.144	
15	2.030	3.140	2.500	1.110	0.470	0.640	57.658		0.147	
16	2.500	3.610	2.960	1.110	0.460	0.650	58.559		0.144	
17	2.960	4.070	3.430	1.110	0.470	0.640	57.658		0.147	
18	3.430	4.540	3.890	1.110	0.460	0.650	58.559		0.144	
19	3.890	5.010	4.360	1.120	0.470	0.650	58.036		0.147	
20	4.360	5.480	4.830	1.120	0.470	0.650	58.036		0.147	
Rdiff								15.831	Jnr-diff	37.938

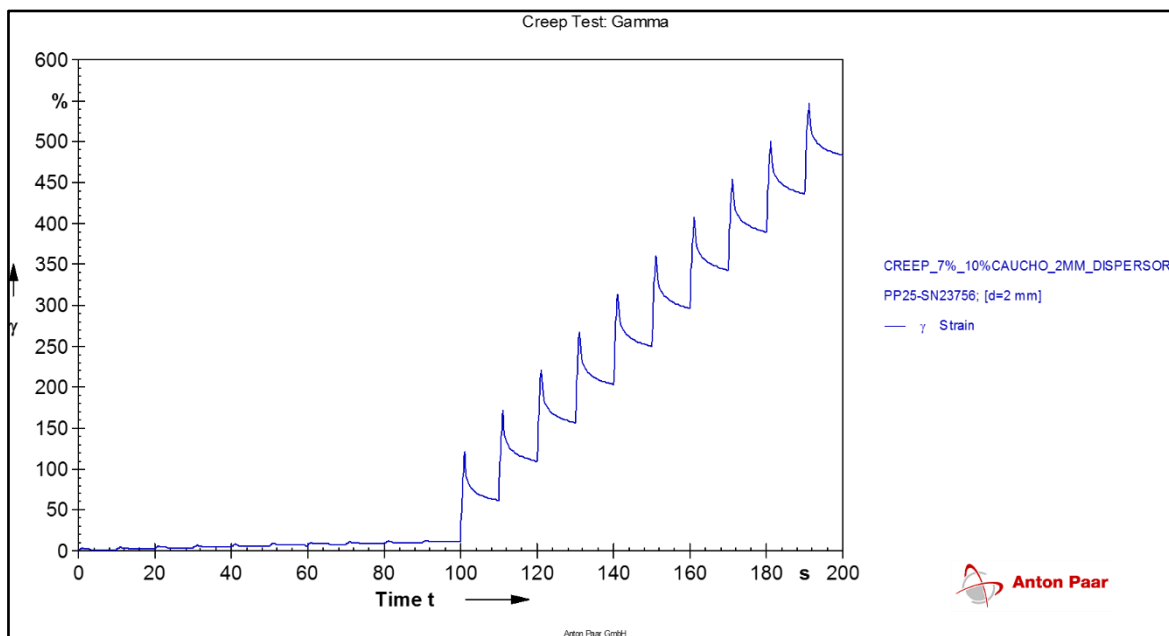


Figura A- 59: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 10% polvo de caucho – Muestra 2

7.15 ANEXO 15: ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD MODIFICACIÓN CON POLVO DE CAUCHO

La *Tabla A- 114* resume los valores de Jnr para cada una de las modificaciones con 7% de Ablandador y 5% de polvo de caucho, elaboradas con el fin de evaluar la repetibilidad del proceso de modificación con polvo de caucho. La *Tabla A- 115* presenta los datos de entrada para el Análisis de Varianza ANOVA con un nivel de significancia de 0.05 (α).

Tabla A- 114: Resumen Valores de Jnr para modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho.

Jnr	Modificación 1	Modificación 2	Modificación 3
Ensayo 1	0.504	0.468	0.471
Ensayo 2	0.540	0.48	0.474
Ensayo 3	-	-	0.516

Tabla A- 115: Datos de entrada para análisis de varianza modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho.

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Column 1	2	1.044	0.522	0.000648
Column 2	2	0.948	0.474	7.2E-05
Column 3	3	1.461	0.487	0.000633

Los resultados de la *Tabla A- 116* indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de Jnr obtenidos para la modificación con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho, dado que el valor de la probabilidad es mayor al valor de α .

Tabla A- 116: Resultados análisis de varianza modificación con polvo de caucho.

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.002511	2	0.001256	2.529132	0.194998	6.944272
Within Groups	0.001986	4	0.000497			
Total	0.004497	6				

7.16 ANEXO 16: CARACTERIZACIÓN PG MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR UTILIZANDO DISPERSOR DE POLÍMEROS EN ASFALTO

INFORME DE ENSAYO 7% ABLANDADOR (DISPERSOR) ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	15-01-2019
Hora de ensayo	15:37
Viscosidad [Pa·s]	0.336
Viscosidad [Poise]	3.36
Tasa corte [1/s]	18.6
Tensión corte [N/m ²]	62.5
Torque [%]	13.4
Velocidad de giro [rpm]	20.0
Temperatura [° C]	134.9
Nº de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	17-01-2019
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	289

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	Anton Paar, MCR-301
Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	52.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi
Fecha de Ensayo	15-01-2019
Hora de ensayo	13:30:00
Cambio de masa por calentamiento	-0.119

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	52.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	100.1
Temperatura Mínima Registrada [°C]	89.2
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:33:03
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	15-01-2019
Hora de ensayo	15:52:06

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	19.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	15-01-2019
Hora de ensayo [hrs]	19:03

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	52	58	64	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.13	1.48	0.72	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	82.6	84.4	85.7	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	52	58	64	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.09	1.43	0.70	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	83.1	84.9	86.5	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]						
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]
	Muestra	52	58	64	-	-	Temp. [°C] T°Prom.
7%	M1	3.16	1.48	0.72	-	-	61.3
	M2	3.11	1.44	0.7	-	-	61.0
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	61.2

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	16-01-2019
Hora de ensayo [hrs]	8:51

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	52	58	64	70	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	10.40	4.86	2.31	1.11	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	75.2	78.2	81.0	83.4	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	52	58	64	70	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	10.40	4.90	2.34	1.15	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	75.0	78.1	80.8	83.2	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]						
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]
	Muestra	52	58	64	70	-	Temp. [°C] T°Prom.
7%	M1	10.70	4.96	2.33	1.12	-	64.5
	M2	10.80	5.01	2.37	1.15	-	64.6
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	64.6

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Valentina Neira Parodi - Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	16-01-2019
Hora de ensayo [hrs]	19:04

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	19	16	13	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3780	5780	8570	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	43.1	20.4	38.7	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	1.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	19	16	13	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3810	5790	8620	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	42.9	40.6	38.4	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	1.0	-	-	-

	Parámetro G* sen(δ) [KPa]
--	---------------------------

Tipo Betún	Temperatura de Ensayo [°C]							Falla a 5000 [KPa]	
	Muestra	19	16	13	-	-	-	-	T° Falla
7%	M1	2590	3780	5360	-	-	-	-	13.6
	M2	2590	3770	5360	-	-	-	-	13.6
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA			-	-	
Temperatura promedio [°C]									13.6

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-18.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	17-01-2019
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	195935.7
Última Verificación Conformidad	17-01-2019
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-18.0	-23.8	
Mínima T° [°C]	-18.1	-24.0	
Máx. Carga [mN]	987.0	986.6	
Mín. Carga [mN]	646.3	652.5	
Carga contacto t=0[mN]	32.0	35.5	
Carga 0,5 s [mN]	646.3	652.5	

Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-18.0	-23.7	
Mínima T° [°C]	-18.1	-23.7	
Máx. Carga [mN]	990.5	985.0	
Mín. Carga [mN]	640.2	652.8	
Carga contacto t=0[mN]	31.8	35.4	
Carga 0,5 s [mN]	640.2	652.8	

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	982.9	985.3	986.8	986.6	984.1	982.9
Deflexión [mm]	0.1431	0.1747	0.2173	0.2748	0.3496	0.4631
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	560.2469	460.0833	370.4694	292.8804	229.6458	173.1782
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	557.7778	462.8723	371.1808	292.9745	227.6115	174.0518
Diferencia [%]	-0.4407	0.6062	0.1920	0.0321	-0.8859	0.5045
Valor m Estimado	0.2863	0.307	0.330	0.3528	0.376	0.398
Coeficiente de Regresión R2	0.99991					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	983.6					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	337.3					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.4					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0131					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0225					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	985.2	988.2	988.5	989.6	989.8	988.8
Deflexión [mm]	0.1466	0.1804	0.2238	0.2795	0.3587	0.4693
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	548.2197	446.9144	360.4446	288.8600	225.1367	171.8845
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	544.5305	451.2524	362.1415	286.7511	224.0268	172.6883
Diferencia [%]	-0.6729	0.9707	0.4708	-0.7301	-0.4930	0.4676
Valor m Estimado	0.290	0.308	0.327	0.3464	0.366	0.385
Coeficiente de Regresión R2	0.99986					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	987.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	347.6					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.3					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0080					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0298					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	985.2	986.0	985.5	985.2	984.3	982.9
Deflexión [mm]	0.0812	0.0952	0.1104	0.1302	0.1576	0.1970
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	989.4059	845.4571	728.0328	617.3893	509.4850	407.0509
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	979.5196	858.4905	731.0244	612.5738	505.1440	409.9229
Diferencia [%]	-0.9992	1.5416	0.4109	-0.7800	-0.8520	0.7055
Valor m Estimado	0.199	0.220	0.243	0.2666	0.290	0.313
Coeficiente de Regresión R2	0.99950					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	983.3					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	330.8					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.2					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0001					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0257					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	983.6	984.4	984.0	983.7	984.0	982.7
Deflexión [mm]	0.0829	0.0963	0.1148	0.1365	0.1660	0.2093
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	967.7178	833.9747	699.5494	587.8742	483.5431	383.1525
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	963.6339	836.6290	705.4402	585.7114	478.8542	385.4953
Diferencia [%]	-0.4220	0.3183	0.8421	-0.3679	-0.9697	0.6115
Valor m Estimado	0.215	0.235	0.257	0.2795	0.3017	0.324
Coeficiente de Regresión R2	0.99980					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	982.6					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	329.8					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	2.4					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0007					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0264					

Tipo	Fecha de Investigación	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
7%	04-12-2018	1	-18.0	292.8804	0.3528	CUMPLE	CUMPLE
		2	-18.0	288.8600	0.3464	CUMPLE	CUMPLE
		3	-24.0	617.3893	0.2666	FALLA	FALLA
		4	-24.0	587.8742	0.2795	FALLA	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 58-28 es 19 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G \cdot \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 13,6 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	58-28
---------------	-------

Grado PG Exacto - Baja Temperatura

Tabla A- 117: Grado PG Exacto Baja Temperatura Modificación con 7% de ablandador utilizando dispersor de polímeros en asfalto

T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	Sprom	mprom	T° exacta (S)	T°exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG
-18	288.86	0.346441	CUMPLE	CUMPLE	290.8702	0.3496075	-18.18	-21.89	-18.18	-28.18	-28
-18	292.8804	0.352774	CUMPLE	CUMPLE							
-24	617.3893	0.266612	NO CUMPLE	NO CUMPLE	602.63175	0.2730405					
-24	587.8742	0.279469	NO CUMPLE	NO CUMPLE							

7.17 ANEXO 17: RESULTADOS MSCR MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE POLVO DE CAUCHO.

Tabla A- 118: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 3% de polvo de caucho – Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.091	0.064	0.091	0.064	0.027	29.857	33.973	0.639	0.586
2	0.064	0.154	0.125	0.090	0.061	0.029	32.186		0.611	
3	0.125	0.215	0.185	0.090	0.060	0.030	33.333		0.600	
4	0.185	0.274	0.244	0.089	0.059	0.030	33.708		0.590	
5	0.244	0.333	0.302	0.089	0.058	0.031	34.831		0.580	
6	0.302	0.390	0.360	0.088	0.058	0.030	34.091		0.580	
7	0.360	0.448	0.417	0.088	0.057	0.031	35.227		0.570	
8	0.417	0.504	0.473	0.087	0.056	0.031	35.632		0.560	
9	0.473	0.561	0.530	0.088	0.057	0.031	35.227		0.570	
10	0.530	0.617	0.586	0.087	0.056	0.031	35.632		0.560	
11	0.586	3.550	2.990	2.964	2.404	0.560	18.893	17.970	0.751	0.766
12	2.990	5.960	5.400	2.970	2.410	0.560	18.855		0.753	
13	5.400	8.390	7.840	2.990	2.440	0.550	18.395		0.763	
14	7.840	10.800	10.300	2.960	2.460	0.500	16.892		0.769	
15	10.300	13.300	12.800	3.000	2.500	0.500	16.667		0.781	
16	12.800	15.800	15.200	3.000	2.400	0.600	20.000		0.750	
17	15.200	18.200	17.700	3.000	2.500	0.500	16.667		0.781	
18	17.700	20.700	20.100	3.000	2.400	0.600	20.000		0.750	
19	20.100	23.100	22.600	3.000	2.500	0.500	16.667		0.781	
20	22.600	25.600	25.100	3.000	2.500	0.500	16.667		0.781	
Rdiff								47.104	Jnr-diff	30.727

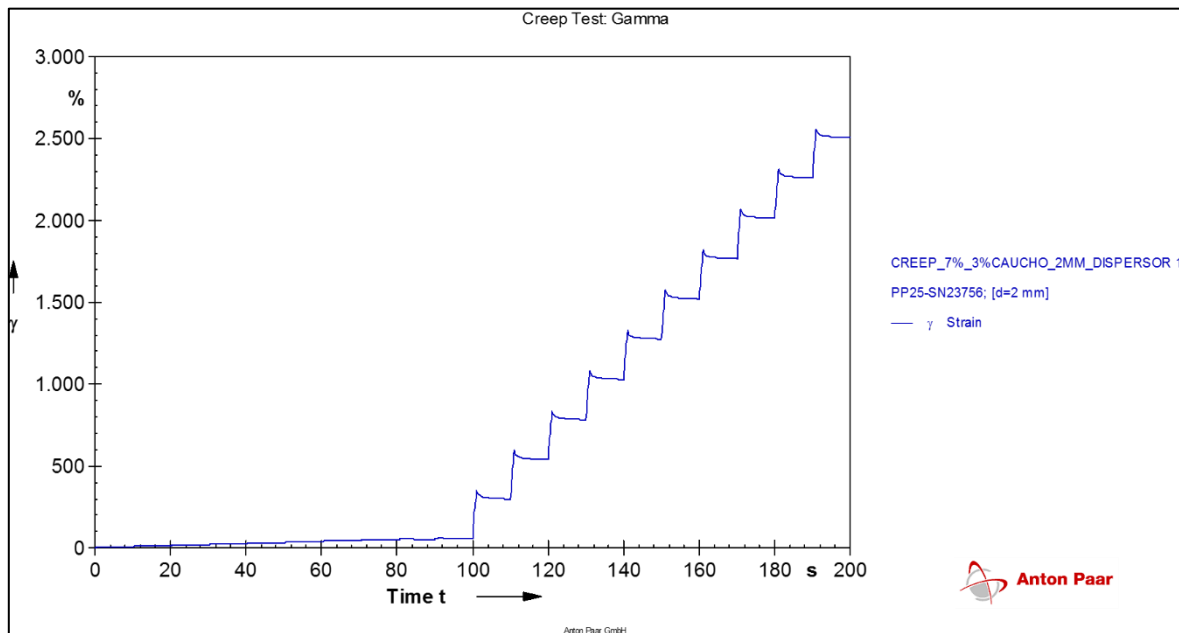


Figura A- 60: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 3% de polvo de caucho – Muestra 1

Tabla A- 119: Resultados MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 3% de polvo de caucho – Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.092	0.065	0.092	0.065	0.027	29.335	33.530	0.648	0.597
2	0.065	0.156	0.127	0.091	0.062	0.029	31.798		0.622	
3	0.127	0.217	0.188	0.090	0.061	0.029	32.222		0.610	
4	0.188	0.278	0.248	0.090	0.060	0.030	33.333		0.600	
5	0.248	0.338	0.307	0.090	0.059	0.031	34.444		0.590	
6	0.307	0.397	0.366	0.090	0.059	0.031	34.444		0.590	
7	0.366	0.455	0.424	0.089	0.058	0.031	34.831		0.580	
8	0.424	0.513	0.482	0.089	0.058	0.031	34.831		0.580	
9	0.482	0.571	0.540	0.089	0.058	0.031	34.831		0.580	
10	0.540	0.628	0.597	0.088	0.057	0.031	35.227		0.570	
11	0.597	3.640	3.060	3.043	2.463	0.580	19.060	18.773	0.770	0.803
12	3.060	6.170	5.580	3.110	2.520	0.590	18.971		0.788	
13	5.580	8.730	8.160	3.150	2.580	0.570	18.095		0.806	
14	8.160	11.300	10.700	3.140	2.540	0.600	19.108		0.794	
15	10.700	13.900	13.300	3.200	2.600	0.600	18.750		0.813	
16	13.300	16.500	15.900	3.200	2.600	0.600	18.750		0.813	
17	15.900	19.100	18.500	3.200	2.600	0.600	18.750		0.813	
18	18.500	21.700	21.100	3.200	2.600	0.600	18.750		0.813	
19	21.100	24.300	23.700	3.200	2.600	0.600	18.750		0.812	
20	23.700	26.900	26.300	3.200	2.600	0.600	18.750		0.813	
Rdiff								44.010	Jnr-diff	34.543

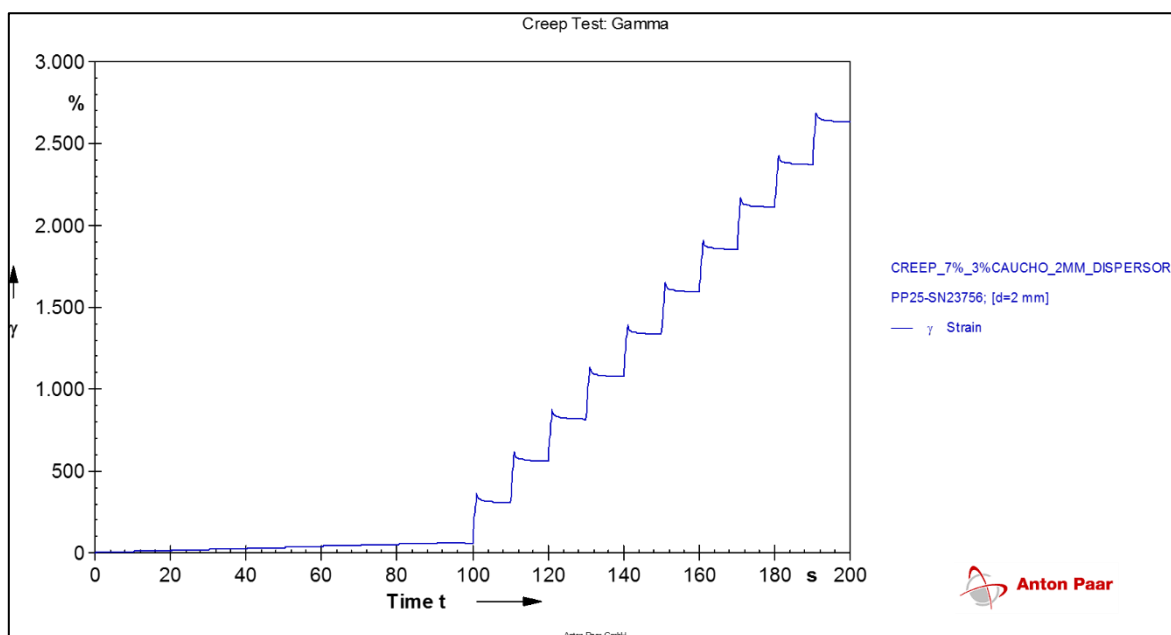


Figura A- 61: Gráfico resultado MSCR a 58°C Modificación con 7% ablandador y 3% de polvo de caucho – Muestra 2

7.18 ANEXO 18: CARACTERIZACIÓN PG MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE POLVO DE CAUCHO

INFORME DE ENSAYO 7% ABLANDADOR + 3% CAUCHO ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	21-02-2019
Hora de ensayo	13:30
Viscosidad [Pa·s]	0.55
Viscosidad [Poise]	5.5
Tasa corte [1/s]	18.6
Tensión corte [N/m ²]	102.5
Torque [%]	22.0
Velocidad de giro [rpm]	20.0
Temperatura [°C]	134.9
Nº de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	25-01-2019
Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Punto de Inflamación [°C]	285

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	Anton Paar, MCR-301
Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	24-01-2019
Hora de ensayo	13:00:00
Cambio de masa por calentamiento [%]	-0.084

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	103.2
Temperatura Mínima Registrada [°C]	96.9
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:14:31
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	05-03-2019
Hora de ensayo	17:24:29

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	19.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	28-01-2019
Hora de ensayo [hrs]	8:59

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.16	1.57	0.79	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	78.7	81.4	83.5	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.21	1.64	0.85	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	78.0	80.8	83.1	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	58	64	70	-	-	Temp. [°C]	T°Prom.
7% + 3%	M1	3.22	1.59	0.80	-	-	68.1	68.4
	M2	3.28	1.66	0.85	-	-	68.6	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	-	

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	25-01-2019
Hora de ensayo [hrs]	10:21

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	8.18	4.28	2.24	1.19	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	69.4	72.3	75.4	78.3	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	7.93	4.16	2.19	1.17	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	69.5	72.5	75.5	78.4	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	58	64	70	76	-	Temp. [°C]	T°Prom.
7% + 3%	M1	8.74	4.49	2.31	1.21	-	70.5	70.4
	M2	8.47	4.36	2.26	1.19	-	70.3	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-		

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	28-01-2019
Hora de ensayo [hrs]	18:49

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	16	13	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	5770	8910	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	40.0	37.6	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	16	13	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	5310	8150	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	40.6	38.3	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1.0	1.0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G* sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000 [KPa]	
	Muestra	16	13	-	-	-	-	T° Falla
7%	M1	3700	5440	-	-	-	-	13.7
	M2	3460	5060	-	-	-	-	13.1
Condición		CUMPLE	CUMPLE	-			-	
Temperatura promedio [°C]								13.4

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-12.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	21-03-2019
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	187838.7
Última Verificación Conformidad	21-03-2019
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-17.9	-23.8	
Mínima T° [°C]	-17.9	-23.9	
Máx. Carga [mN]	983.1	984.7	
Mín. Carga [mN]	680.5	681.7	
Carga contacto t=0[mN]	35.7	35.4	
Carga 0,5 s [mN]	680.5	681.7	

Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-17.9	-23.9	
Mínima T° [°C]	-17.9	-24.1	
Máx. Carga [mN]	982.6	982.4	
Mín. Carga [mN]	679.3	680.8	
Carga contacto t=0[mN]	37.3	36.1	
Carga 0,5 s [mN]	679.3	680.8	

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	983.0	982.0	982.0	980.9	979.3	977.8
Deflexión [mm]	0.2305	0.2740	0.3340	0.4111	0.5136	0.6588
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	347.9213	292.3991	239.8836	194.6846	155.5570	121.0886
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	346.9192	293.4132	240.5614	194.3754	154.7841	121.4732
Diferencia [%]	-0.2880	0.3468	0.2825	-0.1588	-0.4969	0.3176
Valor m Estimado	0.257	0.276	0.297	0.318	0.339	0.360
Coeficiente de Regresión R2	0.99996					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	979.0					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	298.5					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.1					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0319					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0625					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	981.1	980.7	980.7	980.3	979.7	978.9
Deflexión [mm]	0.2316	0.2753	0.3351	0.4135	0.5186	0.6617
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	345.5741	290.6007	238.8087	193.4181	154.1374	120.6894
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	344.8612	291.5332	238.9749	193.1257	153.8691	120.8610
Diferencia [%]	-0.2063	0.3209	0.0696	-0.1511	-0.1741	0.1422
Valor m Estimado	0.258	0.277	0.297	0.318	0.338	0.359
Coeficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	979.0					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	299.7					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	2.7					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.2316					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.2753					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	982.3	981.7	981.5	981.9	980.9	980.7
Deflexión [mm]	0.1392	0.1587	0.1833	0.2149	0.2530	0.3038
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	575.7717	504.6708	436.7959	372.7032	316.2956	263.3914
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	574.5110	506.4822	436.6767	372.8272	315.2150	263.9112
Diferencia [%]	-0.2190	0.3589	-0.0273	0.0333	-0.3416	0.1973
Valor m Estimado	0.194	0.207	0.221	0.235	0.249	0.263
Coeficiente de Regresión R2	0.99996					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980.3					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	298.7					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.4					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0003					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0588					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	981.3	981.0	981.4	981.4	981.1	981.1
Deflexión [mm]	0.1293	0.1473	0.1722	0.2022	0.2389	0.2863
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	618.9686	543.3375	465.0467	396.0766	335.0116	279.5895
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	619.0795	542.7474	465.7119	396.2810	334.3918	279.8172
Diferencia [%]	0.0179	-0.1086	0.1430	0.0516	-0.1850	0.0814
Valor m Estimado	0.204	0.215	0.227	0.239	0.251	0.263
Coeficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980.3					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	299.5					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	1.9					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0113					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0488					

Tipo	Fecha de Investigación	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
7% + 3%	21-03-2019	1	-18.0	194.6846	0.3181	CUMPLE	CUMPLE
		2	-18.0	193.4181	0.3176	CUMPLE	CUMPLE
		3	-24.0	372.7032	0.2351	FALLA	FALLA
		4	-24.0	396.0766	0.2389	FALLA	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 64-28 es 22 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \text{ sen } \delta \leq 5000$ [KPa] en 13.4 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	64-28
---------------	-------

Grado PG Exacto – Baja Temperatura

Tabla A- 120: Grado PG exacto baja temperatura - Modificación con 7% de ablandador y 3% de polvo de caucho.

T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	Sprom	mprom	T° exacta (S)	T°exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG
-18	194.6846	0.318074	CUMPLE	CUMPLE	194.05135	0.317826	-21.34	-19.32	-19.32	-29.32	-28
-18	193.4181	0.317578	CUMPLE	CUMPLE							
-24	396.0766	0.238949	NO CUMPLE	NO CUMPLE	384.3899	0.237032					
-24	372.7032	0.235115	NO CUMPLE	NO CUMPLE							

7.19 ANEXO 19: RESULTADOS MSCR MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5.5% DE POLVO DE CAUCHO

Tabla A- 121: Resultados MSCR Modificación con 7% de ablandador y 5.5 % de polvo de caucho – Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.067	0.040	0.067	0.040	0.026	39.521	45.659	0.404	0.350
2	0.040	0.106	0.078	0.066	0.038	0.028	42.835		0.375	
3	0.078	0.143	0.114	0.065	0.036	0.029	44.547		0.361	
4	0.114	0.179	0.150	0.065	0.036	0.029	44.615		0.360	
5	0.150	0.214	0.184	0.064	0.034	0.030	46.875		0.340	
6	0.184	0.248	0.218	0.064	0.034	0.030	46.875		0.340	
7	0.218	0.282	0.252	0.064	0.034	0.030	46.875		0.340	
8	0.252	0.315	0.285	0.063	0.033	0.030	47.619		0.330	
9	0.285	0.348	0.318	0.063	0.033	0.030	47.619		0.330	
10	0.318	0.381	0.350	0.063	0.032	0.031	49.206		0.320	
11	0.350	2.490	1.860	2.140	1.510	0.630	29.439	29.853	0.472	0.473
12	1.860	4.000	3.340	2.140	1.480	0.660	30.841		0.463	
13	3.340	5.500	4.840	2.160	1.500	0.660	30.556		0.469	
14	4.840	7.010	6.360	2.170	1.520	0.650	29.954		0.475	
15	6.360	8.520	7.870	2.160	1.510	0.650	30.093		0.472	
16	7.870	10.000	9.400	2.130	1.530	0.600	28.169		0.478	
17	9.400	11.600	10.900	2.200	1.500	0.700	31.818		0.469	
18	10.900	13.100	12.500	2.200	1.600	0.600	27.273		0.500	
19	12.500	14.600	14.000	2.100	1.500	0.600	28.571		0.469	
20	14.000	16.200	15.500	2.200	1.500	0.700	31.818		0.469	
Rdiff								34.617	Jnr-diff	35.268

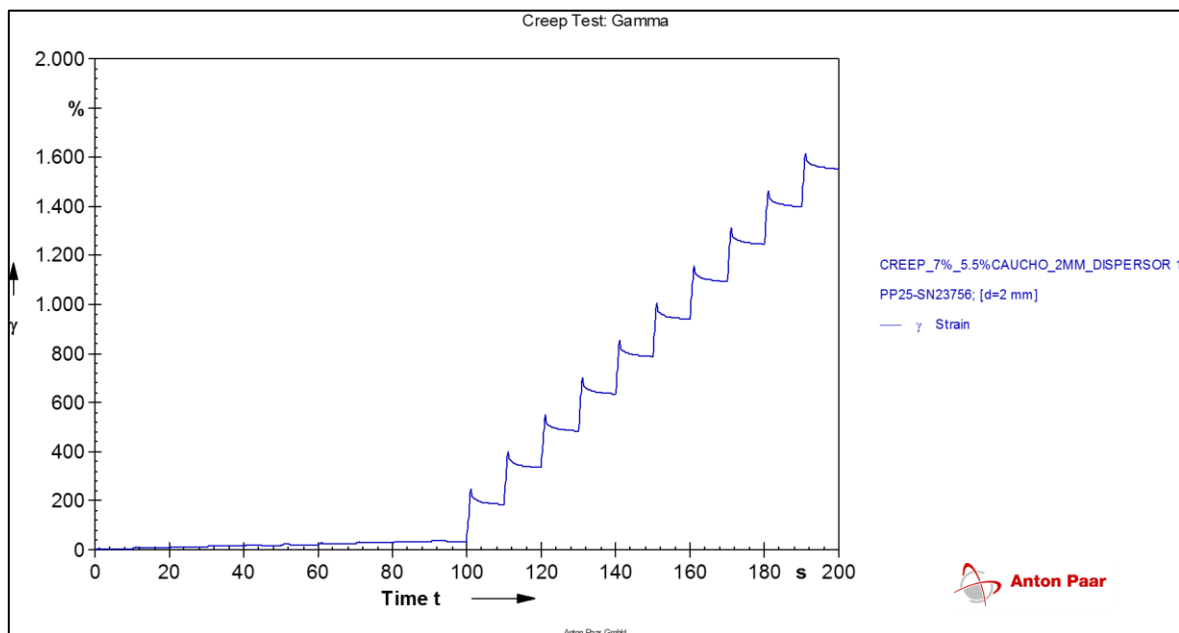


Figura A- 62: Gráfico resultado MSCR Modificación con 7% de ablandador y 5.5 % de polvo de caucho – Muestra 1

Tabla A- 122:Resultados MSCR Modificación con 7% de ablandador y 5.5 % de polvo de caucho – Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga},N)$	$\epsilon_r(\text{Carga},N)$	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0.000	0.064	0.038	0.064	0.038	0.026	40.502	46.953	0.379	0.330
2	0.038	0.101	0.073	0.063	0.035	0.028	44.216		0.352	
3	0.073	0.136	0.107	0.063	0.034	0.029	46.105		0.339	
4	0.107	0.170	0.140	0.063	0.033	0.030	47.619		0.330	
5	0.140	0.202	0.173	0.062	0.033	0.029	46.774		0.330	
6	0.173	0.235	0.205	0.062	0.032	0.030	48.387		0.320	
7	0.205	0.267	0.237	0.062	0.032	0.030	48.387		0.320	
8	0.237	0.298	0.268	0.061	0.031	0.030	49.180		0.310	
9	0.268	0.329	0.299	0.061	0.031	0.030	49.180		0.310	
10	0.299	0.360	0.330	0.061	0.031	0.030	49.180		0.310	
11	0.330	2.400	1.750	2.070	1.420	0.650	31.401	31.524	0.444	0.446
12	1.750	3.820	3.150	2.070	1.400	0.670	32.367		0.438	
13	3.150	5.230	4.560	2.080	1.410	0.670	32.212		0.441	
14	4.560	6.640	5.980	2.080	1.420	0.660	31.731		0.444	
15	5.980	8.060	7.400	2.080	1.420	0.660	31.731		0.444	
16	7.400	9.490	8.830	2.090	1.430	0.660	31.579		0.447	
17	8.830	10.900	10.300	2.070	1.470	0.600	28.986		0.459	
18	10.300	12.400	11.700	2.100	1.400	0.700	33.333		0.438	
19	11.700	13.800	13.100	2.100	1.400	0.700	33.333		0.438	
20	13.100	15.200	14.600	2.100	1.500	0.600	28.571		0.469	
Rdiff								32.860	Jnr-diff	35.133

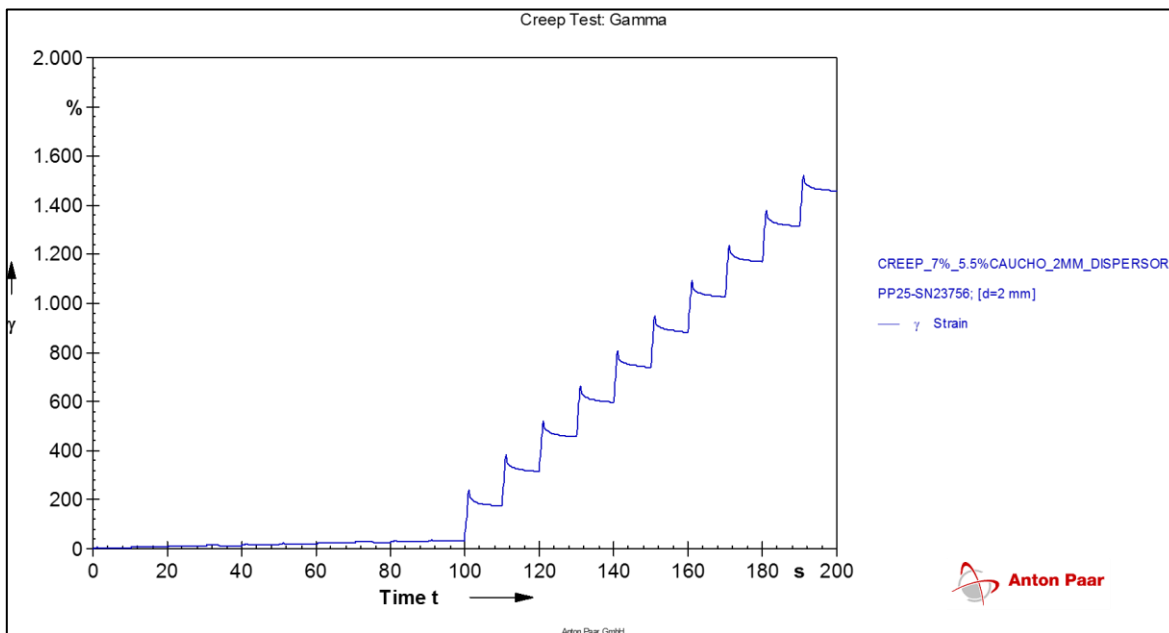


Figura A- 63: Gráfico resultado MSCR Modificación con 7% de ablandador y 5.5 % de polvo de caucho – Muestra 2

7.20 ANEXO 20: CARACTERIZACIÓN PG MODIFICACIÓN CON 7% DE ABLANDADOR Y 5.5% DE POLVO DE CAUCHO

INFORME DE ENSAYO 7% ABLANDADOR + 5.5% CAUCHO ASFALTOS

3. MÉTODO SUPERPAVE PARA CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO PG, ASTM D6373- 16

3.1 Determinación de la viscosidad cinemática con viscosímetro rotacional Brookfield, ASTM D4402-15 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Fecha de ensayo	22-02-2019
Hora de ensayo	9:27
Viscosidad [Pa·s]	0.74
Viscosidad [Poise]	7.4
Tasa corte [1/s]	18.6
Tensión corte [N/m ²]	137.2
Torque [%]	29.5
Velocidad de giro [rpm]	20.0
Temperatura [° C]	135.0
N° de vástago	SC4-21

3.2 Método para determinar los puntos de Inflamación mediante la copa abierta de Cleveland, ASTM D92-16a (MC-V8, 2014) ^(a)

Estado	Asfalto original
Fecha realización	28-02-2019
Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Punto de Inflamación [°C]	275

3.3 Medición de propiedades reológicas superpave mediante reómetro de corte dinámico, según norma ASTM D 7175-15 ^(a)

3.3.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	Anton Paar, MCR-301
Código de Identificación	80863267
Versión de Software	RHEOPLUS/32 V3.40

3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0
Norma Envejecimiento	-

3.3.3.1 Ensayo de pérdida de masa a asfalto envejecido en HPDR, según ASTM D2872-12e1 ^(a)

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	25-01-2019
Hora de ensayo	14:00:00
Cambio de masa por calentamiento [%]	-0.069

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	58.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	25.0

3.4 Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos en cámara a presión (PAV), según ASTM D6521-13 ^(a)

Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Temperatura envejecimiento [°C]	100.0
Temperatura Máxima Registrada [°C]	100.2
Temperatura Mínima Registrada [°C]	90.5
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:04:58
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	11-03-2019
Hora de ensayo	19:23:50

3.4.1 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	16.0
Diámetro de plato de ensayo [mm]	8.0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	28-01-2019
Hora de ensayo [hrs]	12:55

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	4.01	2.07	1.09	0.59	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	75.0	78.2	81.0	83.2	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	12.0	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3.87	2.01	1.06	0.58	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	75.2	78.4	81.1	83.3	-	-
Amplitud de deformación [%]	12.0	12.0	12.0	12.0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	58	64	70	76	-	Temp. [°C]	T°Prom.
7% + 5.5%	M1	4.15	2.11	1.10	0.59	-	70.9	70.8
	M2	4.01	2.05	1.07	0.58	-	70.7	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	26-01-2019
Hora de ensayo [hrs]	12:14

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	10.40	5.73	3.16	1.76	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	63.5	66.1	69.0	72.1	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	10.20	5.55	3.02	1.67	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	64.7	67.2	70.2	73.2	-	-
Amplitud de deformación [%]	10.0	10.0	10.0	10.0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	58	64	70	76	-	Temp. [°C]	T°Prom.
7% + 5.5%	M1	11.70	6.27	3.38	1.85	-	74.3	74.0
	M2	11.30	6.01	3.21	1.74	-	73.7	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-		

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Katherine Landeros Castillo
Fecha de Ensayo	13-03-2019
Hora de ensayo [hrs]	10:24

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	16	13	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	6680	10000	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	37.9	35.8	-	-	-	-
	1.0	1.0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	16	13	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	6190	9320	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	38.5	36.4	-	-	-	-
	1.0	1.0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G* sen(δ) [KPa]							
	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000 [KPa]	
	Muestra	19	16	13	-	-	-	T° Falla
7%+5.5%	M1		4100	5860	-	-	-	14.3
	M2		3850	5530	-	-	-	13.8
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA		-	-	
Temperatura promedio [°C]								14.1

3.8 Método Superpave para Medición de Rigidez en Fluencia por Flexión a Bajas temperaturas mediante Reómetro de Viga de Flexión, según Norma ASTM D6648 -08(2016)^(a)

3.8.1 Identificación del equipo:

Marca Equipo y Modelo	ATS BBR
Código de Identificación	12-8463-6-12
Versión de Software	ATS BBR 4.18 W

3.8.2 Condiciones del ensayo:

Estado Asfalto	Envejecido PAV
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	-12.0
Ancho de la Probeta [mm]	12.7
Espesor de la probeta [mm]	6.35

3.8.3 Información calibración del equipo:

Última Calibración de Temperatura	06/06/2012
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Constantes de Celda de Carga mV/V	12.244
Última Calibración de Celda de Carga	Fabricante, 01/12/2011
Última verificación del Módulo	14-03-2019
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	194726.8
Última Verificación Conformidad	14-03-2019
Observación	Las verificaciones se realizan cada vez que se inicia el Software.

3.8.4 Condiciones del Ensayo

Muestra	M1		
Máxima T° [°C]	-11.9	-17.8	-24.0
Mínima T° [°C]	-11.9	-18.0	-24.1
Máx. Carga [mN]	984.7	983.2	985.3
Mín. Carga [mN]	673.3	672.6	674.6
Carga contacto t=0[mN]	35.7	35.0	36.3
Carga 0,5 s [mN]	673.3	672.6	674.6

Muestra	M2		
Máxima T° [°C]	-11.8	-17.8	
Mínima T° [°C]	-12.0	-17.9	
Máx. Carga [mN]	984.5	985.8	
Mín. Carga [mN]	674.9	674.1	
Carga contacto t=0[mN]	37.2	36.3	
Carga 0,5 s [mN]	674.9	674.1	

Temperatura [°C]	-12.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	981.0	983.5	983.2	982.5	981.4	980.8
Deflexión [mm]	0.4020	0.4975	0.6270	0.7963	1.0311	1.3614
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	199.0939	161.2783	127.9481	100.6560	77.6491	58.7747
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	198.3180	162.1552	128.3204	100.2714	77.3706	58.9511
Diferencia [%]	-0.3897	0.5438	0.2909	-0.3820	-0.3587	0.3002
Valor m Estimado	0.3120	0.329	0.347	0.3649	0.383	0.401
Coefficiente de Regresión R2	0.99996					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980.9					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	307.7					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.1					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0726					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0715					

Temperatura [°C]	-12.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0

Carga [mN]	984.0	981.9	983.1	982.0	981.9	980.3
Deflexión [mm]	0.4225	0.5194	0.6542	0.8355	1.0841	1.4325
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	189.9945	154.2497	122.6033	95.9002	73.8985	55.8336
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	189.4097	155.0174	122.6033	95.9002	73.8985	55.8336
Diferencia [%]	-0.3078	0.4977	0.0497	-0.1727	-0.2762	0.2117
Valor m Estimado	0.310	0.328	0.348	0.368	0.387	0.407
Coeficiente de Regresión R2	0.99998					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	306.0					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.7					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0537					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0901					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	982.3	982.7	982.7	979.4	978.6	977.3
Deflexión [mm]	0.2008	0.2393	0.2923	0.3605	0.4526	0.5791
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	399.0361	335.0537	274.2857	221.6363	176.3970	137.6910
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	398.3107	335.8881	274.6198	221.3855	175.9732	137.9189
Diferencia [%]	-0.1818	0.2490	0.1218	-0.1132	-0.2403	0.1655
Valor m Estimado	0.262	0.280	0.301	0.321	0.341	0.362
Coeficiente de Regresión R2	0.99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	978.5					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	305.9					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.7					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0260					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0501					

Temperatura [°C]	-18.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	984.9	985.5	984.9	983.4	981.8	981.2
Deflexión [mm]	0.2172	0.2617	0.3229	0.4008	0.5067	0.6554
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	369.9036	307.1672	248.8516	200.1867	158.0897	122.1478
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	368.7961	308.2484	249.7252	199.6163	157.4353	122.5125
Diferencia [%]	-0.2994	0.3520	0.3510	-0.2849	-0.4139	0.2986
Valor m Estimado	0.277	0.294	0.313	0.333	0.352	0.372
Coeficiente de Regresión R2	0.99996					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	981.8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	307.7					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.9					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0417					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0470					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	984.3	984.5	984.6	982.1	980.0	979.7
Deflexión [mm]	0.1146	0.1302	0.1519	0.1785	0.2104	0.2491
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	700.6548	616.9693	528.6766	449.0012	379.9604	320.8247
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	702.2742	614.9945	527.8147	449.9004	380.8691	320.2283
Diferencia [%]	0.2311	-0.3201	-0.1630	0.2003	0.2391	-0.1859
Valor m Estimado	0.207	0.216	0.225	0.235	0.245	0.255
Coeficiente de Regresión R2	0.99996					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980.4					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	305.8					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4.6					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0101					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0407					

Temperatura [°C]	-24.0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8.0	15.0	30.0	60.0	120.0	240.0
Carga [mN]	983.2	980.3	982.4	980.3	980.4	979.5
Deflexión [mm]	0.1163	0.1334	0.1533	0.1787	0.2114	0.2543
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	689.4321	599.3179	522.7975	447.4881	378.3528	314.2773

Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	685.5407	605.3008	522.3970	446.1276	377.0045	315.2557
Diferencia [%]	-0.5644	0.9983	-0.0766	-0.3040	-0.3564	0.3113
Valor m Estimado	0.191	0.205	0.220	0.235	0.250	0.266
Coefficiente de Regresión R2	0.99981					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	979.7					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	306.8					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3.7					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0.0077					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0.0430					

Tipo	Fecha de Investigación	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
7% + 5.5%	14-03-2019	1	-12.0	100.6560	0.3649	CUMPLE	CUMPLE
		2	-12.0	95.9002	0.3675	CUMPLE	CUMPLE
		3	-18.0	221.6363	0.3210	CUMPLE	CUMPLE
		4	-18.0	200.1867	0.3328	CUMPLE	CUMPLE
		5	-24.0	449.0012	0.2354	FALLA	FALLA
		6	-24.0	447.4881	0.2353	FALLA	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 70-28 es 25 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 14.1[°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	70-28
---------------	-------

Grado PG Exacto – Baja Temperatura

Tabla A- 123: Grado PG exacto baja temperatura Modificación con 7% de ablandador y 5.5% de polvo de caucho.

T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m	S _{prom}	m _{prom}	T° exacta (S)	T° exacta (m)	T° exacta	Grado exacto	Grado PG
-18	221.6363	0.32104	CUMPLE	CUMPLE	210.9115	0.3269155	-20.25	-19.76	-19.76	-29.76	-28
-18	200.1867	0.332791	CUMPLE	CUMPLE							
-24	449.0012	0.235368	NO CUMPLE	NO CUMPLE							