

2019

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LIGANTE CON CLASIFICACIÓN PG58-28 MODIFICADO CON POLÍMERO ESTIRENO BUTADIENO ESTIRENO (SBS)

NEIRA PARODI, VALENTINA DEL PILAR

<https://hdl.handle.net/11673/48017>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

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



ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LIGANTE CON CLASIFICACIÓN PG58-28 MODIFICADO CON POLÍMERO ESTIRENO BUTADIENO ESTIRENO (SBS)

Memoria de titulación presentada por
VALENTINA DEL PILAR NEIRA PARODI

Como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
RODRIGO DELGADILLO STURLA

AGOSTO de 2019

A mi abuela Ester

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta etapa universitaria, quiero agradecer a todas las personas que de alguna manera estuvieron presentes durante estos años.

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Rossana por su apoyo y cariño incondicional, especialmente durante los momentos difíciles. Agradecer a mis hermanas Fernanda y Javiera, que hemos sabido superar juntas las adversidades y espero de todo corazón que podamos seguir haciéndolo en el futuro, a mi tía Esther por acogerme durante mi vida universitaria, y a mi abuela Ester por ser una fuente de inspiración inagotable. Agradezco también a Luciano por su paciencia que a ratos parece infinita e inquebrantable.

Agradezco a mis compañeros y amigos, por haber sido un gran apoyo durante las largas jornadas de estudio y por haber hecho más amena mi estadía en la universidad. Especialmente a mis amigas Javiera, Isadora y Katherine, que estuvieron desde el primer hasta el último día.

También quiero agradecer a mi profesor guía, Rodrigo Delgadillo, por haber confiado en mí para realizar esta investigación, a Probisa por proveer los materiales, especialmente a Cristian Díaz quien hizo posible la realización de esta investigación, también al profesor Carlos Wahr, por su dedicación en las correcciones realizadas. Además, agradecer al equipo del LEMCO por haberme ayudado a llevarla a cabo de manera correcta, acogiéndome con cariño y calidez. Agradezco especialmente a Rodrigo Verdugo, Alejandra Zamora, Paul Gálvez, Cristián Cano, Diego Donoso y Rolando Urtubia, como también a Katherine Landeros, por su apoyo y compañerismo durante las extensas jornadas de trabajo en el laboratorio.

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LIGANTE CON CLASIFICACIÓN PG58-28 MODIFICADO CON POLÍMERO ESTIRENO BUTADIENO ESTIRENO (SBS)

RESUMEN EJECUTIVO

En la presente investigación se busca estudiar, por medio de la realización de ensayos de desempeño, el comportamiento de un ligante asfáltico con clasificación PG58-28, el cual ha sido modificado con distintas concentraciones de estireno butadieno estireno (SBS). Para lograrlo, en primera instancia, es necesario obtener un betún con clasificación PG58-28, a partir de un ligante tradicional PG64-22, mediante un proceso de modificación con ablandador, en el cual se incorporó al betún tradicional distintas concentraciones de ablandador.

A las muestras de ligante asfáltico obtenidas mediante el proceso de modificación con ablandador, se le realizaron los ensayos correspondientes a la clasificación por grado de desempeño de la norma AASHTO M320-16. De los resultados obtenidos se depende que existe una relación inversamente proporcional entre la viscosidad rotacional y la concentración de ablandador, además, se observa una disminución de los grados PG de alta y baja temperatura a medida que se incrementa la cantidad de ablandador adicionada al ligante.

A las muestras obtenidas del proceso de modificación con SBS se le realizaron los ensayos de viscosidad rotacional, según el procedimiento descrito en la norma ASTM D4402-15, y Multiple Stress Creep & Recovery (MSCR), según las condiciones especificadas en la norma AASHTO T350-14. En base a los resultados obtenidos es posible señalar que existe una relación directamente proporcional entre la viscosidad rotacional y la concentración de SBS, además se observa una disminución en los valores de flexibilidad en fluencia no recuperable ($J_{nr,3,2}$) a medida que se incrementa la cantidad de SBS adicionada al ligante.

Palabras Clave: Asfaltos modificados, estireno butadieno estireno, ablandador, Multiple Stress Creep and Recovery, clasificación por clima, Superior Performing Asphalt Pavements.

ABSTRACT

This investigation studies the performance of an asphalt binder with grade PG58-28 which has been modified with different concentrations of styrene butadiene styrene (SBS). This is achieved by the execution of performance tests. The first step in order to accomplish this, is obtaining a bitumen with grade PG58-28 from a PG64-22 binder, through a modification process using oil softener, which is added in various concentrations.

The obtained samples of modified asphalt binder corresponding the aforementioned oil softener process, are subjected to the performance grade tests specified in AASHTO M320-16. From the obtained results it is noted that there is an inversely proportional relationship between rotational viscosity and the oil softener's concentration, also it is observed a diminish performance grade in both the high and low temperatures.

The obtained samples of modified asphalt binder corresponding to the SBS modification process are subjected to the rotational viscosity test, in accordance to the procedure described in ASTM D4402-15, and also to Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) test according to the specified conditions of AASHTO T350-14 standard. The results from the investigation show a directly proportional relationship between the rotational viscosity and the SBS concentration. Finally, it is noted that there is a diminish regarding the nonrecoverable creep compliance ($J_{nr,3,2}$) as the concentration of SBS rises in the modified binder.

Keywords: modified binders, styrene butadiene styrene, oil softener, Multiple Stress Creep and Recovery, AASHTO M332-14, Superior Performing Asphalt Pavements.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
2.1.	OBJETIVO GENERAL	3
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3.	MARCO TEÓRICO	4
3.1.	MEZCLAS ASFÁLTICAS	4
3.1.1.	MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	4
3.1.2.	COMPOSICIÓN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	7
3.2.	PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	10
3.2.1.	DETERIOROS CRÍTICOS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	11
3.3.	NORMATIVAS UTILIZADAS	12
3.3.1.	PROGRAMA ESTRATÉGICO DE INVESTIGACIÓN DE CARRETERAS (SHRP)	12
3.3.2.	ESPECIFICACIONES SUPERPAVE PLUS	16
3.3.3.	DESARROLLO DE LA CLASIFICACIÓN POR CLIMA UTILIZANDO EL ENSAYO MULTIPLE STRESS CREEP AND RECOVERY (MSCR)	20
3.4.	ZONIFICACIÓN SUPERPAVE	31
3.5.	ASFALTOS MODIFICADOS	33
3.5.1.	AGENTES MODIFICADORES	33
3.5.2.	ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR	39
3.5.3.	ASFALTOS MODIFICADOS CON ESTIRENO BUTADIENO ESTIRENO (SBS)	58
4.	ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN	82
4.1.	ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR	82
4.1.1.	HIPÓTESIS	82
4.1.2.	METODOLOGÍA	82
4.1.3.	MATERIALES	85
4.1.4.	EQUIPOS	86
4.2.	ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR Y ESTIRENO BUTADIENO ESTIRENO (SBS)	93
4.2.1.	HIPÓTESIS	93
4.2.2.	METODOLOGÍA	94
4.2.3.	MATERIALES	96
4.2.4.	EQUIPOS	97
5.	RESULTADOS	98
5.1.	ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR	98
5.1.1.	VISCOSIDAD	98

5.1.2.	CLASIFICACIÓN SUPERPAVE POR GRADO DE DESEMPEÑO (PG).....	99
5.1.3.	MULTIPLE STRESS & CREEP RECOVERY	103
5.1.4.	ANÁLISIS	104
5.2.	VARIABILIDAD ENTRE MEZCLADOR POLYTRON PT 10-35 GT Y DISPERSOR D-25	105
5.2.1.	MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR.....	105
5.2.2.	MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR Y POLVO DE CAUCHO	106
5.3.	ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR Y ESTIRENO BUTADIENO ESTIRENO (SBS) 108	
5.3.1.	VISCOSIDAD	108
5.3.2.	MULTIPLE STRESS CREEP & RECOVERY	110
5.3.3.	ANÁLISIS	113
6.	CONCLUSIONES	125
7.	REFERENCIAS.....	128
8.	ANEXOS	131
8.1.	CARACTERIZACIÓN PG.....	131
8.1.1.	LIGANTE BASE	131
8.1.2.	LIGANTE CON 3% DE ABLANDADOR.....	136
8.1.3.	LIGANTE CON 5% DE ABLANDADOR.....	141
8.1.4.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR.....	146
8.1.5.	LIGANTE CON 12% DE ABLANDADOR.....	151
8.1.6.	LIGANTE CON 14% DE ABLANDADOR.....	156
8.1.7.	LIGANTE CON 15% DE ABLANDADOR.....	161
8.1.8.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1,5% DE SBS.....	166
8.1.9.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3,5% DE SBS.....	171
8.2.	VISCOSIDAD.....	176
8.2.1.	LIGANTE BASE.....	176
8.2.2.	LIGANTE CON 3% DE ABLANDADOR.....	176
8.2.3.	LIGANTE CON 5% DE ABLANDADOR.....	176
8.2.4.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR.....	176
8.2.5.	LIGANTE CON 12% DE ABLANDADOR.....	177
8.2.6.	LIGANTE CON 14% DE ABLANDADOR.....	177
8.2.7.	LIGANTE CON 15% DE ABLANDADOR.....	178
8.2.8.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1% DE SBS.....	178
8.2.9.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 2% DE SBS.....	178
8.2.10.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE SBS.....	179

8.2.11.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 4% DE SBS	179
8.2.12.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1,5% DE SBS	180
8.2.13.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3,5% DE SBS	180
8.3.	MULTIPLE STRESS CREEP & RECOVERY	182
8.3.1.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR.....	182
8.3.2.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1% DE SBS	190
8.3.3.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 2% DE SBS	192
8.3.4.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE SBS	198
8.3.5.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 4% DE SBS	200
8.3.6.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1,5% DE SBS	202
8.3.7.	LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3,5% DE SBS	204

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría polvo mineral.	9
Tabla 2. Selección del ligante basado en la velocidad y volumen de tránsito.	21
Tabla 3. Determinación del valor de J_{nr} para varios ligantes a 3,2 [kPa] y la temperatura a la cual $G^*/\sin\delta$ es 2,2 [kPa].	23
Tabla 4. Relación entre los cambios en J_{nr} y los cambios en el ahuellamiento para los ligantes I-55 Mississippi, ALF y MnRoad Studies.	26
Tabla 5. Límites de las categorías para la clasificación por clima.	27
Tabla 6. Tipo de tránsito.....	28
Tabla 7. Requisitos de la clasificación de asfaltos por grado de desempeño (PG) usando MSCR. ...	29
Tabla 8. Materiales usados para los ensayos en ligantes.	40
Tabla 9. Porcentaje de modificador usado para obtener el mismo grado PG de alta temperatura para el ligante base FH.	41
Tabla 10. Resultados para la temperatura intermedia para ligantes modificados con aceite.	50
Tabla 11. Fuentes de ligantes asfálticos y matriz de ensayos.	64
Tabla 12. Clasificación por grado de desempeño de los ligantes modificados basado en la norma AASHTO MP19-01.....	65
Tabla 13. Grado del ligante basado en AASHTO M332-11.....	69
Tabla 14. Resumen de los resultados de los ensayos.	71
Tabla 15. Granulometría de las mezclas asfálticas.....	76
Tabla 16. Plan de trabajo modificaciones con ablandador.	84
Tabla 17. Límites de la clasificación por clima.	94
Tabla 18. Plan de trabajo modificación con SBS.	95
Tabla 19. Viscosidad rotacional para distintas concentraciones de ablandador.	98
Tabla 20. Temperaturas grado PG ligantes modificados con distintas concentraciones de ablandador.	100
Tabla 21. Grado PG exacto de baja temperatura.....	102
Tabla 22. Grado PG de temperatura intermedia.	102
Tabla 23. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en mezclador (mezcla 1).	103
Tabla 24. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en mezclador (mezcla 2).	104

Tabla 25. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en mezclador (mezcla 3).....	104
Tabla 26. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C.	104
Tabla 27. Resumen datos ingresados a modelo ANOVA.....	105
Tabla 28. Valores calculados para modelo ANOVA.....	105
Tabla 29. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C para variabilidad entre mezclador y dispersor.	106
Tabla 30. Resumen datos ingresados a modelo ANOVA.....	106
Tabla 31 . Valores calculados para modelo ANOVA.....	106
Tabla 32. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C para variabilidad entre mezclador y dispersor.	107
Tabla 33. Resumen datos ingresados a modelo ANOVA.....	107
Tabla 34. Valores calculados para modelo ANOVA.....	107
Tabla 35. Viscosidad rotacional para distintas concentraciones de SBS, medida en estado original y envejecimiento primario.....	108
Tabla 36. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en dispersor (mezcla 1).....	110
Tabla 37. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en dispersor (mezcla 2).....	110
Tabla 38. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en dispersor (mezcla 3).....	110
Tabla 39. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 1% de SBS.....	110
Tabla 40. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 2% de SBS (mezcla 1).	111
Tabla 41. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 2% de SBS (mezcla 2).	111
Tabla 42. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 2% de SBS (mezcla 3).	111
Tabla 43. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 3% de SBS.....	111

Tabla 44. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 4% de SBS.	111
Tabla 45. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C.	113
Tabla 46. Resumen datos ingresados a modelo ANOVA.	114
Tabla 47. Valores calculados para modelo ANOVA.	114
Tabla 48. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C para distintas concentraciones de SBS.	114
Tabla 49. Límites de categorías según volumen y velocidad de tránsito de norma AASHTO M332-14.	116
Tabla 50. Cuadro resumen de las concentraciones mínimas de SBS requeridas para cada nivel de tránsito.	120
Tabla 51. Resumen de resultados caracterización PG.	120
Tabla 52. Grado PG exacto de baja temperatura.	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema planta asfáltica discontinua (Batch)	5
Figura 2. Esquema planta asfáltica continua.....	6
Figura 3. Esquema metodología de selección de ligantes Superpave	13
Figura 4. Comportamiento de materiales elásticos y viscosos frente a esfuerzo sinusoidales.	15
Figura 5. Comportamiento de material viscoelástico frente a esfuerzos sinusoidales.....	15
Figura 6. Flexibilidad en fluencia no recuperable de los ligantes PG70-22 y PG64-22	22
Figura 7. Gráfico de la sensibilidad térmica de un ligante original PG64-22 para variaciones específicas en la flexibilidad en fluencia no recuperable.....	24
Figura 8. Gráfico de la flexibilidad en fluencia no recuperable para ligantes tradicionales y modificados.....	24
Figura 9. Gráfico de la flexibilidad en fluencia no recuperable demostrando la dependencia del esfuerzo para un ligante modificado con SBS PG76-22	25
Figura 10. Flexibilidad en fluencia no recuperable	30
Figura 11. Zonificación Superpave para Chile utilizando el modelo basado en daño LTPP 3.1, para un 98% de confiabilidad	32
Figura 12. Estructura química aceites derivados de la refinación del petróleo.....	35
Figura 13. Esquema clasificación de polímeros.....	36
Figura 14. Grado PG exacto de alta temperatura	42
Figura 15. Resultados de la rigidez $S(t)$	43
Figura 16. Efecto del tiempo de mezclado sobre las propiedades de alta temperatura	44
Figura 17. Resumen de los datos obtenidos para grado PG de alta temperatura estado original...	45
Figura 18. Resumen de los datos obtenidos para grados PG de alta temperatura para diferentes porcentajes de aceite modificador	46
Figura 19. Resumen de los datos obtenidos para grados de alta temperatura para ligantes VA originales	47
Figura 20. Resumen de los datos obtenidos para grados PG de alta temperatura RTFO.....	47
Figura 21. Razón entre los valores de $G^*/\sin\delta$ para RTFO y estado original	48
Figura 22. Resumen de los resultados para el ensayo MSCR para ligante base y ligantes modificados con aceite	49
Figura 23. Resultados BBR a diferentes temperaturas para ligante base y modificados con aceite.	51

Figura 24. Efecto de la modificación con aceite en los resultados de BBR a diferentes temperaturas	53
Figura 25. Resultados BBR a diferentes temperaturas para ligante base VA sin modificar y modificado con aceite	54
Figura 26. Razón de la rigidez del ligante con envejecimiento PAV y en estado original	55
Figura 27. Resumen de los resultados para la curva maestra para ligante original y modificados con aceite	55
Figura 28. Resumen de los resultados de la curva maestra para ligante con envejecimiento RTFO modificados con la concentración óptima de aceite	56
Figura 29. Resumen de los resultados para la curva maestra de ligantes modificados con diferentes concentraciones de aceite en base a residuos.....	57
Figura 30. Estructura química del estireno butadieno estireno (SBS)	58
Figura 31. Estructura polímero SBS en bloque.....	59
Figura 32. Etapa 1 del proceso de polimerización del SBS.....	59
Figura 33. Etapa 2 del proceso de polimerización del SBS.....	60
Figura 34. Etapa 3 del proceso de polimerización del SBS.....	60
Figura 35. Etapa 4 del proceso de polimerización del SBS.....	61
Figura 36. efecto cuantitativo del hinchamiento del SBS sobre las propiedades mecánicas del ligante asfáltico	62
Figura 37. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 64°C	66
Figura 38. Porcentaje de recuperación a 64°C para ligantes asfálticos modificados con Kraton	66
Figura 39. Recuperación elástica a 25°C para ligantes asfálticos modificados con Kraton	67
Figura 40. Grado exacto de temperatura crítica alta para ligantes asfálticos modificados con polímero	68
Figura 41. Grado exacto de temperatura crítica baja para ligantes asfálticos modificados con polímero	69
Figura 42. Flexibilidad en fluencia no recuperable	69
Figura 43. Recuperación elástica a 25°C	70
Figura 45. Estructura del pavimento de la autopista	72
Figura 46. Evolución de la temperatura que limita la rigidez y el valor m en el ensayo BBR	73
Figura 47. Evolución de la recuperación elástica a 25°C.....	74
Figura 48. Evolución de los niveles de oxidación	74

Figura 49. Evolución del contenido de polímero medido por FTIR.....	74
Figura 50. Estructura del pavimento.....	76
Figura 51. $G^*/\sin\delta$ para cada ligante asfáltico a distintas temperaturas.....	77
Figura 52. Porcentaje de recuperación obtenido por medio del ensayo MSCR	78
Figura 53. Flexibilidad en fluencia no recuperable obtenida del ensayo MSCR	78
Figura 54. Energía de fractura del ligante	79
Figura 55. Profundidad de ahuellamiento	79
Figura 56. Perfil transversal de ahuellamiento a 100.000 pasadas.....	80
Figura 57. Mediciones de tensión	81
Figura 58. Esquema proceso de modificación con ablandador	84
Figura 59. Ablandador	86
Figura 60. Mezclador de alto corte POLYTRON PT 10-35 GT	87
Figura 61. Vástago POLYTRON-aggregate type PT-DA 30/2EC-F250	87
Figura 62. Placa calentadora Thermo Scientific Cimarec	88
Figura 63. Horno de Película Delgada Rotatoria Modelo CS 325-B	89
Figura 64. Cámara de Envejecimiento a Presión ATS.....	90
Figura 65. Cámara de vacío	90
Figura 66. Viscosímetro Brookfield DV-II+ pro	91
Figura 67. DSR Anton Paar PHYSICA MCR 301	92
Figura 68. Reómetro de Viga en Flexión ATS	93
Figura 69. Esquema proceso de modificación con SBS	95
Figura 70. Estireno butadieno estireno (SBS).....	96
Figura 71. Dispersor D-25.....	97
Figura 72. Gráfico viscosidad rotacional v/s concentración de ablandador	99
Figura 73. Gráfico Grado PG v/s Concentración de ablandador	101
Figura 74. Gráfico viscosidad rotacional v/s concentración SBS en estado original	109
Figura 75. Gráfico viscosidad rotacional v/s concentración SBS con envejecimiento primario	109
Figura 76. Resultados ensayo MSCR	112
Figura 77. Curva flexibilidad en fluencia no recuperable v/s concentración de SBS, con ajuste lineal	115
Figura 78. Curva flexibilidad en fluencia no recuperable v/s concentración de SBS, con ajuste cuadrático.....	115

Figura 79. Curva flexibilidad en fluencia no recuperable v/s concentración de SBS, con ajuste cúbico	116
Figura 80. Gráfica resumen de las concentraciones de SBS y los rangos de la clasificación por clima (ajuste lineal).....	118
Figura 81. Gráfica resumen de las concentraciones de SBS y los rangos de la clasificación por clima (ajuste cuadrático)	119
Figura 82. Gráfica resumen de las concentraciones de SBS y los rangos de la clasificación por clima (ajuste cúbico)	119
Figura 83. Gráfico temperatura alta PG v/s flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa]....	121
Figura 84. Gráfico temperatura baja PG v/s flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa]...	121
Figura 85. Gráfico temperatura alta PG v/s concentración de SBS.....	122
Figura 86. Gráfico temperatura baja PG v/s concentración de SBS.....	122
Figura 87. Curva resumen caracterización PG v/s concentración de SBS.	123

1. INTRODUCCIÓN

Los deterioros más significativos en los pavimentos flexibles, los cuales son ahuellamiento, fatiga y agrietamiento térmico, están directamente relacionados con las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos con que se construyen dichos pavimentos, además influyen la temperatura de servicio y las condiciones de tránsito a las cuales se encuentran sometidos. Es por esto que se requiere contar con un adecuado sistema de selección de las propiedades de los betunes asfálticos, y así mejorar su desempeño frente a los deterioros mencionados anteriormente. Para avanzar en esta dirección, durante la década de los ochenta, en Estados Unidos, se desarrolló el sistema Superpave (Superior Performance Asphalt Pavements) que pretende reemplazar las especificaciones tradicionales actualmente utilizadas en el país, basándose en la medición de las propiedades reológicas para la selección del ligante.

Además, durante los últimos años se ha producido un aumento de los volúmenes de tránsito en el país (Dirección de Vialidad, Información de Tránsito, 2019), generando un incremento en los esfuerzos a los cuales se ve expuesto el pavimento. Por esta razón es que se han comenzado a utilizar ligantes asfálticos modificados con polímeros, debido a que este aditivo tiene la capacidad de mejorar las propiedades reológicas del betún. Uno de los polímeros más comúnmente usado es el estireno butadieno estireno (SBS), ya que le confiere propiedades elásticas al ligante al mismo tiempo que aumenta su rigidez.

Sin embargo, el actual sistema Superpave no es lo suficientemente sensible para cuantificar el impacto que produce la modificación con polímero sobre las propiedades reológicas del betún, es por esto que se ha planteado modificar el sistema de selección de ligantes Superpave, reemplazando el ensayo que determina el grado de alta temperatura por el ensayo Multiple Stress Creep & Recovery (MSCR), generando una nueva especificación (AASHTO M332, 2014) que permite caracterizar de mejor manera la resistencia del betún al ahuellamiento causado por la deformación permanente de la carpeta asfáltica.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los ligantes asfálticos son materiales susceptibles térmicamente, esto quiere decir que su comportamiento depende de la zona climática donde se ubique el pavimento, es por esto que se realizó una zonificación Superpave (Arteaga, 2017) de Chile continental, dando como resultado una división del territorio nacional en zonas climáticas, a las cuales se les asignó un ligante asfáltico óptimo. Concluyendo que para zonas importantes del

norte y sur de nuestro país el ligante óptimo resultó ser uno con clasificación por grado de desempeño PG58-28.

En vista a lo anterior, esta investigación pretende, en primera instancia, obtener un ligante con clasificación PG58-28, a partir de la modificación con ablandador de un ligante tradicional con clasificación PG64-22. En segunda instancia, se busca dilucidar si la nueva especificación permite cuantificar los efectos producidos por la modificación con SBS del ligante PG58-28, que se obtuvo en el proceso anterior.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1. OBJETIVO GENERAL

Se busca determinar la concentración de ablandador, mediante la realización de caracterizaciones PG, que permite obtener un ligante con clasificación PG58-28, a partir de la modificación de un ligante PG64-22, debido a que el primero de ellos es considerado óptimo para zonas importantes del norte y sur del país. A partir de lo anterior, se busca estudiar experimentalmente las propiedades reológicas del ligante con clasificación PG58-28, que ha sido modificado con SBS, mediante la realización del ensayo MSCR, con la finalidad de determinar las concentraciones de SBS que cumplen con los límites de la clasificación por clima de la norma AASHTO M332-14.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Medir la viscosidad rotacional del ligante modificado con ablandador y SBS, respectivamente, mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D4402-15, para determinar si el proceso de modificación se llevó a cabo de manera correcta.
- Analizar la variabilidad en el proceso de modificación con ablandador y SBS, respectivamente, a través, de la realización de un análisis de varianza a los resultados obtenidos para el ensayo MSCR, con la finalidad de determinar si el proceso de modificación es adecuado.
- Determinar la concentración de ablandador, mediante la realización de caracterizaciones por grado de desempeño, para obtener un ligante con clasificación PG58-28, a partir de un ligante PG64-22.
- Determinar las concentraciones de SBS, mediante la elaboración de una curva de “Flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) v/s Concentración de SBS”, para obtener los valores de Jnr asociados a los límites de la clasificación por clima de la norma AASHTO M332-14.
- Verificar el desempeño del ligante modificado con las concentraciones de SBS determinadas anteriormente, a través de la realización de caracterizaciones por grado de desempeño, para establecer si cumplen con el criterio de aumento de grado establecido en la norma AASHTO M323-12.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una mezcla asfáltica está constituida por una combinación de ligante asfáltico, agregados pétreos y cierto porcentaje de vacíos de aire, en dicha mezcla las partículas de agregados se encuentran cubiertas por una película continua y homogénea de ligante asfáltico. La combinación se realiza en proporciones preestablecidas en la etapa de diseño, de acuerdo a los requerimientos del proyecto de pavimentación.

Existen varios tipos de mezclas asfálticas, de acuerdo a su temperatura de fabricación, se pueden clasificar en mezclas en caliente, mezclas tibias y mezclas en frío, siendo la primera de ellas la más utilizada y la de mejor resistencia (Navarro, 2013).

3.1.1. MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Para confeccionar mezclas asfálticas en caliente (MAC), tanto el ligante asfáltico como los agregados pétreos, se deben llevar a temperaturas elevadas, generalmente del orden de los 180°C, con el objetivo que el ligante alcance una viscosidad adecuada que permita realizar la mezcla con los agregados pétreos.

El proceso de fabricación de una MAC se realiza en una planta asfáltica, la cual es una instalación que está constituida por un conjunto de equipos, que permiten dosificar, combinar, calentar y secar los agregados pétreos, para mezclarlos con el ligante asfáltico. Los procedimientos de fabricación para las mezclas en caliente varían dependiendo del tipo de planta que se utiliza, pudiendo tratarse de una planta discontinua (batch) o una planta continua (Navarro, 2013).

A continuación, se describen las principales características de ambos tipos de plantas asfálticas.

Plantas Discontinuas (Batch)

En este tipo de plantas el control de la granulometría de los agregados pétreos se realiza en acopios calientes, pesándose cada vez que se inicia el proceso de producción de una mezcla. Además se utiliza un secador a contra flujo, lo que quiere decir que el agregado circula hacia el quemador. Cabe señalar que la dosificación del ligante asfáltico se controla en el tacho de pesaje (Delgadillo, 2016).

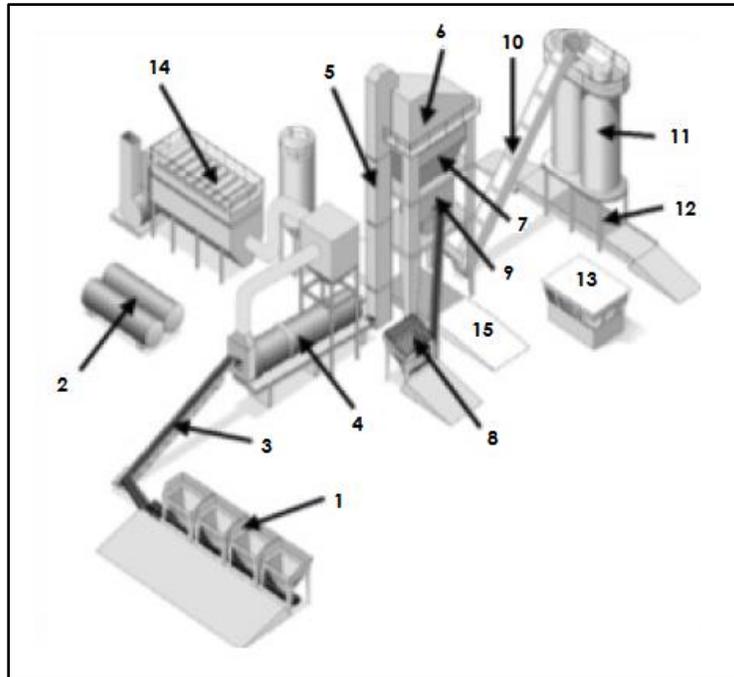


Figura 1. Esquema planta asfáltica discontinua (Batch). Fuente: Apunte de Clases CIV-369 (Delgadillo, 2016).

A continuación, se enumeran los equipos que componen una planta asfáltica discontinua, en referencia a lo mostrado en la figura 1.

1. Almacenamiento de áridos
2. Almacenamiento de ligante asfáltico
3. Cinta transportadora
4. Tambor de secado y mezclado
5. Elevador
6. Cribas
7. Pesa
8. Acopio de material reciclado
9. Ducto de rebase
10. Cinta transportadora
11. Almacenamiento de mezcla
12. Carga de camiones
13. Torre de control
14. Mangas de aspiración de material fino

Plantas Continuas

En este tipo de plantas el control de la granulometría de los agregados pétreos se realiza en frío, durante la circulación de los agregados en las correas transportadoras. Además se utiliza un secador de flujo paralelo, lo que quiere decir que el agregado circula alejándose del quemador. Cabe señalar que la dosificación del ligante asfáltico se proporciona respecto del flujo de agregados, debiendo mantenerse una dosificación volumétrica continua de los materiales (Delgadillo, 2016).

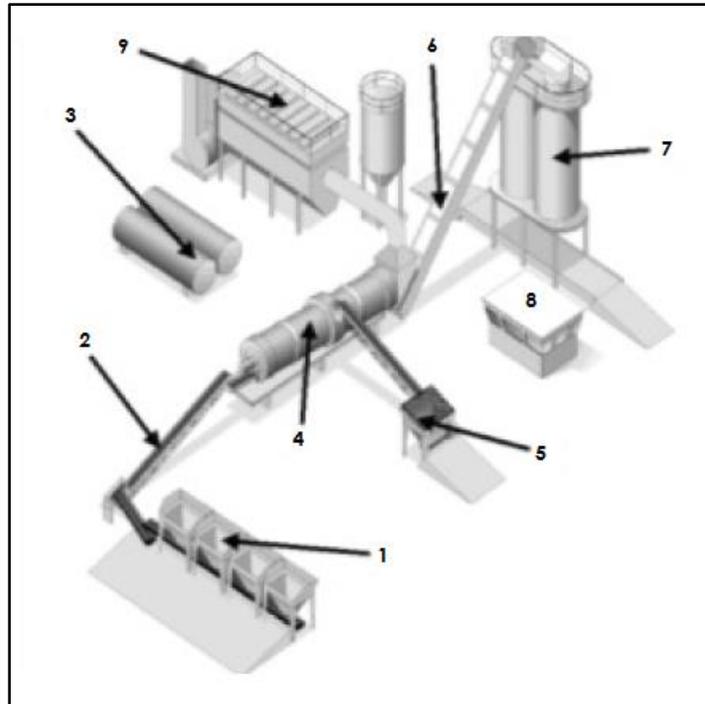


Figura 2. Esquema planta asfáltica continua. Fuente: Apunte de Clases CIV-369 (Delgadillo, 2016).

A continuación, se enumeran los equipos que componen una planta asfáltica continua, en referencia a lo mostrado en la figura 2.

1. Almacenamiento de áridos
2. Cinta transportadora
3. Almacenamiento de betún
4. Tambor de secado y mezclado
5. Acopio de material reciclado
6. Cinta transportadora
7. Almacenamiento de mezcla
8. Torre de control
9. Mangas de aspiración de material fino

Posterior al proceso de producción de mezcla asfáltica en planta, ya sea continua o discontinua, esta se transporta al lugar de pavimentación en camiones tolva, lo cuales debe disponer de las cubiertas necesarias para minimizar las pérdidas de calor durante el tiempo de transporte.

3.1.2. COMPOSICIÓN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Las mezclas asfálticas en caliente están compuestas por ligante asfáltico o betún, agregados pétreos o áridos, y por vacíos de aire. A continuación, se exponen las principales características de cada uno de los componentes de las MAC.

3.1.2.1. Ligante Asfáltico

El ligante asfáltico es un material bituminoso de color marrón oscuro a negro. Es posible encontrarlo en depósitos naturales, formados a partir de la descomposición de organismos marinos, aflorando a la superficie en lagos de asfalto o impregnados en las rocas. Sin embargo, la mayor parte del ligante asfáltico utilizado hoy en día se obtiene a partir del proceso de refinación del petróleo, es por esto que la composición química del ligante asfáltico varía dependiendo del crudo a partir del cual se obtiene.

A continuación, se describen las propiedades químicas y físicas del ligante asfáltico.

Propiedades Químicas

A pesar que la composición química del ligante asfáltico es muy compleja y variable, se puede afirmar que está compuesto principalmente por moléculas de hidrocarburos, siendo posible separarlas en dos tipos de componentes (Delgadillo, 2016) (Solpetroleo, 2019):

Asfaltenos

Los asfaltenos son sólidos amorfos de color café o negro, que constituyen entre el 5 y 25% de la composición del betún, representan los compuestos de peso molecular más elevado del ligante y por lo tanto poseen el mayor punto de ebullición.

Los asfaltenos son, estadísticamente, un conjunto de compuestos muy similares entre sí, que están formados por una elevada cantidad de anillos aromáticos unidos por medio de cadenas de tipo parafínico, con una polaridad relativamente alta. Cabe destacar que son insolubles en los maltenos, los cuales son el segundo tipo de componente del ligante asfáltico.

Maltenos

Los maltenos son sólidos o semisólidos que van desde un color marrón oscuro a blanquizco, agrupan los compuestos de peso molecular más bajo del ligante y por lo tanto poseen puntos de ebullición relativamente bajos. Químicamente están constituidos por anillos aromáticos y nafténicos, y poseen muy pocas cadenas parafínicas.

Los maltenos corresponden a la clasificación que agrupa a distintos compuestos del ligante asfáltico, como ya se mencionó anteriormente, los cuales son los siguientes:

- **Resinas:** son sólidos o semisólidos de color marrón oscuro, que poseen alta polaridad, por lo tanto, son fuertemente adhesivos. Actúan como un medio dispersante o peptizante de los asfaltenos, haciendo que el betún sea estable.
- **Aromáticos:** son líquidos viscosos de color marrón oscuro, que constituyen entre el 40% y 65% de la composición total del betún, y por lo tanto, forman la mayor parte del medio de dispersión para los asfaltenos peptizados. En estos compuestos predominan las moléculas insaturadas de bajo peso molecular no polares, por lo que poseen una alta capacidad para disolver compuestos de alto peso molecular.
- **Saturados:** son aceites viscosos no polares de color blanquizco, compuestos mayoritariamente por cadenas lineales o ramificadas de hidrocarburos alifáticos, tiene un peso molecular similar a los aromáticos, y posee una reactividad muy baja. Representan entre el 5% y 15% del total del ligante (Sylla, 2015).

Cabe destacar que los ligantes asfálticos poseen una estructura coloidal, donde micelas de asfaltenos se encuentran dispersas o disueltas en maltenos. Las micelas están compuestas por asfaltenos rodeados de una capa de resinas de alto peso molecular, hacia el exterior de la micela existe una transición gradual hacia resinas de menor polaridad hasta llegar a un medio de dispersión viscoso (Delgadillo, 2016).

Propiedades Físicas

Las principales propiedades físicas asociadas a las mezclas asfálticas son las siguientes (Navarro, 2013):

- **Durabilidad:** corresponde a la capacidad del asfalto de mantener sus características originales cuando es expuesto a procesos de envejecimiento y degradación.
- **Adhesión y cohesión:** corresponde a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado cuando se realiza el proceso de mezclado, además de permanecer firmemente adherido una vez puesto en servicio el pavimento.

- **Susceptibilidad térmica:** corresponde a la sensibilidad que presenta el asfalto a los cambios de temperatura, manifestándose en cambios en su rigidez.
- **Susceptibilidad a cargas:** la naturaleza del ligante asfáltico le confiere la capacidad de resistir altos esfuerzos producidos al aplicar cargas instantáneas o en cortos periodos de tiempo, en cambio tiende a fluir bajo la acción de cargas permanentes.

Agregados Pétreos

Los agregados pétreos corresponden a cualquier material duro e inerte de composición mineral, como por ejemplo arena, grava, escoria o piedra triturada, utilizado en aplicaciones de pavimentación, ya sea solo o al mezclarse con ligante asfáltico.

Los agregados pueden ser naturales o manufacturados. Los primeros están generalmente constituidos por fragmentos extraídos y procesados de formaciones rocosas o depósitos de rocas, mientras que los segundos son derivados de materiales naturales que han sido físicamente o químicamente modificados, o bien son subproductos industriales que han sido procesados.

Las mezclas asfálticas en caliente requieren agregados con ciertas características deseables, como lo son una distribución de tamaño de partículas adecuado, poseer resistencia y tenacidad, además de estar constituidos por partículas angulares y de iguales dimensiones en todas direcciones, dichas partículas deben poseer una superficie limpia, áspera e hidrofóbica, y tener una porosidad moderada o baja.

Cabe destacar que los agregados pueden clasificarse según su tamaño máximo de partículas en las siguientes categorías (Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras Volumen N°5, 2018):

- **Fracción Gruesa:** corresponde a partículas de agregado que son retenidas en el tamiz N° 8.
- **Fracción Fina:** corresponde a partículas de agregado que pasan por el tamiz N° 8.
- **Polvo Mineral (Filler):** corresponde a un producto mineral finamente dividido, que cumple con la granulometría que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Granulometría polvo mineral.

TAMICES		% QUE PASA EN PESO
(mm)	(ASTM)	
0,630	(N° 30)	100
0,315	(N° 50)	95 – 100
0,080	(N° 200)	70 – 100

Fuente: Sección 5.408.201(3) (Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras Volumen N°5, 2018).

Es posible clasificar las mezclas asfálticas de acuerdo a la granulometría con la cual se fabrican en los siguientes tipos (Delgadillo, 2016):

- **Graduación Uniforme:** presentan un solo tamaño de partícula.
- **Graduación Continua:** presentan una distribución relativamente homogénea de los tamaños de las partículas.
- **Graduación Discontinua:** existe presencia de agregados finos y gruesos, pero sin tamaños intermedios.

3.1.2.2. Vacíos de Aire

Los vacíos de aire corresponden a los espacios vacíos o huecos que se producen en una mezcla asfáltica compactada, están rodeados de partículas de agregados recubiertas con ligante asfáltico. Se deben proveer suficientes vacíos de aire en la mezcla, estableciéndose un límite superior con la finalidad de prevenir un daño excesivo provocado por el medio ambiente, y un límite inferior para permitir la expansión del asfalto durante los meses de verano.

Los vacíos de aire de diseño se expresan como un porcentaje por volumen de la mezcla compactada total, pudiéndose clasificar una mezcla asfáltica en base a dicho porcentaje. Cuando la mezcla asfáltica presenta vacíos de aire superiores a 6% se habla de una mezcla abierta, por el contrario, cuando los vacíos de aire son inferiores o iguales a 6% se denomina mezcla semidensa o densa (Delgadillo, 2016).

3.2. PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Los pavimentos asfálticos o flexibles corresponden a aquellos cuya estructura se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. Están constituidos por una carpeta o capa de rodadura, seguidos por las capas inferiores, las cuales corresponden a base y subbase, siendo construidas sobre una capa de subrasante.

La carpeta asfáltica proporciona soporte a las solicitaciones de tránsito, absorbiendo los esfuerzos horizontales y parte de los esfuerzos verticales producidos por las cargas vehiculares, mientras que los esfuerzos que no son absorbidos se transmiten a las capas inferiores.

3.2.1. DETERIOROS CRÍTICOS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

La incidencia de factores de diverso origen provoca alteraciones en la superficie de rodado de un pavimento, que pueden afectar la seguridad, comodidad y velocidad de circulación. Dichas alteraciones se denominan deterioros, a continuación, se revisan los que resultan más críticos para los pavimentos flexibles (Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras Volumen N°7, 2018).

3.2.1.1. AHUELLAMIENTO

El ahuellamiento corresponde a hundimiento longitudinal que coincide con la huella por donde circula la mayor parte del tránsito y que puede encontrarse asociado a desplazamientos transversales de la carpeta. Las posibles causas corresponden a compactación insuficiente de la base y/o mezcla asfáltica, base de capacidad de soporte inadecuada debido a la falta de trabazón mecánica, y diseño inadecuado de la mezcla asfáltica, como por ejemplo exceso de asfalto o ligante asfáltico muy blando.

3.2.1.2. AGRIETAMIENTO POR FATIGA

El agrietamiento por fatiga corresponde a una serie de fisuras y grietas interconectadas entre sí, con patrones irregulares que forman muchos trozos de ángulos agudos. Las grietas ocurren con más frecuencia en las zonas del pavimento que reciben la mayor parte de las solicitaciones. La fisura tiende a iniciarse en el fondo de la carpeta asfáltica, donde los esfuerzos de tracción son mayores bajo la acción de las cargas. Este deterioro es causado por diferentes motivos, entre los que destacan: espesor del pavimento inadecuado para el nivel de solicitaciones y/o de la capacidad de soporte de la subrasante, drenaje inadecuado en zonas localizadas y mezcla asfáltica muy rígida.

3.2.1.3. AGRIETAMIENTO TÉRMICO

El agrietamiento térmico corresponde a grietas perpendiculares al eje de la calzada, que ocurren a intervalos regulares en carpetas que no recubren pavimento de hormigón o base tratada con cemento. Se produce debido a que el asfalto se comporta como un material muy rígido cuando se encuentra expuesto a bajas temperaturas, lo cual combinado con un enfriamiento rápido de la superficie del pavimento, generan las fisuras perpendiculares al eje de la calzada mencionadas anteriormente. Además, debemos considerar el efecto de rigidización del pavimento al envejecer, que lo hace más propenso este tipo de agrietamiento.

3.3. NORMATIVAS UTILIZADAS

A continuación, se detallan las normativas utilizadas durante la realización de los ensayos necesarios para la investigación, además de los orígenes y fundamentos de estas.

3.3.1. PROGRAMA ESTRATÉGICO DE INVESTIGACIÓN DE CARRETERAS (SHRP)

Debido a que en Estados Unidos, en la década de los ochenta, el desempeño de las carreteras no presentaba mejoras significativas, las demandas del sistema se estaban incrementando y además nuevos materiales se estaban incorporando al mercado, es que surge la necesidad de realizar un programa de investigación denominado SHRP (Programa Estratégico de Investigación de Carreteras), el cual se desarrolla entre los años 1987 y 1993, dando como resultado Superpave (Superior Performance Asphalt Pavements), sistema que incluye nuevas especificaciones para asfalto y agregados, un nuevo método para el diseño de mezclas asfálticas en caliente y un modelo de predicción del comportamiento de pavimentos asfálticos.

El sistema Superpave de clasificación por Grado de desempeño (PG) para ligantes asfálticos tiene dos objetivos principales, el primero de ellos es medir las propiedades físicas de los ligantes, las cuales pueden ser relacionadas con parámetros de desempeño en terreno, asociado a tres fallas críticas: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico. En segundo lugar caracterizar las propiedades físicas de los ligantes de acuerdo a las temperaturas y efectos del envejecimiento, a los cuales se encuentran sometidos los ligantes asfálticos durante el proceso de construcción y vida de servicio de los pavimentos (Federal Highway Administration, 2000).

La selección del ligante asfáltico apropiado para una determinada zona de estudio se realiza teniendo las siguientes consideraciones:

- La temperatura alta de la muestra en laboratorio XX tiene que ser igual o superior a la temperatura alta de diseño ATdis, que corresponde a la temperatura máxima promedio móvil de 7 días.
- La temperatura intermedia de la muestra en laboratorio IT debe ser igual o inferior que la temperatura intermedia de diseño de diseño ITdis, que corresponde a la temperatura media más 4°C.
- La temperatura baja de la muestra en laboratorio YY debe ser igual o inferior a la temperatura baja de diseño BTdis, que corresponde a la temperatura mínima del pavimento.

En la figura 3 se muestra un esquema a modo de resumen de la metodología de selección de ligantes Superpave mencionada anteriormente.

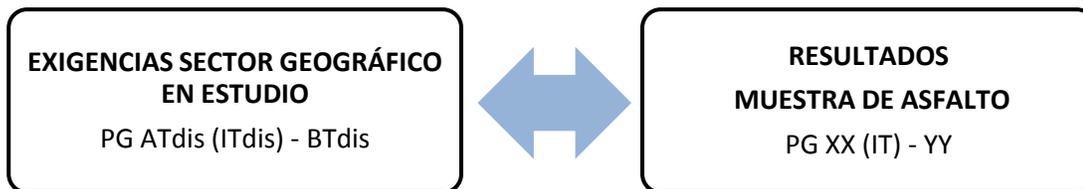


Figura 3. Esquema metodología de selección de ligantes Superpave. Fuente: Elaboración propia.

Una de las principales características del sistema de selección de ligantes Superpave, es que los parámetros reológicos se mantienen constantes, variando solo la temperatura a la cual se realizan los ensayos, la cual está asociada a distintas fallas que presenta el pavimento durante su vida de servicio.

3.3.1.1. Ensayos Superpave

Superpave plantea un sistema de ensayos completamente nuevo, específicamente, ensayos que determinan las características reológicas del ligante, con el fin de realizar una adecuada selección de este. Un tema central de esta normativa es la dependencia de los ligantes ensayados a las condiciones que simulan los escenarios durante la vida del ligante. Existen tres escenarios críticos, los cuales son:

- **Sin Envejecer:** corresponde al estado del ligante durante el transporte, almacenamiento y manipulación.
- **Envejecimiento Primario:** corresponde al estado del ligante durante la producción de la mezcla y construcción del pavimento.
- **Envejecimiento Secundario:** corresponde al estado del ligante después de largos periodos de servicio en el pavimento.

El ligante que se ha envejecido en el horno de película delgada rotatorio (Rolling Thin Film Oven, RTFO) simula el estado de envejecimiento primario. Dicho ensayo expone capas delgadas de ligante a calor y aire, lo que emula la exposición del asfalto a dichos elementos durante el proceso de mezclado en caliente y la construcción del pavimento.

El ligante que se ha envejecido en la cámara de envejecimiento a presión (Pressure Aging Vessel, PAV) simula el estado de envejecimiento secundario. Dicho ensayo expone muestras de asfalto a calor y presión, con el fin de simular, en cuestión de horas, años de envejecimiento del pavimento en servicio.

Es necesario aclarar que esta especificación supone, que las muestras de ligante envejecidas en PAV ya han sido envejecidas en RTFO, en consecuencia los residuos del PAV representan el ligante que ha sido sometido a todas las condiciones a las cuales un ligante está expuesto durante su producción y vida de servicio (Federal Highway Administration, 2000).

Cabe señalar que la reología corresponde al estudio de la relación entre esfuerzos y deformaciones de materiales que tienen la capacidad de fluir, como lo es el ligante asfáltico. Es posible medir las propiedades reológicas de un ligante asfáltico utilizando los siguientes equipos:

Viscosímetro Rotacional

El viscosímetro rotacional (Rotational Viscometer, RV) es utilizado para evaluar la trabajabilidad a altas temperaturas del ligante asfáltico, por lo tanto, la viscosidad es medida a temperaturas elevadas, para asegurar que el asfalto sea lo suficientemente fluido durante el proceso de bombeado y mezclado, por lo que este ensayo se realiza en el ligante sin envejecer.

Se utiliza un viscosímetro rotacional de cilindro coaxial para determinar la viscosidad de la muestra de ligante, de acuerdo con la especificación Superpave, esta no debe exceder 3 [Pa-s] medida a 135°. La viscosidad rotacional es determinada por la medición del torque requerido para mantener una velocidad rotacional constante del eje del cilindro mientras se encuentra sumergido en una cámara a temperatura constante. El torque necesario para rotar el eje a velocidad constante es directamente proporcional a la viscosidad de la muestra de ligante, la cual es automáticamente determinada por el equipo (Federal Highway Administration, 2000).

Reómetro de Corte Dinámico

El reómetro de corte dinámico (Dynamic Shear Rheometer, DSR) es usado para caracterizar el comportamiento viscoelástico de los ligantes asfálticos, a través de la medición de las propiedades viscosas y elásticas de una delgada muestra de ligante, la cual es intercalada entre una placa oscilante y una placa fija. El DSR mide la deformación de corte (γ) del asfalto como respuesta al esfuerzo de corte (τ) aplicado. Si el material es perfectamente elástico, la respuesta coincide inmediatamente con el esfuerzo de corte aplicado, en cambio, si el material es perfectamente viscoso se tiene un gran retraso de tiempo entre la aplicación del esfuerzo de corte y la respuesta.

Cabe destacar que el asfalto a temperaturas de servicio se comporta como un material viscoelástico, por lo tanto, la relación entre el estrés aplicado y la deformación resultante obtenida mediante el DSR cuantifica ambos tipos de comportamiento del ligante asfáltico, proveyendo la información necesaria para calcular dos importantes propiedades del ligante, el módulo complejo

en corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). El módulo complejo en corte es la razón entre el esfuerzo de corte máximo ($\tau_{m\acute{a}x}$) y la deformación de corte máxima ($\gamma_{m\acute{a}x}$), mientras el ángulo de fase corresponde al periodo de tiempo entre la aplicación del esfuerzo de corte y la respuesta. Para un material perfectamente elástico, el ángulo de fase es cero y toda la deformación es temporal, en cambio para un material perfectamente viscoso, el ángulo de fase es cercano a 90° y toda la deformación es permanente, como se muestra en la figura 4 (Federal Highway Administration, 2000).

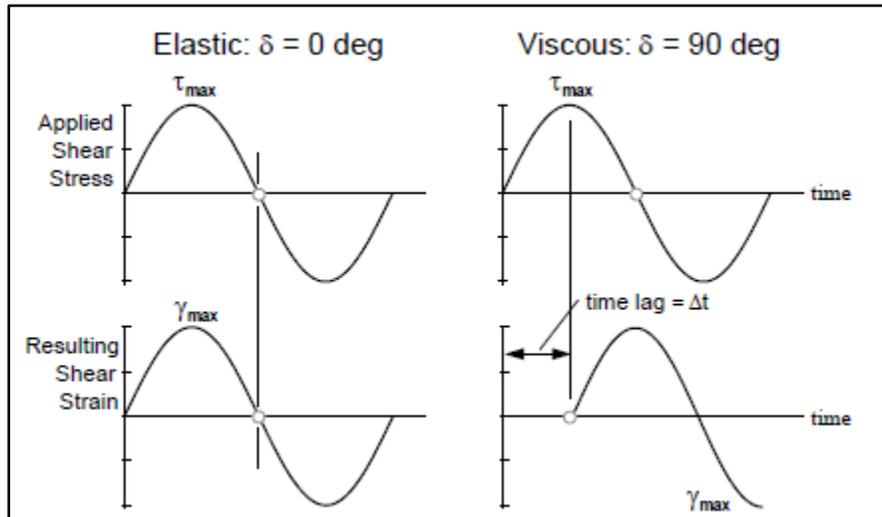


Figura 4. Comportamiento de materiales elásticos y viscosos frente a esfuerzo sinusoidales. Fuente: Superpave Funtamentals Reference Manual (Federal Highway Administration, 2000).

El asfalto a temperaturas normales de servicio muestra una relación esfuerzo-deformación entre ambos extremos, como se muestra en la figura 5.

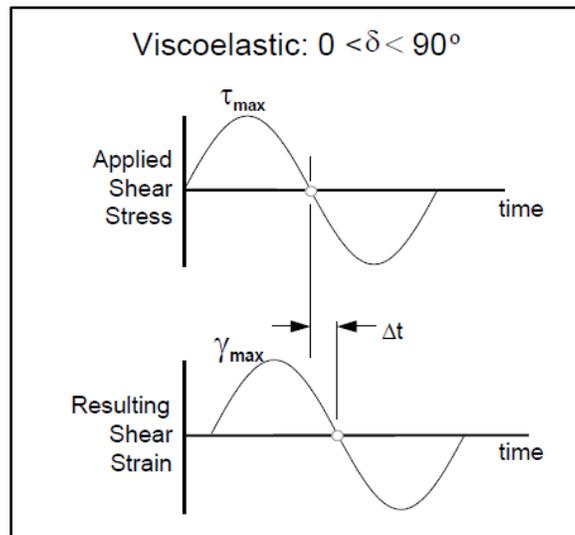


Figura 5. Comportamiento de material viscoelástico frente a esfuerzos sinusoidales. Fuente: Superpave Funtamentals Reference Manual (Federal Highway Administration, 2000).

Reómetro de Viga en Flexión

El reómetro de viga en flexión (Bending Beam Rheometer, BBR) es usado para medir la rigidez del ligante asfáltico a muy bajas temperaturas. El ensayo utiliza la teoría de vigas de mecánica de materiales para medir la rigidez de una pequeña viga de asfalto bajo una carga constante en el tiempo, la cual es usada para simular los esfuerzos que gradualmente aparecen en el pavimento cuando la temperatura desciende. Dos parámetros son evaluados con el BBR, la rigidez a bajas temperaturas ($S(t)$) y la pendiente de la respuesta (valor m), que es una medida de como la rigidez del asfalto cambia cuando se aplican cargas (Federal Highway Administration, 2000).

Tracción Directa

El ensayo de Tracción directa (Direct Tension Test, DTT) mide la deformación de rotura del ligante asfáltico a bajas temperaturas, comprendidas en un rango entre $+6^{\circ}\text{C}$ a -36°C , a las cuales el asfalto presenta un comportamiento frágil. El ensayo se realiza en ligantes que han sido envejecidos mediante RFTO y PAV. Una pequeña muestra en forma de “hueso de perro” es cargada a tensión constante, la deformación de la muestra en el momento de la falla (ϵ_f) es la razón entre el cambio en el largo (ΔL) y el largo efectivo (L) de la muestra. La falla está definida por el esfuerzo donde la carga aplicada sobre la muestra alcanza su máximo valor, y no necesariamente por la carga cuando esta se rompe (Federal Highway Administration, 2000).

3.3.2. ESPECIFICACIONES SUPERPAVE PLUS

Posterior al desarrollo del sistema Superpave, la modificación de asfaltos con polímero se ha vuelto cada vez más común. Los asfaltos modificados muestran un incremento en su desempeño, pero sus potenciales beneficios no pueden ser exhaustivamente medidos o identificados por el actual sistema Superpave. En Estados Unidos agencias estatales y locales han respondido a esta falencia agregando nuevos ensayos denominados Superpave Plus, que permiten identificar la presencia de polímero en el ligante asfáltico. Sin embargo, el grado de incidencia de la modificación con polímeros en las propiedades reológicas del ligante no puede ser determinado por dichos ensayos, por lo que se han desarrollado nuevos ensayos que tienen como objetivo proporcionar una evaluación más acabada del desempeño del ligante asfáltico modificado.

3.3.2.1. Ensayos Superpave Plus

Existen actualmente cuatro ensayos que han sido incluidos en las especificaciones de algunas agencias estatales de Estados Unidos, los cuales son (Lyngdal, 2015):

- Ductilidad
- Dureza y tenacidad
- Ángulo de fase
- Recuperación elástica

Los dos primeros tienen como finalidad medir la elongación del ligante asfáltico a temperaturas intermedias y bajas, en cambio, los dos últimos pretenden determinar la presencia de polímero elastomérico en el asfalto a temperaturas altas e intermedias.

Ductilidad

El ensayo de ductilidad se lleva a cabo llenando moldes que poseen forma de “hueso de perro” con ligante asfáltico, para de esta forma obtener muestras que posteriormente son estiradas hasta la falla. Generalmente el ensayo se realiza a 25°C para asfalto en estado original y a 4°C para asfalto con envejecimiento primario. Al finalizar el ensayo, se registra el largo al cual el espécimen falló. Este ensayo es usado para identificar ciertos tipos de modificaciones realizadas al ligante asfáltico.

Dureza y Tenacidad

El ensayo de dureza y tenacidad mide la capacidad del asfalto de soportar tensión bajo una deformación constante. El aparato de ensayo consiste en una sonda de carga que es sumergida dentro de un recipiente con asfalto a 25°C, luego la sonda es retirada del asfalto y utilizando un sistema de medición, ya sea análogo o digital, se registra la fuerza y el desplazamiento, procedimiento que se repite hasta que se produzca la falla. Con los datos registrados anteriormente se construye una curva de desplazamiento v/s carga, desde la cual se obtienen los parámetros de dureza y tenacidad. Es usado para caracterizar las propiedades elastoméricas del ligante asfáltico.

Ángulo de Fase

El ángulo de fase es definido como el lapso de tiempo entre la carga en fase y la respuesta fuera de fase de un material que es cargado por un sistema dinámico. Es medido utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR) como se menciona en la sección 3.3.1.1 del presente

documento. Este ensayo es utilizado para determinar la presencia de polímero elastomérico, debido a que el ángulo de fase decrece cuando la elasticidad del ligante asfáltico se incrementa.

Recuperación Elástica

El ensayo de recuperación elástica se realiza llenando moldes que poseen forma de “hueso de perro” con ligante asfáltico, para de esta forma obtener muestras que posteriormente son estiradas a 10 o 20 cm, y cortadas en la mitad. Luego se registra el largo que cada muestra de asfalto ha recuperado. A pesar de que el ensayo de recuperación elástica tiene la capacidad de indicar la presencia de polímeros elastoméricos, no es capaz de medir el grado de modificación en el ligante asfáltico.

3.3.2.2. Desarrollo de nuevos ensayos

Recientemente nuevos ensayos han sido desarrollados para proveer una evaluación integral del desempeño de los ligantes asfálticos modificados. Cada uno de estos nuevos ensayos proporciona una alternativa a los ensayos Superpave Plus o directamente se enfocan en los mecanismos de falla en terreno. Se han propuesto los siguientes cinco ensayos (Lyngdal, 2015):

- Recuperación elástica en DSR
- Binder yield energy test (BYET)
- Linear amplitude sweep (LAS)
- Single-edged notch bending (SEND)
- Multiple stress creep and recovery (MSCR)

Los primeros dos ensayos se han propuesto como alternativas a los actuales ensayos de recuperación elástica y de dureza y tenacidad, debido a las complejas configuraciones que poseen ambos ensayos, sumado a que no se encuentran relacionados con ninguna propiedad fundamental del ligante asfáltico.

Recuperación Elástica en DSR

El ensayo de recuperación elástica se realiza en el DSR, utilizando los platos de 8 [mm] de diámetro, a una temperatura de 25°C. Se aplica una carga de corte a razón constante de 2,3% por segundo hasta alcanzar una deformación de 278%, seguido de un tiempo de relajación de 30 minutos. Se define la recuperación elástica como el cociente de la deformación una vez finalizado el tiempo de relajación y en la deformación máxima alcanzada.

Binder Yield Energy Test

Al igual que el ensayo anterior, este ensayo se realiza en el DSR, utilizando los platos de 8 [mm] de diámetro, a la temperatura intermedia correspondiente al grado PG del ligante, las muestras deben ser sometidas previamente a los procesos de envejecimiento primario (RTFO) y secundario (PAV). Luego se aplica una carga de corte a razón constante de 1% por segundo hasta alcanzar una deformación de 3.600%. Durante el proceso de carga se registran esfuerzos y deformaciones. Se reportan dos parámetros: deformación obtenida cuando se alcanza el esfuerzo máximo y la energía de fluencia, el primero de ellos representa la ductilidad del ligante asfáltico, y el segundo corresponde al área bajo la curva esfuerzo v/s deformación, que representa la dureza del asfalto.

Linear Amplitude Sweep

Este ensayo ha sido propuesto como un método acelerado para medir la fatiga en el ligante asfáltico. El ensayo es realizado en el DSR, utilizando los platos de 8 mm de diámetro, a rangos de temperatura intermedia. Primero, se realiza un barrido de frecuencias que mide las propiedades lineales elásticas del ligante. Luego se realiza un barrido de amplitud de deformación, desde 1% hasta 30% de deformación, la cual aumenta de forma lineal. Después de completar el ensayo, se utiliza la teoría de mecánica de daño continua para analizar los datos obtenidos por el DSR, lo que resulta en una ecuación de la vida de fatiga del ligante, de la siguiente forma:

$$N_f = A \cdot (\text{Load Amplitude})^B$$

Donde A y B son parámetros que se obtienen de las propiedades del material en análisis.

Single Edge Notch Bending

Este ensayo es realizado con muestras similares en dimensiones a las utilizadas por el BBR. El ligante asfáltico, el cual se ha sometido a los procesos de envejecimiento primario y secundario, es vertido en un molde para formar una viga con una muesca en el centro de ella. La carga es aplicada en un punto en la mitad de la luz, en el lado opuesto donde se encuentra la muesca, a una tasa de desplazamiento constante y sumergido en un baño como el utilizado en el ensayo para la determinación del grado PG de baja temperatura. El ensayo mide la fuerza y deflexión a la cual se encuentra sometida la viga, a partir de estos datos se pueden calcular los siguientes parámetros: Tenacidad de la fractura (K_{Ic}), Energía de la fractura (G_f) y desplazamiento cuando se alcanza la carga máxima.

Multiple Stress Creep and Recovery

Este ensayo ha sido desarrollado para proveer información más exhaustiva sobre la resistencia al ahuellamiento causado por la deformación plástica de la carpeta asfáltica, deformación que es primordialmente causada por el tránsito de vehículos pesados a bajas velocidades (<70 [Km/hr]). Por lo tanto, el ensayo MSCR intenta simular estas condiciones críticas, considerando altos esfuerzos aplicados a bajas velocidades, causando deformación permanente en el ligante asfáltico. La norma AASHTO T350-14 rige el procedimiento para la realización del ensayo, que es realizado en el DSR, equipo en el cual una pequeña muestra de asfalto es situada entre dos platos paralelos de 25 mm de diámetro, a una separación entre platos de 1 [mm]. Se aplican diez ciclos de carga y recuperación, a dos niveles distintos de esfuerzo (0,1 y 3,2 [kPa]), donde cada ciclo consiste en un segundo de carga seguido por nueve segundos de recuperación, cabe señalar que a modo de calibración se aplican diez ciclos iniciales de carga y recuperación a 0,1 [kPa] que no son considerados en los resultados. El ensayo reporta los siguientes parámetros para cada nivel de esfuerzo:

- Promedio de la flexibilidad en fluencia no recuperable ($J_{nr_{0,1}}$ y $J_{nr_{3,2}}$).
- Promedio del porcentaje de recuperación ($R\%_{0,1}$ y $R\%_{3,2}$).
- Diferencia porcentual entre los valores de flexibilidad en fluencia no recuperable obtenidos para cada nivel de esfuerzos ($J_{nr_{diff}}$)
- Diferencia porcentual entre los valores del porcentaje de recuperación obtenidos para cada nivel de esfuerzo ($R\%_{diff}$).

3.3.3. DESARROLLO DE LA CLASIFICACIÓN POR CLIMA UTILIZANDO EL ENSAYO MULTIPLE STRESS CREEP AND RECOVERY (MSCR)

Como ya se mencionó anteriormente en los últimos años se ha evidenciado un aumento de las cargas de tránsito, lo que ha llevado al límite de su capacidad a los pavimentos de asfalto tradicional. Es por esto que ha comenzado a tomar fuerza la modificación del asfalto con polímeros, logrando así una mejora en su desempeño a altas temperaturas. En general el sistema de ensayos Superpave no es lo suficientemente sensible para cuantificar el impacto que produce la modificación con polímeros en las propiedades reológicas del ligante asfáltico. A continuación, se profundizará en las desventajas que presenta el sistema Superpave, para luego abordar el desarrollo de una nueva especificación que logre cuantificar los cambios en las propiedades reológicas de los ligantes modificados (Metha, y otros, 2012).

3.3.3.1. Desventajas de la especificación Superpave

Superpave aborda la selección del ligante asfáltico, para una determinada zona en estudio, basado en la velocidad y nivel del tránsito, para lo cual utiliza un sistema de aumento de grados, donde sí la velocidad o los ejes equivalentes de diseño lo ameritan se incrementa el grado de alta temperatura en el número de grados indicados en la tabla 2 (AASHTO M323, 2012) .

Tabla 2. Selección del ligante basado en la velocidad y volumen de tránsito.

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

^a Increase the high-temperature grade by the number of grade equivalents indicated (one grade is equivalent to 6°C). Use the low-temperature grade as determined in Section 5.

^b The anticipated project traffic level expected on the design lane over a 20-year period. Regardless of the actual design life of the roadway, determine the design ESALs for 20 years.

^c *Standing Traffic*—where the average traffic speed is less than 20 km/h.

^d *Slow Traffic*—where the average traffic speed ranges from 20 to 70 km/h.

^e *Standard Traffic*—where the average traffic speed is greater than 70 km/h.

^f Consideration should be given to increasing the high-temperature grade by one grade equivalent.

Fuente: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design (AASHTO M323, 2012).

Este sistema se basa en la idea que incrementando la temperatura a la cual se realiza el ensayo en 6°C, que corresponde a un grado PG, y manteniendo el valor del criterio igual, se tendrá un asfalto con el doble de rigidez. Pero esta hipótesis no es cierta, debido a que el sistema de selección de ligantes se desarrolló basándose en la suposición que la susceptibilidad térmica de todos los ligantes asfálticos es similar, lo cual es incorrecto. Por lo tanto estas condiciones no representan las propiedades del ligante asfáltico a la temperatura real a la cual se verá sometido el pavimento, debido a que la temperatura que experimentará durante su vida útil no se va a ver modificada con los cambios en el volumen o velocidad de tránsito, es por esto que se considera más adecuado variar el valor del criterio, en vez de la temperatura a la cual se realiza el ensayo (D'Angelo, 2010).

3.3.3.2. Desarrollo del ensayo Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) y de una nueva especificación para alta temperatura

El ensayo Multiple Stress Creep and Recovery ha sido desarrollado para reemplazar el ensayo Superpave que determina el grado de alta temperatura del ligante asfáltico. Con este objetivo se realizó una investigación (D'Angelo, 2010) donde múltiples asfaltos, tanto modificados como originales, fueron evaluados con el objetivo de desarrollar una nueva especificación que

permita caracterizar la resistencia del ligante asfáltico al ahuellamiento causado por la deformación permanente de la carpeta asfáltica. El ensayo es realizado en el DSR, equipo en el cual se aplican ciclos de 1 segundo de carga, seguido por 9 segundos de recuperación, a múltiples niveles de esfuerzos, como ya se mencionó anteriormente. Se realizan diez ciclos a cada nivel de esfuerzo sin tiempo de descanso entre un nivel de esfuerzo y el siguiente. El promedio de la deformación no recuperada para cada ciclo es dividido por el esfuerzo aplicado, obteniéndose así la flexibilidad en fluencia no recuperable (J_{nr}).

La especificación Superpave existente se basa en la medición de propiedades fundamentales del ligante asfáltico dentro del rango lineal viscoelástico de comportamiento, es por esto que como parte del desarrollo de este nuevo ensayo se obtuvieron los valores de J_{nr} a diversos niveles de esfuerzo para asfaltos sin modificar, logrando determinar que la mayoría de los ligantes presentan un comportamiento lineal hasta los 3,2 [kPa]. Lo cual se evidencia en la figura 6, donde se muestran los resultados obtenidos para los dos asfaltos más usados en Norteamérica (PG64-22 y PG70-22), donde es posible apreciar que la influencia del nivel de carga aplicado comienza a ser significativo a partir de 6,4 [kPa].

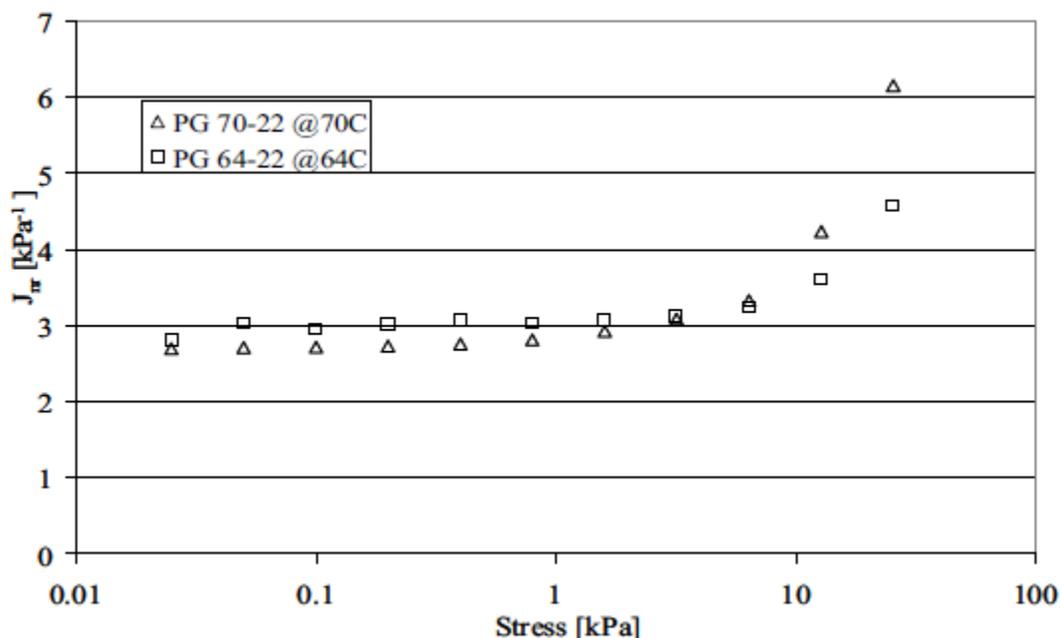


Figura 6. Flexibilidad en fluencia no recuperable de los ligantes PG70-22 y PG64-22. Fuente: *New High-temperature Binder Specification Using Multiple Stress Creep and Recovery* (D'Angelo, 2010).

Además se realizó la caracterización de múltiples asfaltos sin modificar, con la finalidad de determinar si existe una relación entre el grado de alta temperatura de la especificación Superpave, que corresponde a la temperatura donde $G^*/\sin(\delta)$ es igual a 2,2 [kPa] para asfalto con

envejecimiento primario, y la flexibilidad en fluencia no recuperable (J_{nr}) a 3,2 [kPa], obtenida del ensayo MSCR, el cual se realizó a la temperatura alta determinada según el criterio de la normativa Superpave. Como se observa en la tabla 3, se obtuvo un valor promedio de J_{nr} a 3,2 [kPa] de 4,2 [kPa⁻¹].

Tabla 3. Determinación del valor de J_{nr} para varios ligantes a 3,2 [kPa] y la temperatura a la cual $G^*/\sin\delta$ es 2,2 [kPa].

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

Fuente: *New High-temperature Binder Specification Using Multiple Stress Creep and Recovery* (D'Angelo, 2010).

La figura 7 muestra la variación del valor de J_{nr} a 3,2 [kPa] ($J_{nr_{3,2}}$), desde 2 [kPa⁻¹] hasta 8 [kPa⁻¹], para un ligante asfáltico con clasificación Superpave PG64-22. En esta figura queda demostrada la susceptibilidad térmica del ligante, debido a que un cambio en el valor de $J_{nr_{3,2}}$ desde 2,0 [kPa⁻¹] a 4,0 [kPa⁻¹], refleja un cambio en la temperatura de 4,7°C, y un cambio en el valor de $J_{nr_{3,2}}$ desde 4,0 [kPa⁻¹] a 8,0 [kPa⁻¹], refleja un cambio en la temperatura de 5°C, a pesar que la variación del valor de $J_{nr_{3,2}}$ es superior en el último caso. Para este mismo ligante asfáltico un cambio en el valor de $G^*/\sin(\delta)$ desde 4,4 [kPa] hasta 2,2 [kPa] produce un cambio en la temperatura de 5,1°C, y un cambio en el valor de $G^*/\sin(\delta)$ desde 2,2 [kPa] hasta 1,1 [kPa] produce un cambio en la temperatura de 5,6°C. Estos resultados demuestran que el sistema de aumento de grado no funciona, ni siquiera para los ligantes asfálticos sin modificar, debido a la susceptibilidad térmica de estos. Con los resultados obtenidos se establece que un valor de $J_{nr_{3,2}}$ de 4,0 [kPa⁻¹] corresponde a un ligante de clasificación por grado de desempeño PG64-22 bajo la especificación Superpave.

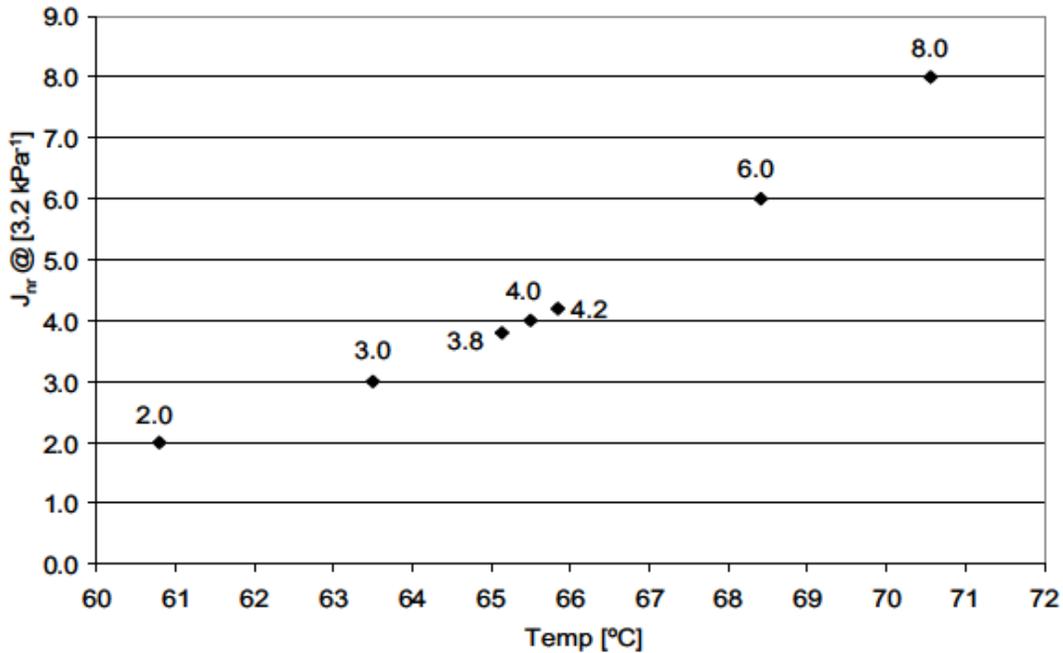


Figura 7. Gráfico de la sensibilidad térmica de un ligante original PG64-22 para variaciones específicas en la flexibilidad en fluencia no recuperable. Fuente: *New High-temperature Binder Specification Using Multiple Stress Creep and Recovery* (D'Angelo, 2010).

Sin embargo, los ligantes asfálticos modificados con polímeros presentan un comportamiento no lineal a niveles de esfuerzos más bajos que los ligantes tradicionales, como se puede apreciar en la figura 8.

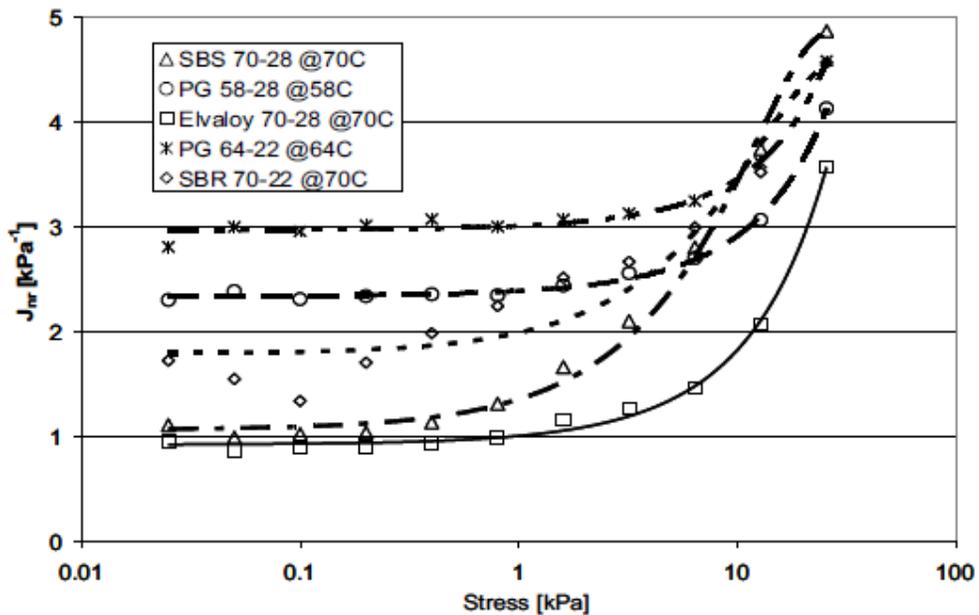


Figura 8. Gráfico de la flexibilidad en fluencia no recuperable para ligantes tradicionales y modificados. Fuente: *New High-temperature Binder Specification Using Multiple Stress Creep and Recovery* (D'Angelo, 2010).

Cabe señalar que en el sistema Superpave, que utiliza el concepto de aumento de grado, mencionado con anterioridad, se evalúan las propiedades del ligante asfáltico hasta 12°C por sobre las temperaturas que probablemente experimentará durante su vida útil. El ensayo MSCR muestra que a dichas temperaturas el ligante es muy sensible a los esfuerzos aplicados y es probable que un ligante modificado con polímero no sea mucho más rígido que un ligante sin modificar, lo cual puede llevar a resultados erróneos, que no estén relacionados con el desempeño del pavimento.

En la figura 9 se grafica el esfuerzo aplicado versus la flexibilidad en fluencia no recuperable, obtenida bajo varias temperaturas, para un ligante modificado con SBS, que posee una clasificación por grado de desempeño PG76-22.

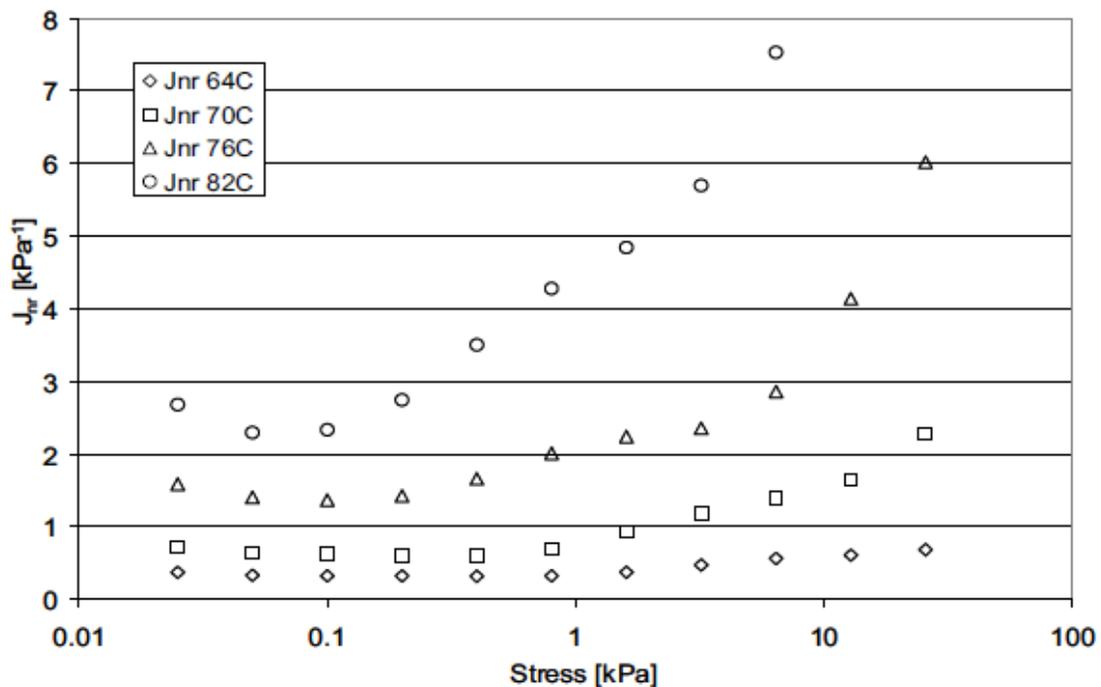


Figura 9. Gráfico de la flexibilidad en fluencia no recuperable demostrando la dependencia del esfuerzo para un ligante modificado con SBS PG76-22. Fuente: *New High-temperature Binder Specification Using Multiple Stress Creep and Recovery* (D'Angelo, 2010).

En la figura 9 se observa que cuando el ensayo es realizado a 76°C, la sensibilidad al esfuerzo aplicado del ligante es bastante pronunciada, debido a que el valor de Jnr crece desde 1,36 [kPa⁻¹], cuando el ensayo se realiza a 0,1 [kPa], hasta 2,35 [kPa⁻¹], cuando el ensayo se realiza a 3,2 [kPa], lo que significa un aumento de 73%. En cambio, el valor de Jnr medido a 64°C, crece desde 0,32 [kPa⁻¹], cuando el ensayo se realiza a 0,1 [kPa], hasta 0,47 [kPa⁻¹], cuando el ensayo se realiza a 3,2 [kPa], lo que significa un aumento de solo 47%.

Anteriormente se determinó que un valor de $J_{nr,3,2}$ de 4,0 [kPa⁻¹] corresponde a un ligante de clasificación PG64-22 bajo la especificación Superpave, por lo que es posible usar este valor como base para un nuevo sistema de clasificación de pavimentos, donde se plantean reducciones del valor de J_{nr} para condiciones de bajas velocidades y niveles de tráfico superiores a 30 millones de ejes equivalentes. Con esta finalidad se realizaron estudios a tres mezclas asfálticas (MS Test Site, ALF study, MnRoad), donde se busca determinar la relación entre el valor de J_{nr} obtenido y el desempeño de la mezcla asfáltica frente al ahuellamiento. En la tabla 4 se muestran las relaciones obtenidas y la variación en los valores del J_{nr} respecto a la variación del ahuellamiento.

Tabla 4. Relación entre los cambios en J_{nr} y los cambios en el ahuellamiento para los ligantes I-55 Mississippi, ALF y MnRoad Studies.

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

Fuente: *New High-temperature Binder Specification Using Multiple Stress Creep and Recovery* (D'Angelo, 2010).

En base a estos resultados se propone una nueva especificación de alta temperatura, la cual debería comenzar con un grado "PG Standard", siendo adecuado requerir un valor de $J_{nr,3,2}$ igual o inferior a 4,0 [kPa⁻¹], el cual se denomina PG64S-XX. Además, considera un aumento de grado cuando existen bajas velocidades, aplicando una reducción del valor de $J_{nr,3,2}$ de 50%, requiriendo un valor igual o inferior a 2,0 [kPa⁻¹], y denominándose PG64H-XX. Un segundo aumento de grado, para tráfico detenido, considera una nueva reducción del valor de $J_{nr,3,2}$ de 50%, requiriendo un valor igual o inferior a 1,0 [kPa⁻¹], y denominándose PG64V-XX. Cabe destacar que en cada caso el ligante asfáltico será ensayado a la alta temperatura recomendada para la zona de estudio, evaluando cómo se comportará el pavimento en la práctica, y no exponiendo el ligante, durante el proceso de ensayo, a temperaturas artificiales que nunca experimentará.

Posteriormente mediante la realización de un nuevo estudio, se decidió reevaluar el valor límite de J_{nr} que define la categoría Standard o "S". Para lo cual se realizaron correlaciones entre los valores de $J_{nr,3,2}$ y $G^*/\sin(\delta)$ para diversos asfaltos sin modificar, obteniendo como resultado promedio que un valor de $J_{nr,3,2}$ de 4,0 [kPa⁻¹] corresponde a un valor de $G^*/\sin(\delta)$ de 2,53 [kPa], lo que es superior al valor de 2,2 [kPa] requerido por el criterio de la normativa Superpave. Es por esto que se decide redefinir el valor límite de la categoría Standard o "S", a un valor de $J_{nr,3,2}$ menor o igual a 4,5 [kPa⁻¹] (Anderson, 2012).

3.3.3.3. AASHTO M332-14: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test

En base a los resultados detallados en la sección anterior, surge una nueva especificación (AASHTO M332, 2014) que aborda la clasificación de ligantes asfálticos utilizando el ensayo MSCR. En esta nueva especificación se elimina el sistema de aumento de grado, utilizado por la actual normativa Superpave, en los casos que existen altos niveles de tráfico o bajas velocidades, reemplazándose por cuatro categorías, que se definen a continuación:

- **Standard (S):** situaciones donde los niveles de tránsito son inferiores a 10 millones de ejes equivalentes y la velocidad es superior a 70 [Km/h].
- **Heavy (H):** situaciones donde los niveles de tránsito se encuentran entre 10 y 30 millones de ejes equivalentes o la velocidad se encuentra entre 20 y 70 [Km/h].
- **Very Heavy (V):** situaciones donde los niveles de tránsito son superiores a 30 millones de ejes equivalentes o la velocidad es inferior a 20 [Km/h].
- **Extremely Heavy (E):** situaciones donde los niveles de tránsito son superiores a 30 millones de ejes equivalentes y la velocidad es inferior a 20 [Km/h].

Para cada categoría mencionada anteriormente, como se muestra en la tabla 5, se establecen valores límites de la flexibilidad en fluencia no recuperable para un nivel de esfuerzo de 3,2 [kPa] ($J_{nr,3,2}$), además se establece un límite máximo de 75% para la diferencia porcentual entre los valores de la flexibilidad en fluencia no recuperable obtenida a niveles de esfuerzo de 0,1 y 3,2 [kPa].

Tabla 5. Límites de las categorías para la clasificación por clima.

Categoría	$J_{nr,3,2}$ [kPa ⁻¹] máximo	$J_{nr,diff}$ máximo
Standard (S)	4,5	75%
Heavy (H)	2	
Very Heavy (V)	1	
Extremely Heavy (E)	0,5	

Fuente: Elaboración propia con datos de la norma Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test (AASHTO M332, 2014).

3.3.3.4. Normativa nacional: Especificaciones para ligantes asfálticos por grado de desempeño (PG) usando ensayo MSCR

Cabe señalar que recientemente se ha incorporado a la normativa vigente en el país la selección de ligantes asfálticos graduados según su desempeño usando el ensayo MSCR, lo que se encuentra especificado en la sección 8.301.10 del complemento N°1 del volumen N°8 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2019). A continuación, se revisarán las disposiciones y requerimientos estipulados en dicha sección.

Para realizar una adecuada selección del ligante asfáltico se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Determinar el grado PG recomendado para una determinada zona geográfica según el mapa de la zonificación Superpave (Arteaga, 2017), el cual se encuentra detallado en la sección 3.4 del presente documento.
2. Utilizar la tabla 6 para seleccionar el tipo de tránsito de acuerdo a su volumen y velocidad: estándar (S), pesado (H), muy pesado (V) o extremadamente pesado (E).

Tabla 6. Tipo de tránsito

VOLUMEN DE TRÁNSITO	VELOCIDAD DE TRÁFICO		
	Menor a 20 km/hr	Entre 20 y 70 km/hr	Mayor a 70km/hr
EE millones 0.3 < 3	H	S	S
3 < 10	V	H	H
10 < 30	E	V	V
≥30	E	E	E

Fuente: Tabla 8.301.10.A, Complemento N°1 del Volumen N°8 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2019).

3. Especificar el grado de desempeño requerido indicando la zonificación climática y el tipo de tránsito (por ejemplo: PG 64V-22 para Santiago y tránsito pesado). Cabe destacar que las velocidades corresponden aproximadamente a la velocidad de operación, mientras los ejes equivalentes corresponden a los que se esperan durante la vida de diseño del pavimento.
4. Los requerimientos indicados para el tipo de asfalto señalados en la tabla 6 se deben emplear para carpetas de los primeros 10 [cm] de la capa asfáltica, para capas en profundidades superiores a 10 [cm], se puede emplear un asfalto grado S.
5. Si en una determinada localidad se disponen de datos de temperatura del aire diarias máximas y mínimas de una serie de 20 años de temperaturas altas y bajas, y además

se emplean las ecuaciones del modelo por daño LTPP 3.1, se podrá determinar el grado PG recomendado para esa localidad en específico.

- En la tabla 7 se detallan los requisitos que debe cumplir un cierto ligante asfáltico para su selección. Cabe destacar que el ensayo MSCR se realiza según las disposiciones de la norma AASHTO T350-14, dicho ensayo se debe realizar a la temperatura alta PG recomendada por la zonificación Superpave mencionada en el punto (1). Además, se deben cumplir con los requerimientos de $J_{nr3,2}$ señalados en la tabla 7, de acuerdo al tipo de tránsito esperado.

Tabla 7. Requisitos de la clasificación de asfaltos por grado de desempeño (PG) usando MSCR.

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", $J_{nr3,2}$, máx. 4.5 kPa ⁻¹ , J_{ndiff} , máx. 75%, Temperatura de ensaye, °C	52				58				64									
MSCR, T 350: Tráfico pesado "H", $J_{nr3,2}$, máx. 2.0 kPa ⁻¹ , J_{ndiff} , máx. 75%, Temperatura de ensaye, °C	52				58				64									
MSCR, T 350: Tráfico muy pesado "V", $J_{nr3,2}$, máx. 1.0 kPa ⁻¹ , J_{ndiff} , máx. 75%, Temperatura de ensaye, °C	52				58				64									
MSCR, T 350: Tráfico extremadamente pesado "E", $J_{nr3,2}$, 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 ^(e) 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 ^(e) 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
<p>(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 J_{nr} determinado a la temperatura de la zona climática.</p> <p>(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.</p> <p>(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.</p> <p>(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.</p> <p>(e) G*/sinδ = rigidez a alta temperatura y G* sinδ = rigidez a temperatura intermedia.</p> <p>(f) El cambio de masa debe ser inferior a 1,00 por ciento pudiendo ser positivo (ganancia de masa) o negativo (pérdida de masa).</p> <p>(g) En condiciones de tránsito S, podrá reemplazarse el requisito de $J_{nr3,2} < 4.5 \text{ KPa}^{-1}$ para el ligante envejecido en PDR, por G*/seno δ > 2,2 KPa para el ligante en las mismas condiciones de envejecimiento.</p> <p>(h) El requisito de J_{ndiff} máx 75% podrá reemplazarse por el cumplimiento de lo especificado en el Apéndice A (sobre la curva).</p>																		

Fuente: Tabla 8.301.10.B, Complemento N°1 del Volumen N°8 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2019).

Para un ligante asfáltico ensayado según lo descrito en la norma AASHTO T350-14 es posible establecer 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 ello es necesario dibujar en el gráfico de la figura 10 el porcentaje de recuperación promedio a 3,2 [kPa] ($R\%_{3,2}$) versus la flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] ($J_{nr,3,2}$), ambos medidos a la misma temperatura. Entonces si el punto dibujado cae sobre o arriba de la línea del gráfico de la figura 10, es un indicador que la modificación se efectuó con un polímero elastomérico adecuado, en cambio si el punto cae bajo la línea del gráfico es un indicador que el ligante no está modificado con un polímero elastomérico.

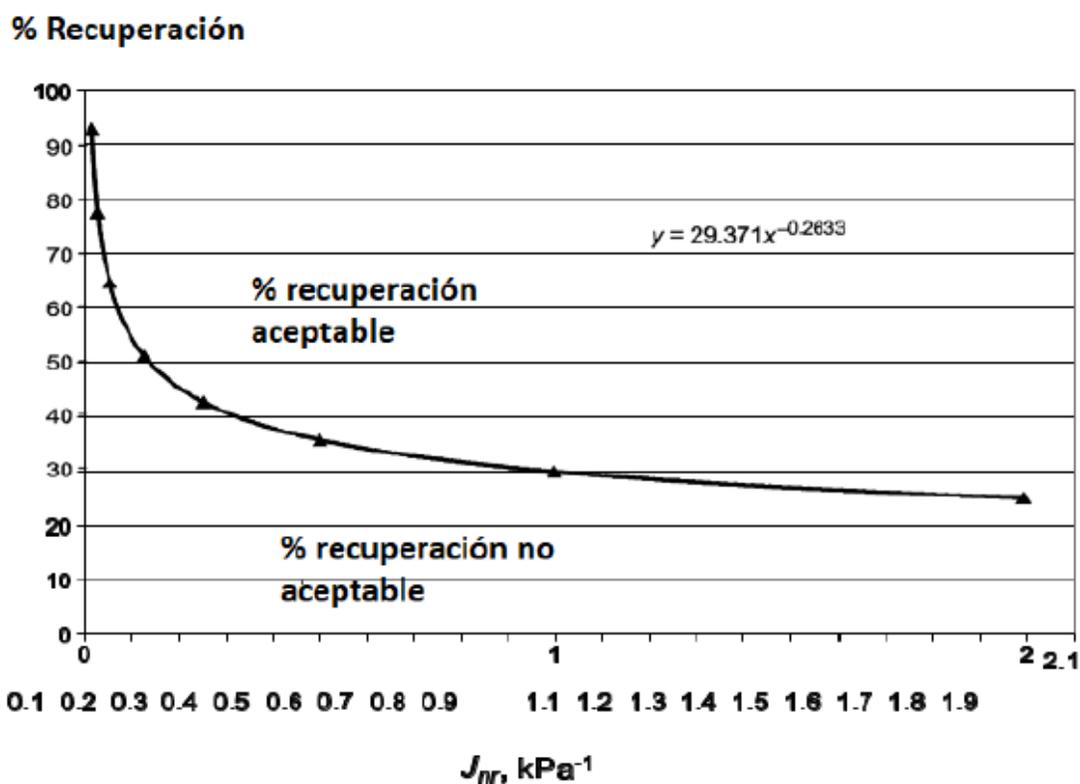


Figura 10. Flexibilidad en fluencia no recuperable. Fuente: Figura 8.301.10.A, Complemento N°1 del Volumen N°8 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2019).

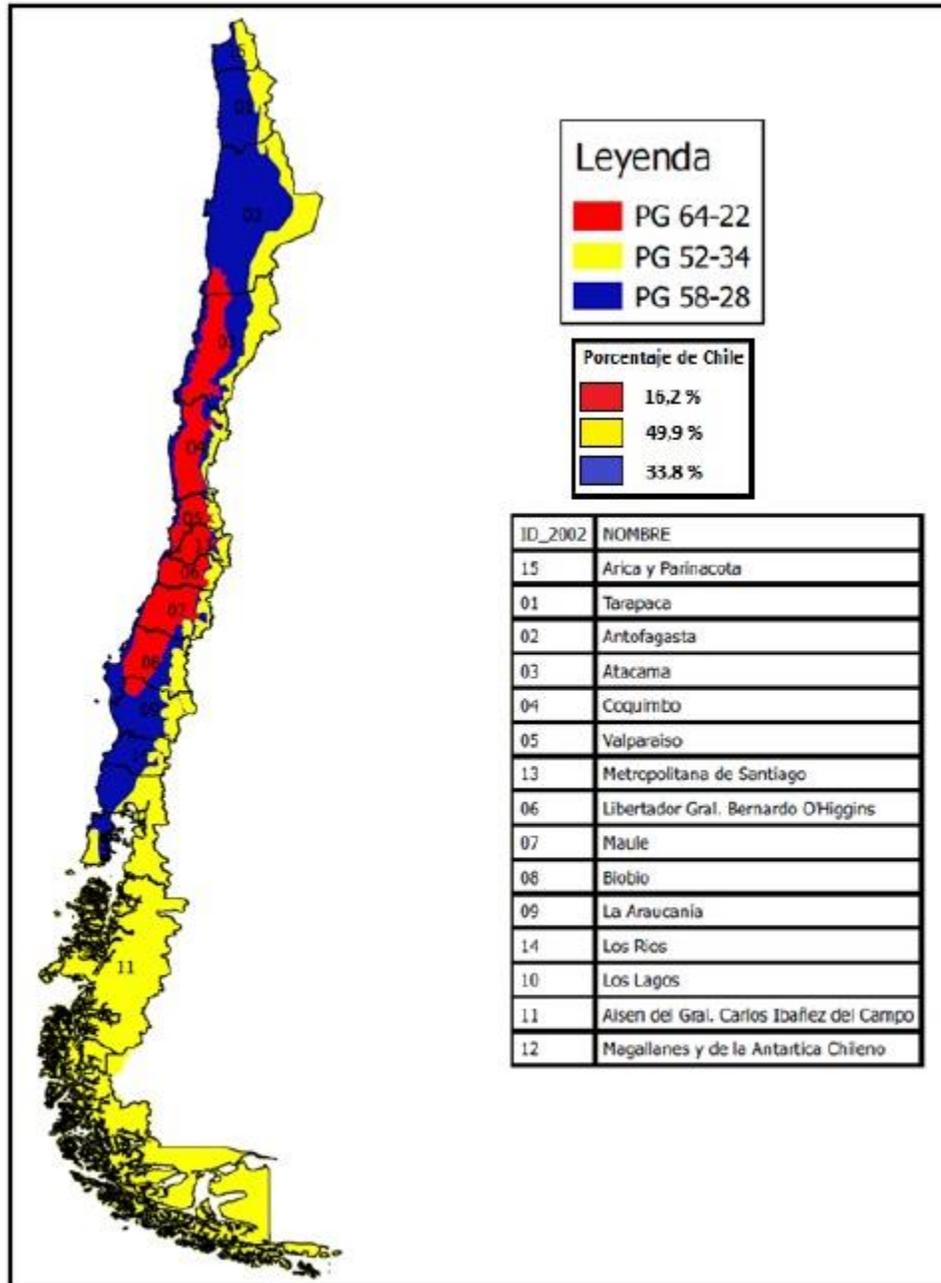
3.4. ZONIFICACIÓN SUPERPAVE

Los ligantes asfálticos son materiales susceptibles térmicamente como ya se ha mencionado, esto quiere decir que su comportamiento depende de la zona climática donde se utilicen, es por esto que se realizó una zonificación Superpave (Arteaga, 2017) de Chile continental, dando como resultado una división del territorio nacional en zonas climáticas, a las cuales se les asignó un ligante asfáltico óptimo.

Para la realización de la zonificación se contó con la información de 94 estaciones meteorológicas, que cumplen con el criterio básico de poseer como mínimo 20 años consecutivos de datos confiables, lo que permite asegurar que la información sea representativa y tenga validez estadística. Se determinó para cada estación las temperaturas de diseño, utilizando el modelo basado en daño LTPP 3.1, además para determinar la zona de influencia de cada estación se utilizó como criterio principal la clasificación por el sistema Köppen de Chile, y como criterio complementario la altura sobre el nivel del mar.

Cabe señalar que la selección del ligante asfáltico no es único para cada zona, por lo tanto, estos fueron seleccionados de manera de mantener una relativa continuidad geográfica de los ligantes recomendados y minimizar la cantidad de ligantes requeridos para cubrir la totalidad del territorio del país, lo que proporciona ventajas en la implementación y uso de las especificaciones.

Los resultados obtenidos muestran que el territorio nacional se puede cubrir con tres tipos de ligantes tradicionales: PG64-22 para la zona centro, PG58-28 para la zona norte y sur, y PG52-34 para la zona de Patagonia y alta montaña. Cabe mencionar que los ligantes fueron zonificados para velocidades de circulación alta y volúmenes de tránsito moderado. En la figura 11 se presenta la zonificación obtenida para un 98% de confiabilidad (Arteaga, 2017).



*Balmaceda AD PG 52-34: Falla la temperatura intermedia para un 98% de confiabilidad.

*Mapa para condiciones de circulación de alta velocidad y volumen de tránsito bajo según el anexo C.

Figura 11. Zonificación Superpave para Chile utilizando el modelo basado en daño LTPP 3.1, para un 98% de confiabilidad. Fuente: Comparación de Zonificaciones SUPERPAVE para Chile y Cuantificación de la Influencia del Cambio Climático en la Selección del Ligante Asfáltico (Arteaga, 2017).

3.5. ASFALTOS MODIFICADOS

Cuando se habla de asfaltos modificados se refiere a asfalto que ha sido mezclado con aditivos o modificadores, con la finalidad de disminuir la cantidad y severidad de los deterioros y aumentar la vida de servicio de los pavimentos. Los principales beneficios de usar estos pavimentos de alto desempeño son mejorar la resistencia al ahuellamiento, al agrietamiento térmico y a la fatiga.

El incremento en el uso de modificadores en los cementos asfálticos puede ser principalmente atribuido a los siguientes factores:

- Aumento significativo del volumen y las cargas de tránsito, por lo que se requieren pavimentos con una mayor resistencia al ahuellamiento.
- Las especificaciones Superpave para ligantes asfálticos solicitan que estos cumplan con la rigidez requerida tanto a altas como a bajas temperaturas, lo que no es posible lograrlo con asfaltos no modificados en regiones con condiciones climáticas extremas.
- Presión ambiental y económica para disponer de algunos materiales de desecho y subproductos de la industria, y utilizarlos como aditivos para MAC.

3.5.1. AGENTES MODIFICADORES

Agente modificador se refiere a cualquier producto que se adicione al asfalto para modificar sus propiedades, a continuación, se revisaran los principales tipos de modificadores utilizados.

3.5.1.1. Ablandadores

Los ablandadores consisten en aceites lubricantes, las propiedades de estos y su efecto modificador en los ligantes asfálticos varía significativamente dependiendo de su fuente, composición y técnica de refinación. Se pueden clasificar dentro de tres categorías principales (Golalipour, 2013):

- Aceites en base a petróleo
- Bio-aceites
- Aceites en base a residuos

A continuación, se presentan las principales características de cada uno de ellos.

Aceites en base a petróleo

Corresponden a aceites derivados del petróleo, al cual ya se le han eliminado por medio del proceso de refinación los componentes más ligeros. La composición química de este tipo de

productos corresponde a la asociación de átomos de hidrógenos y carbono, por lo que se denominan hidrocarburos, la disposición de estos átomos es la que determina si el aceite es parafínico, nafténico o aromático.

Aceites Parafínicos

Durante el proceso de refinación del petróleo, el crudo reducido es enviado a la torre de destilación al vacío, donde el gas es separado del residuo, siendo este último nuevamente procesado para obtener otros productos asfálticos, dentro de los cuales se encuentran varios aceites o lubricantes que serán separados de acuerdo a su punto de ebullición y rango de viscosidad. En este punto, si el crudo es de base parafínica, los aceites contienen tanto componentes parafínicos como aromáticos, los cuales son separados mediante una extracción líquido/líquido (proceso químico empleado para separar una mezcla de compuestos aprovechando su diferencia de solubilidad entre dos líquidos inmiscibles o parcialmente miscibles), para este propósito es utilizado un solvente aromático, que pretende disolver las moléculas aromáticas, para que así sean fácilmente separadas del resto de los componentes, obteniéndose aceite parafínico, que posee una estructura química recta o ramificada, tiene un peso específico de 0,874 y contiene un 18% de componentes aromáticos.

Aceites Nafténicos

De la misma manera que en el caso anterior el crudo reducido es enviado a la torre de destilación al vacío, donde el gas es separado del residuo. En este punto, si el crudo es de base nafténica, los aceites contienen tanto componentes nafténicos como aromáticos. Para poder separar el aceite nafténico del aceite aromático se realiza el proceso químico de hidrotratamiento, mediante el cual se rompen las moléculas grandes para dar origen a moléculas más pequeñas y livianas, el procedimiento se lleva a cabo a una presión de 3.000 psi y a temperaturas entre los 260°C y 425°C, el aceite es mezclado con hidrógeno al 90 por ciento de saturación, para posteriormente pasar a través de un catalizador, donde el hidrógeno es removido, obteniéndose aceite nafténico, el cual tiene una estructura química de anillos simples o compleja, un peso específico de 0,937 y contiene un 44% de componentes aromáticos.

Aceites Aromáticos

Los aceites aromáticos pueden ser obtenidos del proceso de producción tanto de aceites parafínicos como nafténicos, procesos en los cuales las moléculas aromáticas son extraídas mediante la acción de solventes o hidrotratamiento. Su estructura química contiene un anillo

insaturado condensado estable de seis carbonos, tiene un peso específico de 0,97 y contiene un 70% de componentes aromáticos.

En la figura 12 se muestran las estructuras químicas que presentan los aceites derivados de la refinación del petróleo.

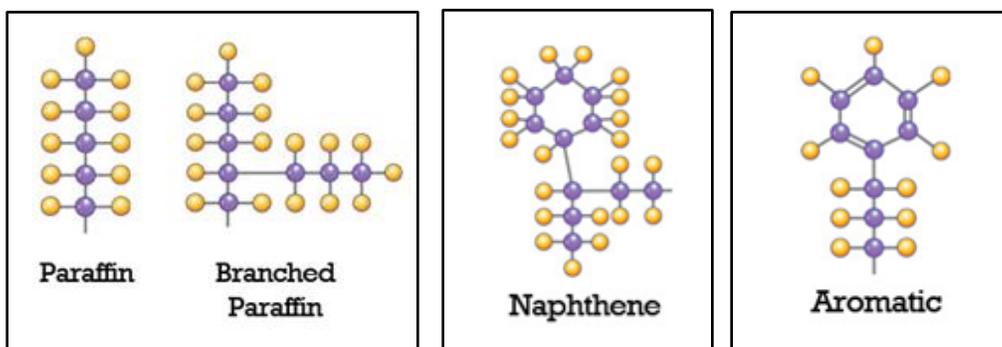


Figura 12. Estructura química aceites derivados de la refinación del petróleo. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Bio-aceites

Los 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. De esta manera, se entiende como un material renovable, amigable con el medio ambiente, que proporciona seguridad energética y resulta conveniente en términos económicos.

De acuerdo al departamento de agricultura de Estados Unidos, los aceites vegetales pueden ser clasificados en tres categorías:

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

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 industrias, automóviles, casas, etc., y, por lo tanto, su uso como aditivo asfáltico resulta beneficioso en términos financieros y ambientales. Los principales aceites son residuos obtenidos en base a aceites lubricantes, aceite de motor y aceite de cocina.

3.5.1.2. Polímeros

Los polímeros son macromoléculas fabricadas mediante un proceso químico, denominado reacción de polimerización, que involucra un solo tipo de moléculas pequeñas, llamados monómeros, las cuales forman largas cadenas o agrupaciones. La secuencia y estructura química de los monómeros determina las propiedades físicas del polímero resultante. Cuando se combinan dos o más tipos diferentes de polímeros se habla de copolímero, el cual puede estar dispuesto en un arreglo alternado, al azar o en bloques.

Los polímeros pueden ser clasificados de acuerdo a sus propiedades físicas y morfológicas, en polímeros termo endurecibles y termo plásticos, estos últimos a su vez pueden dividirse en elastómeros y plastómeros, como se muestra en la figura 13 (Delgadillo, 2016).

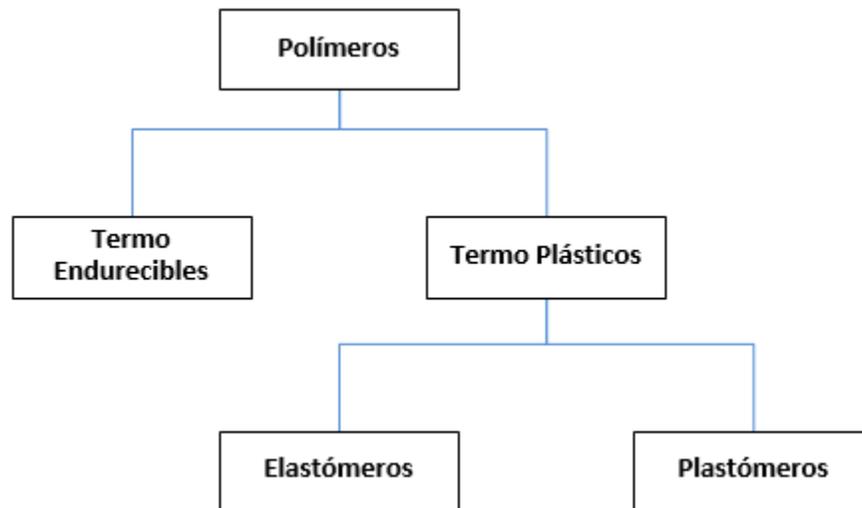


Figura 13. Esquema clasificación de polímeros. Fuente: Apuntes de clases CIV-369 (Delgadillo, 2016).

Polímeros Termo Endurecibles

Son polímeros que presentan cadenas con enlaces altamente cruzados, que forman una estructura de red tridimensional que no puede girar ni deslizarse. En general poseen las siguientes características:

- Son más rígidos, con módulos elásticos dos o tres veces más grandes en comparación con los polímeros termoplásticos.
- Frágiles, no poseen ductilidad y resistencia al impacto.
- No pueden ser refundidos, en lugar estos se degradan o queman.
- No se reciclan, debido a que sus enlaces cruzados no son reversibles.

Se destacan dentro de los polímeros termo endurecibles las resinas epóxicas, que son utilizadas principalmente como adhesivos, sellantes o aisladores en sistemas eléctricos y

electrónicos. También destaca el poliuretano, que se utiliza principalmente en la fabricación de espumas blandas, y por último se puede mencionar al poliéster, donde se obtiene, como resultado del proceso de polimerización, una fibra que es utilizada para la fabricación de hilos de coser y telas.

Polímeros Termo Plásticos

Son polímeros que presentan pocos o ningún enlace cruzado, están formados principalmente por estructuras lineales o ramificadas. Una característica principal de los polímeros termo plásticos es que se reblandecen por la acción del calor y pueden llegar a fluir, pero una vez que regresan a temperatura ambiente estos recuperan su consistencia original. Pueden dividirse en plastómeros y elastómeros.

Los plastómeros son polímeros que al estirarlos fluyen sin recuperar su longitud inicial, poseen deformación pseudo-plástica con poca elasticidad, por lo que su utilización como modificadores de ligantes asfálticos es limitada. Se destacan dentro de los plastómeros el Polietileno (PE), que es un tipo de plástico ampliamente usado para fabricación bolsas, envases, menaje, etc., también destaca el Polipropileno (PP), que es un tipo de plástico usado para la fabricación de botellas, piezas, recipientes para microondas o congelados, y por último se puede mencionar el Etileno Vinilo Acetato (EVA), que se utiliza en diseño, trabajos escolares, industria del calzado, etc.

Los elastómeros son polímeros que tienen estructuras parcialmente reticuladas que les confieren propiedades elásticas. Se destacan dentro de los elastómeros el Estireno Butadieno Estireno (SBS), Estireno Butadieno Goma Latex (SBR), Estireno Butadieno (SB), Poliisopreno (caucho natural y sintético), y caucho reciclado (generalmente de neumáticos usados).

3.5.1.3. Extendedores

La oxidación es la principal causa de envejecimiento a largo plazo en los pavimentos asfálticos, debido a que un pavimento oxidado se rigidiza y eventualmente puede agrietarse. El uso de antioxidantes, como azufre o lignina, para mejorar el desempeño del ligante asfáltico, retrasando el envejecimiento y así incrementar la vida del pavimento (Daly, 2017).

3.5.1.4. Endurecedores

El uso de asfalto modificados con polímeros o polvo de caucho para mejorar el desempeño de los pavimentos ha aumentado en los últimos años, como respuesta a los requerimientos de la normativa Superpave, es por esto, que se agregan, como complemento al ligante asfáltico, agentes endurecedores como lo son el ácido polifosfórico o la gilsonita.

El uso asfaltos modificados con polímeros en conjunto con ácido polifosfórico permite a los proveedores lograr mezclas que pueden ser manipuladas, mezcladas y compactadas a temperaturas razonables, con la desventaja que el efecto endurecedor que logra el ácido polifosfórico depende de la composición del asfalto utilizado. La reactividad parece estar relacionada con el efecto de dispersión de los asfaltenos, donde asfaltos con asfaltenos altamente dispersos presentan un fuerte efecto endurecedor, mientras que asfaltos con asfaltenos más condensados muestran una pequeña reacción al ácido polifosfórico.

La gilsonita incrementa el endurecimiento y mejora el grado PG a altas temperaturas del asfalto sin modificar, sin embargo, a bajas temperaturas la mezcla podría experimentar fragilización, y de esta forma disminuir la resistencia a las bajas temperaturas (Daly, 2017).

3.5.1.5. Rejuvenecedores

Los agentes rejuvenecedores intentan restaurar reológicamente y químicamente las propiedades de un asfalto envejecido para asemejarse a un asfalto sin envejecer, estos modificadores son comúnmente utilizados en los procesos de reciclado de mezclas calientes, donde una cierta cantidad de tiempo es requerida para que el agente rejuvenecedor se combine con el asfalto envejecido y sea capaz de redistribuir los componentes envejecidos en el ligante modificado (Daly, 2017).

3.5.1.6. Mejoradores de Adherencia

La adherencia entre asfalto y agregado es un factor fundamental en la vida de un pavimento, debido a que la falta de adherencia es una causa de deterioros tanto superficiales como integrales del pavimento. La mayoría de los agentes mejoradores de adherencia son líquidos tensoactivos que, mezclados con el cemento asfáltico, reducen la tensión superficial del ligante y por lo tanto promueven un incremento de la adhesión con los agregados (Daly, 2017).

3.5.2. ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR

Los efectos producidos por la modificación del ligante con ablandador dependen del tipo, los componentes y la fuente del aceite modificador, pero en general tiende a ablandar el asfalto, dando como resultados ligantes con grados de desempeño PG más bajos, incrementando la habilidad para relajar esfuerzos y limitando la rigidez, lo que permite una menor acumulación de esfuerzos internos, y por lo tanto un mejor comportamiento frente al agrietamiento térmico, sin embargo, este tipo de modificación perjudica la resistencia al ahuellamiento.

Los aceites utilizados para ablandar ligantes asfálticos son, generalmente, altos en componentes saturados, lo que lleva a obtener un asfalto menos viscoso y con una temperatura de transición vítrea menor. Cabe señalar que los ligantes sin modificar típicamente poseen entre 5% y 15% de componentes saturados (Sylla, 2015), porcentaje que aumenta al incorporar ablandadores.

3.5.2.1. Experiencia de modificación de ligante asfáltico con ablandador

A continuación, se presenta una investigación sobre el efecto que provoca la modificación con ablandadores sobre las propiedades reológicas del ligante asfáltico, además de analizar las variables involucradas en el proceso de modificación.

“Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders” (Golalipour, 2013)

Materiales

Para esta investigación fueron seleccionados dos ligantes comúnmente usados en la región del medio oeste en Estados Unidos: Flint Hill (FH), que tiene un contenido de asfaltenos relativamente alto, y Valero (VA), que tiene un contenido de asfaltenos relativamente bajo, ambos con clasificación PG64-22. Se desarrollaron dos lotes de ligantes modificados, en el primero de ellos se utilizó el ligante FH y nueve aceites modificadores, que se detallan en la tabla 8.

Tabla 8. Materiales usados para los ensayos en ligantes.

	Description				
Base Binder	Flint Heal & Valero PG 64-22				
Oil Modifiers	Physical Properties				
		Viscosity, cSt @ 40 °C	API Gravity	Density, gr/cm ³ @ 15 °C	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)				

Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Cabe mencionar los aceites PA, PP-1, PP-2, PP-3 y PN provienen del proceso de destilación del crudo, mientras que los aceites BO-1, BO-2 y BO-3 son aceites obtenidos en base a plantas, y los aceites RW-1 y RW-2, corresponden a residuos de aceite de motor y de aceite de cocina, respectivamente.

Dos muestras fueron ensayadas para cada ligante, en caso de buena repetitividad, es decir una diferencia entre los resultados inferior al 10%, el promedio de esas dos muestras fue utilizado para el análisis de los resultados, en caso contrario se realizó una tercera muestra.

El factor limitante para la selección de la dosificación del aceite modificador fue la merma en el grado de desempeño de alta temperatura, debido a la disminución de la rigidez como resultado de la modificación con aceite, por lo que se seleccionó la dosificación máxima posible que produzca la disminución de solo un grado de alta temperatura. Los porcentajes requeridos, usando el ligante base FH, para cada modificador se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Porcentaje de modificador usado para obtener el mismo grado PG de alta temperatura para el ligante base FH.

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

Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Además, para evitar la parcialidad y analizar el efecto del contenido de asfaltenos en la modificación con aceite, se decidió modificar el ligante base VA con algunos aceites, los cuales fueron ensayados para alta temperatura. Se utilizó el mismo criterio de selección de la dosificación de aceite mencionado anteriormente.

El segundo lote de muestras corresponde al ligante FH que se modificó con cuatro diferentes aceites: aceite aromático (PA), aceite parafínico (PP-3), bio-aceite (BO-1), y aceite en base a residuos (RW-1). Todos con una dosificación de 5%, para comparar el efecto del tipo de aceite en la modificación, tanto a altas como a bajas temperaturas.

Proceso de modificación

Para este estudio se utilizó un mezclador de alto corte, cuyo cabezal posee una configuración que busca garantizar que se produzca una dispersión adecuada del material, generando un flujo vigoroso. La velocidad se mantuvo constante a aproximadamente 5.000 rpm, la cual se considera la máxima posible sin que se derrame el material. Además, se utilizó un mezclador de bajo corte con turbinas de flujo radial, con una velocidad controlada entre 600 y 700 rpm, teniendo como finalidad comparar los resultados de la modificación producida por cada uno de estos equipos.

Debido a que el tiempo de mezclado puede jugar un papel importante en la calidad final de la mezcla, es que se extrajeron muestras en intervalos de 15 minutos durante la primera hora del proceso de mezclado, para posteriormente extraer muestras cada 30 minutos, hasta alcanzar un tiempo de mezclado máximo de dos horas, dado que un proceso de homogeneización más extenso sería impracticable.

La temperatura de mezclado también fue seleccionada de manera cuidadosa, debido a que una temperatura demasiado baja puede generar problemas en la homogeneidad de la mezcla, debido a la alta viscosidad que presenta el ligante, en cambio, si se utiliza una temperatura demasiado elevada puede producir un envejecimiento excesivo. Por lo tanto, se seleccionó una temperatura de mezclado de 150 ± 5 °C, donde la viscosidad del ligante es lo suficientemente alta para realizar el proceso de mezclado de forma adecuada.

Se decidió seleccionar la máxima dosificación de aceite posible, sin que se viera perjudicado el grado de alta temperatura, para un aceite aromático (AM) y un aceite parafínico (PM), realizándose dos mezclas con cada uno de estos aceites, ambas utilizando el ligante base FH, una empleando un mezclador de alto corte (HS), y otra empleando un mezclador de bajo corte (LS). En la figura 14 se presentan los resultados obtenidos para el grado PG de alta temperatura.

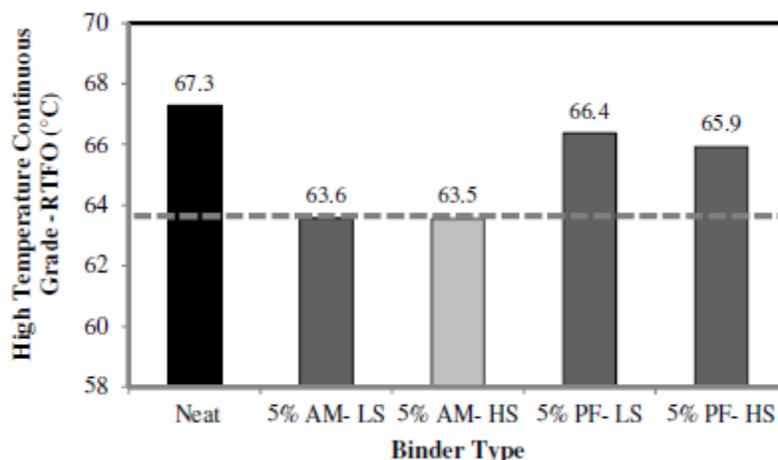
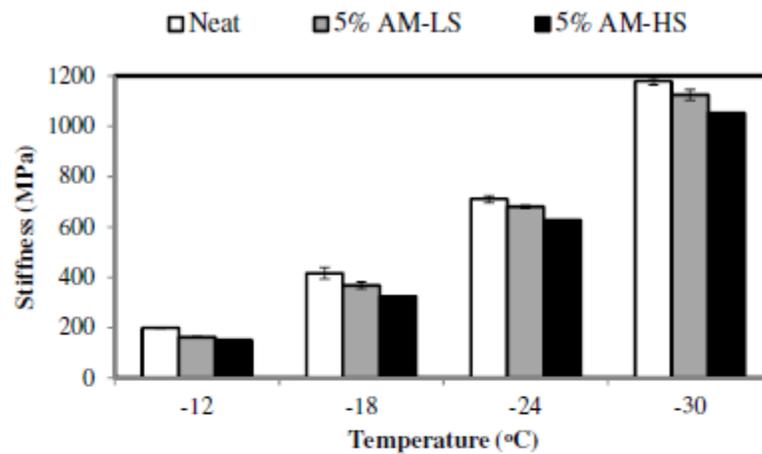


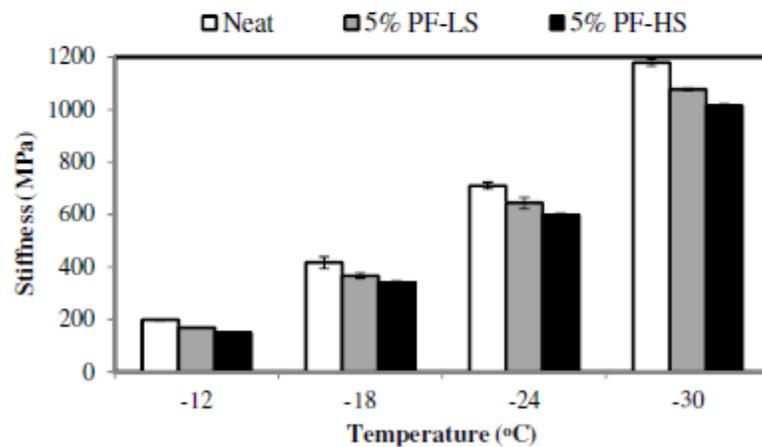
Figura 14. Grado PG exacto de alta temperatura. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Se observa que la incorporación de 5% de aceite parafínico (PF) tiene un efecto menos significativo, mientras que un 5% de aceite aromático (AM) provoca una disminución que resulta en un ligante con grado de desempeño ligeramente menor que PG64. Por otra parte, la velocidad de mezclado no parece ser tan relevante para el grado de alta temperatura, debido a que no se ven diferencias significativas, solo un pequeño reblandecimiento asociado al mezclado de alto corte.

Además, para investigar la influencia a bajas temperaturas del esfuerzo de corte aplicado a la mezcla, se realizó el ensayo BBR, cuyos resultados se presentan en la figura 15.



(a)



(b)

Figura 15. Resultados de la rigidez $S(t)$. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Como se observa en la figura 15, la reducción de la rigidez es más prominente cuando el mezclador de alto corte es utilizado, lo que indica una mayor homogeneización, dando como resultado un reblandecimiento más significativo del ligante a bajas temperaturas.

A partir de los resultados se concluye, que el reblandecimiento del ligante es un proceso que depende del esfuerzo de corte aplicado, debido a que este aumenta la miscibilidad del aceite, mejorando las propiedades del ligante a bajas temperaturas, lo que tendría como resultado una mayor resistencia al agrietamiento térmico.

Otro factor a considerar es el tiempo de mezclado, es por eso que se midieron las propiedades reológicas a alta temperatura, de cada muestra obtenida para distintos tiempos de mezclado, los resultados obtenidos se muestran en la figura 16.

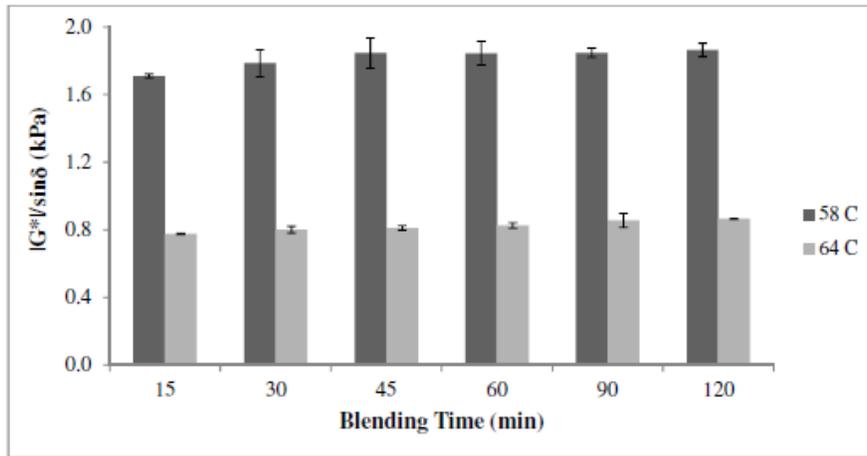


Figura 16. Efecto del tiempo de mezclado sobre las propiedades de alta temperatura. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Como se puede apreciar en la figura 16, se produce un ligero cambio en los valores de $G^*/\sin\delta$ con el incremento del tiempo de mezclado. Sin embargo, posterior a 30 minutos de mezclado, las propiedades de alta temperatura se mantienen prácticamente constantes. Por lo tanto, se considera innecesario someter al ligante asfáltico a tiempos de mezclado muy largos, dado el envejecimiento asociado a esta práctica, es por eso que se considera prudente un tiempo de mezclado de 30 minutos.

Evaluación del efecto de la modificación con aceite en el desempeño

Para evaluar el desempeño a altas temperaturas de los ligantes modificados, se realizó el ensayo DSR para cada uno de ellos, obteniéndose los siguientes resultados para el ligante en estado original:

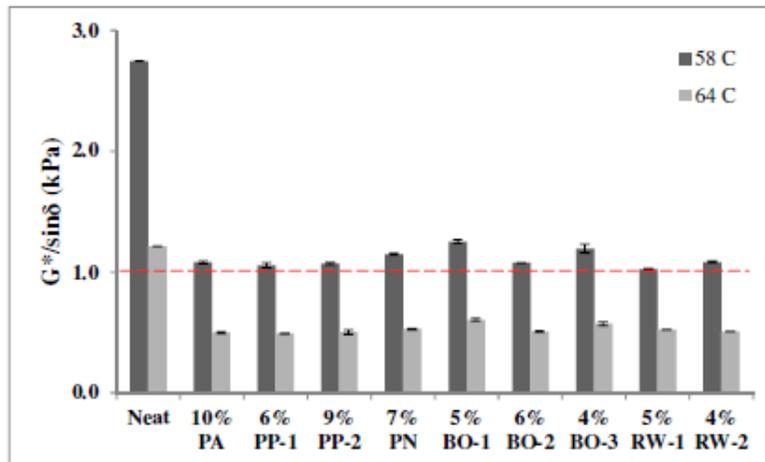
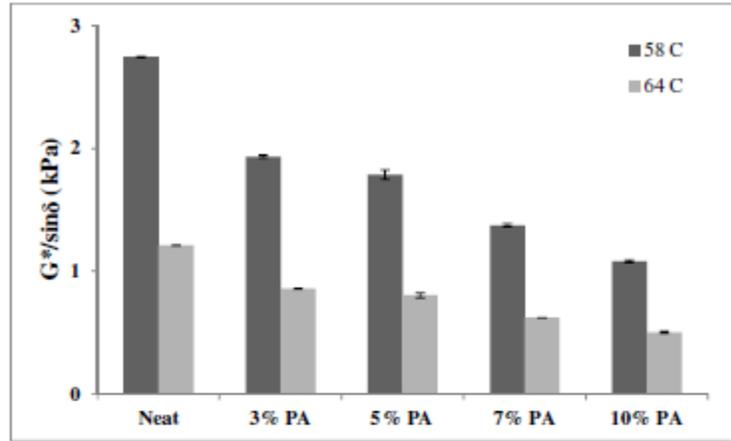


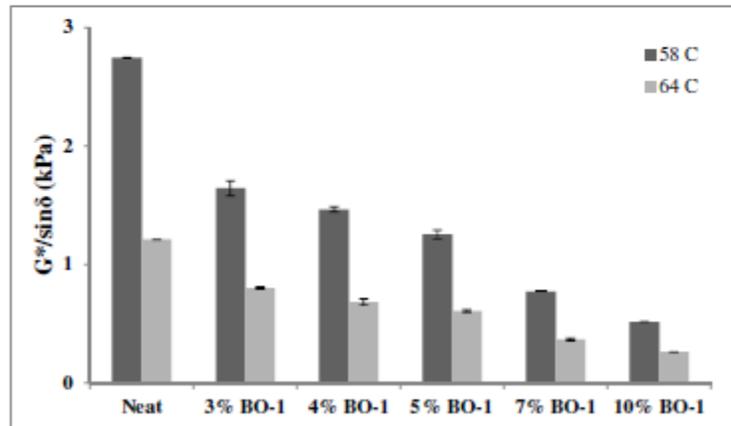
Figura 17. Resumen de los datos obtenidos para grado PG de alta temperatura estado original. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

La figura 17 muestra que la adición de aceite disminuyó el desempeño del ligante a altas temperaturas, como se esperaba. Para todos los ligantes modificados se cumple el criterio de alta temperatura, es decir que el valor de $G^*/\sin\delta$ sea mayor o igual a 1[kPa], para una temperatura de 58 °C. En la figura 17 también se puede apreciar que el efecto, sobre las propiedades mecánicas del ligante, es distinto para cada aceite modificador, donde el aceite RW-1 es el más efectivo, reduciendo un grado PG con una dosificación de 4%. Mientras que el aceite PA es el menos efectivo, dado que necesita una dosificación de 10% para lograr igual disminución en el desempeño.

En la figura 18, se muestra el efecto de diferentes dosificaciones de aceite aromático (AR) y bio-aceite (BO-1) sobre el desempeño de alta temperatura del ligante en su estado original.



(a) Aromatic



(b) Bio-Oil

Figura 18. Resumen de los datos obtenidos para grados PG de alta temperatura para diferentes porcentajes de aceite modificador. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Como se aprecia en la figura 18, el efecto del aceite sobre el desempeño a alta temperatura es más significativo con el incremento del contenido de modificador, además dicho efecto varía según el tipo de aceite utilizado. Por ejemplo, para una dosificación de 5%, el bioaceite reduce el valor $G^*/\sin\delta$ en un 25% más que el aceite aromático.

Además, se realizó el ensayo DSR en muestras de ligantes modificados, que fueron realizadas utilizando el ligante base Valero, con la finalidad de eliminar cualquier sesgo en la investigación relacionado a las características del ligante base. En la figura 19 se muestran los resultados para el ligante en estado original, donde se puede apreciar que el comportamiento es bastante similar para ambos ligantes, existiendo una pequeña diferencia entre los porcentajes determinados como óptimos.

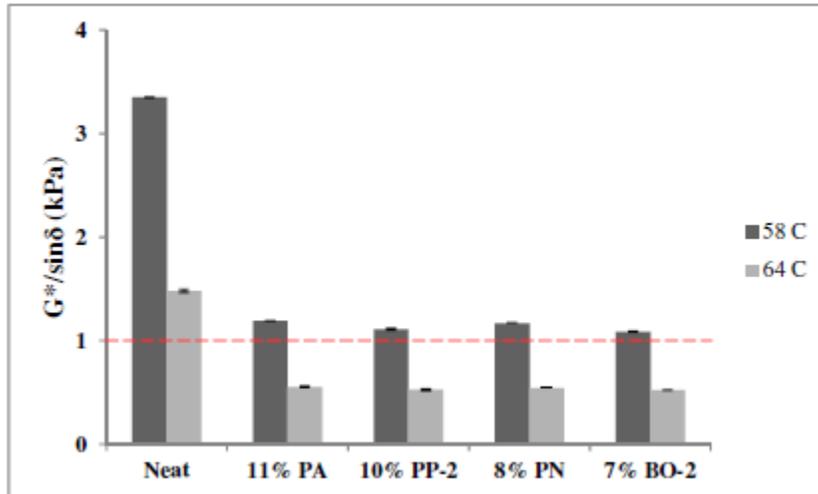


Figura 19. Resumen de los datos obtenidos para grados de alta temperatura para ligantes VA originales. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders (Golalipour, 2013).*

Volviendo al lote de muestras realizadas con el ligante FH, cabe señalar que se sometieron las muestras al proceso de envejecimiento primario, para investigar el efecto de dicho proceso sobre el modificador. En la figura 20 se presentan los resultados obtenidos para el ensayo DSR, donde es posible observar que la dosificación seleccionada para cada tipo de aceite satisface el criterio de alta temperatura para ligantes envejecidos a 58°C.

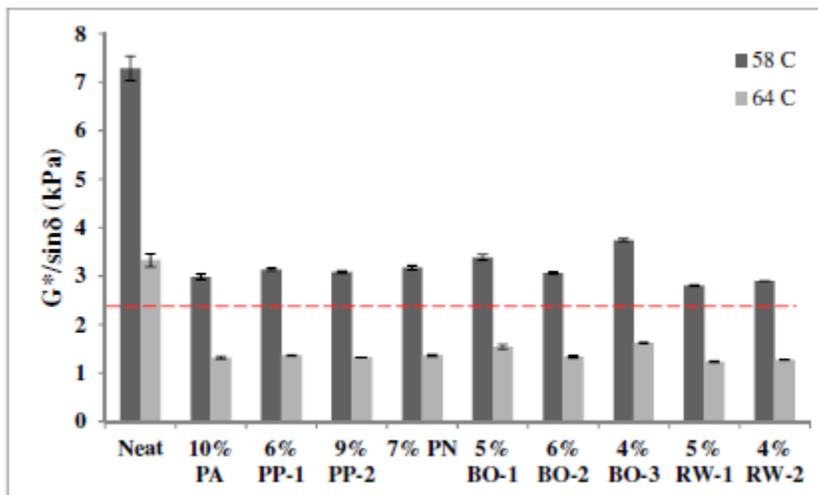


Figura 20. Resumen de los datos obtenidos para grados PG de alta temperatura RTFO. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders (Golalipour, 2013).*

Con el fin de cuantificar la susceptibilidad al envejecimiento de los ligantes modificados con aceites, es que se calcula la razón entre los valores de $G^*/\sin\delta$ obtenidos para los ligantes con envejecimiento primario y en estado original, la cual es denominada índice de envejecimiento.

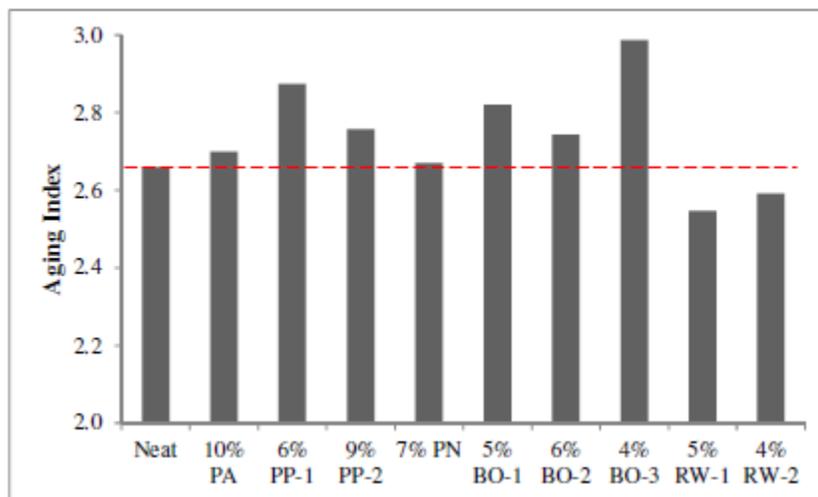
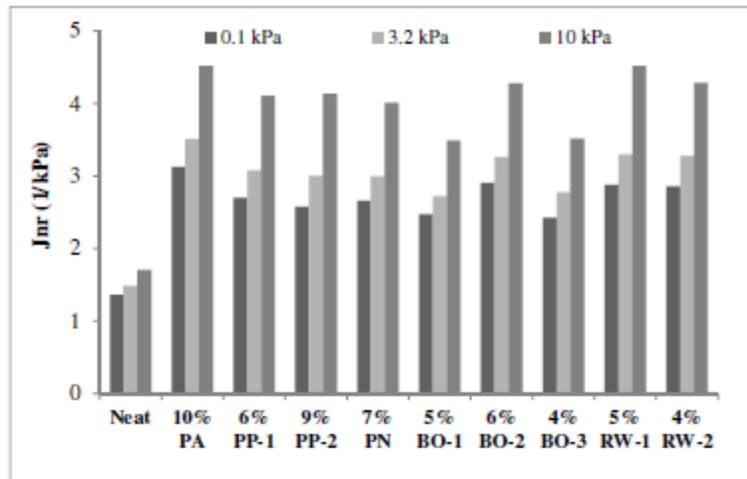


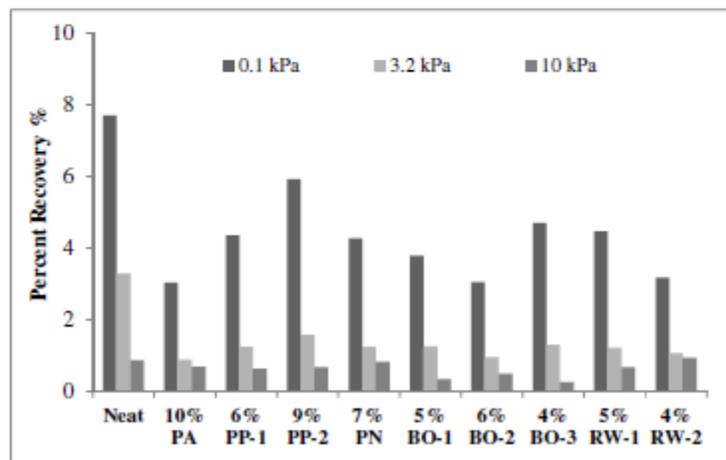
Figura 21. Razón entre los valores de $G^*/\sin\delta$ para RTFO y estado original. Fuente: Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders (Golalipour, 2013).

Los resultados, expuestos en la figura 21, muestran que el endurecimiento por envejecimiento cambia cuando el ligante es modificado con aceite, además este efecto depende del tipo de aceite modificador. Esta diferencia en el índice de envejecimiento proviene de las diferencias en la composición química de los aceites, por ejemplo, los bio-aceites muestran la mayor susceptibilidad al envejecimiento, lo cual puede estar relacionado con el mayor contenido volátil en este tipo de aceites. Por el contrario, los aceites en base a residuos refinados muestran la menor susceptibilidad al envejecimiento, lo que puede ser atribuido al hecho que este material añade algunos componentes, que no son parte habitual de la fracción de bajo peso molecular de los ligantes convencionales.

Además, se les realizó a las muestras obtenidas, utilizando ligante base FH, el ensayo MSCR a la temperatura a la temperatura de 58°C, donde se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 22.



(a) J_{nr} results



(b) R% results

Figura 22. Resumen de los resultados para el ensayo MSCR para ligante base y ligantes modificados con aceite. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders (Golalipour, 2013).*

Los resultados muestran que la modificación con aceite tiene un efecto perjudicial sobre la resistencia al ahuellamiento, debido a 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 con otros aceites. Otro punto importante observado es que la modificación con aceite no tiene un efecto significativo en el porcentaje de recuperación.

También se evaluó el desempeño del ligante a temperaturas intermedias, donde se obtuvieron los resultados que se observan en la tabla 10.

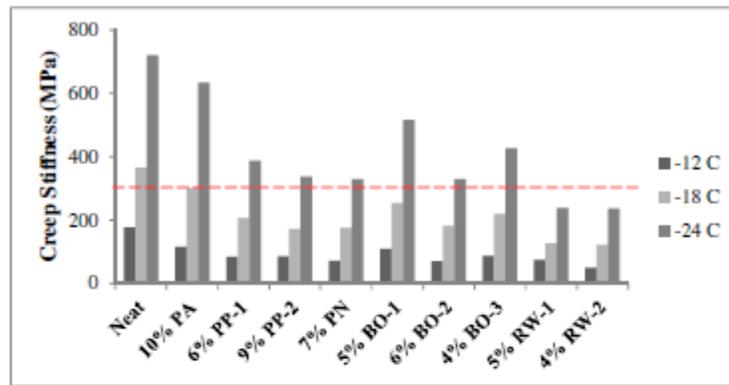
Tabla 10. Resultados para la temperatura intermedia para ligantes modificados con aceite.

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

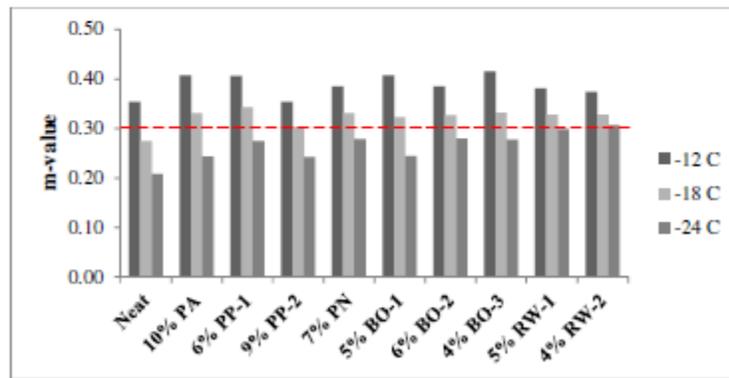
Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Estos resultados confirman que todos los ligantes, tanto modificados como el ligante base, cumplen con el criterio PG para temperatura intermedia, es posible observar que los valores de $G^* \sin \delta$ se encuentran en un rango similar para todos los ligantes. También es posible señalar que algunos aceites, como RW-1 y RW-2, reducen la rigidez del ligante con envejecimiento secundario, lo cual es beneficioso para la vida de fatiga.

Además, se evaluó el desempeño de los ligantes modificados a bajas temperaturas, para lo que se realizó el ensayo BBR, obteniéndose los resultados expuestos en la figura 23.



(a) Creep Stiffness values



(b) m-value

Figura 23. Resultados BBR a diferentes temperaturas para ligante base y modificados con aceite. Fuente: Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders (Golalipour, 2013).

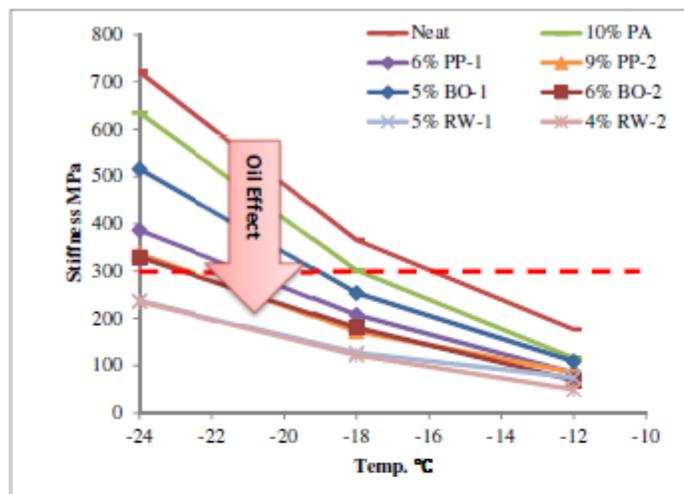
Se puede inferir de los resultados obtenidos, que la modificación con aceite puede disminuir la rigidez y aumentar el valor de m significativamente, estos cambios resultan beneficiosos para mejorar el desempeño a bajas temperaturas del ligante asfáltico. Se puede ver en la figura 23, que, exceptuando el aceite aromático, todos los otros modificadores mejoran el desempeño a baja temperatura en un grado PG, debido a que satisfacen los criterios de rigidez y del valor m a -18°C .

Como se mencionó anteriormente, aunque el aceite aromático disminuyó el desempeño a altas temperaturas en un grado PG, no mejoró el desempeño a bajas temperaturas, debido a que no cumplió con el criterio de rigidez establecido por la normativa Superpave. Esto podría ser explicado por la alta susceptibilidad al envejecimiento que muestra este aceite, por lo tanto luego de ser sometido al PAV, aumentó significativamente la rigidez del ligante.

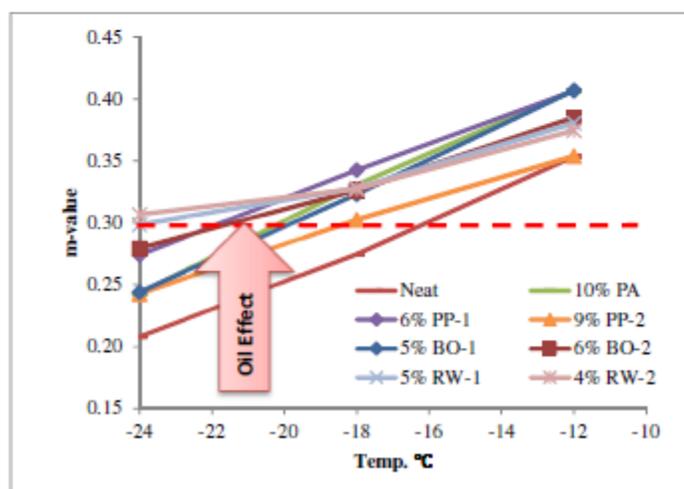
Otro factor importante a considerar es el efecto de la temperatura, se puede ver en la figura 23, que, al disminuir la temperatura en 6°C, la rigidez de los ligantes aumenta significativamente. Este tipo de comportamiento es más evidente para el aceite BO-1 cuya rigidez aumenta al doble cuando la temperatura pasa de -18°C a -24°C. Esto indica que cuando la temperatura cambia bruscamente, el esfuerzo térmico de este aceite aumenta drásticamente, lo cual hace que el pavimento tienda a agrietarse más fácilmente.

Se espera que la mejora en las propiedades de baja temperatura del ligante asfáltico modificado con aceite, se traduzca en una reducción del agrietamiento térmico, debido a la reducción general de la rigidez del ligante y el incremento del valor m .

Con el fin de poder comparar más claramente los efectos de la modificación con aceite sobre las propiedades a baja temperatura, se seleccionaron los resultados de ciertos aceites, que se muestran en la figura 24, donde se observa que la introducción de aceites en el ligante disminuye la rigidez, así como también aumenta el valor m significativamente. Se cree que estos cambios son beneficiosos para el desempeño del ligante a bajas temperaturas.



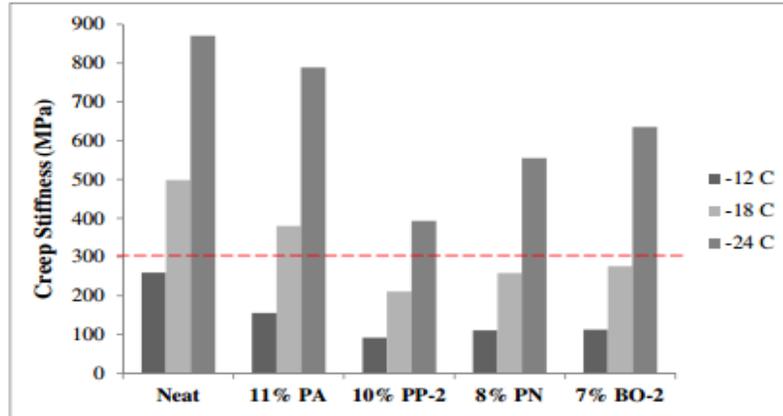
(a) Stiffness



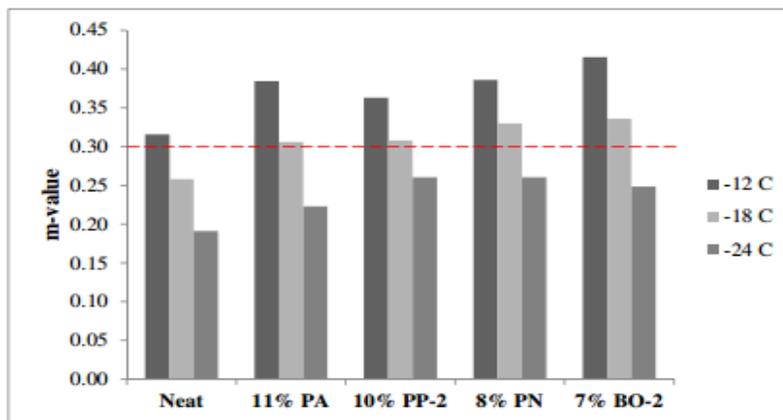
(b) m-value

Figura 24. Efecto de la modificación con aceite en los resultados de BBR a diferentes temperaturas. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

También se realizó el ensayo BBR en muestras de ligantes modificados, que fueron realizadas utilizando el ligante base Valero, con la finalidad de eliminar cualquier sesgo en la investigación relacionado a las características del ligante base. En la figura 25 se muestran los resultados, donde se puede apreciar que el comportamiento es bastante similar para ambos ligantes.



(a) Creep Stiffness values



(b) m-value

Figura 25. Resultados BBR a diferentes temperaturas para ligante base VA sin modificar y modificado con aceite. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Además se realizó el ensayo BRR a temperaturas de -12°C y -18°C , en muestras sin envejecer obtenidas a partir del ligante base FH para cuatro modificadores (uno de cada tipo), y se calculó el índice de envejecimiento cuyos resultados se muestran en la figura 26, donde los resultados muestran que el endurecimiento por envejecimiento cambia cuando el ligante es modificado con aceites, además presenta diferentes efectos para cada tipo de aceite, de igual forma que para el índice de envejecimiento calculado con respecto a las propiedades de alta temperatura.

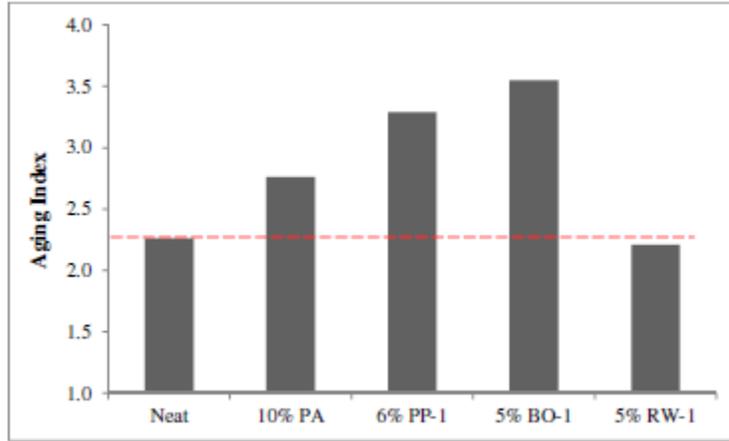


Figura 26. Razón de la rigidez del ligante con envejecimiento PAV y en estado original. Fuente: Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders (Golalipour, 2013).

A continuación, en la figura 27, se presenta el resumen de resultados de las curvas maestras obtenidas para el ligante base FH y los ligantes modificados con distintos aceites.

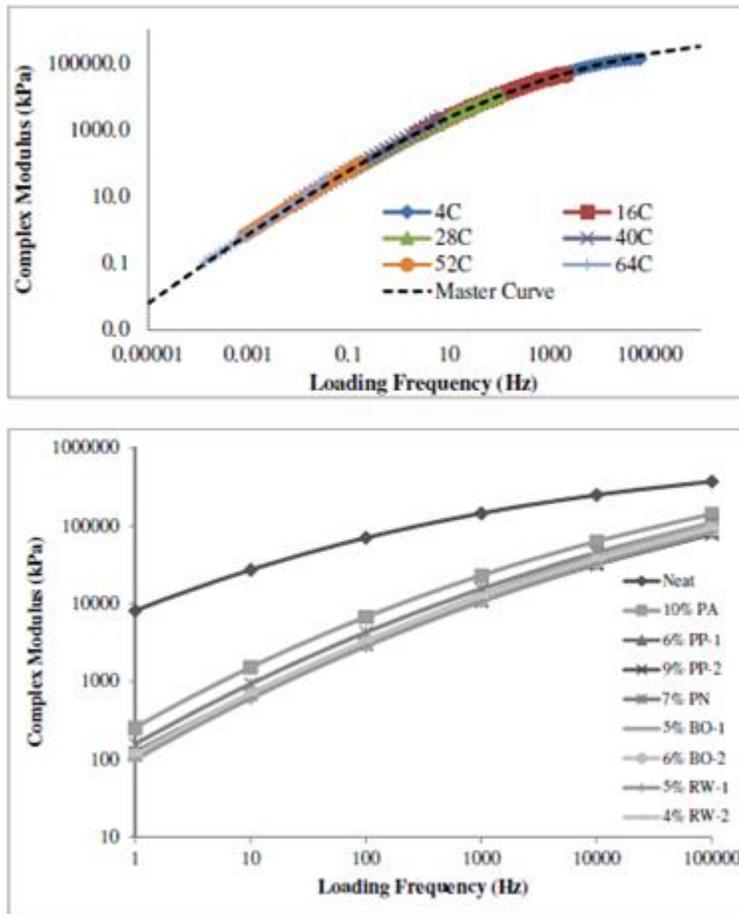


Figura 27. Resumen de los resultado para la curva maestra para ligante original y modificados con aceite. Fuente: Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders (Golalipour, 2013).

Los resultados muestran claramente la diferencia en las propiedades reológicas del ligante base y de los ligantes modificados. También se observa en la figura 27 que cada tipo de aceite modificador tiene un efecto diferente sobre la curva maestra. Por una parte, los aceites BO-2 y RW-2 tiene el efecto más significativo sobre el comportamiento, afectando las propiedades de altas y bajas temperaturas más fuertemente en comparación con los otros ligantes modificados, mientras que el aceite PA muestra el menor efecto sobre la curva maestra y tiene el módulo complejo más alto entre los ligantes modificados.

Todos los aceites disminuyen la rigidez del ligante al reducir los valores del módulo complejo e incrementar la pendiente de la curva maestra, lo que representa una susceptibilidad a la temperatura más alta. Otro punto a destacar es que la diferencia entre el módulo complejo del ligante base y los ligantes modificados es mayor a alta temperatura (baja frecuencia) que a baja temperatura (alta frecuencia), lo que significa que algunos aceites no son tan efectivos para mejorar el desempeño a bajas temperaturas, sin embargo, afectan las propiedades a altas temperaturas.

Para investigar el cambio en las propiedades del ligante debido al envejecimiento, es que se construyeron curvas maestras de los ligantes luego de pasar por el proceso de envejecimiento primario, obteniéndose los siguientes resultados:

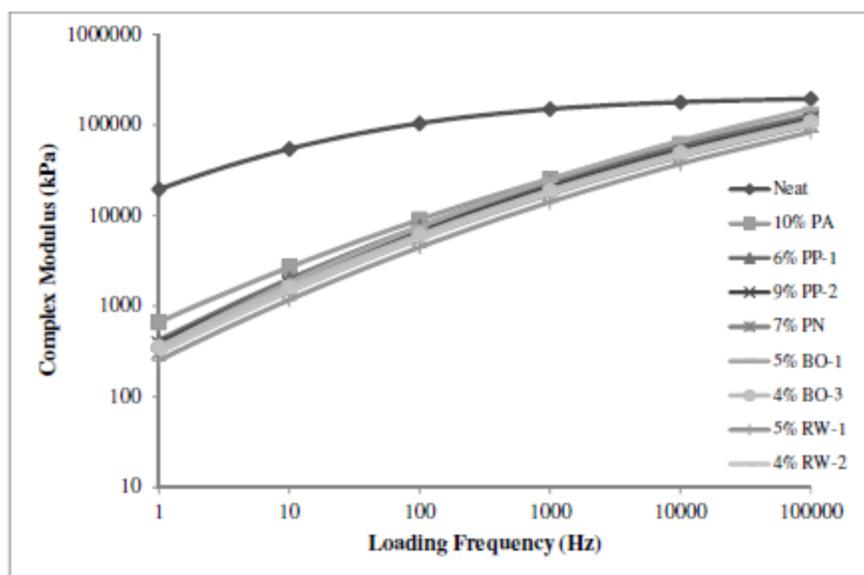


Figura 28. Resumen de los resultado de la curva maestra para ligante con envejecimiento RTFO modificados con la concentración óptima de aceite. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Se aprecia en la figura 28 que, independientemente del nivel de envejecimiento, el efecto de la modificación del aceite sobre el ligante es evidente. Sin embargo, los resultados muestran que la diferencia entre el ligante base y los ligantes modificados se ha reducido en comparación a los ligantes sin envejecer, lo que se puede deber a que los aceites generalmente aumentan la susceptibilidad al envejecimiento, además se observa que la susceptibilidad al envejecimiento es mayor para altas temperaturas que para bajas.

Además, para investigar el efecto del contenido de aceite en el comportamiento reológico del ligante, es que se realizaron modificaciones con diferentes dosificaciones de cada tipo de aceite. La figura 29 resume los valores obtenidos para el ligante modificado con RW-1, donde se aprecia que, con el incremento del contenido de aceite, la curva maestra del módulo complejo se desplaza gradualmente hacia abajo, haciéndose más pequeño el módulo complejo en todas las frecuencias. Se puede inferir que el aceite puede afectar el desempeño a altas temperaturas, pero mejor el desempeño a bajas temperaturas, haciendo este efecto más prominente con el aumento en la dosificación del aceite.

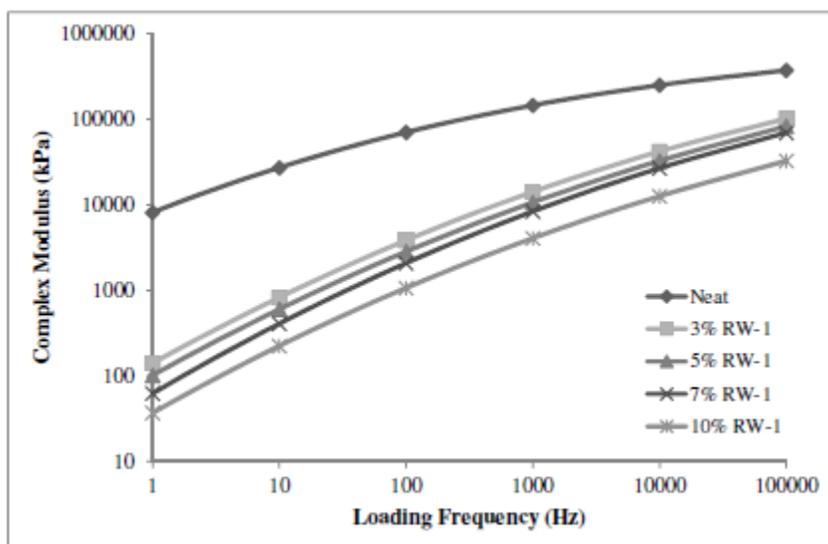


Figura 29. Resumen de los resultados para la curva maestra de ligantes modificados con diferentes concentraciones de aceite en base a residuos. Fuente: *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders* (Golalipour, 2013).

Conclusiones

En este estudio se indica que la adición de aceites modificadores cambia el comportamiento reológico y térmico del ligante asfáltico. Los resultados muestran que la modificación con aceite puede mejorar las propiedades de baja temperatura debido a la reducción de la rigidez, lo que a su vez perjudica el comportamiento a altas temperaturas del ligante.

3.5.3. ASFALTOS MODIFICADOS CON ESTIRENO BUTADIENO ESTIRENO (SBS)

El estireno butadieno estireno (SBS) es probablemente el polímero más ampliamente usado en el mundo para la modificación de ligante asfáltico, dado que mejora sus propiedades elásticas. A continuación, se revisan los principales tópicos relacionados con la modificación de asfalto con SBS.

3.5.3.1. Estireno butadieno estireno (SBS)

El SBS corresponde a un copolímero en bloque termoplástico obtenido a partir de la polimerización de dos monómeros, los cuales son estireno ($C_6H_5CH=CH_2$) y 1,3-butadieno ($CH_2=CHCH=CH_2$) como se aprecia en la figura 30. El estireno es un hidrocarburo aromático, formado por un anillo de benceno y un sustituyente etileno. El 1,3-butadieno, llamado simplemente butadieno, es un alqueno que se produce en la destilación del petróleo (Encyclopedia, 2019) .

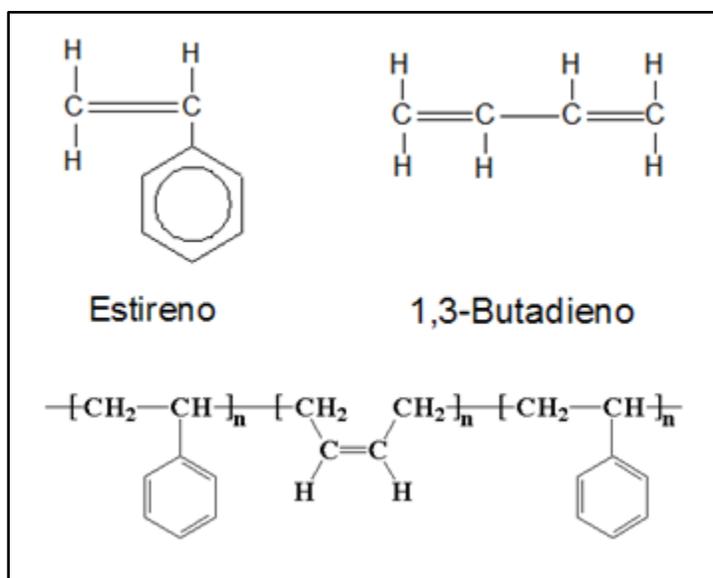


Figura 30. Estructura química del estireno butadieno estireno (SBS). Fuente: Styrene Butadiene Styrene (Encyclopedia, 2019).

Como se dijo anteriormente el SBS es un copolímero en bloque. Su cadena principal está constituida por tres segmentos, el primero es una cadena de poliestireno, el segmento del medio es una larga cadena de polibutadieno, y el último es otra sección de poliestireno, como se aprecia en la figura 31. El poliestireno es un plástico duro y resistente, que le da al SBS su durabilidad, en cambio el polibutadieno es un material parecido al caucho y le confiere al SBS sus características elásticas (Tecnología de los Plásticos, 2018).

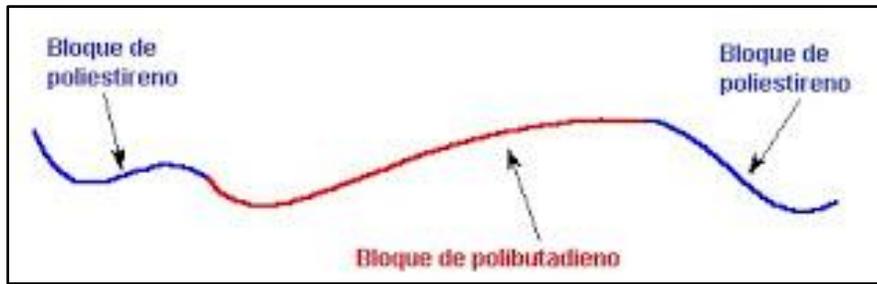


Figura 31. Estructura polímero SBS en bloque. Fuente: SBS (Tecnología de los Plásticos, 2018).

El SBS se obtiene por medio de una polimerización aniónica viviente, lo que significa que la polimerización ocurre sin reacciones de terminación, es decir, que una vez que el monómero reactor ha sido agotado y se ha transformado en un polímero, las cadenas poliméricas aún se encuentran activas, y eventualmente si se incorporará más monómero dentro del reactor, se añadiría al polímero, haciéndolo más grande.

A continuación, se describe el proceso de polimerización del SBS (Tecnología de los Plásticos, 2018):

1. Como se muestra en la figura 32, para obtener una cadena de poliestireno viviente se polimeriza un monómero estireno con un iniciador aniónico, como lo es el butil litio.

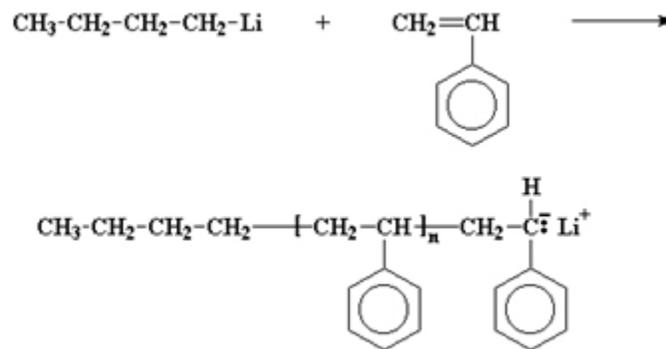


Figura 32. Etapa 1 del proceso de polimerización del SBS. Fuente: SBS (Tecnología de los Plásticos, 2018).

2. Como se muestra en la figura 33, al agregar el segundo monómero (butadieno), este se adicionará al polímero existente.

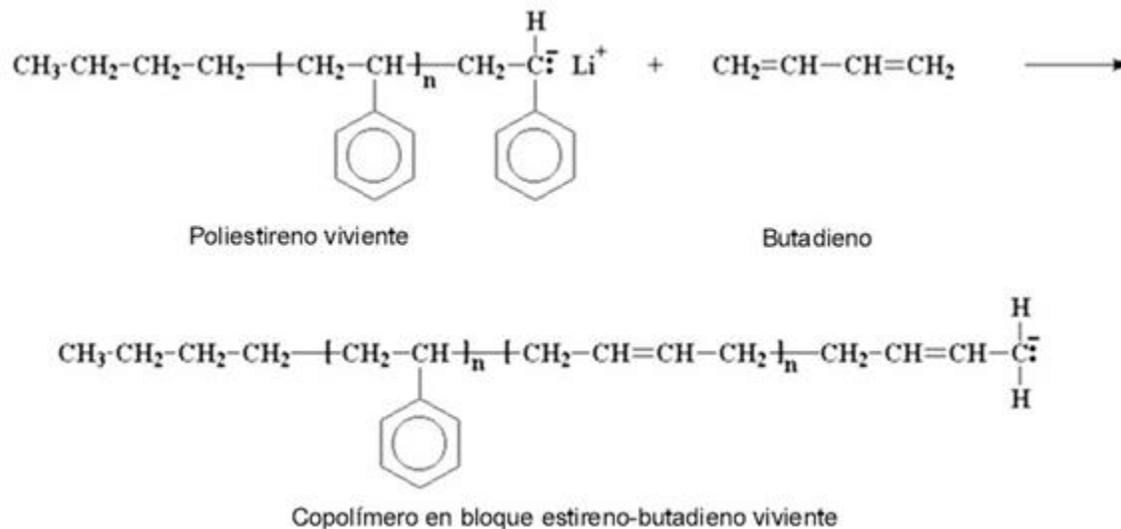


Figura 33. Etapa 2 del proceso de polimerización del SBS. Fuente: SBS (Tecnología de los Plásticos, 2018).

3. Como se muestra en la figura 34, esto da como resultado un copolímero en bloque de estireno butadieno vivo. El cual se hace reaccionar con un compuesto llamado diclorodimetilsilano.

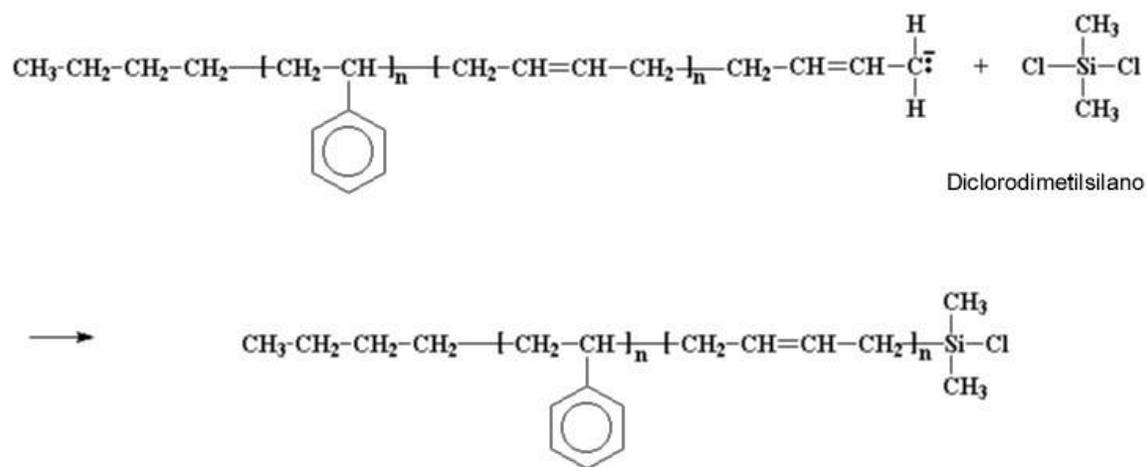


Figura 34. Etapa 3 del proceso de polimerización del SBS. Fuente: SBS (Tecnología de los Plásticos, 2018).

4. La cadena aniónica viva expulsa un átomo de cloro del silano, obteniéndose un polímero terminado en un clorosilano, lo que significa que este ya no es un polímero vivo. Con esto se consigue que un nuevo poliestireno vivo, que se obtiene de igual forma que la mencionada en (1), reaccione con el polímero terminado en clorosilado, de la

misma manera que lo hizo anteriormente el copolímero estireno butadieno con el diclorodimetilsilano. Esto da como resultado un copolímero de estireno butadieno estireno (SBS) en tribloque, como se muestra en la figura 35.

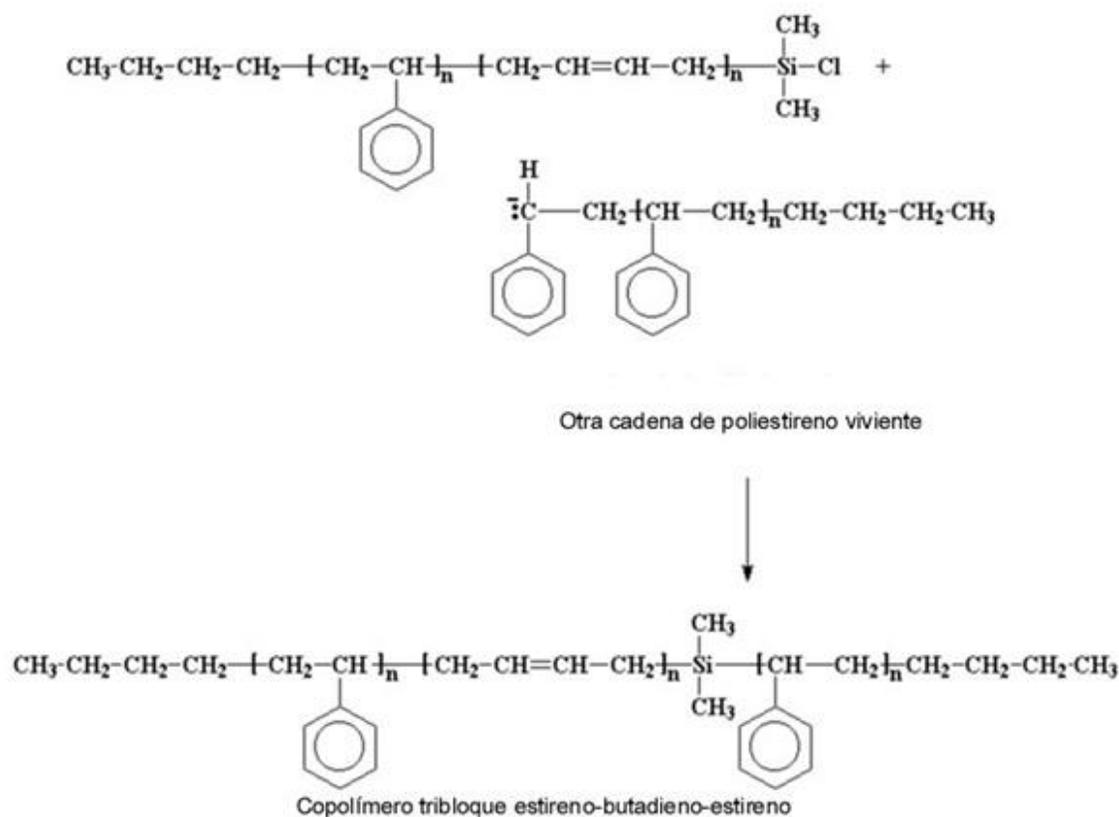


Figura 35. Etapa 4 del proceso de polimerización del SBS. Fuente: SBS (Tecnología de los Plásticos, 2018).

3.5.3.2. Mecanismos de interacción entre asfalto y estireno butadieno estireno (SBS)

El éxito de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros se origina de la habilidad de ciertos polímeros de influenciar y mejorar fuertemente las propiedades reológicas del asfalto, incluso si se agregan pequeñas cantidades de polímero. Sin embargo, esta característica esencial no se obtiene inmediatamente cuando se mezcla un polímero con asfalto, el mejoramiento de las características del asfalto es posible únicamente cuando se logra la llamada "fase de inversión", y se obtiene una apropiada morfología de la mezcla, que esto se pueda realizar o no depende de las interacciones entre los componentes del asfalto y el polímero.

Los componentes del asfalto presentan diferentes polaridades y por lo tanto interactúan de manera diferente con el polímero. Generalmente se produce un hinchamiento selectivo del SBS por parte de las moléculas más afines, conduciendo a la formación de una fase abundante en SBS y una fase residual abundante en asfaltenos, evidenciando la naturaleza bifásica de la mezcla.

Cuando el SBS es hinchado por una pequeña cantidad de moléculas de asfalto, la fase abundante en SBS se presenta dispersa en una matriz de la fase abundante en asfaltenos, y en general las propiedades no difieren mucho del asfalto sin modificar. En contraste, cuando el grado de hinchamiento es suficiente, la fase abundante en SBS se vuelve una fase continua, esto corresponde a la antes mencionada fase de inversión, donde el SBS tiene una fuerte influencia en las propiedades reológicas del asfalto. Cabe señalar que no es una situación ideal que se produzca el hinchamiento completo del polímero, porque a pesar de que la fase rica en asfaltenos desaparezca, viene acompañado de la destrucción de la red polimérica, y por lo tanto de la pérdida las propiedades mecánicas mejoradas del ligante asfáltico.

En la figura 36 se esquematiza de forma cuantitativa el efecto del hinchamiento del SBS sobre las propiedades mecánicas del ligante asfáltico. Se puede dividir el gráfico en dos zonas, a la izquierda corresponde a la zona de inestabilidad de almacenamiento, en cambio cuando se ha alcanzado el estado de solubilidad completa, se entra en una zona de estabilidad de almacenamiento, que se ubica a la derecha del gráfico. El objetivo de una modificación con polímero debe ser alcanzar una zona considerada ideal, debido a que se combina el mejoramiento de las propiedades mecánicas del ligante, con una mezcla que presenta estabilidad de almacenamiento.

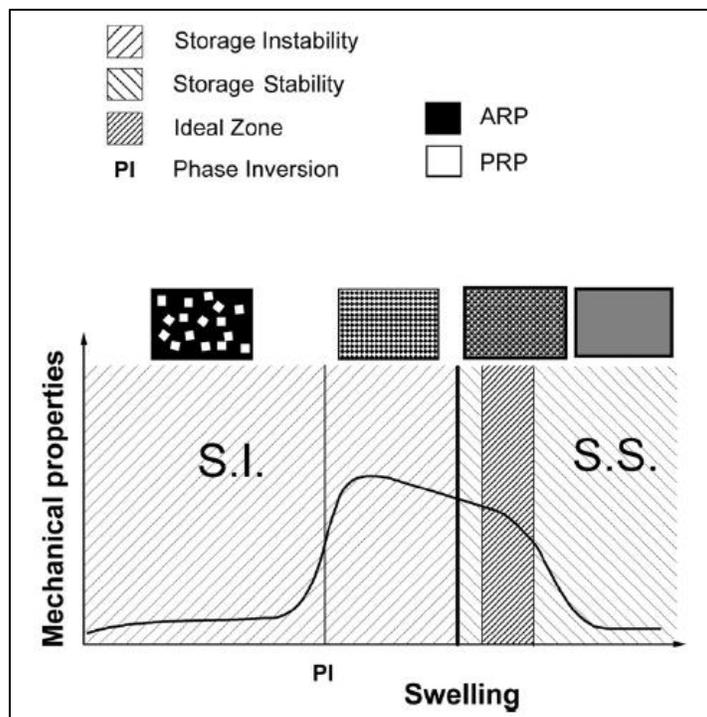


Figura 36. efecto cuantitativo del hinchamiento del SBS sobre las propiedades mecánica del ligante asfáltico. Fuente: *A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: asphalt/polymer interactions and principles of compatibility* (Polacco, Filippi, Mesuri, & Stastna, 2015).

Es importante recordar que el tiempo de mezclado debe ser lo más bajo posible, no solo por motivos de costo, sino también porque el proceso de mezclado involucra altas temperaturas y alto esfuerzo de corte, lo cual induce envejecimiento y degradación tanto en el asfalto como en el polímero (Polacco, Filippi, Mesuri, & Stastna, 2015).

Ahora bien, cuando el SBS es adicionado por medio de agitación mecánica al ligante asfáltico, el cual se encuentra a temperaturas cercanas a 180°C, ocurren algunas interacciones químicas entre ambos materiales. Estudios anteriores (Masson, Collins, Robertson, Woods, & Margeson, 2003) han reportado que las interacciones intermoleculares entre el ligante y los bloques de polibutadieno son más fuertes que las interacciones con los bloques de poliestireno del SBS. Se cree que el polibutadieno interactúa con los componentes del ligante con carga positiva a través de sus π -electrones, mientras que el poliestireno interactúa con los componentes del ligante abundantes en electrones por medio de sus protones aromáticos. Los bloques de polibutadieno presentes en el SBS absorben las fracciones más ligeras de los maltenos, siendo estas los saturados y aromáticos, como ya se mencionó anteriormente es ideal que se formen dos fases continuas interconectadas, una fase abundante en asfaltenos y una fase abundante en SBS, la cual a su vez se subdivide en una matriz de polibutadieno que ha sido hinchado, y poliestireno esencialmente en su estado puro. Una vez que la fase abundante en SBS se forme, una red de propiedades elástica es creada en el ligante modificado, teniendo como resultado el incremento del módulo complejo y de la viscosidad de este (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014) .

3.5.3.3. Experiencias de modificación de ligante asfáltico con SBS

“Correlation of polymer modification to mechanical properties of binders” (Metha, y otros, 2012)

Plan de modificación y ensayos

Este estudio tiene por objetivo entender de mejor manera la relación entre el tipo de polímero y la concentración de este, mediante el grado de desempeño PG del ligante modificado. Se adopta el siguiente procedimiento para el mezclado:

1. Calentar un cuarto de galón del ligante base escogido a 190°C.
2. Comenzar a mezclar utilizando un mezclador de alto corte, manteniendo una velocidad de 2.500 - 3.500 rpm.
3. Después de 20 minutos comenzar a añadir lentamente el polímero, no superando los 5 gramos por minuto.

4. Continuar mezclando por dos horas después de añadir la totalidad del polímero, manteniendo una temperatura de 190°C y una velocidad cercana a 3.000 rpm.

Se utilizaron ligantes sin modificar, provenientes de cuatro refinerías (R1, R2, R3, R4), además de ligantes modificados de tres refinerías (R1, R2, R3). También se obtuvieron ligantes modificados en laboratorio, utilizando SBS (K), termopolímero de etileno (E) y ácido polifosfórico (PPA) en distintos porcentajes.

A los ligantes estudiados se le realizaron los ensayos correspondientes a caracterización PG de la norma AASHTO M320-01, recuperación elástica y MSCR. En la tabla 11 se presenta el plan de ensayos realizado para la investigación.

Tabla 11. Fuentes de ligantes asfálticos y matriz de ensayos.

Binder	Source	AASHTO M-320	ER	MSCR
R1 64-22	Refinery 1	XX	XX	
R1 70-22	Refinery 1	XX	XX	XX
Kraton R1 BD	Refinery 1	XX	XX	XX
R1 76-22	Refinery 1	XX	XX	XX
R1 76-22 Tank 1007	Refinery 1	XX	XX	XX
R2 76-22	Refinery 2	XX	XX	XX
R3 76-28	Refinery 3	XX	XX	XX
R1 82-22	Refinery 1	XX	XX	
R1 82-22 Tank 73	Refinery 1	XX	XX	XX
R1 Stavola	Refinery 1	XX	XX	XX
CRM v=2900	NJDOT	XX	XX	
CRM v=3200	NJDOT	XX	XX	XX
R4 937, 1.5% K	In-House	XX	XX	XX
R1 64-22, 1.5% E, 0.8% PPA	In-House	XX	XX	XX
R1 64-22, 1.5% E	In-House	XX	XX	
R1 64-22, 2.5% E	In-House	XX	XX	XX
R1 64-22, 5% E	In-House	XX		XX
R1 64, 1% K	In-House	XX		XX
R1 64, 1.5% K	In-House	XX	XX	
R1 64, 2% K	In-House	XX		
R1 64, 3% K	In-House	XX	XX	XX
R1 64, 4.5% K	In-House	XX	XX	XX
R1 64, 5% K	In-House	XX	XX	XX
R1 64, 7% K	In-House	XX	XX	XX

Fuente: Correlation of Polymer Modification to Mechanical Properties of Binders (Metha, y otros, 2012).

Cabe señalar que todos los ligantes modificados en laboratorio, provienen de ligantes bases PG64-22, además, debido a que no se conoce la clasificación de los ligantes bases a partir de los cuales fueron obtenidos los ligantes modificados en refinería, es que todos los ligantes son ensayados a 64°C.

Resultados

A partir del ensayo MSCR, se obtienen los siguientes resultados para la Flexibilidad en fluencia no recuperable ($J_{nr,3,2}$ [kPa⁻¹]), los cuales se observan en la tabla 12 y figura 37.

Tabla 12. Clasificación por grado de desempeño de los ligantes modificados basado en la norma AASHTO MP19-01.

Binder	J_{nr} (1/kPa) (3.2 kPa)	PG 64-YY
R1 70-22	0.05	Extreme (E)
Kraton R1 BD	0.01	Extreme (E)
R1 76-22	0.18	Extreme (E)
R1 76-22 TANK 1007	0.53	Very Heavy (V)
R2 76-22	0.11	Extreme (E)
R3 76-28	0.07	Extreme (E)
76-28 Rt 295	0.23	Extreme (E)
R1 82-22 Tank 73	0.13	Extreme (E)
R1 Stavola	0.13	Extreme (E)
CRM v=3200	0.09	Extreme (E)
R4 937, K	3.31	Standard (S)
R1 64-22, 1.5% E, 0.8% PPA	0.34	Extreme (E)
R1 64-22, 1.5% E	1.18	Heavy (H)
R1 64-22, 2.5% E	1.16	Heavy (H)
R1 64-22, 5% E	0.63	Very Heavy (V)
R1 64, 1.5% K	1.49	Heavy (H)
R1 64, 3% K	0.75	Very Heavy (V)
R1 64, 4.5% K	0.33	Extreme (E)
R1 64, 5% K	0.63	Very Heavy (V)
R1 64, 7% K	0.29	Extreme (E)
76-22 3/10/10	0.35	Extreme (E)

Fuente: Correlation of Polymer Modification to Mechanical Properties of Binders (Metha, y otros, 2012).

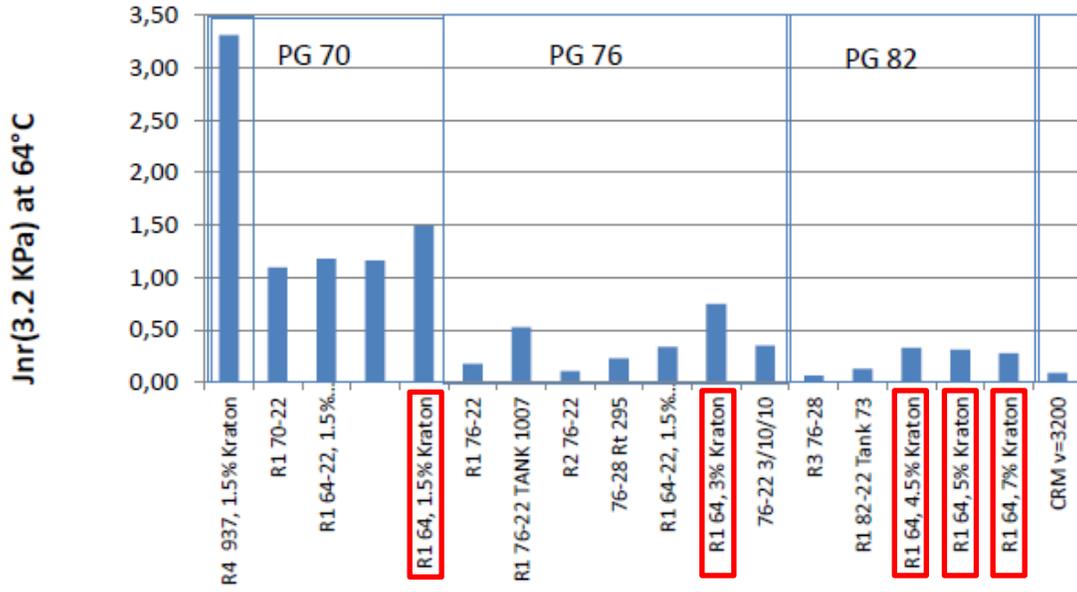


Figura 37. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 64°C. Fuente: Correlation of Polymer Modification to Mechanical Properties of Binders (Metha, y otros, 2012).

Además del ensayo MSCR, se obtienen los resultados expuestos en la figura 38 para el porcentaje de recuperación ($R\%_{3,2}$).

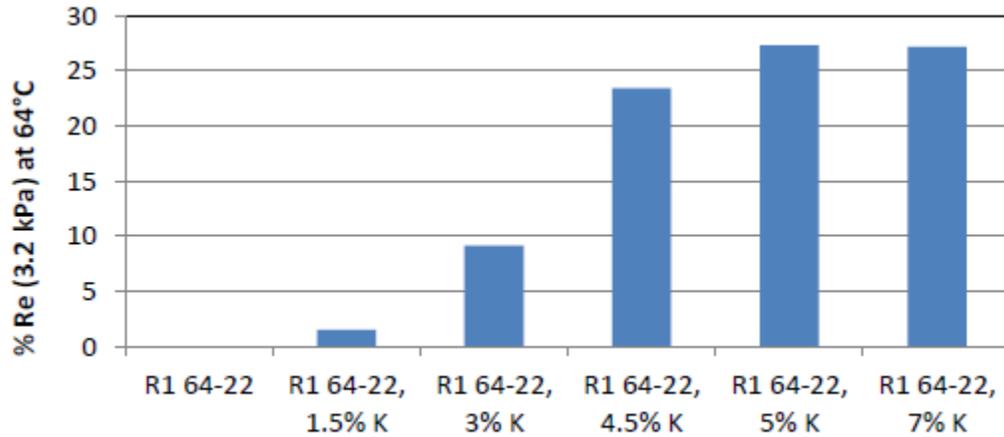


Figura 38. Porcentaje de recuperación a 64°C para ligantes asfálticos modificados con Kraton. Fuente: Correlation of Polymer Modification to Mechanical Properties of Binders (Metha, y otros, 2012).

Para los ligantes modificados con SBS, se produce un aumento de un grado PG de alta temperatura, con respecto al ligante base, para una concentración 1,5% de polímero. Cuando el porcentaje de polímero aumenta a 3% se produce un aumento de dos grados PG de alta temperatura, para concentraciones de 4,5% y superiores se produce un aumento de tres grados PG, evidenciándose un estancamiento en el aumento de temperatura.

Para los valores de flexibilidad en fluencia no recuperable ($J_{nr,3,2}$) se observa una disminución considerable hasta el 4,5% de SBS, para luego mantenerse prácticamente constantes. De igual forma hasta el 4,5% de SBS se produce un incremento del porcentaje de recuperación, manteniéndose casi contante para porcentajes de SBS más elevados.

Para el ensayo de recuperación elástica se obtienen los resultados que se muestran en la figura 39. Produciéndose un incremento de esta hasta una concentración de 3% de SBS, porcentaje a partir del cual permanece prácticamente constante.

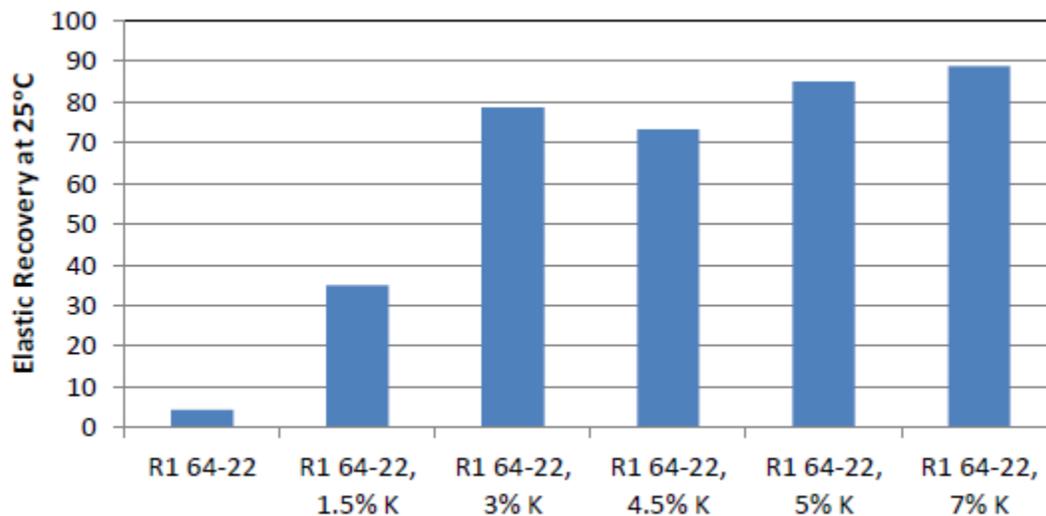


Figura 39. Recuperación elástica a 25°C para ligantes asfálticos modificados con Kraton. Fuente: *Correlation of Polymer Modification to Mechanical Properties of Binders* (Metha, y otros, 2012).

Conclusiones

Se concluye que ligantes modificados con distintos polímeros, pero con grados PG similares, presentan resultados distintos para el ensayo MSCR, esto se debe a que los ensayos Superpave se realizan a bajos niveles de esfuerzo. Por lo tanto, los parámetros entregados por el ensayo MSCR, es decir el porcentaje de recuperación y a la flexibilidad en fluencia no recuperable, tienen el potencial de ser usados para desarrollar una nueva especificación para asfaltos modificados con polímeros.

“A study to evaluate the Effects of SBS Polymer Modification on the True Grade of an Asphalt Binder” (Davidson, Nolan, & Metha, 2014)

Plan de modificación y ensayos

En esta investigación se utiliza polímero SBS, específicamente Kraton D1101 K, el cual presenta una estructura lineal en tribloque con un 31% de poliestireno, en formato de pellet poroso. El proceso de mezclado se realiza a una temperatura constante de 190°C, buscando mantener la velocidad de mezclado lo más cercana posible a 3.000 rpm. Se realizan dos mezclas, la primera de ellas con una concentración de 2% SBS, la cual es mezclada durante 240 minutos, en cambio la segunda de ellas corresponde a una mezcla con una concentración de 4% SBS, que es mezclada durante 120 minutos.

A los ligantes estudiados se le realizan los ensayos correspondientes a caracterización PG de la norma AASHTO M320-11, recuperación elástica y MSCR.

Resultados

A continuación, en las figuras 40 y 41, se presentan los valores obtenidos para los ensayos correspondientes a la clasificación PG, tanto para alta como para baja temperatura. Donde la tendencia de los datos muestra que, con el incremento de la cantidad de polímero, se produce un aumento en la temperatura exacta alta y baja de la clasificación PG.

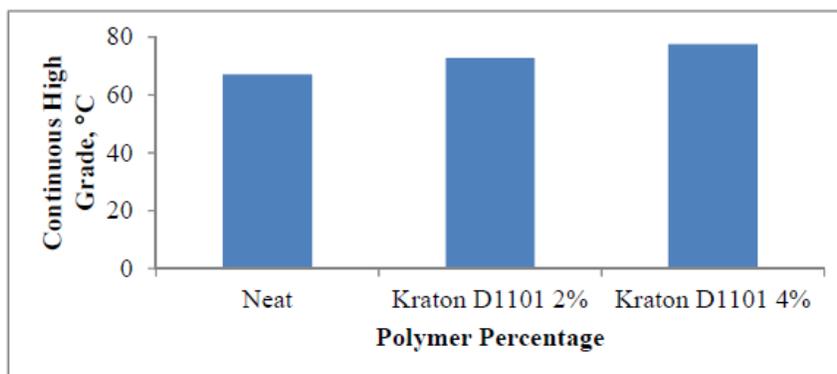


Figura 40. Grado exacto de temperatura crítica alta para ligantes asfálticos modificados con polímero. Fuente: Study to Evaluate the Effects of SBS Polymer Modification on the True Grade of an Asphalt Binder (Davidson, Nolan, & Metha, 2014).

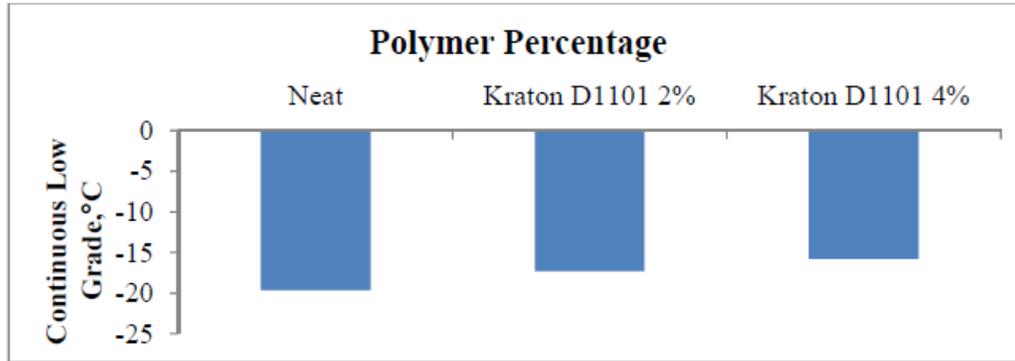


Figura 41. Grado exacto de temperatura crítica baja para ligantes asfálticos modificados con polímero. Fuente: Study to Evaluate the Effects of SBS Polymer Modification on the True Grade of an Asphalt Binder (Davidson, Nolan, & Metha, 2014).

A partir del ensayo MSCR, se obtienen para la Flexibilidad en fluencia no recuperable ($Jnr_{3,2}$ [kPa^{-1}]), los resultados que se muestran en la figura 42.

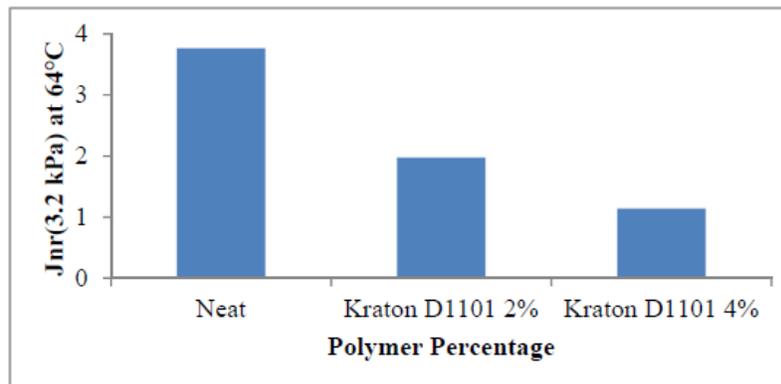


Figura 42. Flexibilidad en fluencia no recuperable. Fuente: Study to Evaluate the Effects of SBS Polymer Modification on the True Grade of an Asphalt Binder (Davidson, Nolan, & Metha, 2014).

Tabla 13. Grado del ligante basado en AASHTO M332-11.

Binder	Binder grade	Traffic (ESALS)
Neat	64-22 S	S < 3 million
2 % Kraton D1101	64-22 H	H < 10 million (>3 million)
4% Kraton D1101	64-22 V	V > 19 million (<30 million)

Fuente: Study to Evaluate the Effects of SBS Polymer Modification on the True Grade of an Asphalt Binder (Davidson, Nolan, & Metha, 2014).

Los datos muestran que, al aumentar el porcentaje de polímero, la flexibilidad en fluencia no recuperable disminuye. En la tabla 13 se muestra el grado del ligante según la clasificación por clima de la norma AASHTO M332-11, estos resultados señalan que la adición de polímero está correlacionada con un incremento en la resistencia al ahueamiento del ligante asfáltico.

En la figura 43 se pueden observar los resultados para el ensayo de recuperación elástica, la cual muestra un aumento a medida que la concentración de polímero se incrementa.

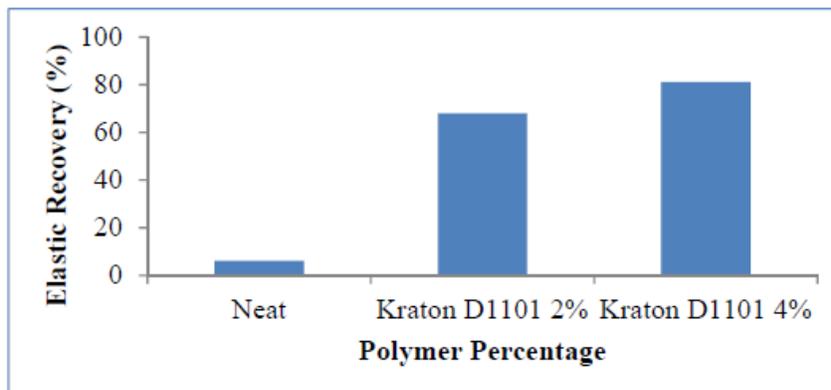


Figura 43. Recuperación elástica a 25°C. Fuente: Study to Evaluate the Effects of SBS Polymer Modification on the True Grade of an Asphalt Binder (Davidson, Nolan, & Metha, 2014).

Conclusiones

Los valores obtenidos indican que la modificación con SBS afecta significativamente el grado PG de los ligantes, y puede tener un impacto negativo en el grado de baja temperatura de este. Los resultados también muestran que la modificación del ligante reduce el valor de la flexibilidad en fluencia no recuperable, indicando que el ligante tiene un mejor desempeño frente al ahuellamiento, a medida que la concentración de SBS aumenta.

“Rheological Properties of the Polymer Modified Bitumen with Emphasis on SBS Polymer and its Microstructure” (Zorn, y otros, 2011)

Plan de modificación y ensayos

Este estudio tuvo por objetivo evaluar la influencia de la composición química en las propiedades mecánicas de asfaltos modificados con diferentes polímeros. Los cuales fueron preparados usando un ligante base PG64-22, y modificadores como SBS Kraton D1101, Evaloy AM y Evaloy con ácido polifosfórico.

El ligante fue separado en Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos, los cuales son llamados fracciones SARA. El procedimiento fue efectuado de acuerdo a la norma ASTM D4124-01, utilizando n-Heptano. El análisis SARA fue realizado tanto en los asfaltos modificados con polímeros como el asfalto sin modificar, para luego comparar la composición química, especialmente de los asfaltos modificados, con las propiedades mecánicas, representadas por el valor de Jnr.

Resultados

En la tabla 14 se presentan los resultados obtenidos para el análisis SARA, como para el ensayo MSCR.

Tabla 14. Resumen de los resultados de los ensayos.

Binder	Modifier	SARA analysis (wt %)				J _{nr} (kPa)	Molecular weight (g/mol)	Elastic Recovery (%)
		S	A	R	As			
PG 64-22 (NuStar)	Base binder	26.39	26.39	9.72	30.00	3.16(S)	2750	4.40
PG 64-22 (NS)	1.5% Elvalov AM	4.17	72.92	4.17	18.75	1.18(H)	Not available	48.75
PG 64-22 (NS)	2.5% Elvalov AM	9.72	43.06	13.89	25.00	1.16(H)	Not available	62.50
PG 64-22 (NS)	1.5% Elvalov AM+0.8% PPA	28.00	36.00	16.00	16.00	0.33(E)	Not available	60.63
PG 64-22 (Valero)	1.5% Kraton D 1101 (SBS)	21.33	41.33	9.33	12.00	3.31(S)	248,000	28.50
PG 64-22 (NS)	1.5% Kraton D 1101 (SBS)	18.67	42.67	10.67	20.00	1.49(H)	215,000	35.00
PG 64-22 (NS)	3.0% Kraton D 1101 (SBS)	20.83	37.50	16.67	25.00	0.75(V)	234,000	78.50
PG 64-22 (NS)	4.5% Kraton D 1101 (SBS)	8.33	58.33	8.33	22.92	0.33(E)	239,000	73.13
PG 64-22 (NS)	5.0% Kraton D 1101 (SBS)	4.86	52.78	11.11	31.25	0.63(V)	235000	85.00

Fuente: *Rheological Properties of the Polymer Modified Bitumen with Emphasis on SBS Polymer and its Microstructure* (Zorn, y otros, 2011).

En los resultados obtenidos se observa que en general a mayor concentración de SBS se genera una disminución del valor de flexibilidad en fluencia no recuperable (J_{nr}), y un incremento del porcentaje de recuperación, a excepción del valor obtenido para 4% de SBS. Además, se observa que el valor de J_{nr}, para un mismo porcentaje de SBS (1,5%), varía según el origen del asfalto.

Conclusiones

El SBS ha mostrado tener el mejor potencial para mezclarse con el ligante asfáltico, en comparación a los otros modificadores. Un alto contenido de resinas y aromáticos en el asfalto significa una alta habilidad de solvencia y por lo tanto una mejor movilidad de las micelas de

asfaltenos. La estructura química del SBS y su polaridad lo hacen adecuado para mezclarse con un amplio número de asfaltos, sin presentar problemas de solubilidad o segregación.

“Durability Study: Field experience of long-term evolution of SBS polymer modified binder” (Dreessen, Gallet, Dumont, & Pittet, 2012)

Condiciones de servicio

En el año 1988, en la región suiza de Valais, se realizó la pavimentación de un tramo de la carretera A9, durante este proyecto se desarrollaron dieciséis secciones de prueba, de 300 metros cada una, de las cuales son de interés para este estudio la sección 11 pavimentada con Styrelf 13/80 (asfalto modificado con SBS), además de la sección de control pavimentada con ligante 80/100.

El área en estudio presenta un promedio anual de 24.000 vehículos por día desde 1988 hasta 2007, año en que fue retirado el pavimento. El tráfico de vehículos pesados representa solo el 6% del tránsito en general, lo que corresponde a 830 ejes equivalentes.

El área bajo revisión posee condiciones climáticas con largos periodos soleados (270 días por año con temperaturas alrededor de 15°C), además de periodos de condiciones extremas de frío (bajo -10°C) y días con una razón de enfriamiento muy rápida (5°C/h).

El diseño del pavimento utilizado presenta la estructura que observa en la figura 44.

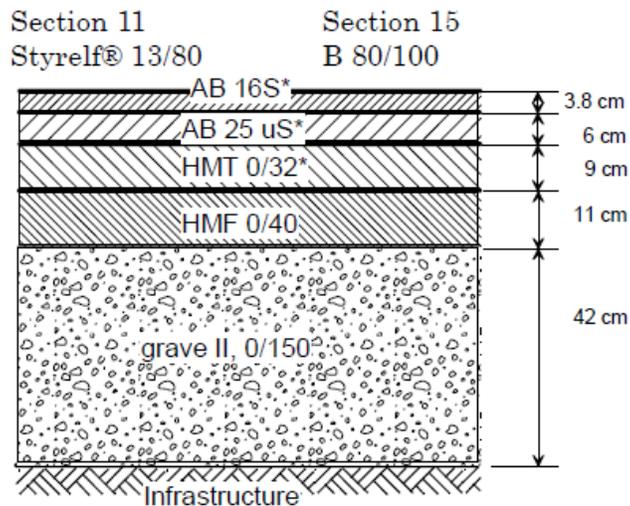


Figura 44. Estructura del pavimento de la autopista. Fuente: Durability study: Field experience of long-term evolution of SBS polymer modified binder (Dreessen, Gallet, Dumont, & Pittet, 2012).

Resultados

Se realizaron ensayos de laboratorio en muestras obtenidas después de 2, 4, 8, 14 y 19 años de servicio. Cuando estas fueron retiradas, un protocolo específico fue utilizado para limitar los cambios que se pudieran producir en la mezcla durante el proceso de extracción. Las muestras fueron calentadas en un horno a temperatura de 80°C, luego el proceso de recuperación del ligante asfáltico se realizó usando tolueno, siguiendo el procedimiento especificado en la normativa suiza.

El ligante fue caracterizado usando ensayos tradicionales, BBR y el ensayo de recuperación elástica. Además, con el fin de caracterizar químicamente la composición de los ligantes recuperados es que se realizó espectroscopia infrarroja (FTIR), para monitorear los niveles de oxidación y la cantidad monómeros presentes en el ligante.

En la figura 45 se presentan los resultados para el ensayo BBR, donde es posible observar que se produce un incremento, en ambos ligantes, de la temperatura para la cual la rigidez $S(t)$ es igual a 300 [MPa], para el ligante sin modificar el aumento es de 12° al cabo de 14 años de servicio, mientras que para el ligante modificado con SBS el aumento es de tan solo de 4°C. Además, los valores de m muestran un menor riesgo de agrietamiento térmico para el ligante modificado.

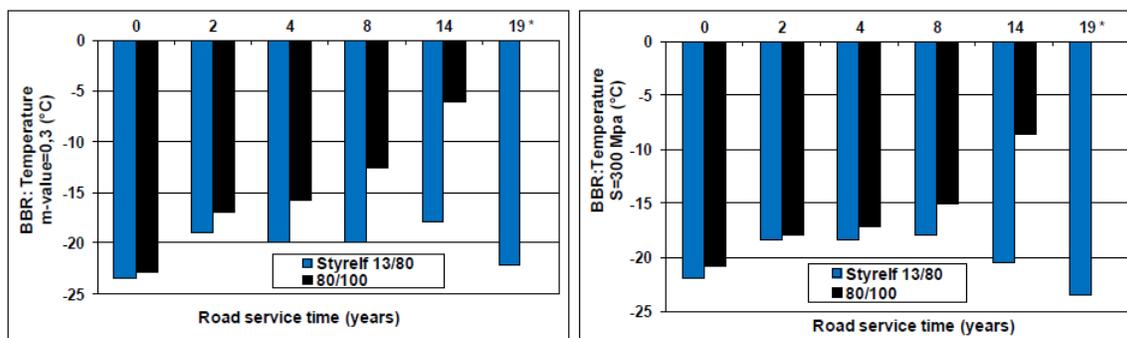


Figura 45. Evolución de la temperatura que limita la rigidez y el valor m en el ensayo BBR. Fuente: Durability study: Field experience of long-term evolution of SBS polymer modified binder (Dreessen, Gallet, Dumont, & Pittet, 2012).

La recuperación elástica del ligante modificado con SBS, como se muestra en la figura 46, permanece en un nivel alto durante los 19 años de servicio del pavimento, se produce una pérdida de solo 13%, mostrando el ligante asfáltico una buena y durable habilidad de relajación a 25°C.

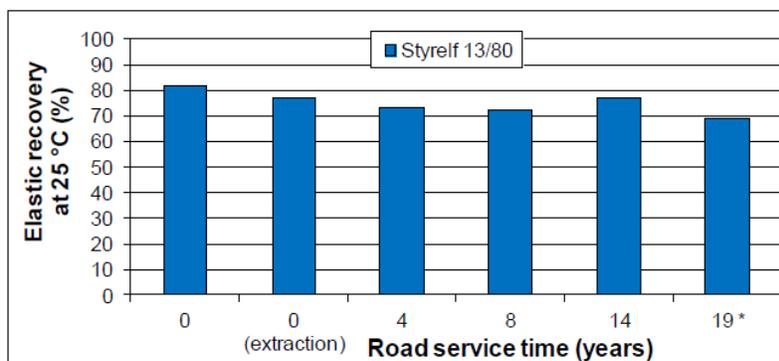


Figura 46. Evolución de la recuperación elástica a 25°C. Fuente: Durability study: Field experience of long-term evolution of SBS polymer modified binder (Dreessen, Gallet, Dumont, & Pittet, 2012).

Una de las características primordiales del envejecimiento del ligante es su endurecimiento, el cual es posible explicar por la formación de grupos polares, como lo son grupos carbonilos o sulfóxidos, causados por la oxidación producto del ambiente, los valores de dichos grupos son calculados desde los espectros FTIR. En la figura 47 es posible observar que la incorporación de SBS al ligante limita moderadamente los niveles de oxidación.

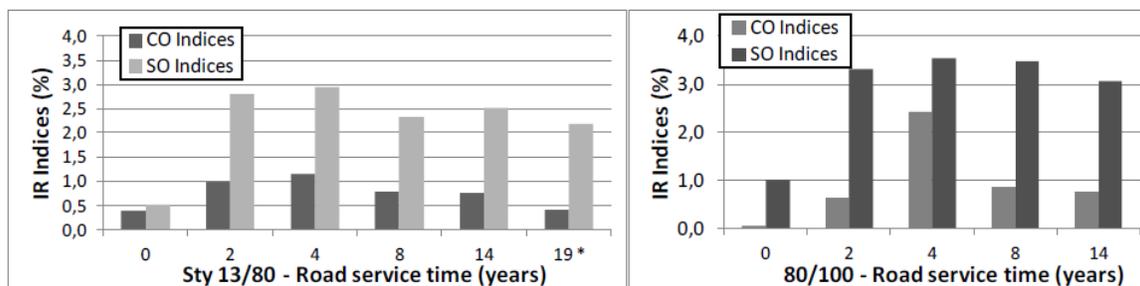


Figura 47. Evolución de los niveles de oxidación. Fuente: Durability study: Field experience of long-term evolution of SBS polymer modified binder (Dreessen, Gallet, Dumont, & Pittet, 2012).

Los valores de monómeros estireno y butadieno fueron determinados usando valores de transmisión de 700 [cm⁻¹] y 965 [cm⁻¹], de acuerdo a las secciones del espectro infrarrojo. En la figura 48 se muestran los valores obtenidos, donde se observa un ligero decrecimiento de la cantidad de monómeros presentes en el ligante durante su periodo de servicio.

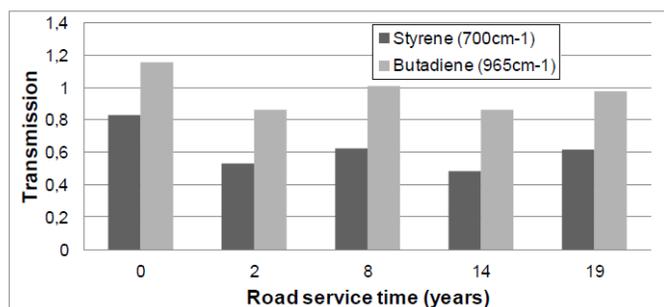


Figura 48. Evolución del contenido de polímero medido por FTIR. Fuente: Durability study: Field experience of long-term evolution of SBS polymer modified binder (Dreessen, Gallet, Dumont, & Pittet, 2012).

Conclusiones

Las propiedades elásticas del ligante modificado con SBS se mantienen a través del tiempo en un nivel alto en relación con el valor determinado para el ligante sin modificar, es por esto que se puede concluir que la red polimérica se mantiene activa durante toda la vida de servicio después de diecinueve años.

“Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing” (Greene, Choubane, & Chun, 2013)

Objetivos y alcances del estudio

Durante el año 2001 en Florida, el departamento de transportes condujo un estudio que tiene por objetivo evaluar la resistencia al ahuellamiento y al agrietamiento por fatiga de tres tipos de ligante asfáltico: (1) un ligante modificado con polímero PG82-22 (6% SBS), (2) un ligante modificado con polímero PG76-22 (3% SBS), (3) un ligante sin modificar PG67-22. Para permitir una evaluación más rápida y práctica bajo una precisa simulación de las condiciones de servicio, es que se realizó el ensayo “Accelerated Pavement Testing” (APT), que consiste en una aplicación controlada de carga, por medio de una rueda real, en el cual, a través de un sistema de monitoreo, es posible cuantificar la acumulación de daño a largo plazo en un tiempo mucho más corto.

Tres carriles de prueba, cada uno de 12 pies de ancho y 150 pies de largo, fueron triturados y repavimentados para realizar la sección del estudio enfocada en la resistencia al ahuellamiento. Cada carril fue repavimentado con dos capas de 2 pulgadas de espesor cada una, de mezcla asfáltica Superpave con un tamaño máximo nominal de los agregados de 12,5 [mm] y con un 5,1% de ligante asfáltico, cabe señalar que las mezclas asfálticas utilizadas en cada carril fueron similares, variando solo el tipo de ligante utilizado. Durante el ensayo de ahuellamiento, el pavimento fue calentado a 50°C y transitado por un neumático de 455 [mm] de ancho, inflado con 100 [psi] y cargado con 9.000 libras, una rueda de desplazamiento de 4 pulgadas fue usada para cada ensayo. La profundidad del ahuellamiento fue medida utilizando un perfilador láser.

Tres carriles adicionales de prueba fueron construidos para estudiar la resistencia al agrietamiento por fatiga, cada uno de 12 pies de ancho y 50 pies de largo, cada carril fue pavimentado directamente sobre un base granular, con dos capas de 1,5 pulgadas de espesor cada una, de mezcla asfáltica Superpave con un tamaño máximo nominal de los agregados de 12,5 [mm] y con un 5,1% de ligante asfáltico, las mezclas utilizadas en cada carril fueron similares, variando solo el tipo de ligante utilizado. Tres medidores de deformación fueron instalados en el fondo de la capa de asfalto, con el fin de medir la deformación longitudinal. Un neumático inflado

con 100 [psi] y cargado con 12.000 libras, fue usado para cargar cada carril de prueba sin el uso de una rueda de desplazamiento.

En la tabla 15 es posible observar la granulometría utilizada en las mezclas asfálticas realizadas, además en la figura 49 se detalla la estructura del pavimento de las pistas de prueba.

Tabla 15. Granulometría de las mezclas asfálticas.

Sieve Size	Job Mix Formula	PG67-22	PG76-22	PG82-22
¼ in. (19.0 mm)	100	100.0	100.0	100.0
½ in. (12.5 mm)	98	97.3	97.4	97.8
3/8 in. (9.5 mm)	88	86.3	86.1	86.6
No. 4 (4.75 mm)	59	57.8	57.4	57.5
No. 8 (2.36 mm)	40	39.2	38.5	39.1
No. 16 (1.18 mm)	29	28.7	27.9	28.4
No. 30 (600 µm)	22	22.1	21.4	21.7
No. 50 (300 µm)	12	13.2	12.8	13.0
No. 100 (150 µm)	4	4.9	4.7	5.0
No. 200 (75 µm)	2.0	2.8	2.7	2.8
% Asphalt Binder	5.1	4.9	4.8	4.7
% Air Voids at N _{des}	4.0	3.3	4.0	4.0

Fuente: Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing (Greene, Choubane, & Chun, 2013).

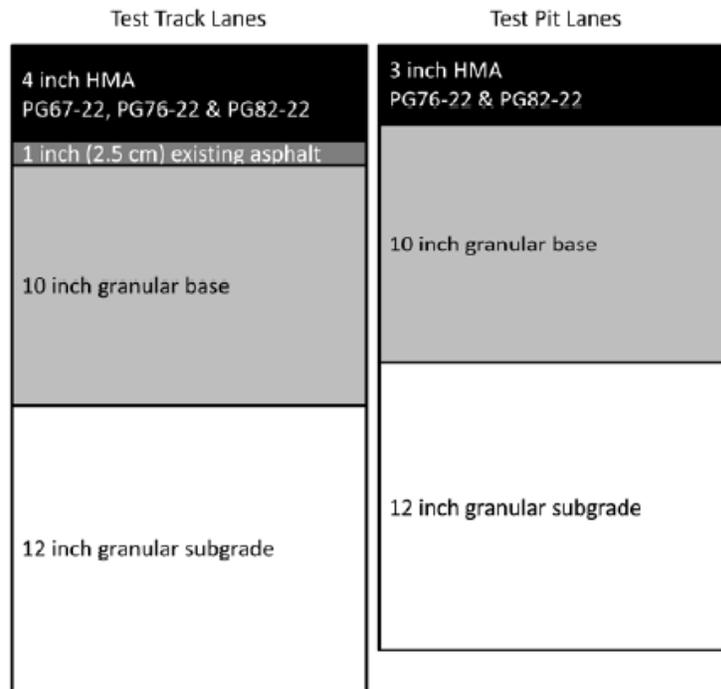


Figura 49. Estructura del pavimento. Fuente: Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing (Greene, Choubane, & Chun, 2013).

Resultados

Además de las pruebas en mezclas asfálticas, se caracterizaron las propiedades reológicas de los distintos ligantes utilizados. Se realizaron los ensayos de DSR, MSCR y Binder Fracture Energy.

Los ensayos en el DSR fueron realizados en ligante sin envejecer, a la temperatura que señala el grado de la clasificación PG para cada ligante. De acuerdo a la figura 50, el ligante PG82-22 exhibe el mayor potencial de resistencia al ahuellamiento, como lo indica el parámetro $G^*/\sin\delta$.

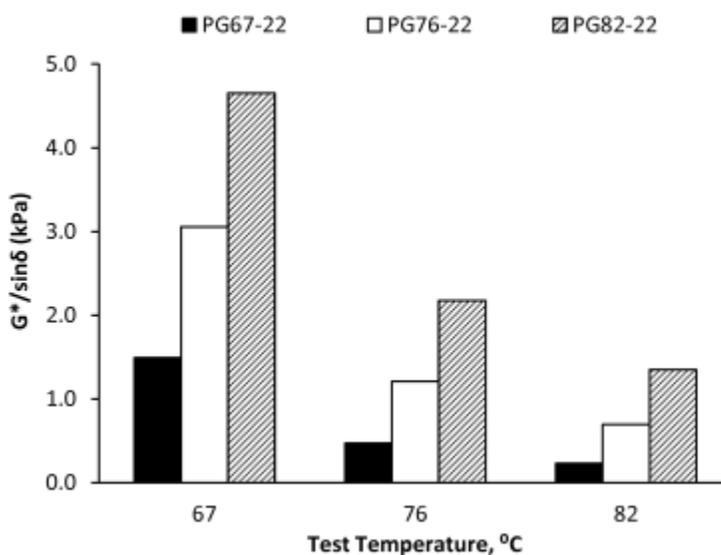


Figura 50. $G^*/\sin\delta$ para cada ligante asfáltico a distintas temperaturas. Fuente: *Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing* (Greene, Choubane, & Chun, 2013).

El ensayo MSCR fue realizado en el ligante, después de someterlo al proceso de envejecimiento primario (RTFO), a una temperatura de 64°C. Los asfaltos modificados con polímeros exhiben una mayor respuesta elástica, y poseen menor sensibilidad a los cambios en los niveles de esfuerzo, como se muestra en la figura 51. Además según lo expuesto en la figura 52 los asfaltos modificados exhiben un valor más bajo para la flexibilidad en fluencia no recuperable que el ligante sin modificar, para ambos niveles de esfuerzos.

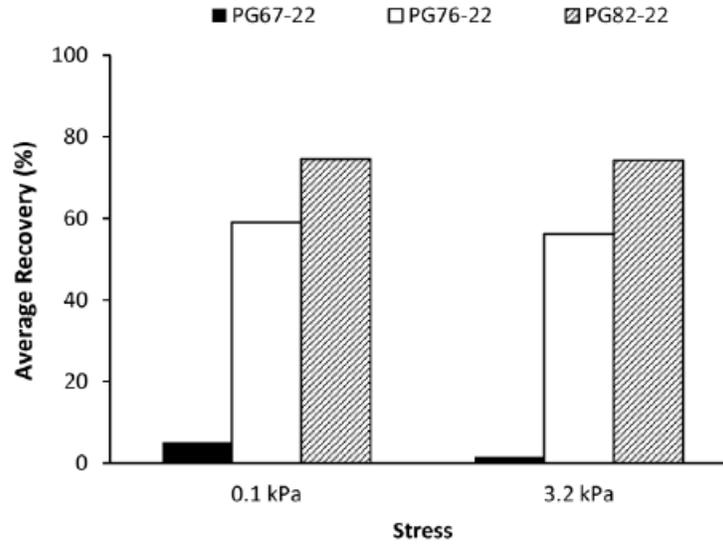


Figura 51. Porcentaje de recuperación obtenido por medio del ensayo MSCR. Fuente: *Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing* (Greene, Choubane, & Chun, 2013).

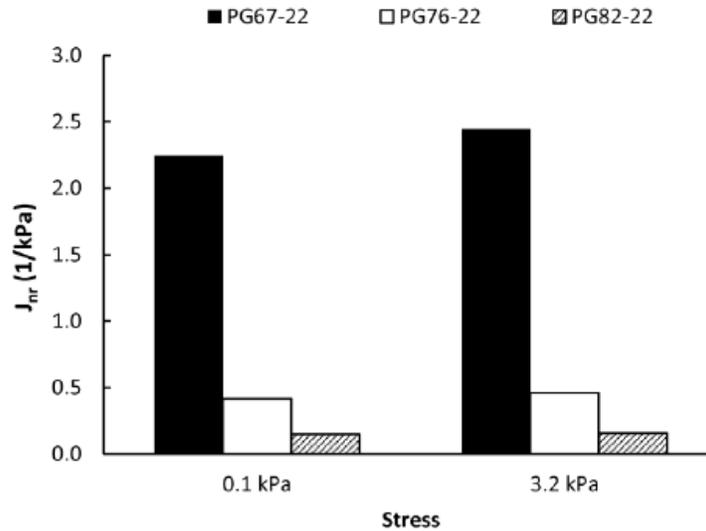


Figura 52. Flexibilidad en fluencia no recuperable obtenida del ensayo MSCR. Fuente: *Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing* (Greene, Choubane, & Chun, 2013).

El ensayo Binder Fracture Energy fue realizado a 10°C, los resultados, que se muestran en la figura 53, son claros en indicar que el ligante PG82-22 exhibe una energía de fractura mayor, lo cual refleja una mezcla asfáltica con mayor resistencia al agrietamiento por fatiga, en comparación con los ligantes PG76-22 y PG67-22.

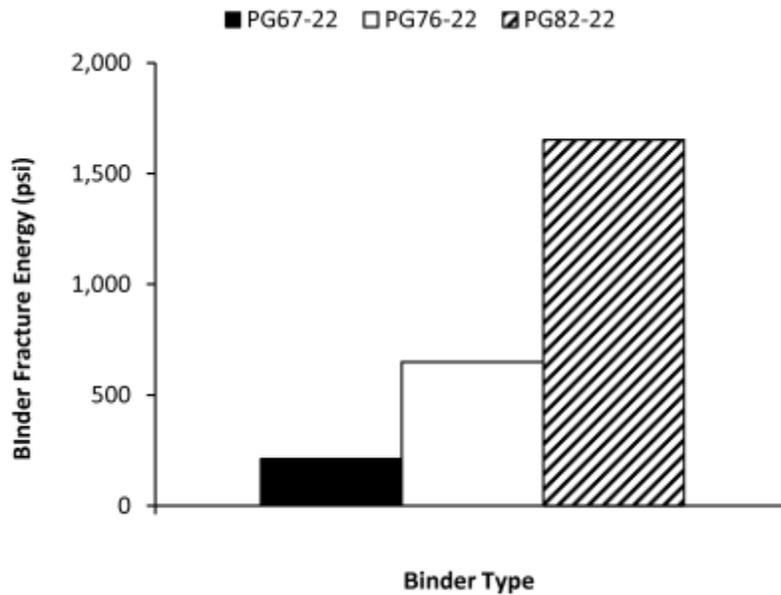


Figura 53. Energía de fractura del ligante. Fuente: Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing (Greene, Choubane, & Chun, 2013).

En la figura 54 se muestra el promedio de la profundidad de ahuellamiento generado en cada carril, donde se observa que este disminuye a medida que se incrementa la cantidad de SBS añadida al ligante asfáltico. Después de 100.000 pasadas, los carriles construidos con los ligantes PG76-22 y PG82-22 muestran aproximadamente 0,5 y 0,8 veces menos ahuellamiento, respectivamente, que el carril construido con ligante sin modificar.

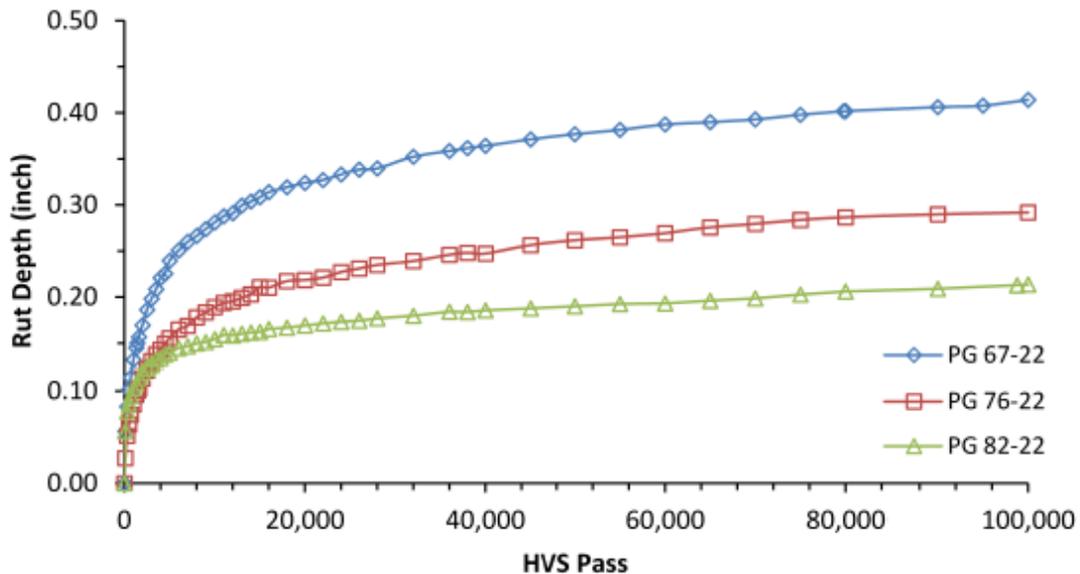


Figura 54. Profundidad de ahuellamiento. Fuente: Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing (Greene, Choubane, & Chun, 2013).

La figura 55 ilustra el perfil transversal de ahuellamiento después de 100.000 pasadas, donde se puede observar que a mayor cantidad de SBS incorporado al asfalto, se presentan menores flujos de corte en el área de contacto del neumático. Lo cual implica que ligantes asfálticos altamente modificados proveen una excelente resistencia al ahuellamiento.

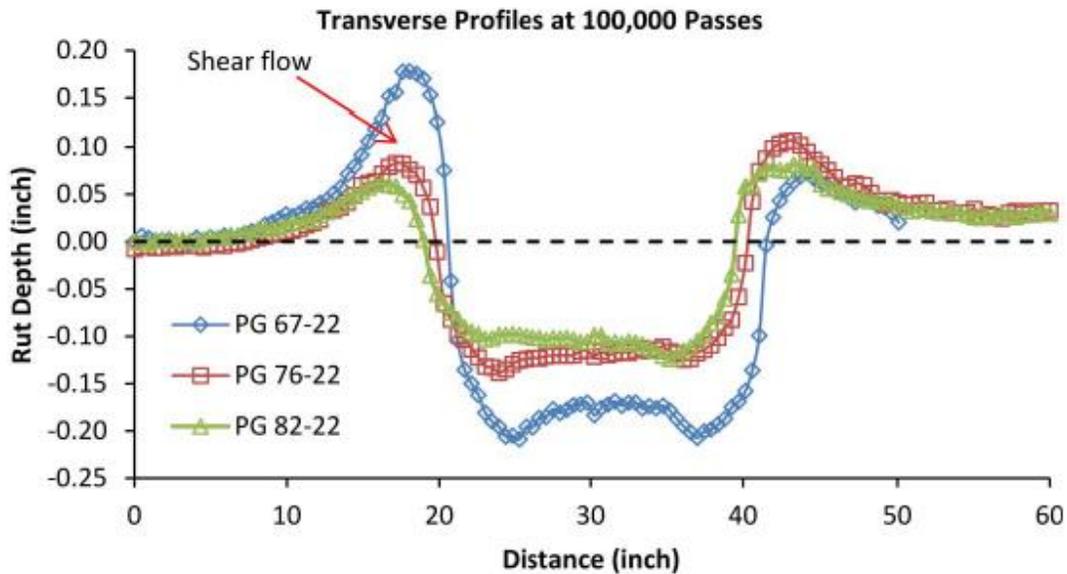


Figura 55. Perfil transversal de ahuellamiento a 100.000 pasadas. Fuente: *Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing* (Greene, Choubane, & Chun, 2013).

Se completaron más de 500.000 pasadas en los carriles destinados al estudio de la resistencia a fatiga, sin que se observara ninguna grieta asociada a este deterioro. En la figura 56 se muestra el promedio de la deformación por tracción en el fondo de la carpeta asfáltica para cada uno de los carriles.

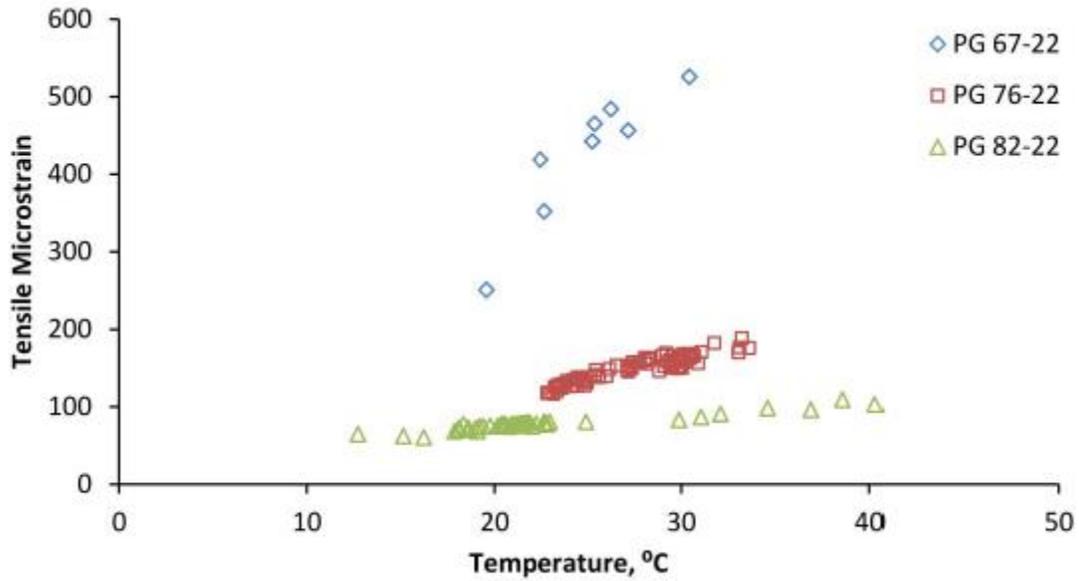


Figura 56. Mediciones de tensión. Fuente: *Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing* (Greene, Choubane, & Chun, 2013).

Ambas mezclas realizadas con ligantes modificados tiene un notable mejoramiento en cuanto al desempeño frente al agrietamiento por fatiga, comparadas con la mezcla realizada con ligante sin modificar.

Conclusiones

Se concluye que la incorporación de polímeros al ligante mejora las propiedades de las mezclas asfálticas relacionadas con la resistencia al ahuellamiento y a la fatiga, por lo que el uso de ligantes altamente modificados con polímeros se debe considerar para mejorar el desempeño del pavimento en áreas donde históricamente se han producido grandes deformaciones por ahuellamiento.

4. ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN

Esta sección busca exponer la estructura por medio de la cual se llevará a cabo la etapa de experimentación. Dicha etapa consta de dos partes, en la primera de ellas se buscará determinar la concentración de ablandador que permite obtener un ligante con clasificación PG58-28, para posteriormente, en la segunda parte, determinar las concentraciones de SBS asociadas a los límites de la clasificación por clima de la norma AASHTO M332-14.

4.1. ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR

Durante la primera parte de la etapa experimental se busca determinar, por medio de los ensayos correspondientes a la clasificación Superpave por grado de desempeño PG, las concentraciones de ablandador necesarias para obtener a partir de un ligante tradicional PG64-22, un ligante con clasificación PG58-28, que corresponde al ligante recomendado para las zonas norte y sur de nuestro país, regiones que fueron determinadas con anterioridad por la zonificación Superpave realizada para condiciones de circulación de alta velocidad y tránsito moderado (Arteaga, 2017).

Además, se busca conocer los valores de la flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) para el ligante PG58-28 obtenido anteriormente, por medio de la realización del ensayo Multiple Stress Creep & Recovery.

4.1.1. HIPÓTESIS

A modo de hipótesis se plantea que los siguientes parámetros son los que producen una mayor influencia en los resultados obtenidos.

- Concentración de ablandador
- Temperatura de mezclado
- Velocidad de mezclado
- Tiempo de mezclado

4.1.2. METODOLOGÍA

Se divide la primera etapa de experimentación en cinco partes: etapa preliminar, caracterización del ligante base, determinación de concentraciones de ablandador, plan de ensayos y análisis de resultados.

4.1.2.1. Fase preliminar

Esta fase apunta a determinar los objetivos que guiarán la investigación, las hipótesis planteadas para lograrlos, y finalmente la metodología y planes de trabajo que se utilizarán. Es necesario destacar que como se trata de una fase previa, está sujeta a constantes modificaciones, en base a las dificultades o problemáticas que podrían surgir, como también a las acotaciones y correcciones realizadas por el profesor guía.

4.1.2.2. Caracterización del ligante base

Se requiere realizar la caracterización del ligante base, para de esta forma obtener un punto de partida, desde donde es posible analizar adecuadamente los resultados obtenidos. La caracterización se realizará mediante la clasificación Superpave por grado de desempeño PG, cabe destacar que los objetivos principales de dicha clasificación son:

- Medir las propiedades físicas de los ligantes, las cuales pueden ser relacionadas con parámetros de desempeño en terreno, asociado a tres fallas críticas: ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico.
- Caracterizar las propiedades físicas de los ligantes de acuerdo a las temperaturas y efectos del envejecimiento, a los cuales se encuentran sometidos los ligantes asfálticos durante el proceso de construcción y servicio de los pavimentos.

4.1.2.3. Determinación de concentraciones de ablandador

En esta etapa se busca determinar la concentración de ablandador, con la cual se obtiene un ligante con clasificación PG58-28, para lo cual se realizan modificaciones con distintos porcentajes del modificador. Los ligantes obtenidos se someten a los ensayos correspondientes para determinar la clasificación PG, y de esta forma es posible obtener curvas “Temperatura PG v/s Concentración de ablandador”.

Además, se busca analizar la variabilidad arrojada por el ensayo Multiple Stress Creep and Recovery, específicamente para el valor de la flexibilidad en fluencia no recuperable ($J_{nr_{3,2}}$), por lo cual se realiza el ensayo a tres muestras realizadas con el mismo porcentaje de ablandador. En la figura 57 se presenta un esquema del procedimiento a seguir.

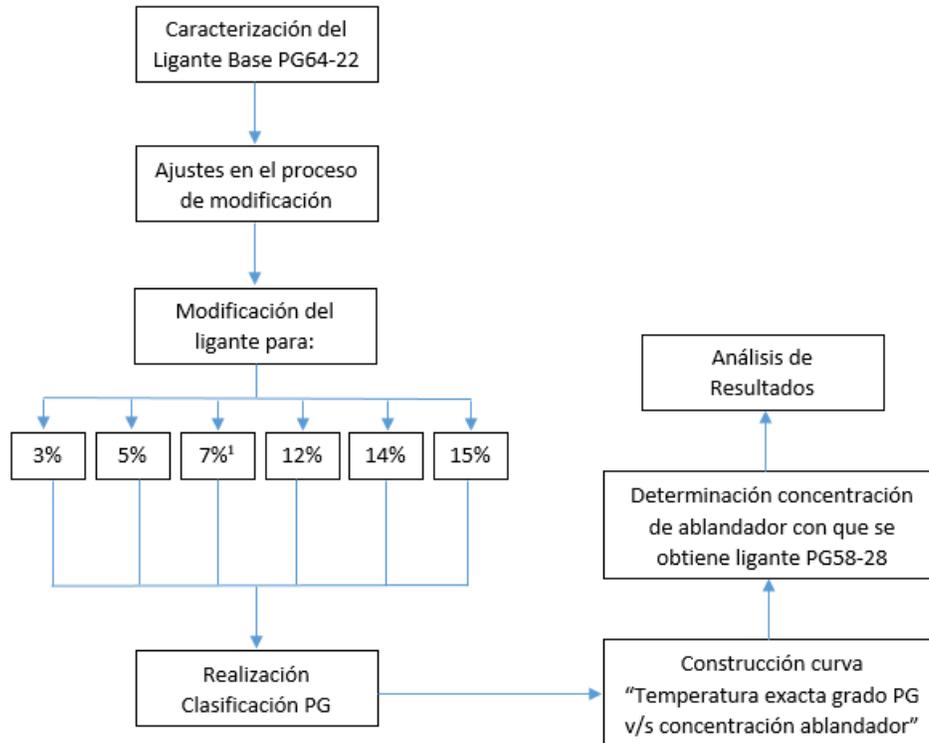


Figura 57. Esquema proceso de modificación con ablandador. Fuente: elaboración propia.
 ¹ Se realizarán tres mezclas con dosificación de 7% de ablandador para analizar variabilidad.

4.1.2.4. Plan de ensayos

La tabla 16 resume el plan de trabajo asociado al proceso de modificación con ablandador.

Tabla 16. Plan de trabajo modificaciones con ablandador.

% Ablandador	0%	3%	5%	7%	12%	14%	15%
Cantidad Ligante	200 gr.	200 gr.	200 gr.	200 gr.	200 gr.	200 gr.	200 gr.
Cantidad Ablandador	0 gr.	6,2 gr.	10,5 gr.	15,1 gr.	27,3 gr.	32,6 gr.	35,3 gr.
Nº muestras	1	1	1	3	1	1	1

Fuente: elaboración propia.

El proceso de modificación se realizará en un mezclador de alto corte, en las siguientes condiciones:

- Velocidad: 2.500 rpm.
- Temperatura: 180°C.
- Tiempo: 30 minutos.

A cada una de las muestras de ligante modificado se le realizarán los siguientes ensayos, correspondientes a caracterización PG completa.

- DSR para determinar temperatura alta en estado original.
- DSR para determinar temperatura alta con envejecimiento primario (RTFO).
- DSR para determinar temperatura intermedia con envejecimiento secundario (PAV).
- BBR para determinar temperatura baja con envejecimiento secundario (PAV).
- Viscosidad Rotacional en estado original.
- Pérdida de masa.
- Punto de Inflamación.

Además, a las tres muestras modificadas con 7% de ablandador se les realizará el ensayo MSCR, con la finalidad de medir la variabilidad en los resultados obtenidos.

4.1.2.5. Análisis de resultados

Esta etapa busca realizar una interpretación de los datos obtenidos mediante la clasificación PG realizada. Además, se analiza la factibilidad del uso de ablandador como medio para obtener un ligante PG58-28, a partir de un ligante tradicional PG64-22.

También, se analizan los valores de $J_{nr,3.2}$ obtenidos para una concentración de 7% de ablandador, para lo cual se realiza un análisis de varianza ANOVA, el cual busca cuantificar la variabilidad de los resultados.

4.1.3. MATERIALES

En esta sección se caracterizan los materiales a utilizar en el proceso de experimentación, señalando su origen y consideraciones necesarias para la investigación.

4.1.3.1. Ligante asfáltico

El ligante a utilizar corresponde a un CA24, el cual ha sido donado para la investigación por la empresa Probisa, solicitándose 40 tarros de un cuarto de galón. A dicho ligante se le realizó una clasificación PG completa, arrojando un ligante con grado de desempeño PG64-22. Los ensayos realizados y sus resultados se encuentran en la sección 8.1.1 de los Anexos.

4.1.3.2. Ablandador

El ablandador, que se observa en la figura 58, corresponde, probablemente, a un aceite derivado de la refinación del crudo, fue donado por la empresa Probisa, entregándose 2 tarros de un galón cada uno.



Figura 58. Ablandador. Fuente: elaboración propia.

4.1.4. EQUIPOS

En la presente sección, se detallan los equipos y aparatos a utilizar durante la primera etapa de la fase experimental.

4.1.4.1. Modificación del ligante con ablandador

Mezclador de alto corte POLYTRON PT 10-35 GT

El equipo a utilizar para la modificación del ligante corresponde, a un mezclador de alto corte (figura 59), modelo POLYTRON PT 10-35 GT de la compañía suiza Kinematica, el cual cuenta con un regulador de la velocidad de giro del vástago, graduado en unidades de mil revoluciones por minuto, de cinco en cinco, hasta llegar a 30.000 rpm. En esta primera etapa de la investigación se utiliza una velocidad de mezclado de 2.500 rpm.



Figura 59. Mezclador de alto corte POLYTRON PT 10-35 GT. Fuente: elaboración propia.

Vástago POLYTRON-aggregate type PT-DA 30/2EC-F250

El vástago a utilizar corresponde, como se observa en la figura 60, al modelo PT-DA 30/2EC-F250 de Kinematica, mismo fabricante del mezclador de alto corte utilizado, posee una masa de 756 gramos, un diámetro de 30 [mm] y una longitud de 250 [mm]. Tiene una capacidad de trabajo permitido desde 100 [ml] hasta 4.000 [ml], lo cual es adecuado debido a que en esta primera etapa se utilizarán muestras de 200 [ml] de ligante.



Figura 60. Vástago POLYTRON-aggregate type PT-DA 30/2EC-F250. Fuente: elaboración propia.

Placa calentadora Thermo Scientific Cimarec

La placa calentadora utilizada, que se observa en la figura 61, posee un rango de funcionamiento de 0 a 400°C, además cuenta con una pantalla con display digital que muestra la temperatura de 5 en 5°C. Para esta investigación en particular se determinó que regulando la placa calentadora a 265°C se logra que el ligante asfáltico alcance y mantenga una temperatura de $180 \pm 5^\circ\text{C}$ durante el proceso de mezclado.



Figura 61. Placa calentadora Thermo Scientific Cimarec. Fuente: elaboración propia.

Elementos misceláneos

- Baño de aceite
- Vaso Precipitado de 400 [ml]
- Termómetro
- Balanza

4.1.4.2. Clasificación Superpave por grado de desempeño del ligante modificado y medición de la flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) mediante el ensayo MSCR

Horno de Película Delgada Rotatoria Modelo CS 325-B

El horno de película delgada rotatoria (RTFO), que se observa en la figura 62, se utiliza para simular el envejecimiento primario, producido durante la fase de preparación y compactación de la mezcla asfáltica. El horno contiene un carro circular que posee orificios donde se acomodan los vasos con las muestras, dicho carro es manejado mecánicamente para rotar en torno a su propio eje. Además, posee un flujo de aire, el cual está ubicado frente a la posición más baja por la cual pasan los vasos mientras giran.



Figura 62. Horno de Película Delgada Rotatoria Modelo CS 325-B. Fuente: elaboración propia.

Cámara de Envejecimiento a Presión ATS

La cámara de envejecimiento a presión (PAV) utilizada, que se observa en la figura 63, corresponde a un equipo de la compañía estadounidense Applied Test Systems, su finalidad es simular el envejecimiento secundario del ligante, el cual es producido durante varios de años de servicio de la mezcla asfáltica. El equipo consiste en una cámara presurizada que se encuentra dentro de una cámara con control de temperatura, permitiendo obtener las condiciones necesarias para realizar el ensayo (2.070 [kPa] y 100°C). Dentro de la cámara presurizada se acomoda el rack o columna que permite introducir en el equipo hasta 10 bandejas circulares con muestras de $50 \pm 0,5$ gramos de ligante asfáltico, al que ya se le ha realizado el proceso de envejecimiento primario. Pasadas las 20 horas de ensayo la columna es retirada e introducida a un horno a 150°C durante 15 minutos, para posteriormente verter el ligante dentro de recipientes metálicos e introducirlos a la cámara de vacío (figura 64), con el objetivo de desgasificarlo.



Figura 63. Cámara de Envejecimiento a Presión ATS. Fuente: elaboración propia.



Figura 64. Cámara de vacío. Fuente: elaboración propia.

Viscosímetro Brookfield DV-II+ pro

La viscosidad rotacional será medida mediante un viscosímetro Brookfield de modelo DV-II+ pro (figura 65), para dicho proceso el ligante es depositado en contenedores metálicos, los cuales se llenan con una cantidad de ligante entre los 7,8 y los 8 gramos. El equipo consiste en un cilindro coaxial, que mide la viscosidad por medio del torque requerido para mantener constante la velocidad rotacional de un eje cilíndrico o husillo, que se encuentra sumergido en una muestra de asfalto a 135°C. Se utilizará una velocidad de giro del husillo de 20 o 50 [rpm], dependiendo del grado de modificación del ligante, cabe destacar que ambos resultados son equivalentes.



Figura 65. Viscosímetro Brookfield DV-II+ pro. Fuente: elaboración propia.

DSR Anton Paar PHYSICA MCR 301

El reómetro de corte dinámico a utilizar, como se observa en la figura 66, corresponde al modelo PHYSICA MCR 301 de la compañía austriaca Anton Paar. Este equipo es usado para caracterizar el comportamiento viscoelástico del ligante asfáltico, midiéndose las propiedades del ligante en una delgada muestra, situada entre dos platos paralelos, siendo el plato superior oscilante, mientras que el plato inferior se mantiene fijo. Este equipo es utilizado para determinar los grados de temperatura alta e intermedia de la caracterización Superpave, además de el valor de la flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) por medio del ensayo MSCR.



Figura 66. DSR Anton Paar PHYSICA MCR 301. Fuente: elaboración propia.

Reómetro de Viga en Flexión ATS

El reómetro de viga en flexión, como se observa en la figura 67, corresponde a un equipo de la compañía estadounidense Applied Test Systems, el cual es usado para medir la rigidez del ligante asfáltico a bajas temperaturas. El ensayo mide la rigidez de una pequeña viga (127 x 6,35 x 12,7 [mm]) sometida a una carga aplicada lentamente por un eje de punta roma en la mitad de la luz de la viga, la cual es sostenida por puntos de apoyo en cada uno de sus extremos. Cabe señalar que la viga se encuentra sumergida en un baño de alcohol que permite mantener la temperatura constante durante la realización del ensayo.

El eje de carga cuenta con un transductor que permite monitorear la deflexión en la viga, además sumado a que se conoce la carga aplica, es posible, por medio del uso de la teoría de vigas, obtener el valor de la rigidez $S(t)$, y la razón de cambio del logaritmo de la rigidez, llamado valor m .

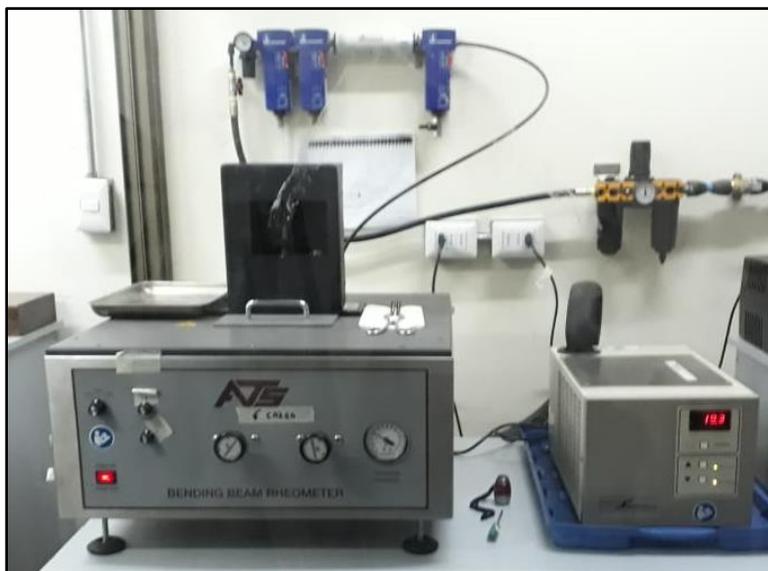


Figura 67. Reómetro de Viga en Flexión ATS. Fuente: elaboración propia.

Elementos Misceláneos

- Balanza
- Contenedores metálicos

4.2. ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR Y ESTIRENO BUTADIENO ESTIRENO (SBS)

En la segunda parte de la etapa experimental, se busca determinar por medio del valor de la flexibilidad en fluencia no recuperable (J_{nr}), las concentraciones de SBS asociadas a los límites estipulados en la clasificación por clima de la norma AASHTO M332-14, utilizando el ligante obtenido en la primera etapa experimental como ligante base.

4.2.1. HIPÓTESIS

A modo de hipótesis se plantea que los siguientes parámetros son los que producen una mayor influencia en los resultados obtenidos.

- Concentración de SBS
- Temperatura de mezclado
- Velocidad de mezclado
- Tiempo de mezclado

4.2.2. METODOLOGÍA

Se divide la segunda etapa de experimentación en cuatro partes: etapa preliminar, determinación de concentraciones de SBS, plan de ensayos y análisis de resultados.

4.2.2.1. Etapa preliminar

En esta etapa se determinan los objetivos, hipótesis y metodología de trabajo que se utilizarán. Es necesario destacar que como se trata de una fase previa, está sujeta a constantes modificaciones, en base a las dificultades o problemáticas que podrían surgir.

4.2.2.2. Determinación de concentraciones de Estireno Butadieno Estireno (SBS)

En esta etapa se busca determinar las concentraciones de SBS, con las cuales se obtienen ligantes que cumplen con los límites de la clasificación por clima expuestos en la tabla 17, para lo cual se realizan modificaciones con distintos porcentajes de polímero. Los ligantes obtenidos se someten al ensayo MSCR realizado a 58°C, que entrega como resultado el valor de la flexibilidad en fluencia no recuperable a un nivel de esfuerzo de 3,2 [kPa] ($Jnr_{3,2}$). De esta forma, al ajustarle distintas líneas de tendencia a los datos, se podrán obtener curvas de “Concentración de SBS v/s $Jnr_{3,2}$ ”.

Tabla 17. Límites de la clasificación por clima.

Concentración SBS	$Jnr_{3,2}$ [1/kPa]
W %	4,5
X %	2
Y%	1
Z%	0,5

Fuente: elaboración propia con datos de norma Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test (AASHTO M332, 2014).

En la figura 68 se presenta un esquema del procedimiento a seguir.

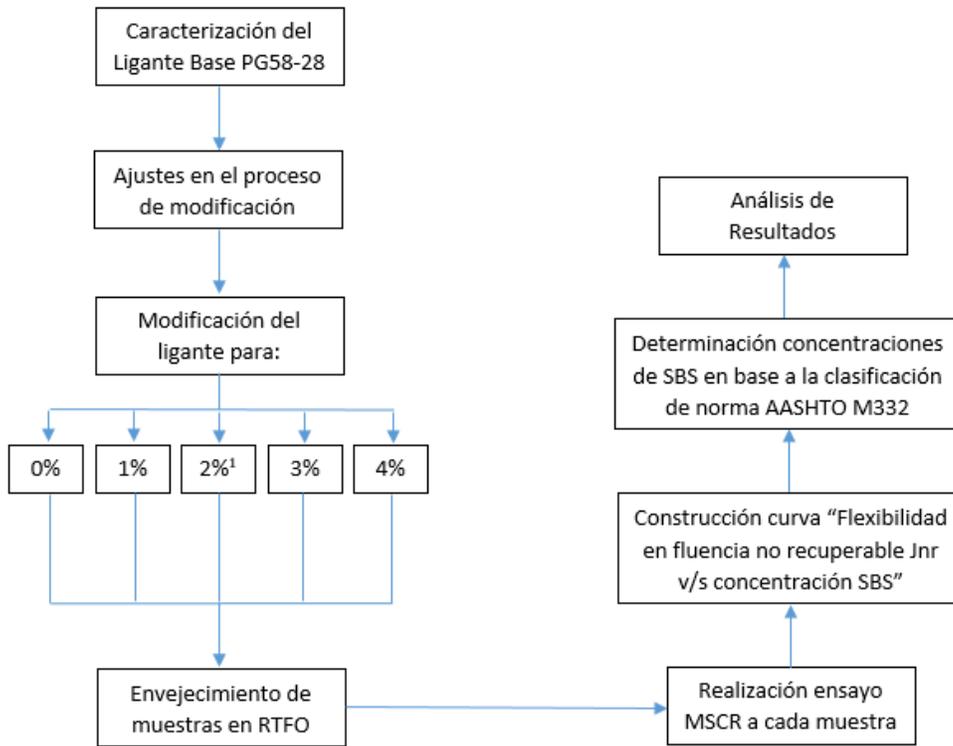


Figura 68. Esquema proceso de modificación con SBS. Fuente: elaboración propia.

¹ Se realizarán tres mezclas con dosificación de 2% de SBS para analizar variabilidad.

4.2.2.3. Plan de ensayos

La tabla 18 resume el plan de trabajo asociado a las modificaciones con SBS.

Tabla 18. Plan de trabajo modificación con SBS.

% SBS	0%	1%	2%	3%	4%
Cantidad Ligante	500 gr.				
Cantidad Ablandador	37,6 gr.				
Cantidad SBS	0 gr.	5,4 gr.	11 gr.	16,6 gr.	22,4 gr.
N° muestras	1	1	3	1	1

Fuente: elaboración propia.

El proceso de modificación se realizará en un mezclador de alto corte, en las siguientes condiciones:

- Velocidad: 3.000 rpm.
- Temperatura: 180°C.
- Tiempo: 60 minutos.

A cada una de las muestras obtenidas de estas modificaciones se les realizará el ensayo MSCR, con la finalidad de obtener valores correspondientes a $Jnr_{3,2}$. De forma adicional se medirá la viscosidad rotacional del asfalto en estado original y con envejecimiento primario, para asegurar que la modificación se hizo de manera correcta.

4.2.2.4. Análisis de resultados

En esta etapa se busca determinar los límites de la Clasificación por Clima, a partir de la interpretación de los datos obtenidos del ensayo MSCR ejecutado a 58°C, por lo que se realiza una curva “Flexibilidad en Fluencia no recuperable Jnr v/s Concentración SBS”. Además, se analizan los valores de Jnr obtenidos para las muestras de ligante modificado con 2% de SBS, para lo cual se realiza un análisis de varianza ANOVA, el cual busca cuantificar la variabilidad de los resultados.

4.2.3. MATERIALES

En esta sección se caracterizan los materiales a utilizar en el proceso de experimentación, señalando su origen y consideraciones necesarias para la investigación.

4.2.3.1. Ligante asfáltico modificado con ablandador

Se utiliza el ligante obtenido a partir de la modificación con 7% de Ablandador. A dicho ligante se le realizó una clasificación PG completa, arrojando como resultado un ligante PG58-28. Los ensayos realizados y sus resultados se encuentran en la sección 8.1.4 de los Anexos.

4.2.3.2. Estireno Butadieno Estireno (SBS)

El polímero SBS (figura 69) utilizado en esta investigación fue donado por la Empresa Oil Malal. Corresponde a gránulos o pellets de color blanco, de tamaño aproximado 5 [mm].



Figura 69. Estireno butadieno estireno (SBS). Fuente: elaboración propia.

4.2.4. EQUIPOS

En la presente sección, se detallan los equipos y aparatos a utilizar durante la segunda etapa de la fase experimental.

4.2.4.1. Modificación del ligante con SBS

Dispensor D-25

El equipo utilizado para la modificación del ligante corresponde a un dispersor de polímeros en asfalto (figura 70), de fabricación argentina. El equipo cuenta con un regulador de la velocidad de giro del vástago, que muestra en pantalla la frecuencia de giro en [Hz], además de un controlador de temperatura que muestra en pantalla la temperatura en [°C]. En esta segunda etapa de la investigación se utiliza una velocidad de mezclado inicial de 2.500 rpm durante media hora, correspondiente a la fase de modificación con ablandador, seguida de una velocidad de mezclado de 3.000 rpm durante una hora, que corresponde a la fase de modificación con SBS.



Figura 70. Dispensor D-25. Fuente: elaboración propia.

Elementos misceláneos

- Vaso Precipitado de 600 [ml]
- Balanza

4.2.4.2. Medición de viscosidad y de la flexibilidad en fluencia no recuperable (Jnr) mediante el ensayo MSCR

Los equipos utilizados en esta etapa son los siguientes:

- Horno de Película Delgada Rotatoria Modelo CS 325-B
- Viscosímetro Brookfield DV-II+ pro
- DSR Anton Paar PHYSICA MCR 301

La descripción de dichos equipos se encuentra en la sección 4.1.4.2 del presente documento.

5. RESULTADOS

5.1. ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos correspondientes a la caracterización PG, realizada a los ligantes modificados con distintas concentraciones de ablandador.

5.1.1. VISCOSIDAD

La viscosidad es un parámetro que permite verificar si la modificación del ligante se logra de forma adecuada, debido a que se espera que, a mayor concentración de ablandador, el valor de la viscosidad disminuya.

Los valores de viscosidad del ligante se midieron en estado original, a una temperatura de 135°C como indica la norma ASTM D4402-15. En la tabla 19 se presentan los valores obtenidos, donde se debe notar que los valores tabulados corresponden al promedio de las lecturas realizadas para cada porcentaje de concentración de ablandador. El detalle de cada una de estas lecturas se encuentra en la sección 8.2 de los Anexos.

Tabla 19. Viscosidad rotacional para distintas concentraciones de ablandador.

Concentración Ablandador [%]	Viscosidad [mPas]
0	554
3	443
5	379
7	331
12	268
14	227
15	203

Fuente: elaboración propia.

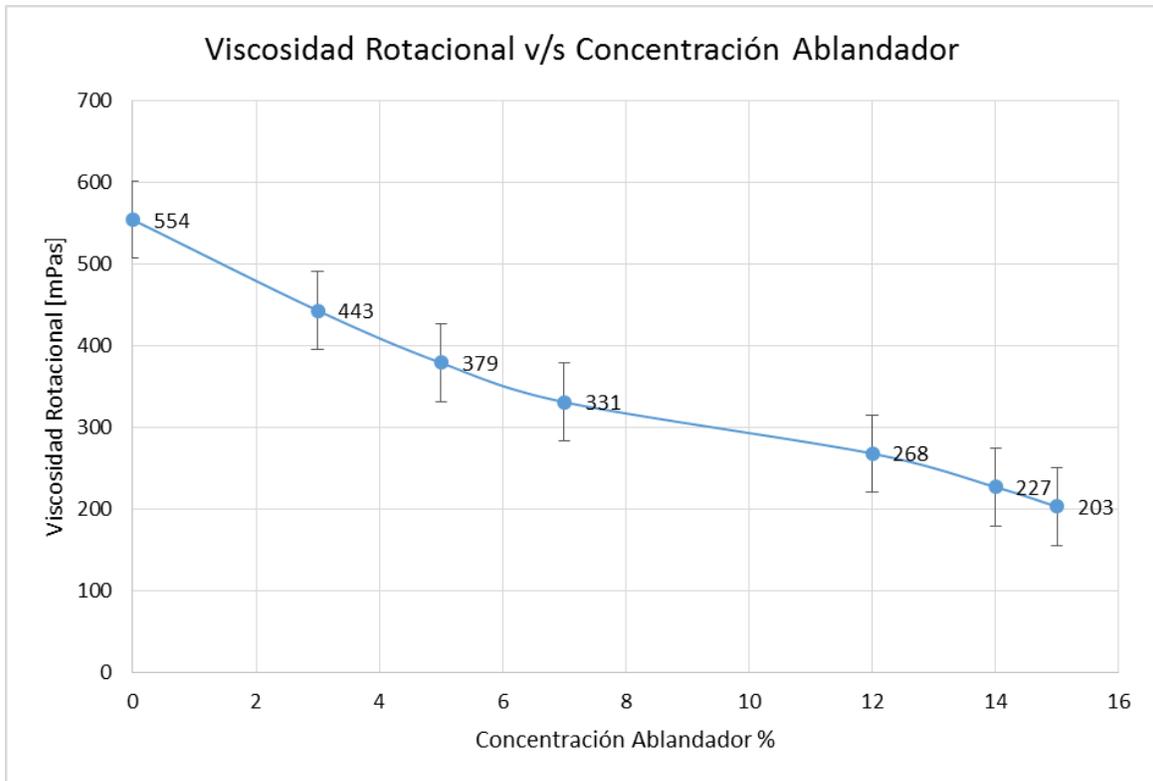


Figura 71. Gráfico viscosidad rotacional v/s concentración de ablandador. Fuente: elaboración propia.

Cabe señalar que las barras de dispersión de la figura 71 muestran la incertidumbre en torno al valor de la viscosidad medido. Para lo cual se calcula el error típico de la muestra, utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Error típico} = \pm \frac{\text{Desviación estándar de los datos}}{\sqrt{\text{Cantidad de datos}}}$$

5.1.2. CLASIFICACIÓN SUPERPAVE POR GRADO DE DESEMPEÑO (PG)

Se realiza la clasificación por grado de desempeño de los ligantes obtenidos mediante la modificación con ablandador, según los criterios definidos en la norma AASHTO M320-16.

Temperatura Alta

Utilizando el reómetro de corte dinámico se debe determinar la temperatura en que el ligante, en estado original, cumple la siguiente condición:

$$\frac{G^*}{\text{sen } \delta} > 1,0 \text{ [kPa]}$$

Donde:

- G^* : Módulo dinámico
- δ : Ángulo de fase

Además, se debe determinar la temperatura en que el ligante, después de atravesar el proceso de envejecimiento primario (RTFO), cumple la siguiente condición:

$$\frac{G^*}{\text{sen } \delta} > 2,2 \text{ [kPa]}$$

Definiéndose como la temperatura alta del ligante la menor de las obtenidas entre los dos criterios mencionados anteriormente.

Temperatura Baja

Utilizando el reómetro de viga en flexión se determinan los valores para la rigidez del asfalto $S(t)$ y la pendiente de la respuesta m , parámetros que deben cumplir las siguientes condiciones:

$$S(t) < 300 \text{ [MPa]}$$
$$m > 0,300$$

Temperatura Intermedia

Utilizando el reómetro de corte dinámico se debe determinar la temperatura en que el ligante, después de atravesar el proceso de envejecimiento primario (RTFO) y envejecimiento secundario (PAV), cumple la siguiente condición:

$$G^* \cdot \text{sen } \delta > 5000 \text{ [kPa]}$$

Se obtiene los resultados expuestos en la tabla 20 y graficados en la figura 72 para el comportamiento del ligante asfáltico a altas y bajas temperaturas.

Tabla 20. Temperaturas grado PG ligantes modificados con distintas concentraciones de ablandador.

% Ablandador	T° Exacta		Grado PG	
	T° Alta	T° Baja	T° Alta	T° Baja
0	68,6	-24,0	64	-22
3	66,0	-25,4	64	-22
5	63,8	-27,5	58	-22
7	61,2	-29,1	58	-28
12	60,0	-31,3	58	-28
14	56,8	-32,4	52	-28
15	52,8	-33,0	52	-28

Fuente: elaboración propia.

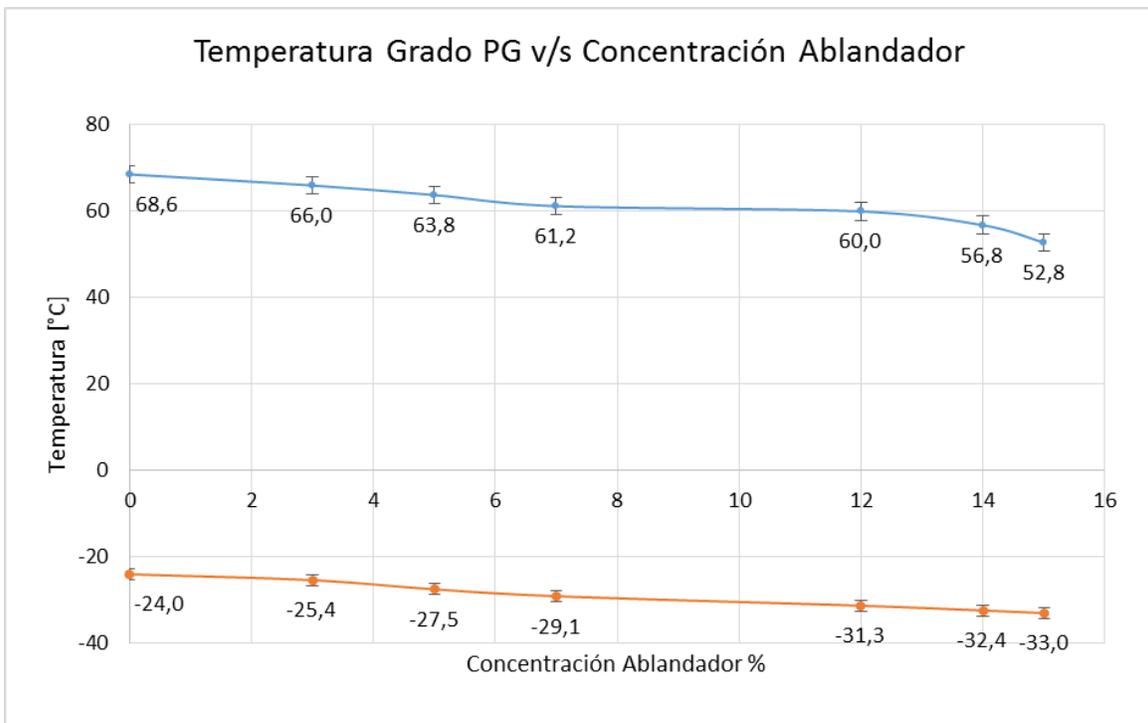


Figura 72. Gráfico Grado PG v/s Concentración de ablandador. Fuente: elaboración propia.

Se debe notar que los valores exactos de la temperatura alta son entregados directamente por parte del equipo, en cambio los valores exactos de la temperatura baja son calculados en la tabla 21.

Tabla 21. Grado PG exacto de baja temperatura.

		T°	S(t) [Mpa]	Valor m	T° Exacta S(t)	T° Exacta Valor m	T° exacta	T° PG exacta
BASE	V1	-12	180,703	0,318	-17,3	-13,6	-13,6	-24,0
		-18	371,874	0,252				
	V2	-12	166,935	0,327	-17,2	-14,3	-14,3	
		-18	379,434	0,256				
3% ABLANDADOR	V1	-12	134,912	0,343	-18,5	-15,3	-15,3	-25,4
		-18	334,368	0,265				
	V2	-12	149,138	0,346	-17,9	-15,4	-15,4	
		-18	354,816	0,264				
5% ABLANDADOR	V1	-12	120,675	0,340	-19,8	-17,4	-17,4	-27,5
		-18	297,219	0,296				
	V2	-12	123,715	0,355	-20,3	-17,7	-17,7	
		-18	288,198	0,297				
7% ABLANDADOR	V1	-18	292,880	0,353	-19,1	-21,7	-19,1	-29,1
		-24	617,383	0,267				
	V2	-18	288,860	0,346	-19,2	-22,2	-19,2	
		-24	587,874	0,279				
12% ABLANDADOR	V2	-18	161,857	0,336	-23,6	-21,2	-21,2	-31,3
		-24	362,283	0,268				
	V3	-18	172,220	0,338	-21,4	-22,3	-21,4	
		-24	489,408	0,284				
14% ABLANDADOR	V1	-18	141,418	0,351	-25,4	-22,8	-22,8	-32,4
		-24	310,125	0,287				
	V2	-18	135,780	0,352	-28,4	-21,9	-21,9	
		-24	259,702	0,272				
15% ABLANDADOR	V1	-18	132,133	0,353	-26,8	-23,7	-23,7	-33,0
		-24	280,169	0,297				
	V2	-18	126,631	0,357	-26,7	-22,4	-22,4	
		-24	279,911	0,279				

Fuente: elaboración propia.

Además, se verifica el criterio para la temperatura intermedia, obteniéndose los resultados expuestos en la tabla 22.

Tabla 22. Grado PG de temperatura intermedia.

% Ablandador	T° Intermedia medida	T° Intermedia fórmula
0	17,2	25
3	17,0	25
5	15,4	22
7	13,6	19
12	11,0	19
14	9,3	16
15	8,9	16

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta primera etapa, se concluye que para obtener un ligante con clasificación PG58-28, es necesario incorporar en el proceso de modificación una dosificación de 7% de ablandador, concentración con la cual se continuará trabajando en la segunda etapa de la fase experimental, utilizando dicho asfalto como ligante base para la modificación con SBS.

5.1.3. MULTIPLE STRESS & CREEP RECOVERY

El ensayo MSCR se ejecuta siguiendo lo especificado en la norma AASHTO T350-14, este se realiza en el reómetro de corte dinámico, utilizando los platos paralelos de 25 [mm] de diámetro a un 1 [mm] de separación. Durante esta investigación el ensayo se realiza a una temperatura de 58°C, determinada de acuerdo a la clasificación por grado de desempeño realizada al ligante anteriormente.

A continuación, se detalla la terminología utilizada:

- $R\%_{0,1}$ [kPa] : Porcentaje de recuperación promedio a 0,1 [kPa].
- $R\%_{3,2}$ [kPa] : Porcentaje de recuperación promedio a 3,2 [kPa].
- $Jnr_{0,1}$ [kPa⁻¹] : Flexibilidad en fluencia no recuperable a 0,1 [kPa].
- $Jnr_{3,2}$ [kPa⁻¹] : Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa].
- R_{diff} % : Diferencia porcentual entre el porcentaje de recuperación a 0,1 [kPa] y 3,2 [kPa].
- Jnr_{diff} : Diferencia porcentual entre la flexibilidad en fluencia no recuperable a 0,1 [kPa] y 3,2 [kPa].

A continuación, en las tablas 23, 24 y 25, se muestran los resultados obtenidos para las tres modificaciones realizadas con 7% de ablandador.

Tabla 23. Resultados ensayo MSCR realizados a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en mezclador (mezcla 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
CV 15%	4,31	6,52	3,55	1,19	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 24. Resultados ensayo MSCR realizados a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en mezclador (mezcla 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
CV 15%	6,67	3,90	11,04	8,71	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 25. Resultados ensayo MSCR realizados a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en mezclador (mezcla 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
CV 15%	4,25	7,43	11,94	4,50	-	-

Fuente: elaboración propia.

5.1.4. ANÁLISIS

5.1.4.1. Variabilidad

Con el fin de analizar la repetitividad en el proceso de modificación con ablandador, es que se realizaron tres mezclas de ligante modificado con 7% de ablandador, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 26.

Tabla 26. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C.

	Jnr3,2 [1/kPa]		
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
M1	2,03	2,02	1,82
M2	2,00	2,28	1,98
M3	-	-	1,96
Promedio	2,02	2,15	1,92

Fuente: elaboración propia.

Para analizar cuantitativamente los resultados obtenidos, es que se realiza el modelo de análisis de varianza (ANOVA), con el cual se busca comprobar si existe diferencia estadísticamente significativa en el valor promedio del $Jnr_{3,2}$ entre los ensayos realizados (con 95% de confiabilidad). Cabe destacar que en la tabla 27 se resumen los datos ingresados al modelo ANOVA.

Tabla 27. Resumen datos ingresados a modelo ANOVA.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Mezcla 1	2	4,032	2,016	0,000578
Mezcla 2	2	4,301	2,1505	0,0351125
Mezcla 3	3	5,757	1,919	0,007461

Fuente: elaboración propia.

Tabla 28. Valores calculados para modelo ANOVA.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,064338357	2	0,032169179	2,54	0,194	6,94427191
Dentro de los grupos	0,0506125	4	0,012653125	-	-	-
Total	0,114950857	6				

Fuente: elaboración propia.

Se observa en la tabla 28, que el valor de la probabilidad es mayor a 0,05, es decir, no existe una diferencia estadísticamente significativa en el valor promedio de Jnr entre los ensayos realizados.

5.2. VARIABILIDAD ENTRE MEZCLADOR POLYTRON PT 10-35 GT Y DISPERSOR D-25

Debido a fallas mecánicas presentadas por el mezclador Polytron PT10-35GT es que se decide reemplazar el equipo. Para asegurar la repetitividad entre los resultados obtenidos con dicho mezclador y los resultados obtenidos con el nuevo equipo, se realizan análisis de varianza (ANOVA) tanto para el proceso de modificación con ablandador, como para el proceso de modificación con polímeros, en este caso polvo de caucho, que eran los resultados que se poseían al momento de la falla del equipo.

5.2.1. MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR

Para analizar la repetitividad en los resultados obtenidos para el proceso de modificación con ablandador entre el mezclador POLYTRON PT10-35GT y el dispersor D-25, es que se realizaron tres mezclas, con cada uno de dichos equipos, con 7% de ablandador, obteniéndose los resultados expuestos en la tabla 29.

Tabla 29. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C para variabilidad entre mezclador y dispersor.

	Jnr3,2 [1/kPa]	
	Mezclador POLYTRON PT 10-35 GT	Dispersor D-25
Mezcla 1	2,03	1,995
	2,00	2,003
Mezcla 2	2,02	1,858
	2,28	1,888
Mezcla 3	1,82	1,923
	1,98	1,833
	1,96	-

Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de analizar cuantitativamente los resultados obtenidos, es que se realiza el modelo de análisis de varianza (ANOVA). Cabe destacar que en la tabla 30 se resumen los datos ingresados al modelo ANOVA.

Tabla 30. Resumen datos ingresados a modelo ANOVA.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Mezclador POLYTRON PT 10-35 GT	7	14,09	2,012857143	0,019158476
Dispersor D-25	6	11,5	1,916666667	0,004978667

Fuente: elaboración propia.

Tabla 31 . Valores calculados para modelo ANOVA.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,029893	1	0,02989304	2,35	0,153	4,844335675
Dentro de los grupos	0,1398442	11	0,012713108	-	-	-
Total	0,1697372	12				

Fuente: elaboración propia.

Se observa en la tabla 31, que el valor de la probabilidad es mayor a 0,05, es decir, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados obtenidos para cada equipo, al realizarse el proceso de modificación con ablandador.

5.2.2. MODIFICACIÓN CON ABLANDADOR Y POLVO DE CAUCHO

Para analizar la repetitividad en los resultados obtenidos para el proceso de modificación con polímeros entre el mezclador POLYTRON PT10-35GT y el dispersor D-25, es que se realizaron tres mezclas con el dispersor D-25 para ser comparadas con los resultados que se poseían hasta el momento con el mezclador POLYTRON PT10-35GT. Las mezclas fueron realizadas con 7% de ablandador y 5% de polvo de caucho, obteniéndose los resultados expuestos en la tabla 32.

Tabla 32. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C para variabilidad entre mezclador y dispersor.

	Jnr3,2 [1/kPa]	
	Mezclador POLYTRON PT 10-35 GT	Dispersor D-25
Mezcla 1	0,454	0,504
	0,424	0,540
Mezcla 2	-	0,468
	-	0,480
Mezcla 3	-	0,471
	-	0,474

Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de analizar cuantitativamente los resultados obtenidos, es que se realiza el modelo de análisis de varianza (ANOVA). Cabe destacar que en la tabla 33 se resumen los datos ingresados al modelo ANOVA.

Tabla 33. Resumen datos ingresados a modelo ANOVA.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Mezclador POLYTRON PT 10-35 GT	2	0,878	0,439	0,00045
Dispersor D-25	6	2,937	0,4895	0,0007791

Fuente: elaboración propia.

Tabla 34. Valores calculados para modelo ANOVA.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0038254	1	0,003825375	5,28	0,061	5,987377607
Dentro de los grupos	0,0043455	6	0,00072425	-	-	-
Total	0,0081709	7				

Fuente: elaboración propia.

Se observa en la tabla 34, que el valor de la probabilidad es mayor a 0,05, es decir, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre equipos al realizarse el proceso de modificación con ablandador y polvo de caucho, pudiendo de esta forma suponer que dicho comportamiento se extrapola para la modificación con polímeros en general.

5.3. ASFALTOS MODIFICADOS CON ABLANDADOR Y ESTIRENO BUTADIENO ESTIRENO (SBS)

5.3.1. VISCOSIDAD

De igual forma que en la modificación con ablandador, la viscosidad se considera un parámetro que permite verificar, de forma preliminar, si se logra la modificación del ligante con SBS, debido a que se espera que a mayor concentración de SBS, el valor de la viscosidad aumente, producto de la red polimérica generada en el ligante, como consecuencia del proceso de modificación.

Los valores de viscosidad del ligante se midieron en estado original y posterior al proceso de envejecimiento primario (RTFO), a una temperatura de 135°C como indica la norma ASTM D4402-15. En la tabla 35 se presentan los resultados obtenidos, donde se debe notar que los valores tabulados corresponden el promedio de las lecturas realizadas para cada porcentaje de SBS. El detalle de cada una de estas lecturas se encuentra en la sección 8.2 de los Anexos.

Tabla 35. Viscosidad rotacional para distintas concentraciones de SBS, medida en estado original y envejecimiento primario.

Concentración SBS [%]	Viscosidad [mPas] Estado Original	Viscosidad [mPas] RTFO
0	331	571
1	496	832
2	603	1098
3	727	1318
4	840	1502

Fuente: elaboración propia.

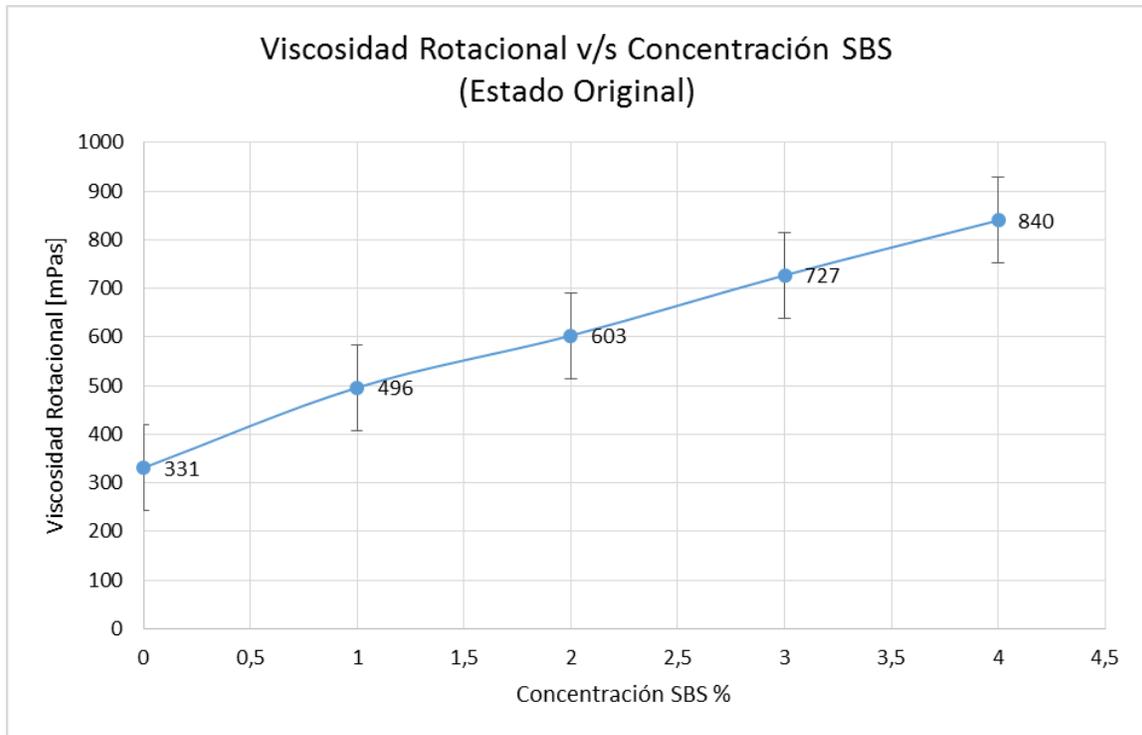


Figura 73. Gráfico viscosidad rotacional v/s concentración SBS en estado original. Fuente: elaboración propia.

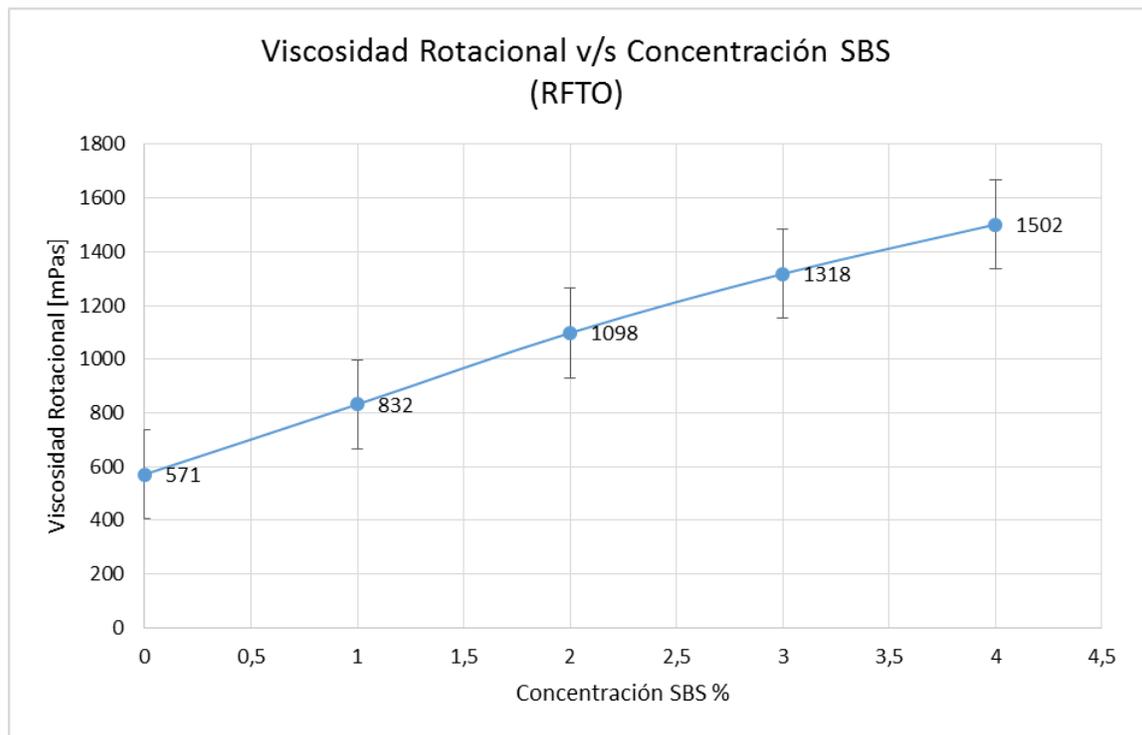


Figura 74. Gráfico viscosidad rotacional v/s concentración SBS con envejecimiento primario. Fuente: elaboración propia.

Cabe señalar que las barras de dispersión presentes en los gráficos de las figuras 73 y 74, muestran la incertidumbre en torno al valor de la viscosidad medido, mediante el cálculo del error típico de la muestra, de igual forma que para el proceso de modificación con ablandador.

5.3.2. MULTIPLE STRESS CREEP & RECOVERY

Se realizó el ensayo MSCR a 58°C siguiendo las disposiciones de la norma AASHTO T350-14. A continuación se muestran los resultados obtenidos para las modificaciones realizadas con una concentración 7% de ablandador y distintas concentraciones de SBS (desde tabla 36 hasta tabla 44).

Tabla 36. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en dispersor (mezcla 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	12,47	2,81	1,62	1,93	77,48	19,37
Muestra 3	10,68	3,16	1,70	1,90	70,40	11,58
Muestra 4	10,33	2,70	1,79	2,00	73,87	11,92
Desviación Estándar	0,95	0,21	0,07	0,05	2,94	3,59
Promedio	11,08	2,85	1,72	1,96	74,18	14,22
CV 15%	8,58	7,55	4,27	2,59	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 37. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en dispersor (mezcla 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
CV 15%	3,83	2,29	1,69	1,13	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 38. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador en dispersor (mezcla 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
CV 15%	2,64	0,29	5,73	3,39	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 39. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 1% de SBS.

	R% 0,1 [KPA]	R% 3,2 [KPA]	JNR 0,1 [1/KPA]	JNR 3,2 [1/KPA]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	18,91	8,35	0,86	1,02	55,85	19,92
Muestra 2	18,41	8,78	0,83	0,97	55,30	17,07
Desviación Estándar	0,36	0,30	0,02	0,03	0,39	2,01
Promedio	18,66	8,57	0,85	1,00	55,57	18,49
CV 15%	1,91	3,55	2,42	3,47	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 40. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 2% de SBS (mezcla 1).

	R% 0,1 [KPA]	R% 3,2 [KPA]	NR 0,1 [1/KPA]	JNR 3,2 [1/KPA]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	23,01	12,35	0,62	0,73	46,34	19,14
Muestra 2	21,83	11,85	0,61	0,72	45,71	16,99
Desviación Estándar	0,84	0,35	0,00	0,01	0,44	1,52
Promedio	22,42	12,10	0,62	0,73	46,03	18,06
CV 1S%	3,75	2,92	0,23	1,56	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 41. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 2% de SBS (mezcla 2).

	R% 0,1 [KPA]	R% 3,2 [KPA]	NR 0,1 [1/KPA]	JNR 3,2 [1/KPA]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	22,07	11,88	0,62	0,73	46,18	17,53
Muestra 2	22,30	11,78	0,61	0,72	47,17	17,38
Desviación Estándar	0,16	0,07	0,00	0,01	0,70	0,11
Promedio	22,18	11,83	0,62	0,72	46,68	17,46
CV 1S%	0,73	0,59	0,80	0,98	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 42. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 2% de SBS (mezcla 3).

	R% 0,1 [KPA]	R% 3,2 [KPA]	NR 0,1 [1/KPA]	JNR 3,2 [1/KPA]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	21,14	11,11	0,66	0,77	47,47	16,60
Muestra 2	21,98	12,06	0,64	0,75	45,14	17,94
Desviación Estándar	0,59	0,67	0,02	0,01	1,65	0,95
Promedio	21,56	11,58	0,65	0,76	46,30	17,27
CV 1S%	2,74	5,81	3,05	1,76	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 43. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 3% de SBS.

	R% 0,1 [KPA]	R% 3,2 [KPA]	NR 0,1 [1/KPA]	JNR 3,2 [1/KPA]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	27,99	19,55	0,39	0,45	30,14	15,27
Muestra 2	27,88	19,07	0,40	0,46	31,61	14,45
Desviación Estándar	0,08	0,34	0,01	0,01	1,04	0,58
Promedio	27,94	19,31	0,40	0,45	30,87	14,86
CV 1S%	0,27	1,77	2,86	2,33	-	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla 44. Resultados ensayo MSCR realizado a 58°C para ligantes modificados con 7% de ablandador y 4% de SBS.

	R% 0,1 [KPA]	R% 3,2 [KPA]	NR 0,1 [1/KPA]	JNR 3,2 [1/KPA]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	29,91	22,44	0,34	0,38	24,96	12,01
Muestra 2	30,74	20,85	0,37	0,43	30,74	16,94
Desviación Estándar	0,59	1,13	0,02	0,03	4,09	3,49
Promedio	30,33	21,65	0,35	0,41	27,85	14,47
CV 1S%	1,94	5,21	4,99	8,01	-	-

Fuente: elaboración propia.

En la figura 75 se muestran los resultados del ensayo MSCR realizado a las muestras de ligante asfáltico PG58-28 modificadas con distintas concentraciones de SBS.

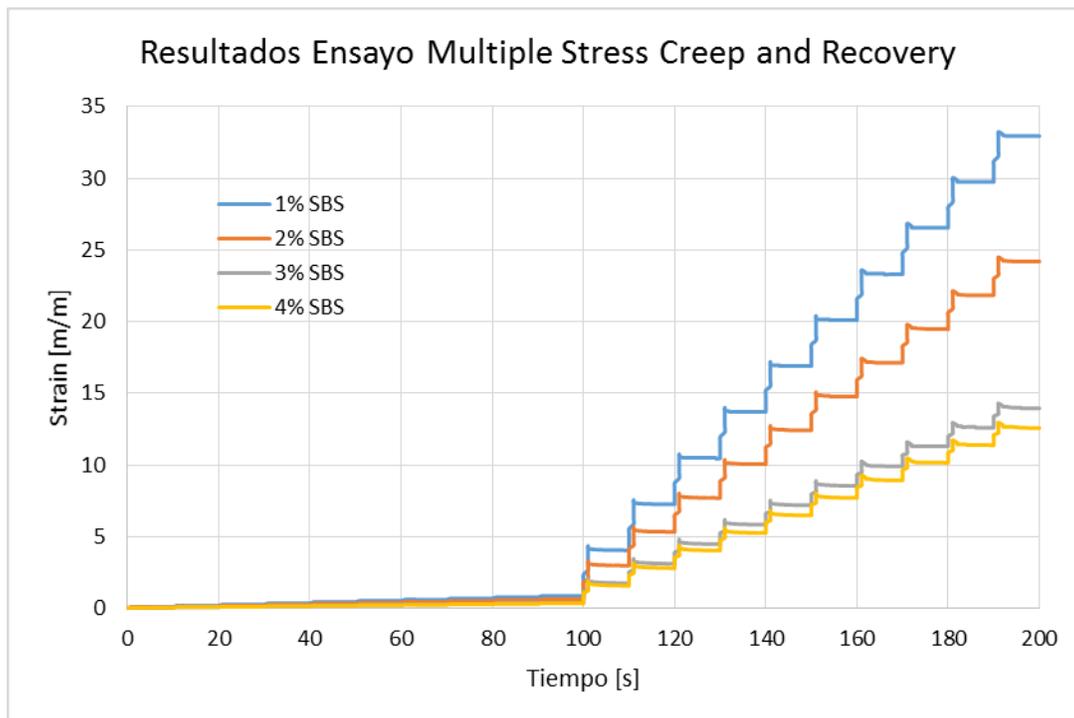


Figura 75. Resultados ensayo MSCR a 58°C. Fuente: elaboración propia.

Además, se realizó un gráfico “Porcentaje de recuperación elástica v/s Flexibilidad en fluencia no recuperable”, ambos medidos a nivel de esfuerzo de 3,2 [kPa]. De acuerdo a lo estipulado en el apéndice A del complemento N°1 del volumen N°8 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2019) los puntos dibujados deben ubicarse sobre la curva que se encuentra la normativa (figura 10 del presente documento) para considerar que la modificación del ligante asfáltico se efectuó con un polímero adecuado. En la figura 76 es posible observar que, a pesar de que se produce un incremento en el porcentaje de recuperación elástica que muestra el ligante a medida que se incrementa la concentración de SBS, esta no alcanza niveles aceptables, dado que los puntos dibujados se sitúan por debajo de la curva.

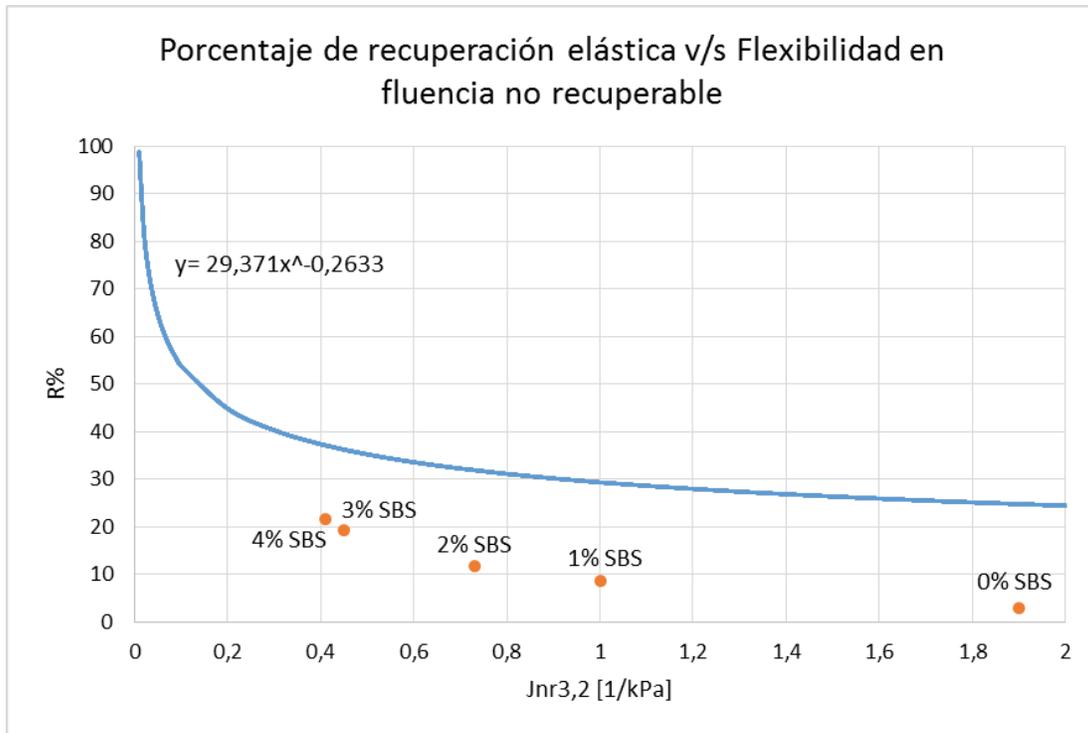


Figura 76. Gráfico “Porcentaje de recuperación elástica v/s Flexibilidad en fluencia no recuperable” medidos a 58°C.
Fuente: elaboración propia.

5.3.3. ANÁLISIS

5.3.3.1. Variabilidad

Con el fin de analizar la repetitividad en el proceso de modificación con ablandador y SBS, es que se realizaron tres mezclas de ligante modificadas con concentraciones de 7% de ablandador y 2% de SBS, obteniéndose los resultados expuestos en la tabla 45.

Tabla 45. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C.

	Jnr3,2 [1/kPa]		
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
M1	0,734	0,728	0,773
M2	0,718	0,718	0,745
Promedio	0,726	0,723	0,759

Fuente: elaboración propia.

Para analizar cuantitativamente los resultados obtenidos, es que se realiza el modelo de análisis de varianza (ANOVA). Cabe destacar que en la tabla 46 se resumen los datos ingresados al modelo ANOVA.

Tabla 46. Resumen datos ingresados a modelo ANOVA.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Mezcla 1	2	1,452	0,726	0,000128
Mezcla 2	2	1,446	0,723	5E-05
Mezcla 3	2	1,518	0,759	0,000392

Fuente: elaboración propia.

Tabla 47. Valores calculados para modelo ANOVA.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,001596	2	0,000798	4,20	0,135	9,5520945
Dentro de los grupos	0,00057	3	0,00019	-	-	-
Total	0,002166	5				

Fuente: elaboración propia.

Se observa en la tabla 47, que el valor de la probabilidad es mayor a 0,05, es decir, no existe una diferencia estadísticamente significativa en el valor promedio de J_{nr} entre los ensayos realizados.

5.3.3.2. Curva “Flexibilidad en fluencia no recuperable (J_{nr}) v/s Concentración de SBS”

A partir, de los valores obtenidos de $J_{nr,3,2}$ se confecciona una curva “Flexibilidad en fluencia no recuperable ($J_{nr,3,2}$) v/s Concentración de SBS”, a la cual se le ajustan líneas de tendencia lineal, cuadrática y cúbica. A continuación, se presentan los datos (tabla 48) y curvas obtenidas (figuras 77, 78 y 79).

Tabla 48. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa] medida a 58°C para distintas concentraciones de SBS.

% SBS	$J_{nr,3,2}$ [1/kPa]
0	1,903
1	0,999
2	0,736
3	0,425
4	0,382

Fuente: elaboración propia.

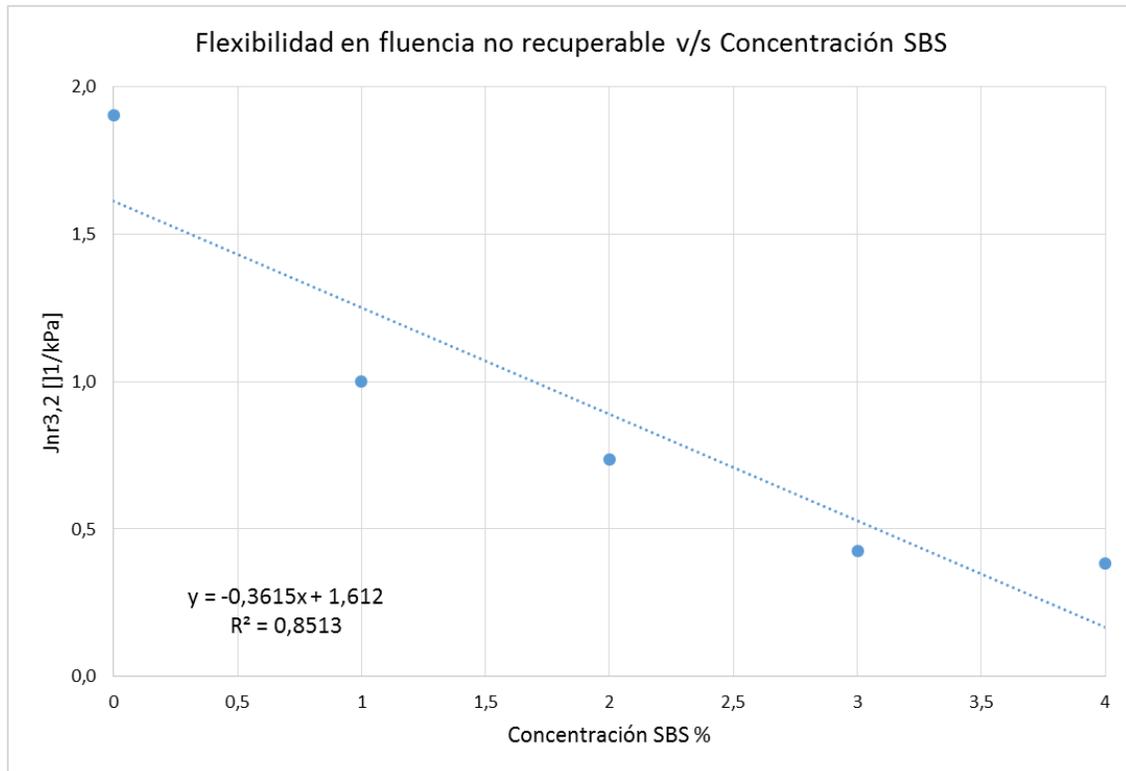


Figura 77. Curva flexibilidad en fluencia no recuperable v/s concentración de SBS, con ajuste lineal. Fuente: elaboración propia.

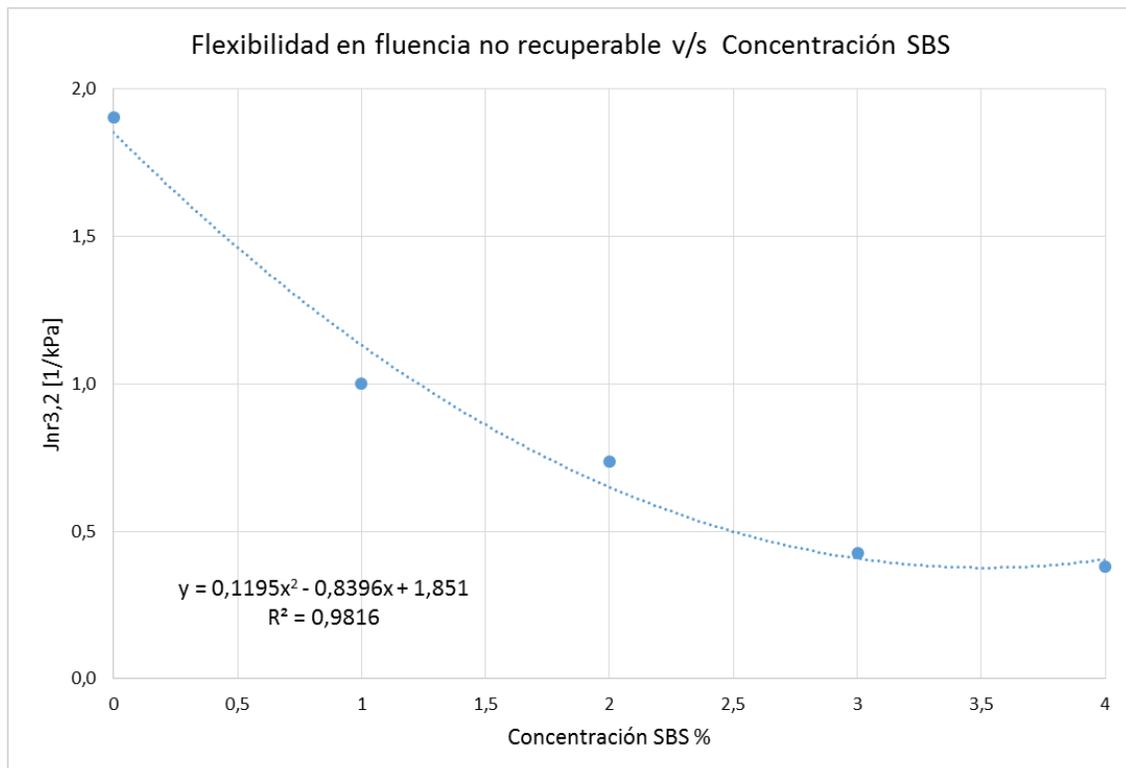


Figura 78. Curva flexibilidad en fluencia no recuperable v/s concentración de SBS, con ajuste cuadrático. Fuente: elaboración propia.

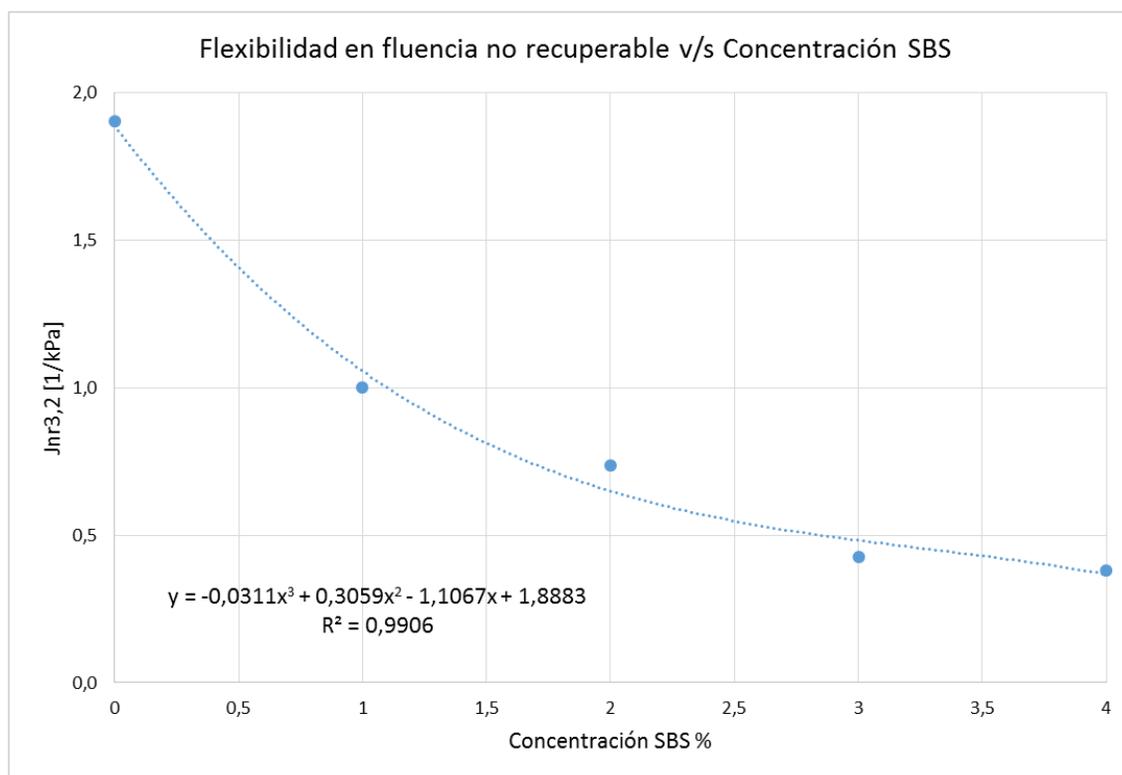


Figura 79. Curva flexibilidad en fluencia no recuperable v/s concentración de SBS, con ajuste cúbico. Fuente: elaboración propia.

5.3.3.3. Determinación de concentraciones de SBS asociadas a los límites de la clasificación por clima

En la clasificación por clima, que se explica en la sección 3.3.3.3, se definen límites que delimitan categorías según volumen y velocidad de tránsito. Basándose en estos límites, que se presentan en la tabla 49, y en las curvas confeccionadas anteriormente, es que se puede estimar la concentración de SBS a incorporar para que un ligante cumpla con cierto rango de la clasificación.

Tabla 49. Límites de categorías según volumen y velocidad de tránsito de norma AASHTO M332-14.

Categoría	Jnr _{3,2} [kPa ⁻¹] máximo	Jnr _{diff} máximo
Standard (S)	4,5	75%
Heavy (H)	2	
Very Heavy (V)	1	
Extremely Heavy (E)	0,5	

Fuente: Elaboración propia con datos de la norma Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test (AASHTO M332, 2014).

A continuación, se revisan las concentraciones obtenidas para cada límite y las consideraciones realizadas, además de sus respectivas gráficas a modo de resumen (figuras 80, 81 y 82).

- **Standard (S ≤ 4,5 [kPa⁻¹]):**

Debido a que la flexibilidad en fluencia no recuperable del ligante con 7% de ablandador es de 1,9 [kPa⁻¹], es que cualquiera de las concentraciones analizadas cumple con esta clasificación.

- **Heavy (H ≤ 2,0 [kPa⁻¹]):**

Debido a que la flexibilidad en fluencia no recuperable del ligante con 7% de ablandador es de 1,9 [kPa⁻¹], es que cualquiera de las concentraciones analizadas cumple con esta clasificación.

- **Very Heavy (V ≤ 1,0 [kPa⁻¹]):**

Para este caso, el límite de la categoría es 1 [kPa⁻¹], por lo tanto, se determina por medio de las regresiones ajustadas anteriormente a los datos, la concentración de SBS que cumple con el límite de esta clasificación. Debido a que la medición de la flexibilidad en fluencia no recuperable presenta cierta variabilidad, es que se le resta tres veces el valor de la desviación estándar al valor del límite de la categoría, obteniendo el valor objetivo.

$$\text{Valor objetivo} = 1[\text{kPa}^{-1}] - 3 \cdot \sigma = 0,938 [\text{kPa}^{-1}]$$

$$\text{Valor Objetivo} = -0,3615 \cdot x + 1,6120$$

Igualando ambas expresiones, se obtiene el valor límite de la categoría Very Heavy para el ajuste lineal:

$$x = 1,866 [\%] \rightarrow \text{Ajuste Lineal}$$

Se realiza el mismo procedimiento para los ajustes cuadrático y cúbico:

$$\text{Valor objetivo} = 0,1195 \cdot x^2 - 0,8396 \cdot x - 1,8510$$

$$x = 1,344 [\%] \rightarrow \text{Ajuste Cuadrático}$$

$$\text{Valor objetivo} = -0,0311 \cdot x^3 + 0,3059 \cdot x^2 - 1,1067 \cdot x - 1,8883$$

$$x = 1,219 [\%] \rightarrow \text{Ajuste Cúbico}$$

- **Extremely Heavy (E ≤ 0,5 [kPa⁻¹]):**

Para este caso, el límite de la categoría es 0,5 [kPa⁻¹], por lo tanto, se determina por medio de las regresiones ajustadas anteriormente a los datos, la concentración de SBS que cumple con el límite de esta clasificación. Debido a que la medición de la flexibilidad en

fluencia no recuperable presenta cierta variabilidad, es que se le resta tres veces el valor de la desviación estándar al valor del límite de la categoría, obteniendo el valor objetivo.

$$\text{Valor objetivo} = 0,5[kPa^{-1}] - 3 \cdot \sigma = 0,438 [kPa^{-1}]$$

$$\text{Valor Objetivo} = -0,3615 \cdot x + 1,6120$$

Igualando ambas expresiones, se obtiene el valor límite de la categoría Extremely Heavy para el ajuste lineal:

$$x = 3,249 [\%] \rightarrow \text{Ajuste Lineal}$$

Se realiza el mismo procedimiento para los ajustes cuadrático y cúbico:

$$\text{Valor objetivo} = 0,1195 \cdot x^2 - 0,8396 \cdot x - 1,8510$$

$$x = 2,797 [\%] \rightarrow \text{Ajuste Cuadrático}$$

$$\text{Valor objetivo} = -0,0311 \cdot x^3 + 0,3059 \cdot x^2 - 1,1067 \cdot x - 1,8883$$

$$x = 3,424 [\%] \rightarrow \text{Ajuste Cúbico}$$

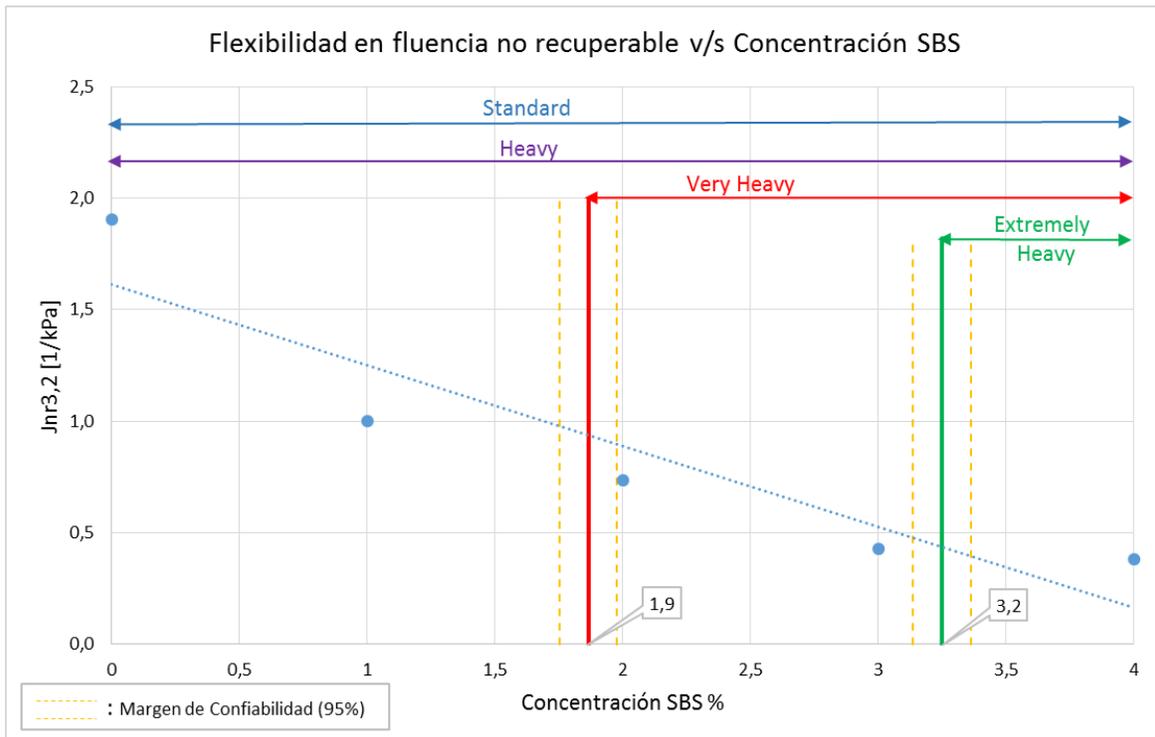


Figura 80. Gráfica resumen de las concentraciones de SBS y los rangos de la clasificación por clima (ajuste lineal). Fuente: elaboración propia.

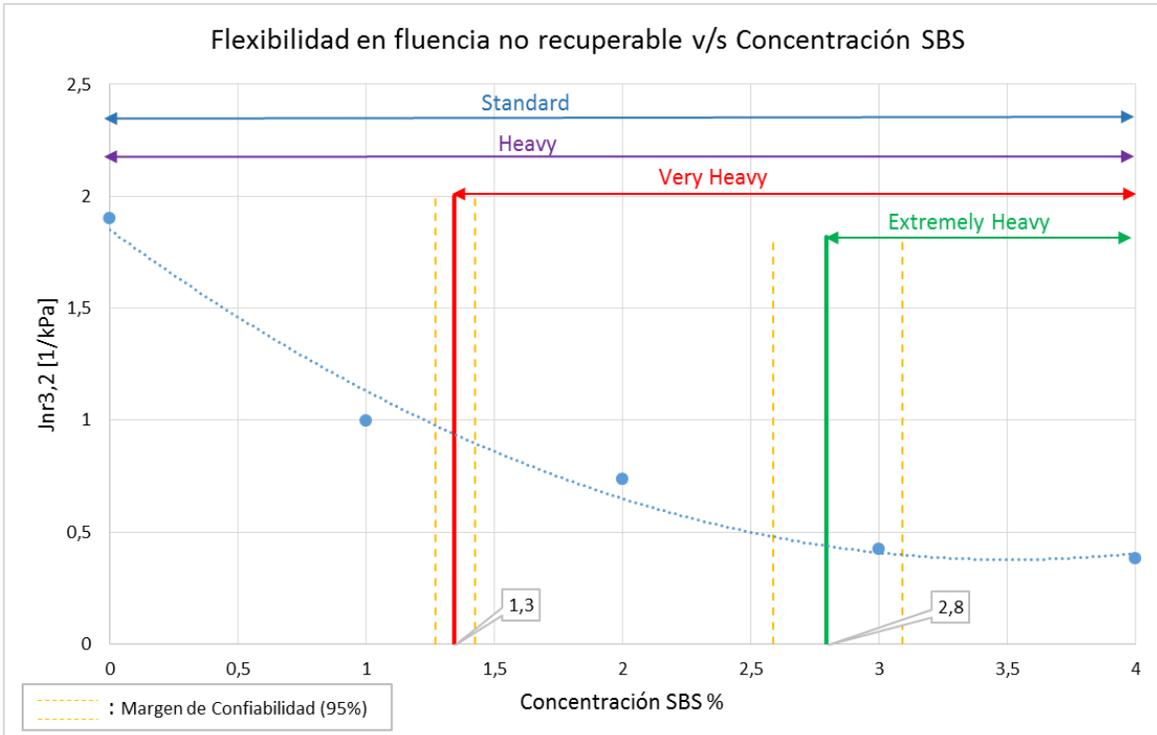


Figura 81. Gráfica resumen de las concentraciones de SBS y los rangos de la clasificación por clima (ajuste cuadrático).
Fuente: elaboración propia.

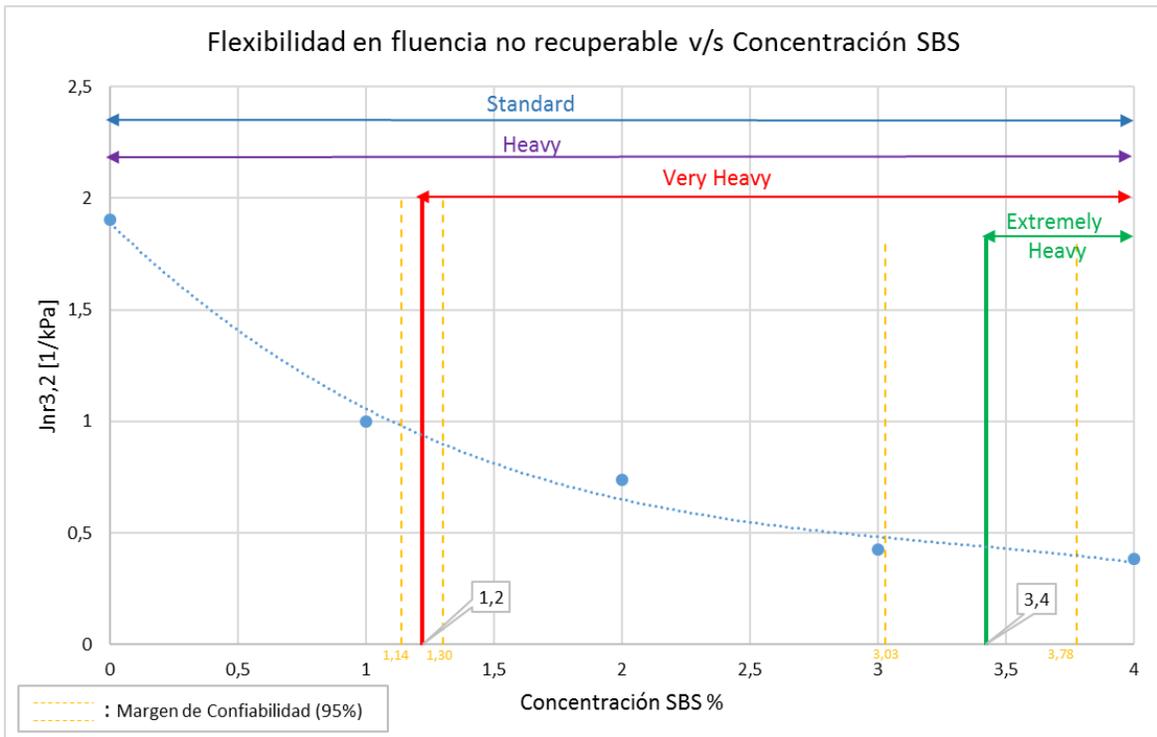


Figura 82. Gráfica resumen de las concentraciones de SBS y los rangos de la clasificación por clima (ajuste cúbico).
Fuente: elaboración propia.

En base a los resultados obtenidos anteriormente y de forma aproximada, es que se consideran que las concentraciones mínimas de SBS para cumplir con cada categoría de la clasificación por clima son las expuestas en la tabla 50.

Tabla 50. Cuadro resumen de las concentraciones mínimas de SBS requeridas para cada nivel de tránsito.

Categoría	Jnr _{3,2} [kPa ⁻¹] máximo	Concentración SBS%
Standard (s)	4,5	0
Heavy (H)	2	0
Very Heavy (V)	1	1,5
Extremely Heavy (E)	0,5	3,5

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.4. Análisis Clasificación por grado de desempeño

Para verificar el desempeño del ligante modificado con ablandador y SBS, tanto a alta como a baja temperatura, es que se realizó una caracterización PG a las muestras modificadas con las concentraciones de SBS asociadas a los límites de las categorías “Very Heavy” y “Extremely Heavy”, determinadas en la sección 5.3.3.3. En la tabla 51 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 51. Resumen de resultados caracterización PG.

% SBS	Jnr _{3,2} [1/kPa]	T° Exacta			Grado PG	
		T° Alta	T° Baja	T° Interm.	T° Alta	T° Baja
0	1,903	61,2	-29,1	13,6	58	-28
1,5	0,887	67,2	-28,7	17,0	64	-28
3,5	0,425	71,8	-25,7	17,3	70	-22

Fuente: elaboración propia.

Se debe notar que los valores exactos de la temperatura alta son entregados directamente por parte del equipo, en cambio los valores exactos de la temperatura baja son calculados en la tabla 52.

Tabla 52. Grado PG exacto de baja temperatura.

		T°	S(t) [Mpa]	Valor m	T° Exacta S(t)	T° Exacta Valor m	T° exacta	T° PG exacta
7% ABLANDADOR + 1,5% SBS	V1	-18	275,969	0,310	-19,7	-18,8	-18,8	-28,7
		-24	533,835	0,232				
	V2	-18	279,084	0,308	-19,4	-18,6	-18,6	
		-24	572,547	0,233				
7% ABLANDADOR+ 3,5% SBS	V1	-12	151,509	0,331	-21,1	-16,2	-16,2	-25,7
		-18	282,169	0,286				
	V2	-12	134,975	0,334	-18,9	-15,2	-15,2	
		-18	321,747	0,271				

Fuente: elaboración propia.

En base a los valores de la Tabla 51, se construyen curvas que permiten ver de mejor manera el comportamiento del ligante (desde figura 83 hasta figura 87).

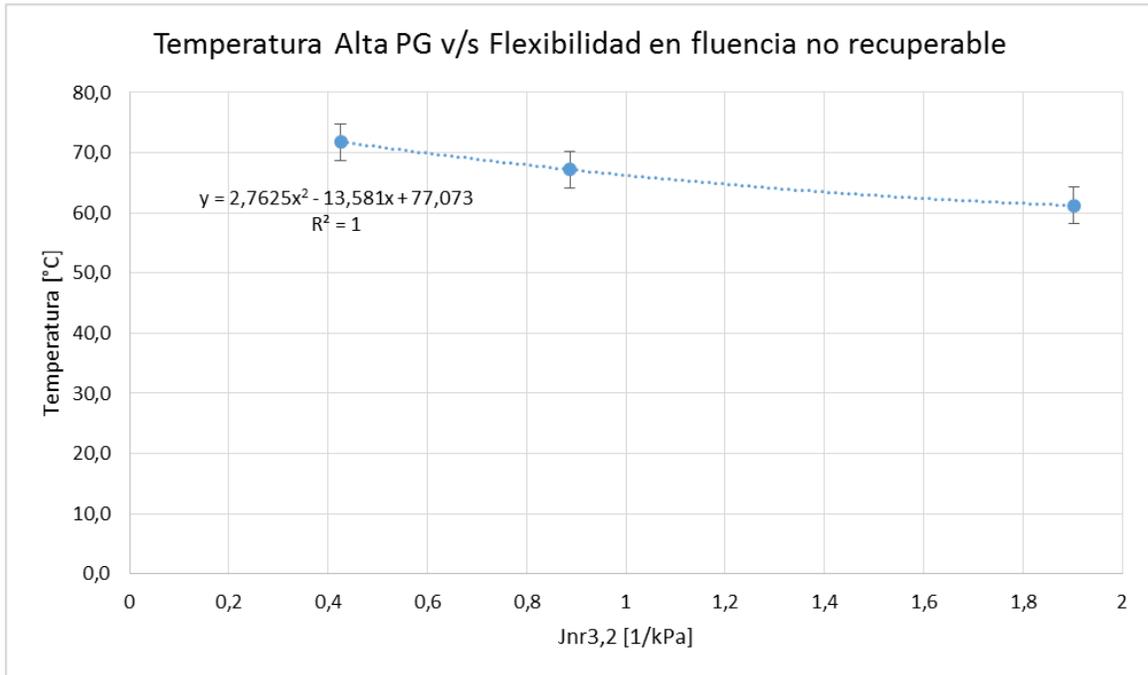


Figura 83. Gráfico temperatura alta PG v/s flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa]. Fuente: elaboración propia.

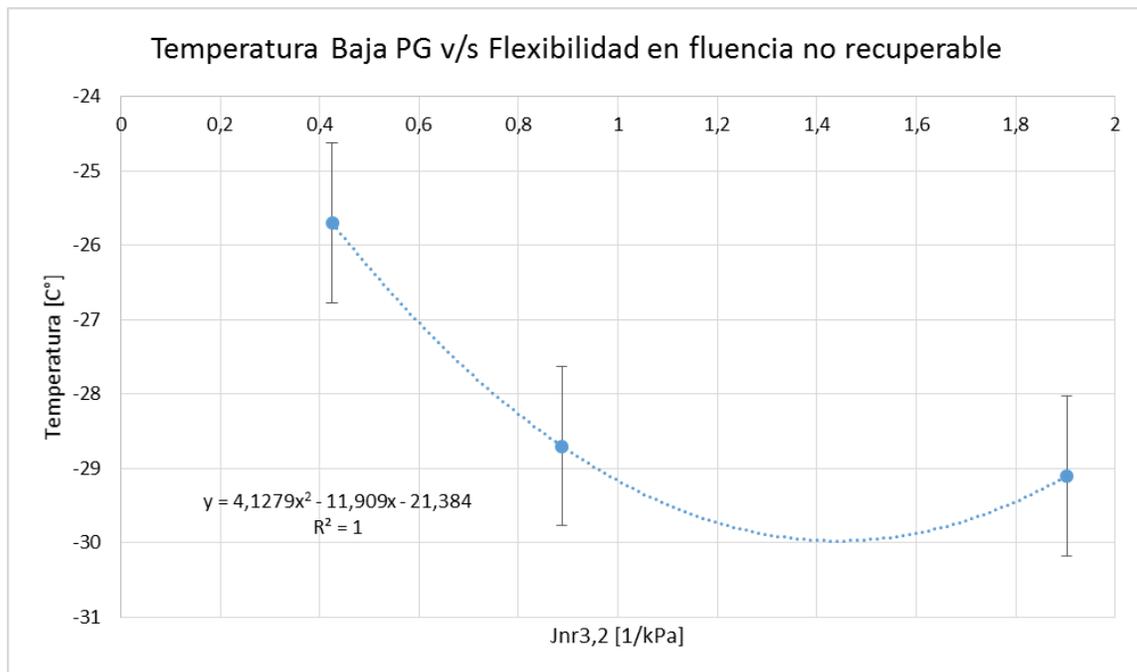


Figura 84. Gráfico temperatura baja PG v/s flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 [kPa]. Fuente: elaboración propia.

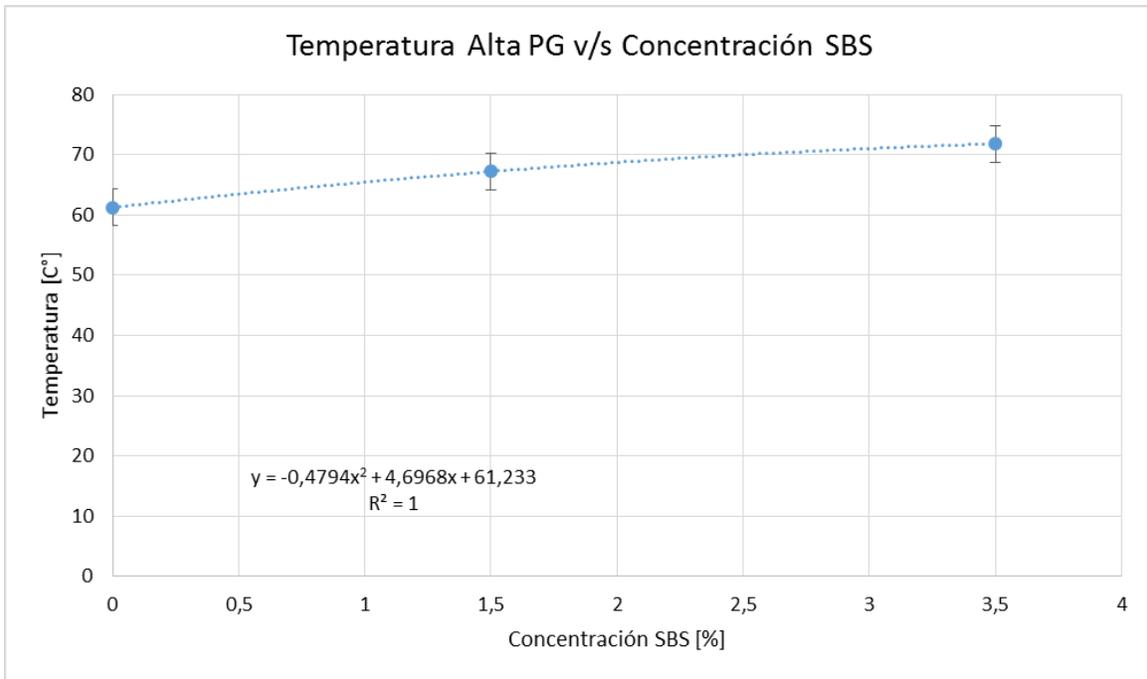


Figura 85. Gráfico temperatura alta PG v/s concentración de SBS. Fuente: elaboración propia.

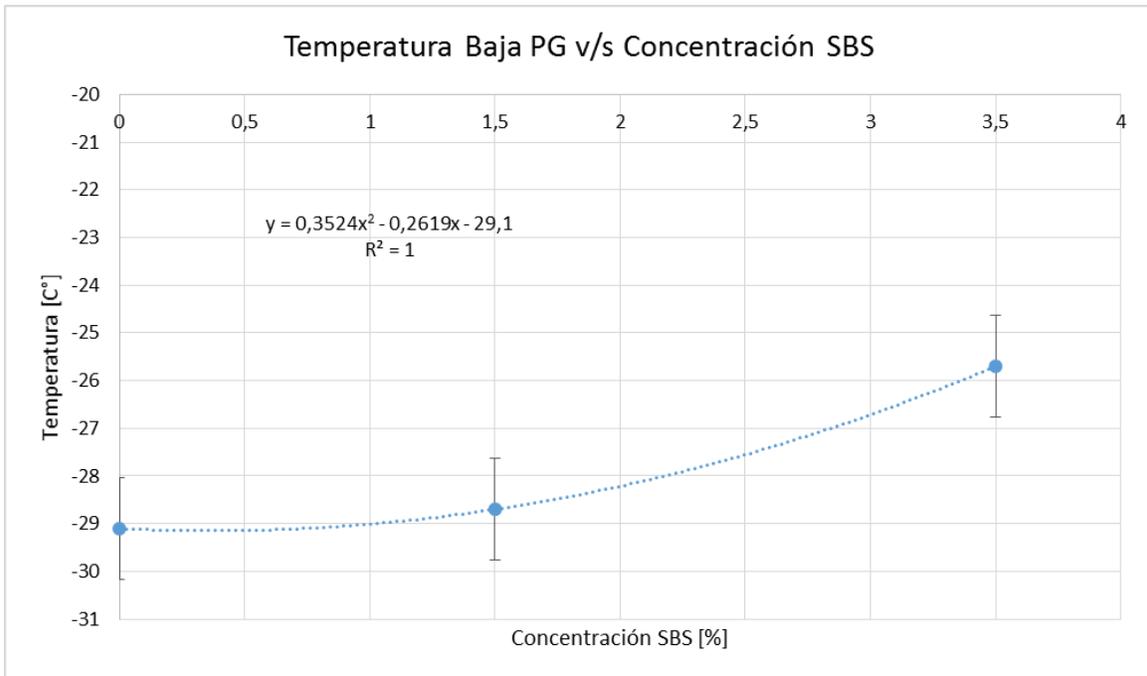


Figura 86. Gráfico temperatura baja PG v/s concentración de SBS. Fuente: elaboración propia.

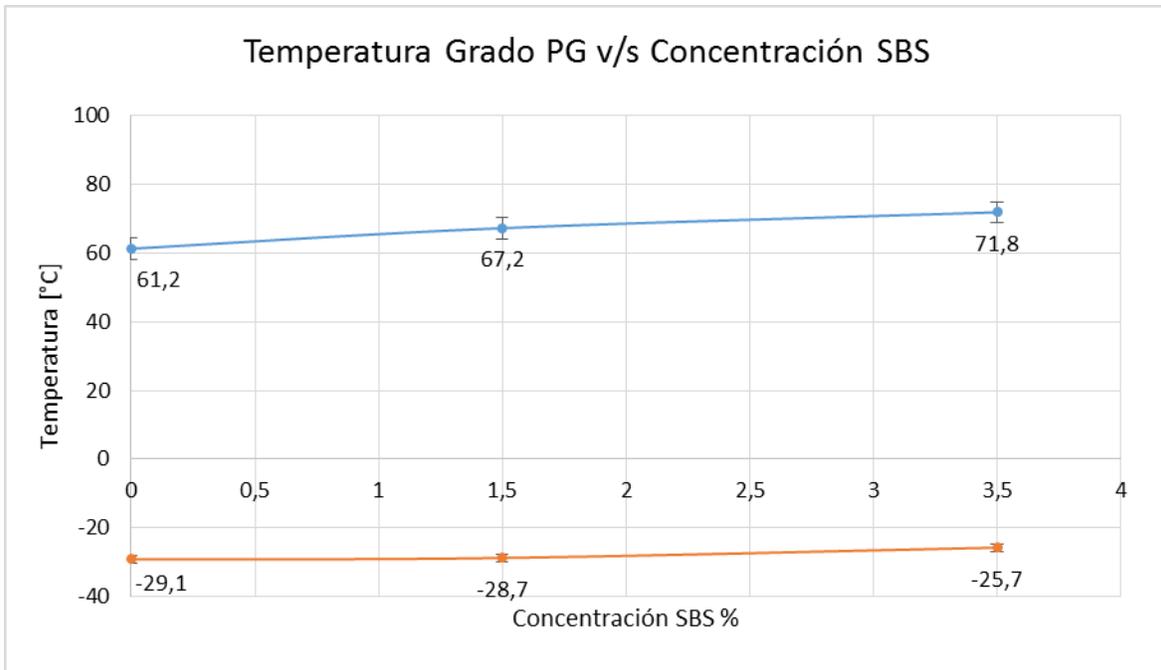


Figura 87. Curva resumen caracterización PG v/s concentración de SBS. Fuente: elaboración propia.

Además, se realizó nuevamente un gráfico “Porcentaje de recuperación elástica v/s Flexibilidad en fluencia no recuperable”, ambos medidos a nivel de esfuerzo de 3,2 [kPa]. De acuerdo a lo estipulado en la normativa los puntos dibujados deben ubicarse sobre la curva (figura 10 del presente documento) para considerar que la modificación del ligante asfáltico se efectuó con un polímero adecuado. En la figura 88 es posible observar que, a pesar de que se produce un incremento en el porcentaje de recuperación elástica que muestra el ligante a medida que se incrementa la concentración de SBS, esta no alcanza niveles aceptables, dado que los puntos dibujados se sitúan por debajo de la curva.

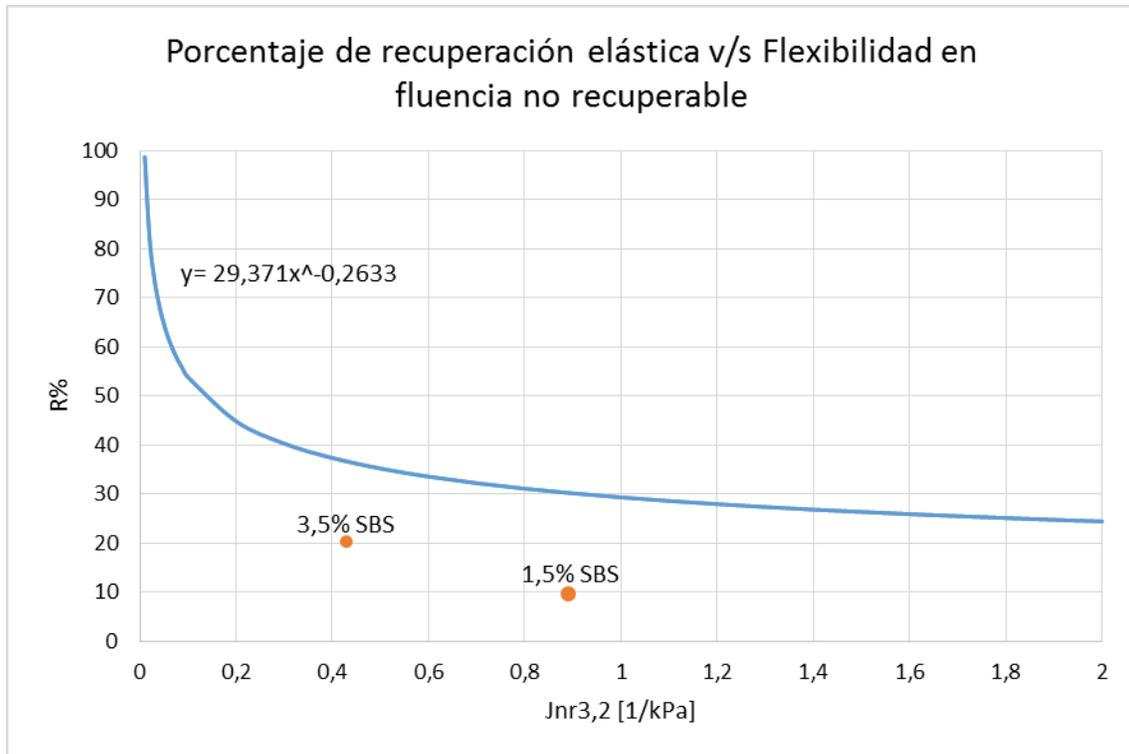


Figura 88. Gráfico "Porcentaje de recuperación elástica v/s Flexibilidad en fluencia no recuperable" medidos a 58°C.
Fuente: elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo investigativo, se realizó la modificación con SBS de un ligante con clasificación por grado de desempeño PG58-28, el cual fue obtenido a partir de la modificación de un ligante tradicional PG64-22 con ablandador. Además, se analizó el cambio en sus propiedades reológicas, mediante la realización del ensayo MSCR, y se buscó estimar las concentraciones de SBS que cumplen con los límites de la clasificación por clima de la norma AASHTO M332-14.

En cuanto a la investigación previa realizada se puede señalar que existe poca información disponible sobre la modificación con ablandador, lo que generó cierta incertidumbre con respecto al procedimiento de modificación óptimo y a los resultados esperados. En cambio, existen suficientes estudios previos sobre la modificación con SBS, pudiendo establecer de forma sencilla un procedimiento de modificación a seguir, además de poseer referencias sobre los efectos que genera este tipo de modificación y los resultados esperados de ella.

En cuanto a la etapa de experimentación realizada y los resultados obtenidos, se obtienen las siguientes observaciones e inferencias:

- Al realizar la caracterización por grado de desempeño del ligante base se obtuvo un ligante PG64-22, lo que concuerda con los resultados esperados para un ligante CA24.
- En base a los valores obtenidos de viscosidad se puede concluir de forma preliminar que el proceso de modificación se llevó a cabo de manera exitosa, debido a que los valores obtenidos muestran una disminución de la viscosidad para los ligantes modificados con ablandador, y un aumento de la viscosidad para los ligantes modificados con SBS, considerando para este último caso el ligante PG58-28, obtenido de la modificación con ablandador, como ligante base.
- La modificación del ligante PG64-22 con ablandador mostró una relación directamente proporcional entre los valores obtenidos para la temperatura exacta del grado PG del ligante modificado y la cantidad de ablandador incorporada. Cabe señalar que el cambio en las temperaturas es más significativo para el grado de alta temperatura, llegando a disminuir cerca de 16°C para una concentración de 15% de ablandador, en cambio para igual concentración se produce una disminución de solo 9°C para el grado de baja temperatura. De esta forma se concluye que para una concentración de 7% de ablandador es posible obtener un ligante con clasificación por grado de desempeño PG58-28.
- Con respecto a los resultados entregados por el ensayo MSCR, el cual fue realizado a una temperatura de 58°C a diferentes muestras obtenidas de la modificación del ligante PG58-

28 con SBS, es posible señalar que existe una relación inversamente proporcional entre el valor de la flexibilidad en fluencia no recuperable (J_{nr}) y la concentración de SBS, lo que está en concordancia con los resultados esperados, ya que este tipo de modificación busca mejorar el desempeño del ligante frente al ahuellamiento generado por la deformación permanente de la carpeta asfáltica.

- En base a los resultados exhibidos en la curva de “Porcentaje de recuperación elástica v/s Flexibilidad en fluencia no recuperable”, es posible señalar que el ligante modificado con SBS no alcanza un nivel Porcentaje de recuperación adecuado, debido a que los puntos graficados se ubican por debajo de la curva presente en la normativa (Apéndice A del complemento N°1 del volumen N°8 del Manual de Carreteras), lo cual puede deberse a que no se produce adecuadamente la formación de una red polimérica.
- En referencia a la curva de “Flexibilidad en fluencia no recuperable v/s Concentración de SBS” obtenida, se observa que las líneas de tendencia ajustadas representan de buena forma los resultados obtenidos, por lo que es posible estimar a partir de estas las concentraciones de SBS que se encuentran asociadas a los límites de la clasificación propuesta por la norma AASHTO M332-14.
- Se le realizó un análisis de varianza (ANOVA) a los resultados obtenidos de flexibilidad en fluencia no recuperable ($J_{nr,3,2}$), tanto para el proceso de modificación con ablandador como para el proceso de modificación con SBS, llegando a la conclusión que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras obtenidas, siendo esto un indicador de la correcta realización del proceso de modificación.
- A partir de la caracterización por grado de desempeño, realizada a los ligantes obtenidos para las concentraciones de SBS que cumple con los límites de la norma AASHTO M332-14, se puede concluir que se produce un incremento en los valores para el grado de alta temperatura a medida que aumenta la concentración de SBS, lo que refleja un mejor desempeño del ligante en zonas climáticas donde la temperatura del pavimento es elevada. De igual forma se produce un incremento en el grado de baja temperatura, que se hace más significativo conforme aumenta la concentración de SBS, lo que significa un empeoramiento en el desempeño del ligante en zonas de temperaturas bajas extremas.

Finalmente, a modo de recomendación, se recalca la necesidad de realizar más investigaciones sobre la modificación de ligante asfáltico, tanto con ablandador como con SBS a nivel nacional, analizando los efectos que provoca la utilización de estos ligantes sobre el

desempeño de los pavimentos asfálticos, con la finalidad de generar una metodología que permita la selección del ligante asfáltico más adecuado para una determinada zona de estudio.

7. REFERENCIAS

- AASHTO M320. (2016). *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*. Washington D.C., Estados Unidos.
- AASHTO M323. (2012). *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. Washington D.C., Estados Unidos.
- AASHTO M332. (2014). *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*. Washington D.C., Estados Unidos.
- AASHTO T350. (2014). *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Washington D.C., Estados Unidos.
- Anderson, M. (2012). *Evaluation of Jnr Criterion for Unmodified Asphalt Binders*. Minneapolis, Estados Unidos: Asphalt Institute.
- Arteaga, L. (2017). *Comparación de Zonificaciones SUPERPAVE para Chile y Cuantificación de la Influencia del Cambio Climático en la Selección del Ligante Asfáltico*. Valparaíso, Chile.
- ASTM D4402. (2015). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. West Conshohocken, Estados Unidos.
- Daly, W. (2017). Asphalt Additives and Modifiers. En W. Daly, *Relationship Between Chemical Makeup of Binders and Engineering Performance* (págs. 41- 52). Baton Rouge, Estados Unidos: National Academy of Sciences.
- D'Angelo, J. (2010). *New High-temperature Binder Specification Using Multiple Stress Creep and Recovery*. Washington DC, Estados Unidos: Federal Highway Administration.
- Davidson, T., Nolan, A., & Metha, Y. (2014). *Study to Evaluate the Effects of SBS Polymer Modification on the True Grade of an Asphalt Binder*. Nueva Jersey, Estados Unidos: ASCE.
- Delgadillo, R. (2016). *Apuntes de clases CIV-369*. Valparaíso, Chile.
- Dirección de Vialidad. (2018). *Manual de Carreteras, Volumen N°5*. Santiago, Chile.
- Dirección de Vialidad. (2018). *Manual de Carreteras, Volumen N°7*. Santiago, Chile.
- Dirección de Vialidad. (2018). *Manual de Carreteras, Volumen N°8*. Santiago, Chile.
- Dirección de Vialidad. (2019). *Manual de Carreteras, Complemento N°1 Volumen N°8*. Santiago, Chile.
- Dirección de Vialidad. (1 de Mayo de 2019). *Información de Tránsito*. Obtenido de <http://servicios.vialidad.cl/censo/>

- Dreessen, S., Gallet, T., Dumont, A., & Pittet, M. (2012). *Durability study: Field experience of long-term evolution of SBS polymer modified binder. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012*. Estambul, Turquía.
- *Encyclopedia*. (10 de Enero de 2019). Obtenido de <https://www.encyclopedia.com/science/academic-and-educational-journals/polystyrene-butadiene-styrene>
- Federal Highway Administration. (2000). *Superpave Fundamentals Reference Manual*. Washington D.C., Estados Unidos: U.S Department of Transportation.
- Golalipour, A. (2013). *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders*. Tesis para optar al grado de PhD de la Ingeniería Civil & Ambiental, University of Wisconsin-Madison, Madison, Estados Unidos.
- Greene, J., Choubane, B., & Chun, S. (2013). *Evaluation of a Heavy Polymer Modified Binder through Accelerated Pavement Testing. TRB 2013 Annual Meeting*. Gainesville, Estados Unidos.
- Lyngdal, E. (2015). *Critical analysis of PG and PG+ asphalt binder test methods*. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil & Ambiental, University of Wisconsin-Madison, Madison, Estados Unidos.
- Masson, J., Collins, P., Robertson, G., Woods, J., & Margeson, J. (2003). Thermodynamics, Phase Diagrams and Stability of Bitumen-Polymer Blends. *Energy & Fuels* , 714-724.
- Metha, Y., Nolan, A., Dahm, K., Dusseau, R., Roller, K., Grusmark, K., . . . Villiers, C. (2012). *Correlation of Polymer Modification to Mechanical Properties of Binders. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012*. Estambul, Turquía.
- Navarro, N. (2013). *Confeción y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Polacco, G., Filippi, S., Mesuri, F., & Stastna, G. (2015). *A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. Advances in Colloid an Interface Science*, 72-112. Amsterdam, Holanda.
- *Solpetroleo*. (17 de Abril de 2019). Obtenido de <http://www.solpetroleo.com/fisico-quimica-del-asfalto>

- Sylla, R. (2015). *Effects of oil Modification on Aging Characteristics of Asphalt Materials*. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil & Ambiental, University of Wisconsin-Madison, Madison, Estados Unidos.
- *Tecnología de los Plásticos*. (11 de Enero de 2018). Obtenido de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/sbs.html>
- Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges. *European Polymer Journal*, 18-38.
- Zorn, S., Metha, Y., Dahm, K., Batten, E., Nolan, A., & Dusseau, R. (2011). *Rheological Properties of the Polymer Modified Bitumen with Emphasis on SBS Polymer and its Microstructure*. Nueva Jersey, Estados Unidos: ASCE.

8. ANEXOS

8.1. CARACTERIZACIÓN PG

8.1.1. 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]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]	
		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]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]	
		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	12-07-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	177759,5
Última Verificación Conformidad	12-07-2018
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	0,2773	0,2977	0,3181	0,3385	0,3588
Coefficiente 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]	983,8	983,6	982,6	982,7	982,1	979,6
Deflexión [mm]	0,2641	0,3147	0,3860	0,6052	0,6052	0,7762
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	303,9020	255,0113	207,6944	132,3945	132,3945	102,9689
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	303,6483	255,2349	207,8911	132,1212	132,1212	103,0892
Diferencia [%]	-0,0835	0,0877	0,0947	-0,2064	-0,2064	0,1169
Valor m Estimado	0,2669	0,2857	0,3063	0,3476	0,3476	0,3683
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]	0,0					
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	0,2175	0,2348	0,2521	0,2694	0,2867
Coefficiente de Regresión R2	0,99993					
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	980,4	980,4	979,9
Deflexión [mm]	0,1321	0,1518	0,1784	0,2546	0,2546	0,3079
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	606,7010	528,1235	448,3766	314,2053	314,2053	259,6729
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	606,4443	528,2835	449,2460	314,8965	314,8965	259,5580
Diferencia [%]	-0,0423	0,0303	0,1939	0,2200	0,2200	-0,0442
Valor m Estimado	0,2127	0,2263	0,2413	0,2713	0,2713	0,2863
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 $G^* \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 17,2 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

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

8.1.2. LIGANTE 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
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	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 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	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 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]	100,1
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]							Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					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]							Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					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]	T° Falla
3% Abl.	M1	3760	5450	-	-	-	-	-	16,7
	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
Coefficiente 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
Coefficiente 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
Coefficiente 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	N° 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
---------------	-------

8.1.3. LIGANTE 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	Sra. Alejandra Zamora Maric
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	15:16:00

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]	100,2
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	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	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]						Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]				Temp. [°C]	T°Prom.	
5% Abl.	M1	2,02	0,96	-	-	-	63,7	63,8
	M2	2,03	0,98	-	-	-	63,9	
Condición		CUMPLE	FALLA	-	-	-	-	

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	20-12-2018
Hora de ensayo [hrs]	13:49

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]						Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]				Temp. [°C]	T°Prom.	
5% Abl.	M1	6,43	2,98	1,40	-	-	66,4	66,9
	M2	6,89	3,27	1,59	-	-	67,3	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-		

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
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	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1,0	1,0	1,0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G* sen(δ) [KPa]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000 [KPa]	T° Falla
5% Abl.	M1	3050	4420	6130	-	-	-	-	14,9
	M2	3410	4970	6970,000	-	-	-	-	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]	194438,8
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]	981,9	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		35,1			
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	0,282	0,383
Coefficiente 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	984,1	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	0,392	0,1140	-0,2422	-0,1691	0,1620
Valor m Estimado	0,2915	0,3114	0,3334	0,3553	0,3773	0,3992
Coefficiente 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	0,2639	0,2798	0,2956	0,3115	0,3273
Coefficiente 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	0,2600	0,2784	0,2969	0,3154	0,3338
Coefficiente 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	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
5% Abl.	11-12-2018	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 64-22 es 25 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 15,4 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

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

8.1.4. LIGANTE 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
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	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:

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 Ensaye 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	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 Ensaye 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]	100,3
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]	25,0
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]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]	
		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]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]	
		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* sen(δ) [KPa]								
	Temperatura de Ensayo [°C]							Falla a 5000 [KPa]	T° Falla
	Muestra	19	16	13	-	-	-	-	
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	19-06-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	175805,2
Última Verificación Conformidad	19-06-2018
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	0,2811	0,2973	0,3135	0,3297	0,3459
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]	35,3					
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	79,6
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	0,2638	0,2815	0,3010	0,3205	0,3400	0,3596
Coefficiente 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	980,5	979,7	978,4	978,1	327,2
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	0,1810	0,1986	0,2180	0,2374	0,2568	0,2762
Coefficiente 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
Coefficiente 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.		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
---------------	-------

8.1.5. LIGANTE CON 12% DE ABLANDADOR

INFORME DE ENSAYO ASFALTO 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	13-12-2018
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 [%]	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	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	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	46,0
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	03-12-2018
Hora de ensayo	15:20:00

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]	100,1
Temperatura Mínima Registrada [°C]	89,9
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:32:50
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20:00:00
Fecha de Ensayo	03-12-2018
Hora de ensayo	14:39:48

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	25-10-2018
Hora de ensayo [hrs]	14:29

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	12,0	12,0	-	-

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]							Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Temp. [°C]	T°Prom.
12% Abl.	M1	5,61	2,62	1,25	0,62	-	-	59,9	60,0
	M2	5,72	2,66	1,27	0,63	-	-	60,0	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-		

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
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	1,49	-	-	-
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	1,52	-	-	-
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]							Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Temp. [°C]	T°Prom.
12% Abl.	M1	6,81	3,17	1,51	-	-	61,0	61,1	
	M2	6,79	3,20	1,53	-	-	61,1		
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-			

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	11-12-2018
Hora de ensayo [hrs]	14:40

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]	2629	4050	6040	8890	-	-	-
Ángulo de Fase (δ)[°]	43,8	41,6	39,500	37,5	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1,0	1,0	1,0	1,0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G* sen(δ) [KPa]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]				Falla a 5000 [KPa]			T° Falla
12% Abl.		M1	1940	2900	4150	5810	-	-	
	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	13-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	194438,8
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]	-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	0,284	0,300	0,318	0,3356	0,353	0,371
Coefficiente de Regresión R2	0,99993					
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	0,338	0,356	0,374
Coefficiente 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	0,268	0,288	0,307
Coefficiente 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	589,8328	487,8328	397,6744	319,5526
Diferencia [%]	-0,3033	0,4026	0,2748	-0,3218	-0,2949	0,2455
Valor m Estimado	0,224	0,243	0,264	0,284	0,305	0,326
Coefficiente 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	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
12% Abl.	11-12-2018	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 $G^* \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 11,0 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	58-28
---------------	-------

8.1.6. LIGANTE CON 14% DE ABLANDADOR

INFORME DE ENSAYO ASFALTO 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
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	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	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Original
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	46,0
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	08-11-2018
Hora de ensayo	15:20:00

3.3.3.2 Condiciones del ensayo:

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Estado Asfalto	Envejecido HPDR
Temperatura Ensayo Inicial [°C]	46,0
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]	102,0
Temperatura Mínima Registrada [°C]	95,3
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:11:12
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20:00:00
Fecha de Ensayo	08-11-2018
Hora de ensayo	14:12:01

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	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]							Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Temp. [°C]	T°Prom.	
14% Abl.	M1	3,86	1,79	0,85	-	-	-	56,7	56,8
	M2	3,89	1,82	0,87	-	-	-	56,9	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	-		

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
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	1,110	-	-
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	1,090	-	-
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]							Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Temp. [°C]	T°Prom.	
14% Abl.	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	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	11-12-2018
Hora de ensayo [hrs]	14:40

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	36,800	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1,0	1,0	1,0	-	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G* sen(δ) [KPa]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 5000 [KPa]	T° Falla
		13	10	7	-	-	-	-	
14% Abl.	M1	3260	4640	6510	-	-	-	-	9,3
	M2	3060	4590	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	13-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	194438,8
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]	-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	223,6905	141,4175	110,3479	84,5267
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	272,6423	224,4025	224,4025	141,1568	109,9984	84,7168
Diferencia [%]	-0,2447	0,3228	0,1999	-0,1843	-0,3166	0,2249
Valor m Estimado	0,302	0,317	0,317	0,351	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	979,6	979,0	978,7	977,5	75,8
Deflexión [mm]	0,3052	0,3752	0,4659	0,5881	0,7530	0,9840
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	261,8343	214,4328	171,4133	135,7803	105,9173	80,9069
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	0,352	0,370	0,388
Coefficiente 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	0,287	0,305	0,322
Coefficiente 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	-0,0040	0,0281	-0,1262	0,0710
Valor m Estimado	0,232	0,247	0,262	0,277	0,293	0,308
Coefficiente 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	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
14% Abl.	11-12-2018	1	-18,0	135,7803	0,3519	CUMPLE	CUMPLE
		2	-18,0	141,4175	0,3513	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 16 [°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
---------------	-------

8.1.7. LIGANTE CON 15% DE ABLANDADOR

INFORME DE ENSAYO ASFALTO 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
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]	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]	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	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]	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]	100,5
Temperatura Mínima Registrada [°C]	88,2
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:52:31
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20:00:00
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 ensayo [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]							Falla a 1,0 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Temp. [°C]	T°Prom.	
15% Abl.	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]							Falla a 2,2 [KPa]	
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Temp. [°C]	T°Prom.	
15% Abl.	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	9319	-	-
Ángulo de Fase (δ)[°]	45,9	43,6	41,5	39,5	37,500	-	-
Amplitud de deformación [%]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G* sen(δ) [KPa]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]					Falla a 5000 [KPa]		
		19	16	13	10	7	-	T° Falla	
15% Abl.	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	13-12-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	194438,8
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]	-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]	721,2			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	309,9018	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	0,3412	0,0676
Valor m Estimado	0,310	0,324	0,338	0,353	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
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]	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	490,7105	342,7357	280,1681	227,0573	182,0793
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	490,2585	490,2585	342,5744	280,1020	226,9263	182,1633
Diferencia [%]	-0,0921	-0,0921	-0,0471	-0,0239	-0,0577	0,0461
Valor m Estimado	0,259	0,259	0,284	0,297	0,310	0,324
Coefficiente 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]	487,4274	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 [%]	-0,0205	0,3017	0,1699	-0,3524	-0,0029	0,0898
Valor m Estimado	0,242	0,258	0,276	0,293	0,311	0,329
Coefficiente 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]	0,5450					

Tipo	Fecha de Investigación	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
15% Abl.	07-12-2018	1	-18,0	132,1328	0,3531	CUMPLE	CUMPLE
		2	-18,0	126,6310	0,3574	CUMPLE	CUMPLE
		3	-24,0	280,1691	0,2971	CUMPLE	FALLA
		4	-24,0	284,7355	0,2934	CUMPLE	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 52-28 es 16 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \cdot \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 8,9 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	52-28
---------------	-------

8.1.8. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1,5% DE SBS

INFORME DE ENSAYO 7% ABLANDADOR + 1,5% SBS 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	25-02-2019
Hora de ensayo	9:43
Viscosidad [Pa·s]	0,506
Viscosidad [Poise]	5,1
Tasa corte [1/s]	18,6
Tensión corte [N/m ²]	94,1
Torque [%]	20,2
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	07-03-2019
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	293

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	20-02-2019
Hora de ensayo	16:00:00

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]	101,3
Temperatura Mínima Registrada [°C]	
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:09:27
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	19-02-2019
Hora de ensayo	17:00:00

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 ensayo [mm]	8,0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	25-02-2019
Hora de ensayo [hrs]	11:34

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	3,00	1,48	0,74	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	80,9	83,5	85,5	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12,0	12,0	12,0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	2,86	1,41	0,71	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	81,2	83,7	85,6	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	12,0	12,0	12,0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 1,0 [KPa]	
		58	64	70	-	-	-	Temp. [°C]	T°Prom.
7% Abl. + 1,5% SBS	M1	3,04	1,49	0,74	-	-	-	67,4	67,2
	M2	2,90	1,42	0,71	-	-	-	67,0	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-	-		

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	21-02-2019
Hora de ensayo [hrs]	13:09

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	8,58	4,24	2,11	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	72,4	76,3	79,7	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10,0	10,0	10,0	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	-	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	8,51	4,21	2,08	-	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	72,6	76,5	79,8	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	10,0	10,0	10,0	-	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]						Falla a 2,2 [KPa]	
		58	64	70	-	-	-	Temp. [°C]	T°Prom.
7% Abl. + 1,5% SBS	M1	9,00	4,37	2,14	-	-	-	69,8	69,8
	M2	8,51	4,33	2,12	-	-	-	69,7	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-			

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	28-02-2019
Hora de ensayo [hrs]	9:47

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	19	16	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*)[KPa]	6490	9660	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ)[°]	40,1	37,9	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1,0	1,0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	19	16	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*)[KPa]	5770	8590	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ)[°]	40,2	38,0	-	-	-	-
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
7% Abl. +	M1	4180	5930	-	-	-	-	17,5
1,5% SBS	M2	3720	5280	-	-	-	-	16,5
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]	-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	19-06-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	175805,2
Última Verificación Conformidad	19-06-2018
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	-24,0
Máx. Carga [mN]	984,3	984,8
Mín. Carga [mN]	671,1	671,7
Carga contacto t=0[mN]	36,4	35,3
Carga 0,5 s [mN]	671,1	671,7

Muestra	M2					
Máxima T° [°C]	-18,0		-23,9			
Mínima T° [°C]	-18,1		-24,0			
Máx. Carga [mN]	986,5		982,9			
Mín. Carga [mN]	674,5		670,8			
Carga contacto t=0[mN]	36,0		35,8			
Carga 0,5 s [mN]	674,5		670,8			
Temperatura [°C]	-18,0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8,0	15,0	30,0	60,0	120,0	240,0
Carga [mN]	984,3	983,7	983,9	983,4	981,7	980,3
Deflexión [mm]	0,1676	0,1966	0,2372	0,2903	0,3619	0,4630
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	479,0847	408,2190	338,4044	276,4209	221,2923	172,7372
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	478,0114	409,3490	339,1441	275,9688	220,5571	173,1280
Diferencia [%]	-0,2240	0,2768	0,2186	-0,1636	-0,3322	0,2263
Valor m Estimado	0,2349	0,2585	0,2844	0,3104	0,3363	0,3623
Coefficiente de Regresión R2	0,99998					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	981,3					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	310,2					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3,0					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0,0229					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0,0442					
Temperatura [°C]	-18,0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8,0	15,0	30,0	60,0	120,0	240,0
Carga [mN]	985,4	985,7	985,4	984,7	984,8	984,0
Deflexión [mm]	0,1662	0,1947	0,2363	0,2879	0,3593	0,4578
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	483,6570	413,0280	340,2095	279,0842	223,6002	175,3840
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	483,1680	412,9062	341,8149	278,3578	222,9898	175,7258
Diferencia [%]	-0,1011	-0,0303	0,4719	-0,2603	-0,2730	0,1949
Valor m Estimado	0,2393	0,2607	0,2844	0,3081	0,3318	0,3555
Coefficiente de Regresión R2	0,99997					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	983,8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	309,4					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	2,7					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0,0106					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0,0515					
Temperatura [°C]	-24,0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8,0	15,0	30,0	60,0	120,0	240,0
Carga [mN]	983,4	984,1	983,5	982,8	981,0	979,5
Deflexión [mm]	0,0980	0,1112	0,1281	0,1502	0,1755	0,2108
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	818,4899	722,2728	626,1434	533,8350	455,9097	379,1465
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	817,5789	723,4088	625,7365	535,5435	453,5171	380,0040
Diferencia [%]	-0,1113	0,1573	-0,0650	0,3200	-0,5248	0,2261
Valor m Estimado	0,1877	0,2016	0,2169	0,2322	0,2475	0,2628
Coefficiente de Regresión R2	0,99994					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980,8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	309,8					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	4,0					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0,0085					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0,0371					

Temperatura [°C]	-24,0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8,0	15,0	30,0	60,0	120,0	240,0
Carga [mN]	982,5	982,5	982,1	981,8	980,6	980,0
Deflexión [mm]	0,0926	0,1041	0,1201	0,1399	0,1651	0,1984
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	865,5826	769,9675	667,4484	572,5470	484,5007	403,0147
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	865,2720	769,9279	668,3325	572,4200	483,7452	403,3651
Diferencia [%]	-0,0359	-0,0051	0,1325	-0,0222	-0,1559	0,0869
Valor m Estimado	0,1770	0,1945	0,2138	0,2332	0,2525	0,2718
Coefficiente de Regresión R2	0,99999					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	980,4					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	309,6					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	2,4					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0,0087					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0,0335					

Tipo	Fecha de Investigación	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
7% Abl. + 1,5% SBS		1	-18,0	275,9688	0,3104	CUMPLE	CUMPLE
		2	-18,0	279,0842	0,3081	CUMPLE	CUMPLE
		3	-24,0	533,8350	0,2322	FALLA	FALLA
		4	-24,0	572,5470	0,2332	FALLA	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 64-28 es 22 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 17,0 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	64-28
---------------	-------

8.1.9. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3,5% DE SBS

INFORME DE ENSAYO 7% ABLANDADOR + 3,5% SBS 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	11:05
Viscosidad [Pa·s]	0,727
Viscosidad [Poise]	7,3
Tasa corte [1/s]	18,6
Tensión corte [N/m ²]	135,2
Torque [%]	29,1
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	07-03-2019
Ejecutado por	Sr. Rodrigo Verdugo
Punto de Inflamación [°C]	295

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 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	22-02-2019
Hora de ensayo	16:00:00

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 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]	89,2
Tiempo fuera de rango [hrs]	0:29:30
Tiempo total de envejecimiento [hrs]	20
Fecha de Ensayo	26-02-2019
Hora de ensayo	17:00:00

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 ensayo [mm]	8,0

3.5 Clasificación PG Estado Original

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	25-02-2019
Hora de ensayo [hrs]	11:34

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	4,48	2,25	1,15	0,61	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	76,7	79,7	82,0	83,7	-	-
Amplitud de deformación [%]	12,0	12,0	12,0	12,0	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	4,87	2,45	1,25	0,66	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	76,3	79,6	82,1	84,0	-	-
Amplitud de deformación [%]	12,0	12,0	12,0	12,0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]				Falla a 1,0 [KPa]		Temp. [°C]	T°Prom.
		58	64	70	76	-	-		
7% Abl. + 3,5% SBS	M1	4,60	2,29	1,17	0,62	-	-	71,4	71,8
	M2	5,02	2,49	1,26	0,66	-	-	72,2	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-		

3.6 Clasificación PG Envejecido HPDR

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	22-02-2019
Hora de ensayo [hrs]	13:09

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	13,10	6,66	3,35	1,69	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	67,4	72,1	76,3	79,8	-	-
Amplitud de deformación [%]	10,0	10,0	10,0	10,0	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	58	64	70	76	-	-
Módulo Complejo (G*) [KPa]	12,50	6,39	3,22	1,64	-	-
Ángulo de Fase (δ) [°]	67,8	72,5	76,7	80,2	-	-
Amplitud de deformación [%]	10,0	10,0	10,0	10,0	-	-

Tipo Betún	Parámetro G*/sen(δ) [KPa]								
	Muestra	Temperatura de Ensayo [°C]				Falla a 2,2 [KPa]		Temp. [°C]	T°Prom.
		58	64	70	76	-	-		
7% Abl. + 3,5% SBS	M1	14,10	7,00	3,45	1,72	-	-	73,9	73,8
	M2	13,50	6,70	3,31	1,66	-	-	73,6	
Condición		CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	FALLA	-	-		

3.7 Clasificación PG Envejecido PAV

Ejecutado por	Sra. Alejandra Zamora Maric
Fecha de Ensayo	18-03-2019
Hora de ensayo [hrs]	11:10

Muestra	M1					
Temperatura [°C]	19	16	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*)[KPa]	6840	10200	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ)[°]	37,6	35,4	-	-	-	-
Amplitud de deformación [%]	1,0	1,0	-	-	-	-

Muestra	M2					
Temperatura [°C]	19	16	-	-	-	-
Módulo Complejo (G*)[KPa]	6550	9749	-	-	-	-
Ángulo de Fase (δ)[°]	37,8	35,6	-	-	-	-
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
7% Abl. +	M1	4170	5880	-	-	-	-	17,4
3,5% SBS	M2	4010	5670	-	-	-	-	17,1
Condición	CUMPLE	FALLA	-	-	-	-	-	-
Temperatura promedio [°C]								17,3

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]	-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	19-06-2018
Rigidez Medida Viga de Acero [MPa]	175805,2
Última Verificación Conformidad	19-06-2018
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	-17,9
Mínima T° [°C]	-12,0	-18,0
Máx. Carga [mN]	988,0	980,6
Mín. Carga [mN]	670,7	665,4
Carga contacto t=0[mN]	34,9	36,8
Carga 0,5 s [mN]	670,7	665,4

Muestra	M2					
Máxima T° [°C]	-11,9	-17,9				
Mínima T° [°C]	-11,9	-18,0				
Máx. Carga [mN]	985,9	986,5				
Mín. Carga [mN]	670,7	662,8				
Carga contacto t=0[mN]	36,5	36,7				
Carga 0,5 s [mN]	670,7	662,8				
Temperatura [°C]	-12,0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8,0	15,0	30,0	60,0	120,0	240,0
Carga [mN]	987,7	987,4	986,8	986,5	984,3	982,4
Deflexión [mm]	0,2887	0,3490	0,4284	0,5312	0,6703	0,8671
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	279,0987	230,8034	187,9147	151,5094	119,7955	92,4357
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	277,7072	232,4192	188,5467	150,9010	119,1494	92,8150
Diferencia [%]	-0,4986	0,7001	0,3363	-0,4015	-0,5393	0,4103
Valor m Estimado	0,2744	0,2921	0,3116	0,3311	0,3506	0,3701
Coefficiente de Regresión R2	0,99991					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	983,8					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	988,0					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	670,7					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0,0516					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0,0560					
Temperatura [°C]	-12,0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8,0	15,0	30,0	60,0	120,0	240,0
Carga [mN]	984,9	982,8	984,7	984,7	983,2	982,2
Deflexión [mm]	0,3187	0,3855	0,4767	0,5952	0,7518	0,9710
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	252,1362	207,9834	168,5354	134,9752	106,6984	82,5363
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	251,2307	209,0734	168,8209	134,7117	106,2274	82,7789
Diferencia [%]	-0,3591	0,5241	0,1694	-0,1952	-0,4415	0,3061
Valor m Estimado	0,2845	0,3000	0,3171	0,3342	0,3513	0,3687
Coefficiente de Regresión R2	0,99996					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	982,4					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	311,6					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3,6					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0,0380					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0,0768					
Temperatura [°C]	-18,0					
Muestra	M1					
Tiempo [s]	8,0	15,0	30,0	60,0	120,0	240,0
Carga [mN]	979,8	980,0	980,4	979,2	978,6	977,0
Deflexión [mm]	0,1674	0,1958	0,2342	0,2831	0,3471	0,4311
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	477,4262	408,4613	341,5493	282,1687	230,0197	184,8837
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	476,8581	409,2046	341,7095	281,9137	229,7830	185,0386
Diferencia [%]	-0,1190	0,1820	0,0691	-0,0904	-0,1029	0,0837
Valor m Estimado	0,2355	0,2513	0,2688	0,2862	0,3031	0,3212
Coefficiente 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]	312,4					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	2,7					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0,0142					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0,0520					

Temperatura [°C]	-18,0					
Muestra	M2					
Tiempo [s]	8,0	15,0	30,0	60,0	120,0	240,0
Carga [mN]	985,3	984,9	984,5	985,2	984,1	982,2
Deflexión [mm]	0,1523	0,1785	0,2102	0,2498	0,3027	0,3752
Módulo de Rigidez Medido [MPa]	527,9344	450,1028	382,0680	321,7469	265,2270	213,5774
Módulo de Rigidez Estimado [MPa]	524,4542	454,4244	383,5747	319,9045	263,6166	214,6484
Diferencia [%]	-0,6592	0,9601	0,3944	-0,5726	-0,6071	0,4968
Valor m Estimado	0,2201	0,2359	0,2532	0,2705	0,2879	0,3052
Coefficiente de Regresión R2	0,99978					
Carga Promedio de 0,5 a 240 s [MPa]	983,2					
Máxima Desviación de carga 0,5 a 5s [mN]	320,4					
Máxima Desviación de carga 5 a 240s [mN]	3,3					
Deflexión en Tiempo 0 s [mm]	0,0346					
Deflexión en Tiempo 0,5 s [mm]	0,0341					

Tipo	Fecha de Investigación	N° Análisis	T °C	S[MPa]	Valor m	Criterio Stiffness	Criterio Valor m
7% Abl. + 3,5% SBS		1	-12,0	151,5094	0,3311	CUMPLE	CUMPLE
		2	-12,0	134,9752	0,3342	CUMPLE	CUMPLE
		3	-18,0	282,1687	0,2862	CUMPLE	FALLA
		4	-18,0	321,7469	0,2705	FALLA	FALLA

3.9.- Temperatura intermedia

La Temperatura intermedia de un 70-22 es 28 [°C], por lo cual se cumple, ya que $G^* \sin \delta \leq 5000$ [KPa] en 17,3 [°C].

3.10.- Clasificación por Desempeño PG

Clasificación	70-22
---------------	-------

8.2. VISCOSIDAD

8.2.1. LIGANTE BASE

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
555	020,0	022,2	103,2	018,6	134,9	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 16:42:47
553	020,0	022,1	102,8	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 16:45:47
555	020,0	022,2	103,2	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 16:48:47

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
554	020,0	022,2	103,1	018,6	135,0

8.2.2. LIGANTE CON 3% DE ABLANDADOR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
443	020,0	017,7	082,31	018,60	135,0	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	11-06-2018 11:44:40
443	020,0	017,7	082,31	018,60	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	11-06-2018 11:47:40
445	020,0	017,8	082,77	018,60	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	11-06-2018 11:50:40

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
443	020,0	017,7	082,5	018,6	134,9

8.2.3. LIGANTE CON 5% DE ABLANDADOR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
380	020,0	015,2	070,7	018,6	135,0	575	01:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	12-07-2018 13:05:20
378	020,0	015,1	070,2	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	12-07-2018 13:08:20
380	020,0	015,2	070,7	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	12-07-2018 13:11:20

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
379	020,0	015,2	070,5	018,6	135,0

8.2.4. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR

8.2.4.1. Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
330	020,0	013,2	061,4	018,6	134,9	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	14-06-2018 11:11:50
330	020,0	013,2	061,4	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	14-06-2018 11:14:50
333	020,0	013,3	061,8	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	14-06-2018 11:17:51

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
331	020,0	013,2	061,5	018,6	134,9

8.2.4.2. Envejecimiento Primario (RTFO)

M1

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
559	050,0	055,9	259,9	046,5	134,9	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	05-09-2018 11:42:40
558	050,0	055,8	259,5	046,5	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	05-09-2018 11:45:40
560	050,0	056,0	260,4	046,5	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	05-09-2018 11:48:40

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
559	050,0	055,9	259,9	046,5	134,9

M2

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
578	020,0	023,1	107,4	018,6	134,9	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	15-01-2019 16:58:34
580	020,0	023,2	107,9	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	15-01-2019 17:01:34
578	020,0	023,1	107,4	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	15-01-2019 17:04:34

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
578	020,0	023,1	107,6	018,6	134,9

M3

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
575	020,0	023,0	107,0	018,6	135,0	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	13-09-2018 13:04:15
578	020,0	023,1	107,4	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	13-09-2018 13:07:15
578	020,0	023,1	107,4	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	13-09-2018 13:10:16

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
577	020,0	023,1	107,3	018,6	135,0

8.2.5. LIGANTE CON 12% DE ABLANDADOR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
268	050,0	026,8	124,6	046,5	134,9	575	01:03:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	03-12-2018 13:10:04
267	050,0	026,7	124,2	046,5	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	03-12-2018 13:13:04
268	050,0	026,8	124,6	046,5	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	03-12-2018 13:16:05

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
268	050,0	026,8	124,5	046,5	134,9

8.2.6. LIGANTE 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

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
227	050,0	022,7	105,7	046,5	134,9

8.2.7. LIGANTE CON 15% DE ABLANDADOR

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
203	020,0	008,1	037,7	018,6	134,9	575	01:03:00,4	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 11:05:57
203	020,0	008,1	037,7	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 11:08:57
203	020,0	008,1	037,7	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-06-2018 11:11:57

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
203	020,0	008,1	037,7	018,6	134,9

8.2.8. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1% DE SBS

8.2.8.1. Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
498	020,0	019,9	092,5	018,6	134,9	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 14:50:49
495	020,0	019,8	092,1	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 14:53:49
495	020,0	019,8	092,1	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 14:56:49

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
496	020,0	019,8	092,2	018,6	134,9

8.2.8.2. Envejecimiento Primario (RTFO)

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
833	020,0	033,3	154,8	018,6	134,9	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 13:35:55
830	020,0	033,2	154,4	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 13:38:55
833	020,0	033,3	154,8	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 13:41:55

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
832	020,0	033,3	154,7	018,6	134,9

8.2.9. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 2% DE SBS

8.2.9.1. Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
603	020,0	024,1	112,1	018,6	135,0	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 16:41:22
605	020,0	024,2	112,5	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 16:44:23
603	020,0	024,1	112,1	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 16:47:23

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
603	020,0	024,1	112,2	018,6	134,9

8.2.9.2. Envejecimiento Primario (RTFO)

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
1.100	020,0	044,0	204,6	018,6	135,0	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 15:25:38
1.095	020,0	043,8	203,7	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 15:28:38
1.098	020,0	043,9	204,1	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 15:31:38

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
1.098	020,0	043,9	204,1	018,6	135,0

8.2.10. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE SBS

8.2.10.1. Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
725	020,0	029,0	134,9	018,6	134,9	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	22-02-2019 11:05:04
728	020,0	029,1	135,3	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	22-02-2019 11:08:04
728	020,0	029,1	135,3	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	22-02-2019 11:11:04

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
727	020,0	029,1	135,2	018,6	134,9

8.2.10.2. Envejecimiento Primario (RTFO)

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
1.360	020,0	054,4	253,0	018,6	135,0	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	22-02-2019 13:12:41
1.353	020,0	054,1	251,6	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	22-02-2019 13:15:42
1.360	020,0	054,4	253,0	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	22-02-2019 13:18:42

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
1.358	020,0	054,3	252,5	018,6	134,9

8.2.11. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 4% DE SBS

8.2.11.1. Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
840	020,0	033,6	156,2	018,6	135,0	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 12:31:20
840	020,0	033,6	156,2	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 12:34:20
840	020,0	033,6	156,2	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 12:37:20

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
840	020,0	033,6	156,2	018,6	135,0

8.2.11.2. Envejecimiento Primario (RTFO)

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
1.503	020,0	060,1	279,5	018,6	134,9	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 11:44:29
1.500	020,0	060,0	279,0	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 11:47:29
1.503	020,0	060,1	279,5	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 11:50:29

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
1.502	020,0	060,1	279,3	018,6	134,9

8.2.12. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1,5% DE SBS

8.2.12.1. Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
505	020,0	020,2	093,9	018,6	135,0	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 9:43:22
508	020,0	020,3	094,4	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 9:46:22
505	020,0	020,2	093,9	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 9:49:22

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
506	020,0	020,2	094,1	018,6	134,9

8.2.12.2. Envejecimiento Primario (RTFO)

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
863	020,0	034,5	160,4	018,6	134,9	575	01:33:00,3	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	22-02-2019 15:38:51
860	020,0	034,4	160,0	018,6	135,0	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	22-02-2019 15:41:51
863	020,0	034,5	160,4	018,6	134,9	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	22-02-2019 15:44:51

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
862	020,0	034,5	160,3	018,6	134,9

8.2.13. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3,5% DE SBS

8.2.13.1. Estado Original

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
755	020,0	030,2	140,4	018,6	134,8	575	01:33:00,4	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 10:04:55
758	020,0	030,3	140,9	018,6	134,4	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 10:07:56
758	020,0	030,3	140,9	018,6	134,7	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	26-02-2019 10:10:56

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
757	020,0	030,3	140,7	018,6	134,6

8.2.13.2. Envejecimiento Primario (RTFO)

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad	Temperatura	Bath	Intervalo	Husillo	Modelo	Identificación de Brookfield	Fecha y Tiempo
1.320	020,0	052,8	245,5	018,6	134,5	575	01:33:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 17:55:44
1.318	020,0	052,7	245,1	018,6	134,5	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 17:58:44
1.318	020,0	052,7	245,1	018,6	134,5	575	00:03:00,2	SC4-21	RV	Rheocalc Data1	25-02-2019 18:01:44

Valores Promedio

mPas	rpm	%	N/m ²	1/s	°C
1.318	020,0	052,7	245,2	018,6	134,5

8.3. MULTIPLE STRESS CREEP & RECOVERY

Cabe señalar que todos los ensayos MSCR se realizaron a 58°C.

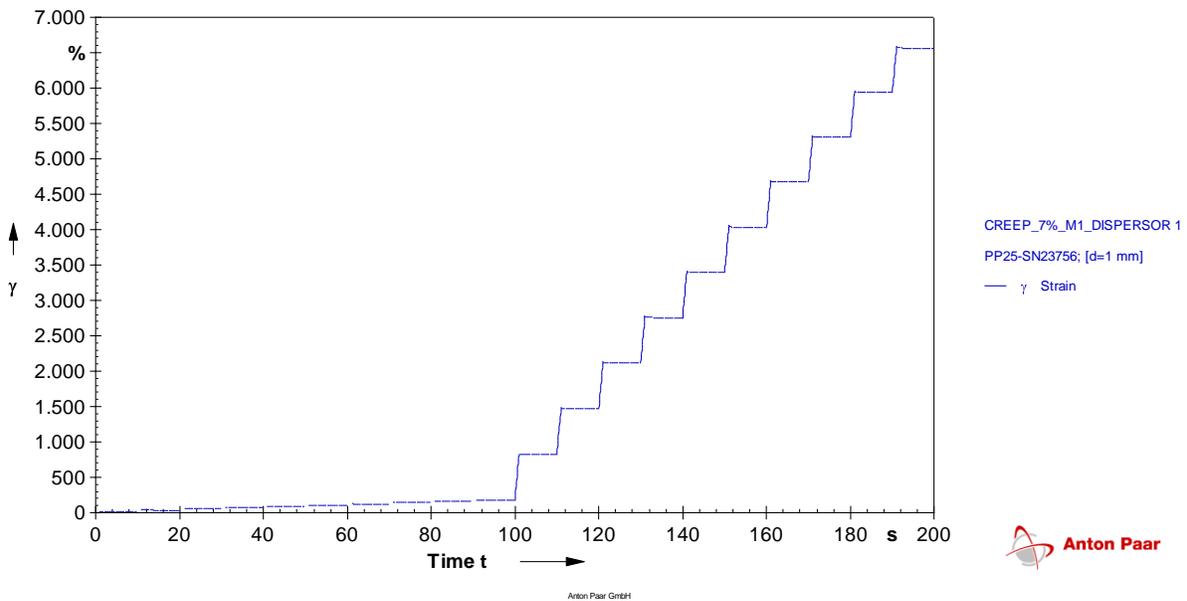
8.3.1. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR

8.3.1.1. Mezcla 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	Jnr
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[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

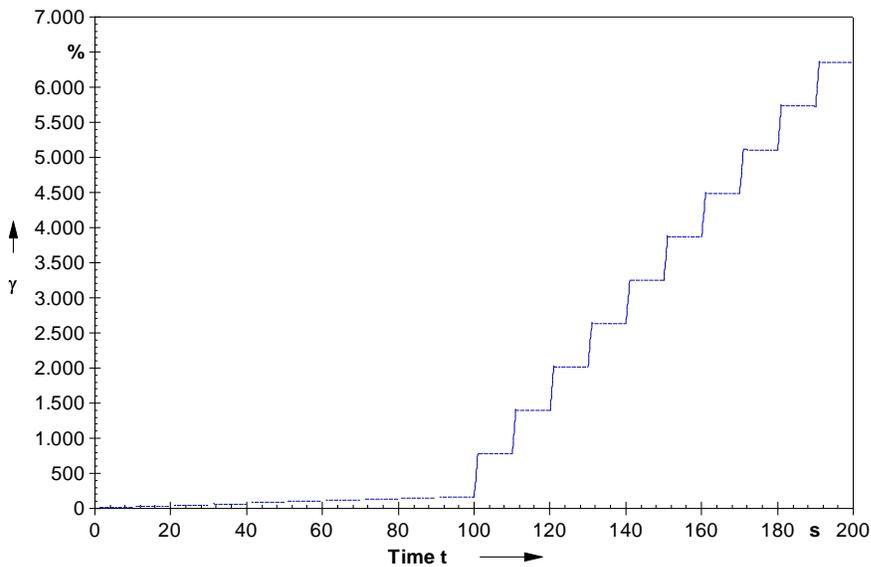
Creep Test: Gamma



Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0,000	0,185	0,164	0,185	0,164	0,021	11,351		1,640	1,620
2	0,164	0,349	0,327	0,185	0,163	0,022	11,892		1,630	
3	0,327	0,511	0,489	0,184	0,162	0,022	11,957		1,620	
4	0,489	0,673	0,651	0,184	0,162	0,022	11,957		1,620	
5	0,651	0,834	0,812	0,183	0,161	0,022	12,022		1,610	
6	0,812	0,995	0,973	0,183	0,161	0,022	12,022	12,467	1,610	
7	0,973	1,160	1,130	0,187	0,157	0,030	16,043		1,570	
8	1,130	1,320	1,290	0,190	0,160	0,030	15,789		1,600	
9	1,290	1,480	1,460	0,190	0,170	0,020	10,526		1,700	
10	1,460	1,640	1,620	0,180	0,160	0,020	11,111		1,600	
11	1,620	7,940	7,750	6,320	6,130	0,190	3,006		1,916	
12	7,750	14,100	13,900	6,350	6,150	0,200	3,150	2,808	1,922	
13	13,900	20,300	20,100	6,400	6,200	0,200	3,125		1,938	
14	20,100	26,500	26,300	6,400	6,200	0,200	3,125		1,938	
15	26,300	32,600	32,500	6,300	6,200	0,100	1,587		1,938	
16	32,500	38,800	38,700	6,300	6,200	0,100	1,587		1,938	
17	38,700	45,100	44,900	6,400	6,200	0,200	3,125		1,938	
18	44,900	51,300	51,100	6,400	6,200	0,200	3,125		1,938	
19	51,100	57,500	57,300	6,400	6,200	0,200	3,125		1,938	
20	57,300	63,700	63,500	6,400	6,200	0,200	3,125		1,938	
Rdiff								77,476	Jnr-diff	19,367

Creep Test: Gamma



CREEP_7%ABLANDADOR_M1_DISPERSOR 1
PP25-SN23756; [d=1 mm]
— γ Strain

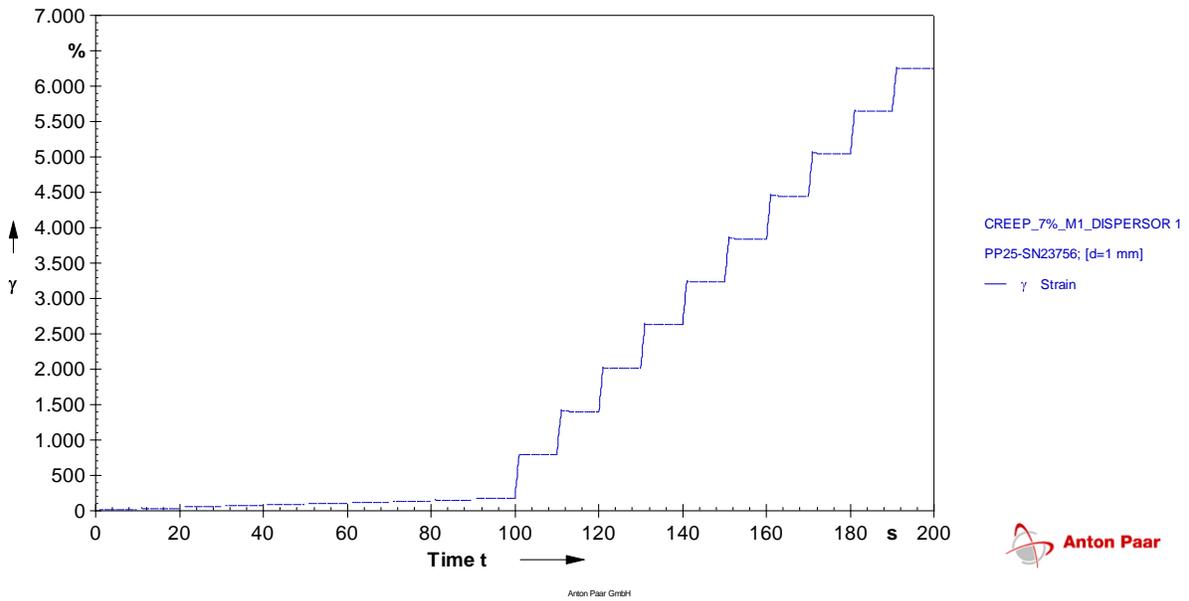


Anton Paar GmbH

Muestra 3

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]	
1	0,000	0,199	0,179	0,199	0,179	0,020	10,050		1,790	1,700	
2	0,179	0,375	0,354	0,196	0,175	0,021	10,714		1,750		
3	0,354	0,549	0,528	0,195	0,174	0,021	10,769		1,740		
4	0,528	0,720	0,700	0,192	0,172	0,020	10,417		1,720		
5	0,700	0,890	0,869	0,190	0,169	0,021	11,053		1,690		
6	0,869	1,060	1,040	0,191	0,171	0,020	10,471		1,710		
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	1,720	1,700	0,190	0,170	0,020	10,526		1,700		
11	1,700	8,050	7,870	6,350	6,170	0,180	2,835		1,928		
12	7,870	14,200	14,000	6,330	6,130	0,200	3,160		1,916		
13	14,000	20,400	20,200	6,400	6,200	0,200	3,125		1,938		
14	20,200	26,500	26,300	6,300	6,100	0,200	3,175		1,906		
15	26,300	32,600	32,400	6,300	6,100	0,200	3,175		1,906		
16	32,400	38,600	38,400	6,200	6,000	0,200	3,226		1,875		
17	38,400	44,700	44,500	6,300	6,100	0,200	3,175		1,906		
18	44,500	50,700	50,500	6,200	6,000	0,200	3,226		1,875		
19	50,500	56,700	56,500	6,200	6,000	0,200	3,226		1,875		
20	56,500	62,600	62,400	6,100	5,900	0,200	3,279		1,844		
								Rdiff	70,399	Jnr-diff	11,581

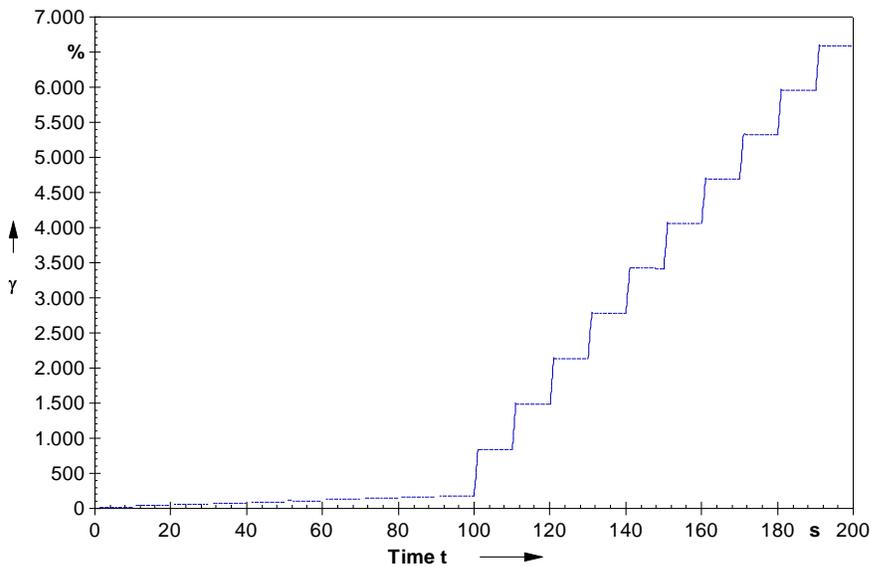
Creep Test: Gamma



Muestra 4

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]	
1	0,000	0,210	0,189	0,210	0,189	0,021	10,000		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		2,041	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

Creep Test: Gamma



CREEP_7%ABLANDADOR_M1_DISPERSOR 1
PP25-SN23756; [d=1 mm]
— γ Strain

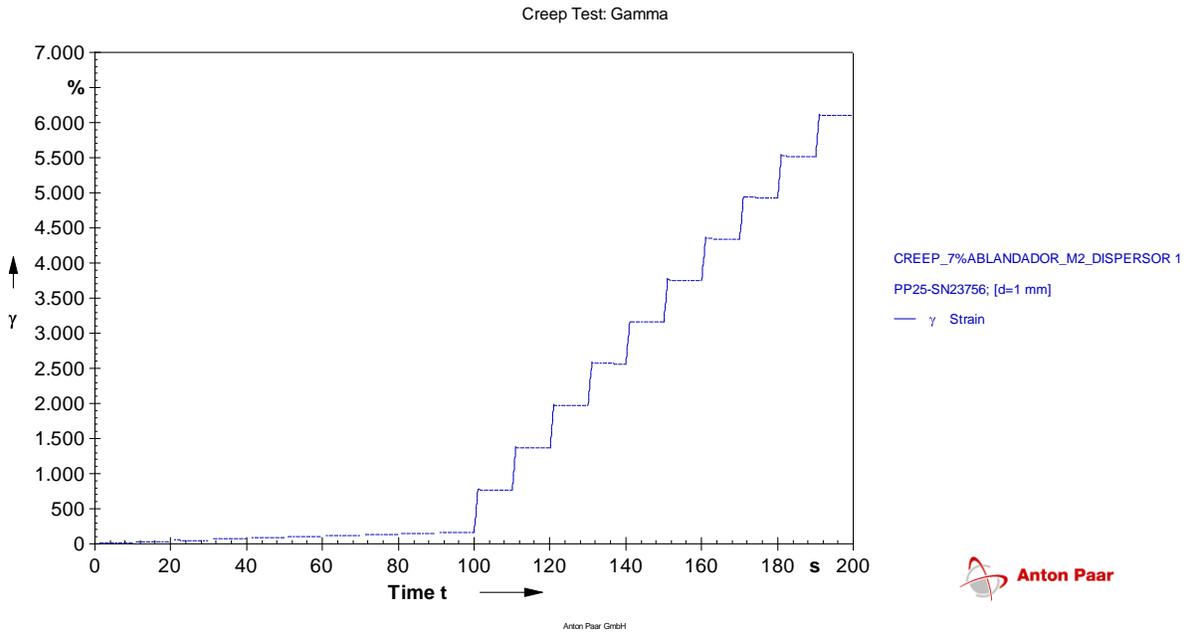


Anton Paar GmbH

8.3.1.2. Mezcla 2

Muestra 2

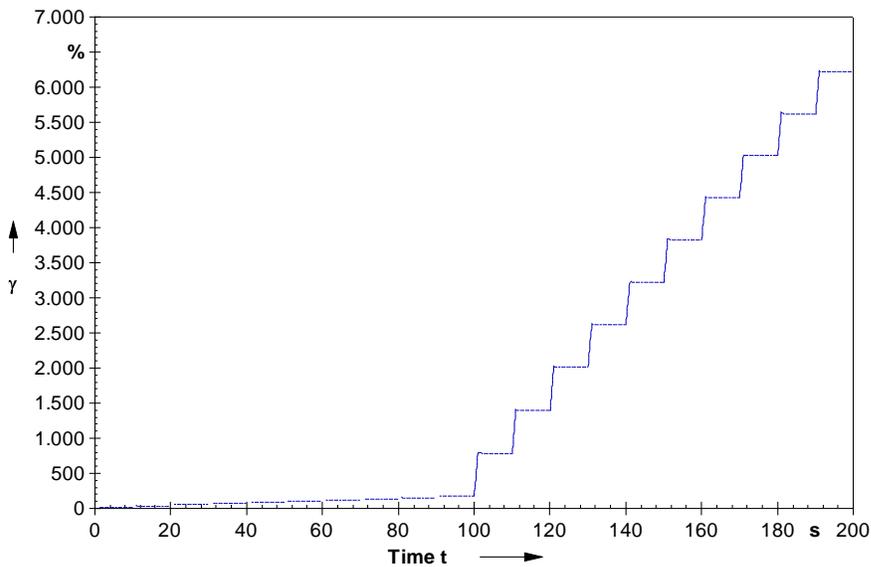
Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]	
1	0,000	0,192	0,172	0,192	0,172	0,020	10,417		1,720		
2	0,172	0,363	0,342	0,191	0,170	0,021	10,995		1,700		
3	0,342	0,531	0,510	0,189	0,168	0,021	11,111		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	11,478	1,590	1,650	
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		1,884		
12	7,680	13,900	13,700	6,220	6,020	0,200	3,215	2,920	1,881	1,858	
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



Muestra 3

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]	
1	0,000	0,199	0,179	0,199	0,179	0,020	10,050		1,790		
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	10,872	1,720	1,690	
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		1,925		
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

Creep Test: Gamma



CREEP_7%ABLANDADOR_M2_DISPERSOR 1
PP25-SN23756; [d=1 mm]
— γ Strain



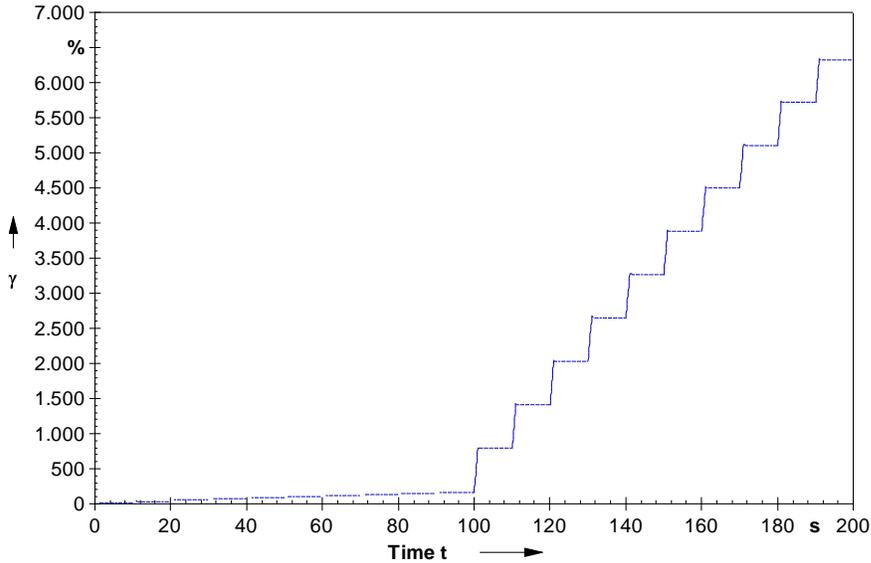
Anton Paar GmbH

8.3.1.3. Mezcla 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	Jnr	
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[1/kPa]	[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	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

Creep Test: Gamma



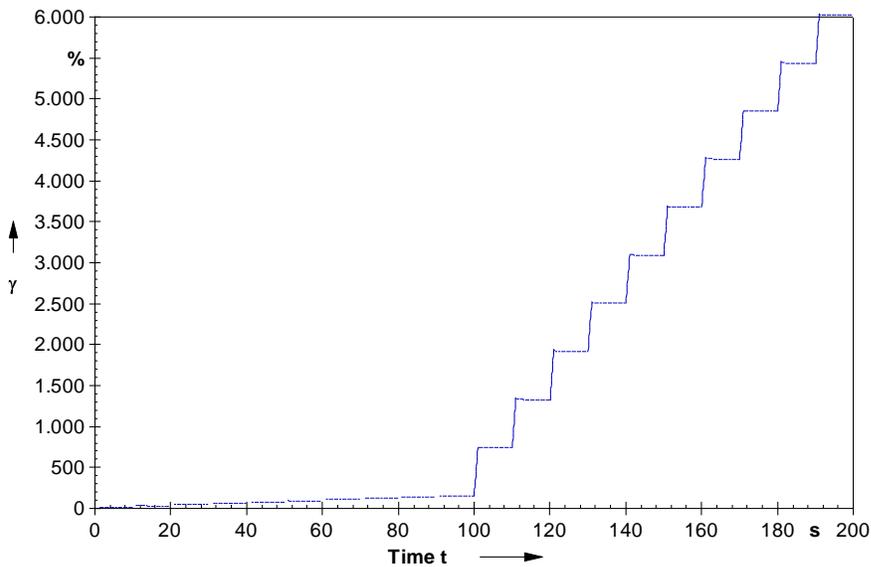
CREEP_7%ABLANDADOR_M3_DISPERSOR 1
PP25-SN23756; [d=1 mm]
— γ Strain



Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]	
1	0,000	0,177	0,157	0,177	0,157	0,020	11,299		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	1,760	1,740	6,060	5,860	0,200	3,300		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

Creep Test: Gamma

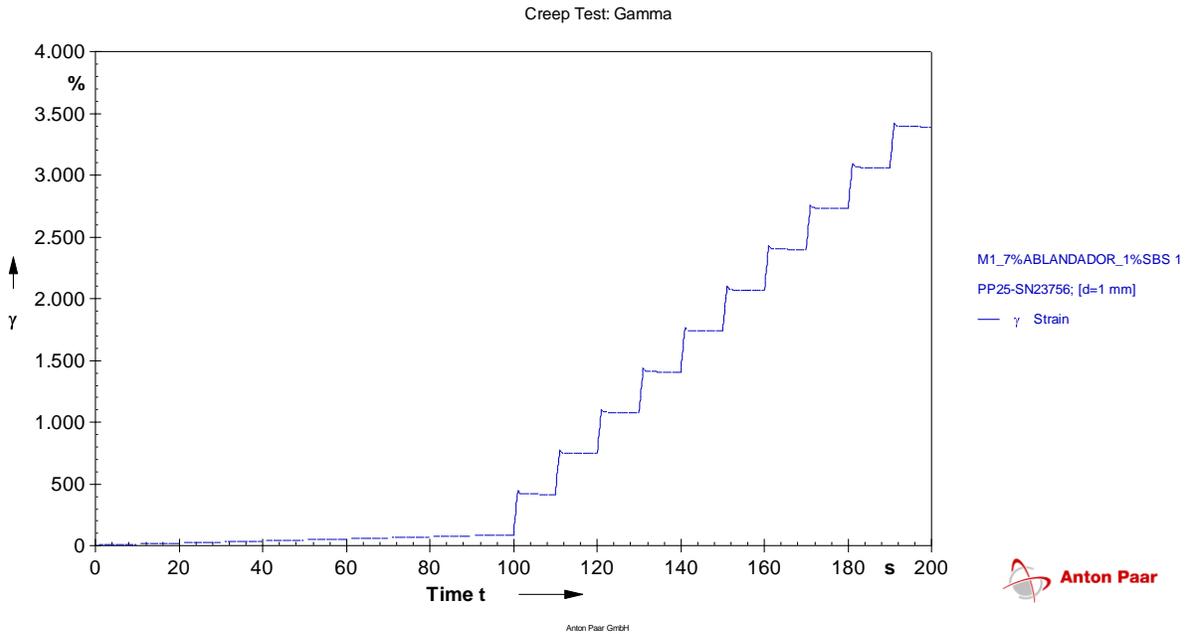


Anton Paar GmbH

8.3.2. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1% DE SBS

8.3.2.1. Muestra 1

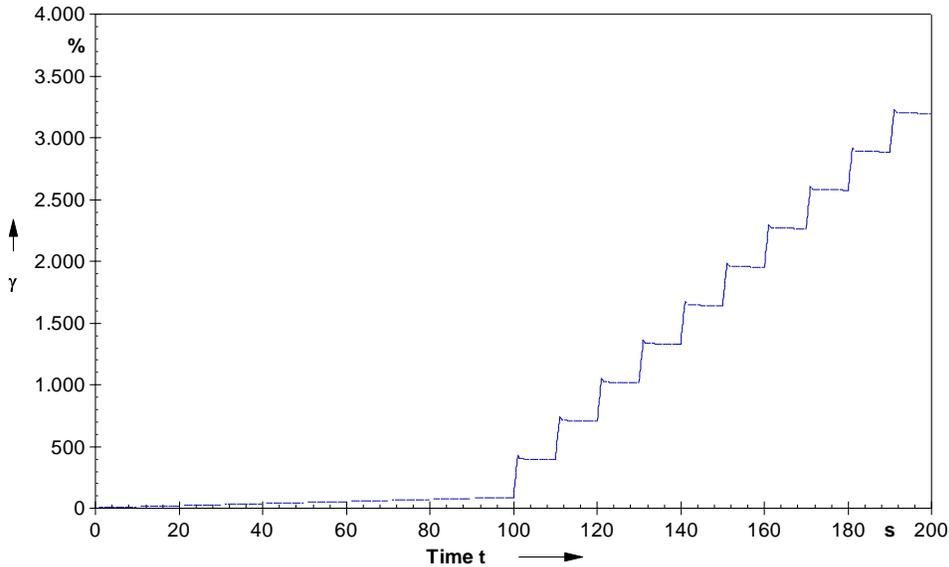
Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	R	Jnr	Jnr	
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]	
1	0,000	0,107	0,088	0,107	0,088	0,019	17,570	18,913	0,882	0,861	
2	0,088	0,195	0,175	0,107	0,087	0,020	18,727		0,868		
3	0,175	0,282	0,262	0,107	0,087	0,020	18,692		0,870		
4	0,262	0,368	0,348	0,106	0,086	0,020	18,868		0,860		
5	0,348	0,454	0,434	0,106	0,086	0,020	18,868		0,860		
6	0,434	0,540	0,520	0,106	0,086	0,020	18,868		0,860		
7	0,520	0,626	0,605	0,106	0,085	0,021	19,811		0,850		
8	0,605	0,711	0,691	0,106	0,086	0,020	18,868		0,860		
9	0,691	0,796	0,776	0,105	0,085	0,020	19,048		0,850		
10	0,776	0,882	0,861	0,106	0,085	0,021	19,811		0,850		
11	0,861	4,460	4,150	3,599	3,289	0,310	8,614	8,351	1,028	1,032	
12	4,150	7,750	7,450	3,600	3,300	0,300	8,333		1,031		
13	7,450	11,000	10,700	3,550	3,250	0,300	8,451		1,016		
14	10,700	14,400	14,100	3,700	3,400	0,300	8,108		1,063		
15	14,100	17,700	17,400	3,600	3,300	0,300	8,333		1,031		
16	17,400	21,000	20,700	3,600	3,300	0,300	8,333		1,031		
17	20,700	24,300	24,000	3,600	3,300	0,300	8,333		1,031		
18	24,000	27,600	27,300	3,600	3,300	0,300	8,333		1,031		
19	27,300	30,900	30,600	3,600	3,300	0,300	8,333		1,031		
20	30,600	34,200	33,900	3,600	3,300	0,300	8,333		1,031		
								Rdiff	55,848	Jnr-diff	19,915



8.3.2.2. Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0,000	0,103	0,085	0,103	0,085	0,018	17,184		0,853	
2	0,085	0,188	0,169	0,103	0,084	0,019	18,500		0,837	
3	0,169	0,272	0,253	0,103	0,084	0,019	18,447		0,840	
4	0,253	0,355	0,337	0,102	0,084	0,018	17,647		0,840	
5	0,337	0,438	0,420	0,101	0,083	0,018	17,822		0,830	
6	0,420	0,522	0,502	0,102	0,082	0,020	19,608		0,820	
7	0,502	0,604	0,585	0,102	0,083	0,019	18,627		0,830	
8	0,585	0,687	0,668	0,102	0,083	0,019	18,627		0,830	
9	0,668	0,769	0,750	0,101	0,082	0,019	18,812		0,820	
10	0,750	0,851	0,832	0,101	0,082	0,019	18,812		0,820	
11	0,832	4,240	3,940	3,408	3,108	0,300	8,803		0,971	
12	3,940	7,360	7,060	3,420	3,120	0,300	8,772		0,975	
13	7,060	10,500	10,200	3,440	3,140	0,300	8,721		0,981	
14	10,200	13,600	13,300	3,400	3,100	0,300	8,824		0,969	
15	13,300	16,700	16,400	3,400	3,100	0,300	8,824		0,969	
16	16,400	19,800	19,500	3,400	3,100	0,300	8,824		0,969	
17	19,500	22,900	22,600	3,400	3,100	0,300	8,824		0,969	
18	22,600	26,100	25,800	3,500	3,200	0,300	8,571		1,000	
19	25,800	29,200	28,900	3,400	3,100	0,300	8,824		0,969	
20	28,900	32,300	32,000	3,400	3,100	0,300	8,824		0,969	
							Rdiff	52,301	Jnr-diff	17,067

Creep Test: Gamma



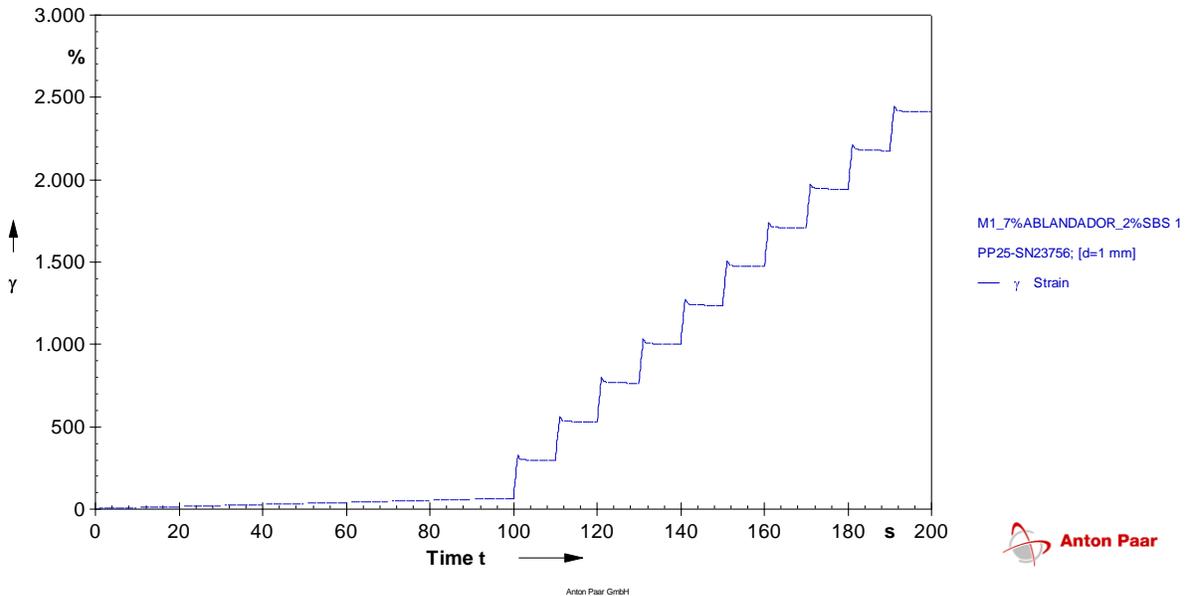
8.3.3. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 2% DE SBS

8.3.3.1. Mezcla 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	Jnr	
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]	
1	0,000	0,081	0,064	0,081	0,064	0,017	21,111	23,013	0,639	0,616	
2	0,064	0,145	0,127	0,081	0,063	0,018	22,195		0,631		
3	0,127	0,207	0,189	0,080	0,062	0,018	22,500		0,620		
4	0,189	0,269	0,250	0,080	0,061	0,019	23,750		0,610		
5	0,250	0,331	0,312	0,081	0,062	0,019	23,457		0,620		
6	0,312	0,392	0,373	0,080	0,061	0,019	23,750		0,610		
7	0,373	0,453	0,434	0,080	0,061	0,019	23,750		0,610		
8	0,434	0,513	0,495	0,079	0,061	0,018	22,785		0,610		
9	0,495	0,574	0,555	0,079	0,060	0,019	24,051		0,600		
10	0,555	0,634	0,616	0,079	0,061	0,018	22,785		0,610		
11	0,616	3,280	2,940	2,664	2,324	0,340	12,763	12,349	0,726	0,734	
12	2,940	5,630	5,290	2,690	2,350	0,340	12,639		0,734		
13	5,290	7,980	7,650	2,690	2,360	0,330	12,268		0,738		
14	7,650	10,300	10,000	2,650	2,350	0,300	11,321		0,734		
15	10,000	12,700	12,400	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
16	12,400	15,100	14,700	2,700	2,300	0,400	14,815		0,719		
17	14,700	17,400	17,100	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
18	17,100	19,800	19,400	2,700	2,300	0,400	14,815		0,719		
19	19,400	22,100	21,800	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
20	21,800	24,400	24,100	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
								Rdiff	46,339	Jnr-diff	19,136

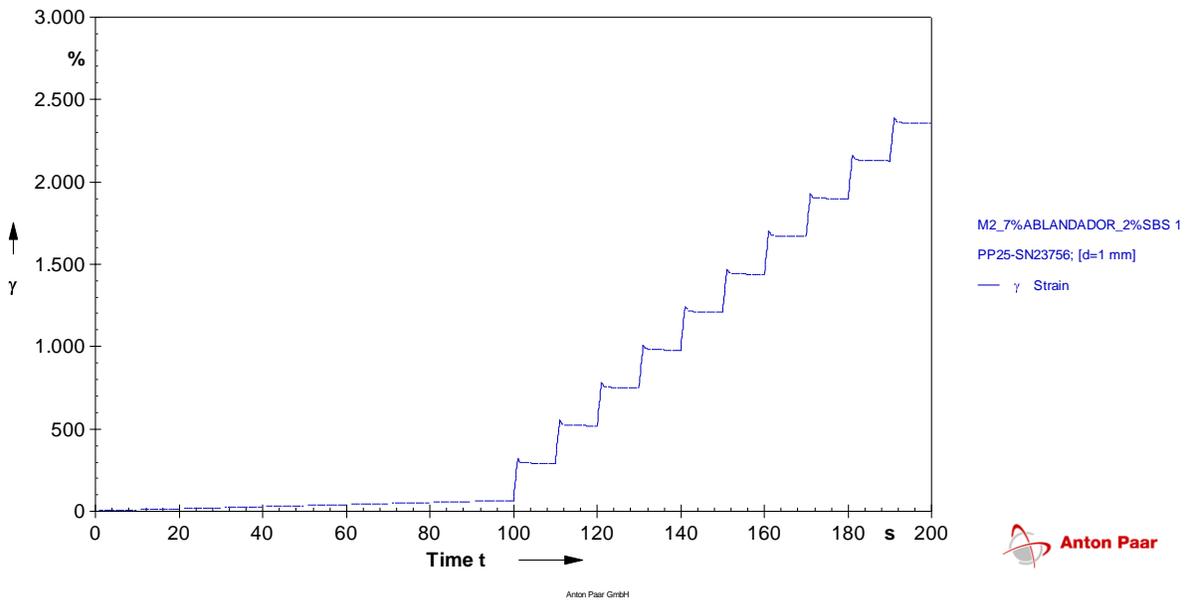
Creep Test: Gamma



Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]	
1	0,000	0,079	0,063	0,079	0,063	0,016	20,655		0,630	0,614	
2	0,063	0,142	0,125	0,079	0,062	0,017	21,519		0,620		
3	0,125	0,204	0,187	0,079	0,062	0,017	21,519		0,620		
4	0,187	0,266	0,248	0,079	0,061	0,018	22,785		0,610		
5	0,248	0,327	0,310	0,079	0,062	0,017	21,519	21,825	0,620		
6	0,310	0,388	0,371	0,078	0,061	0,017	21,795		0,610		
7	0,371	0,449	0,432	0,078	0,061	0,017	21,795		0,610		
8	0,432	0,510	0,493	0,078	0,061	0,017	21,795		0,610		
9	0,493	0,571	0,553	0,078	0,060	0,018	23,077		0,600		
10	0,553	0,631	0,614	0,078	0,061	0,017	21,795		0,610		
11	0,614	3,230	2,900	2,616	2,286	0,330	12,615		0,714		0,718
12	2,900	5,520	5,190	2,620	2,290	0,330	12,595		0,716		
13	5,190	7,810	7,490	2,620	2,300	0,320	12,214		0,719		
14	7,490	10,100	9,790	2,610	2,300	0,310	11,877		0,719		
15	9,790	12,400	12,100	2,610	2,310	0,300	11,494		0,722		
16	12,100	14,700	14,400	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
17	14,400	17,000	16,700	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
18	16,700	19,300	19,000	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
19	19,000	21,600	21,300	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
20	21,300	23,900	23,600	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
								Rdiff	45,711	Jnr-diff	16,989

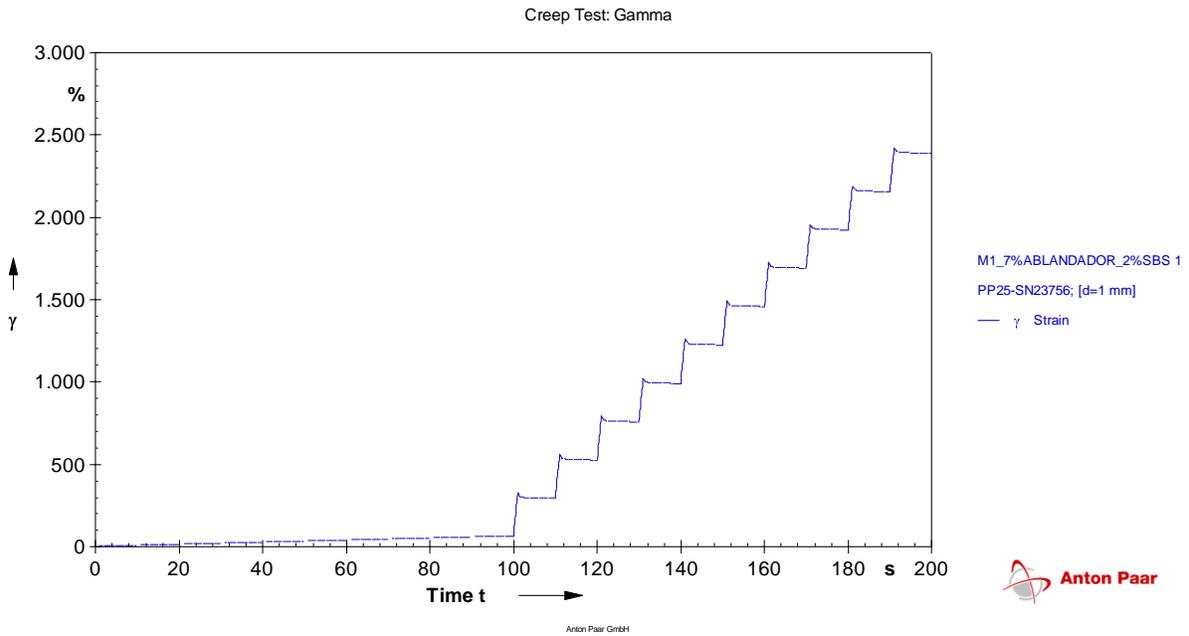
Creep Test: Gamma



8.3.3.2. Mezcla 2

Muestra 1

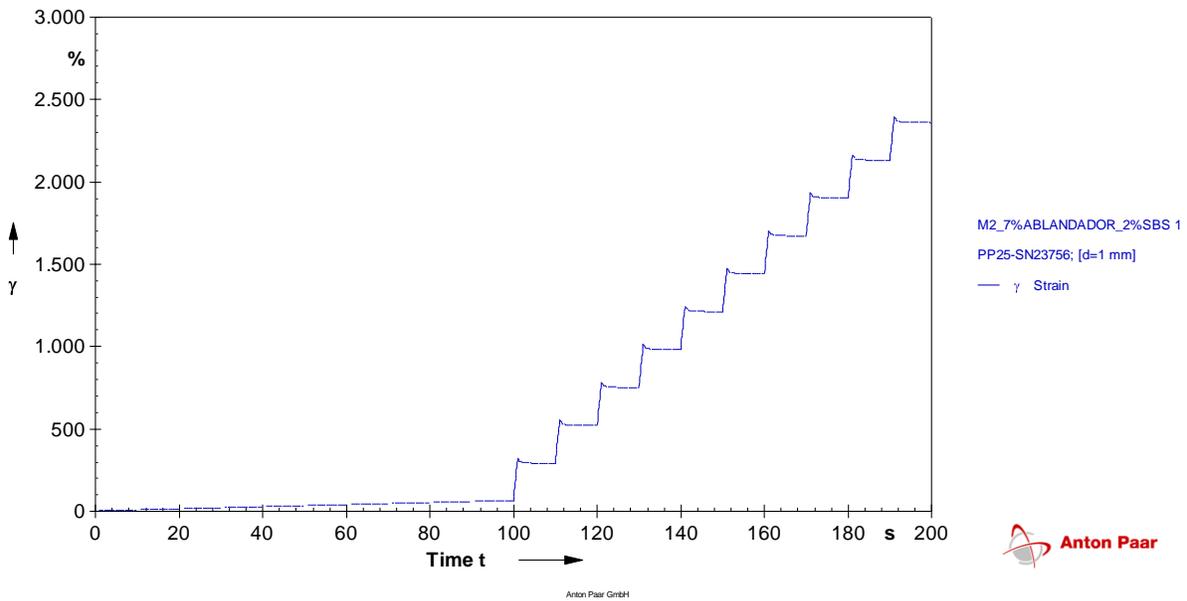
Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	R	Jnr	Jnr
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]
1	0,000	0,080	0,064	0,080	0,064	0,016	20,401	22,070	0,636	0,619
2	0,064	0,143	0,126	0,079	0,062	0,017	21,411		0,624	
3	0,126	0,206	0,188	0,080	0,062	0,018	22,500		0,620	
4	0,188	0,268	0,250	0,080	0,062	0,018	22,500		0,620	
5	0,250	0,330	0,312	0,080	0,062	0,018	22,500		0,620	
6	0,312	0,391	0,374	0,079	0,062	0,017	21,519		0,620	
7	0,374	0,453	0,435	0,079	0,061	0,018	22,785		0,610	
8	0,435	0,514	0,497	0,079	0,062	0,017	21,519		0,620	
9	0,497	0,576	0,558	0,079	0,061	0,018	22,785		0,610	
10	0,558	0,637	0,619	0,079	0,061	0,018	22,785		0,610	
11	0,619	3,260	2,940	2,641	2,321	0,320	12,117	11,878	0,725	0,728
12	2,940	5,580	5,260	2,640	2,320	0,320	12,121		0,725	
13	5,260	7,910	7,590	2,650	2,330	0,320	12,075		0,728	
14	7,590	10,200	9,920	2,610	2,330	0,280	10,728		0,728	
15	9,920	12,600	12,300	2,680	2,380	0,300	11,194		0,744	
16	12,300	14,900	14,600	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719	
17	14,600	17,200	16,900	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719	
18	16,900	19,600	19,200	2,700	2,300	0,400	14,815		0,719	
19	19,200	21,900	21,600	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750	
20	21,600	24,200	23,900	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719	
							Rdiff	46,183	Jnr-diff	17,533



Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]	
1	0,000	0,080	0,063	0,080	0,063	0,017	20,854		0,630		
2	0,063	0,142	0,125	0,079	0,062	0,017	21,519		0,620		
3	0,125	0,204	0,187	0,079	0,062	0,017	21,519		0,620		
4	0,187	0,266	0,248	0,079	0,061	0,018	22,785		0,610		
5	0,248	0,327	0,309	0,079	0,061	0,018	22,785		0,610		
6	0,309	0,388	0,370	0,079	0,061	0,018	22,785	22,298	0,610	0,612	
7	0,370	0,448	0,430	0,078	0,060	0,018	23,077		0,600		
8	0,430	0,509	0,491	0,079	0,061	0,018	22,785		0,610		
9	0,491	0,569	0,551	0,078	0,060	0,018	23,077		0,600		
10	0,551	0,629	0,612	0,078	0,061	0,017	21,795		0,610		
11	0,612	3,230	2,900	2,618	2,288	0,330	12,605		0,715		
12	2,900	5,530	5,200	2,630	2,300	0,330	12,548		0,719		
13	5,200	7,830	7,510	2,630	2,310	0,320	12,167		0,722		
14	7,510	10,100	9,810	2,590	2,300	0,290	11,197		0,719		
15	9,810	12,400	12,100	2,590	2,290	0,300	11,583		0,716		
16	12,100	14,700	14,400	2,600	2,300	0,300	11,538	11,779	0,719	0,718	
17	14,400	17,000	16,700	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
18	16,700	19,300	19,000	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
19	19,000	21,600	21,300	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
20	21,300	23,900	23,600	2,600	2,300	0,300	11,538		0,719		
							Rdiff		47,174	Jnr-diff	17,382

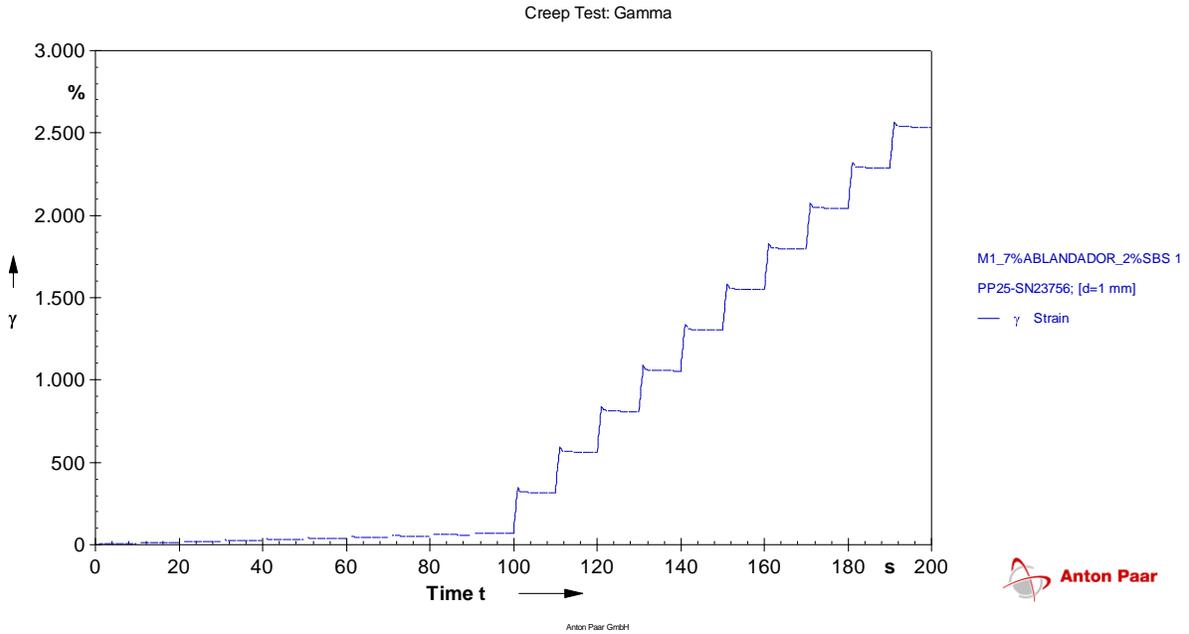
Creep Test: Gamma



8.3.3.3. Mezcla 3

Muestra 1

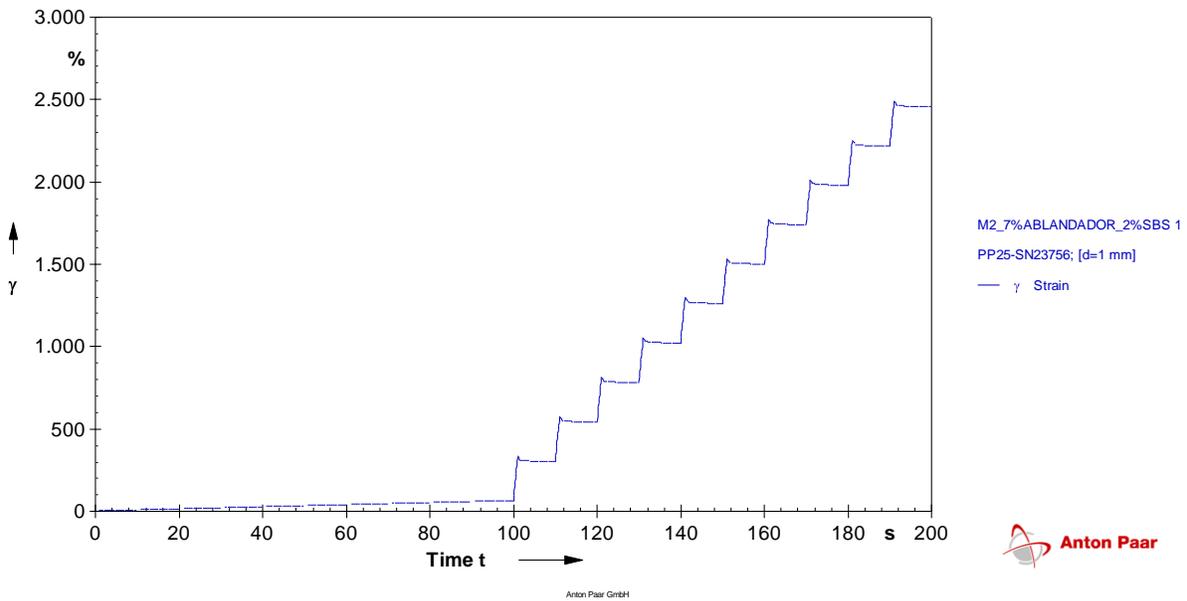
Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	R	Jnr	Jnr	
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]	
1	0,000	0,085	0,068	0,085	0,068	0,017	19,670	21,140	0,682	0,663	
2	0,068	0,153	0,135	0,085	0,067	0,018	21,226		0,668		
3	0,135	0,220	0,202	0,085	0,067	0,018	21,176		0,670		
4	0,202	0,286	0,269	0,084	0,067	0,017	20,238		0,670		
5	0,269	0,353	0,335	0,084	0,066	0,018	21,429		0,660		
6	0,335	0,419	0,401	0,084	0,066	0,018	21,429		0,660		
7	0,401	0,485	0,467	0,084	0,066	0,018	21,429		0,660		
8	0,467	0,550	0,532	0,083	0,065	0,018	21,687		0,650		
9	0,532	0,616	0,598	0,084	0,066	0,018	21,429		0,660		
10	0,598	0,681	0,663	0,083	0,065	0,018	21,687		0,650		
11	0,663	3,470	3,140	2,807	2,477	0,330	11,756	11,105	0,774	0,773	
12	3,140	5,940	5,610	2,800	2,470	0,330	11,786		0,772		
13	5,610	8,410	8,080	2,800	2,470	0,330	11,786		0,772		
14	8,080	10,900	10,600	2,820	2,520	0,300	10,638		0,788		
15	10,600	13,300	13,000	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
16	13,000	15,800	15,500	2,800	2,500	0,300	10,714		0,781		
17	15,500	18,300	18,000	2,800	2,500	0,300	10,714		0,781		
18	18,000	20,700	20,400	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
19	20,400	23,200	22,900	2,800	2,500	0,300	10,714		0,781		
20	22,900	25,700	25,400	2,800	2,500	0,300	10,714		0,781		
								Rdiff	47,471	Jnr-diff	16,596



Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]	
1	0,000	0,082	0,066	0,082	0,066	0,017	20,388		0,656		
2	0,066	0,148	0,130	0,082	0,064	0,018	21,845		0,644		
3	0,130	0,212	0,194	0,082	0,064	0,018	21,951		0,640		
4	0,194	0,276	0,258	0,082	0,064	0,018	21,951		0,640		
5	0,258	0,339	0,321	0,081	0,063	0,018	22,222		0,630		
6	0,321	0,402	0,384	0,081	0,063	0,018	22,222	21,975	0,630	0,635	
7	0,384	0,465	0,447	0,081	0,063	0,018	22,222		0,630		
8	0,447	0,528	0,510	0,081	0,063	0,018	22,222		0,630		
9	0,510	0,591	0,573	0,081	0,063	0,018	22,222		0,630		
10	0,573	0,653	0,635	0,080	0,062	0,018	22,500		0,620		
11	0,635	3,350	3,020	2,715	2,385	0,330	12,155		0,745		
12	3,020	5,750	5,420	2,730	2,400	0,330	12,088		0,750	0,749	
13	5,420	8,150	7,820	2,730	2,400	0,330	12,088		0,750		
14	7,820	10,600	10,200	2,780	2,380	0,400	14,388		0,744		
15	10,200	13,000	12,600	2,800	2,400	0,400	14,286		0,750		
16	12,600	15,300	15,000	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
17	15,000	17,700	17,400	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
18	17,400	20,100	19,800	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
19	19,800	22,500	22,200	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
20	22,200	24,900	24,600	2,700	2,400	0,300	11,111		0,750		
								Rdiff	45,137	Jnr-diff	17,938

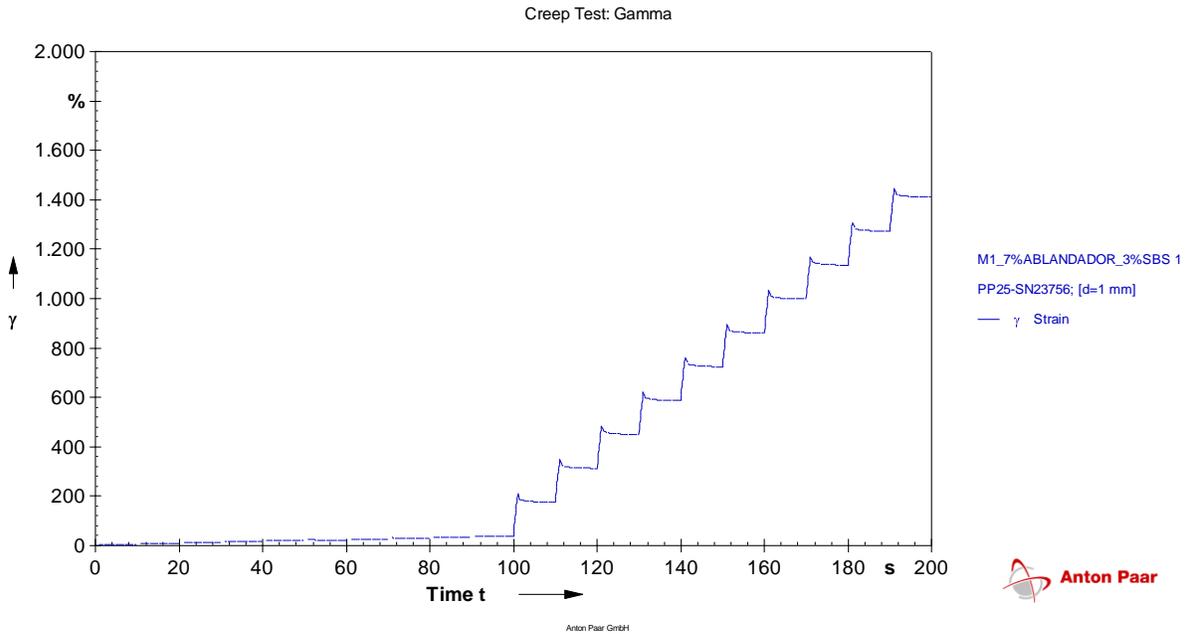
Creep Test: Gamma



8.3.4. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3% DE SBS

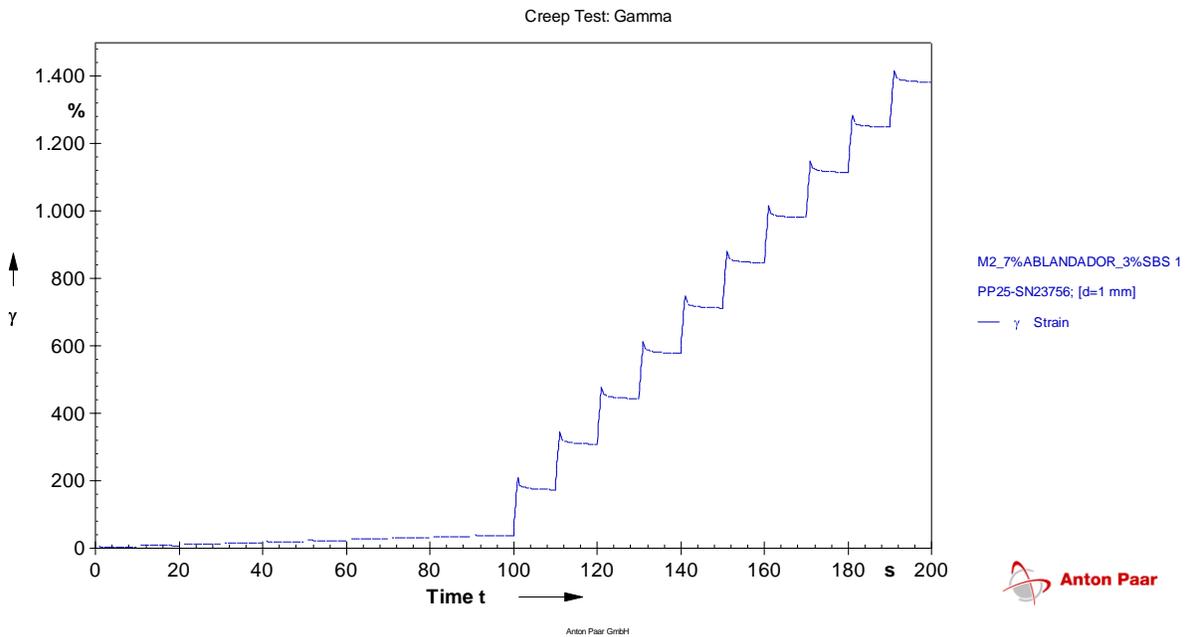
8.3.4.1. Muestra 1

Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	R	Jnr	Jnr
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]
1	0,000	0,053	0,039	0,053	0,039	0,014	26,604	28,395	0,389	0,375
2	0,039	0,092	0,077	0,053	0,038	0,015	27,704		0,381	
3	0,077	0,129	0,115	0,052	0,038	0,014	26,923		0,380	
4	0,115	0,167	0,152	0,052	0,037	0,015	28,846		0,370	
5	0,152	0,205	0,189	0,053	0,037	0,016	30,189		0,370	
6	0,189	0,242	0,227	0,053	0,038	0,015	28,302		0,380	
7	0,227	0,279	0,264	0,052	0,037	0,015	28,846		0,370	
8	0,264	0,316	0,301	0,052	0,037	0,015	28,846		0,370	
9	0,301	0,353	0,338	0,052	0,037	0,015	28,846		0,370	
10	0,338	0,390	0,375	0,052	0,037	0,015	28,846		0,370	
11	0,375	2,100	1,760	1,725	1,385	0,340	19,710	19,761	0,433	0,429
12	1,760	3,470	3,120	1,710	1,360	0,350	20,468		0,425	
13	3,120	4,840	4,500	1,720	1,380	0,340	19,767		0,431	
14	4,500	6,210	5,870	1,710	1,370	0,340	19,883		0,428	
15	5,870	7,580	7,240	1,710	1,370	0,340	19,883		0,428	
16	7,240	8,960	8,610	1,720	1,370	0,350	20,349		0,428	
17	8,610	10,300	9,980	1,690	1,370	0,320	18,935		0,428	
18	9,980	11,700	11,400	1,720	1,420	0,300	17,442		0,444	
19	11,400	13,100	12,700	1,700	1,300	0,400	23,529		0,406	
20	12,700	14,400	14,100	1,700	1,400	0,300	17,647		0,438	
							Rdiff	30,406	Jnr-diff	14,375



8.3.4.2. Muestra 2

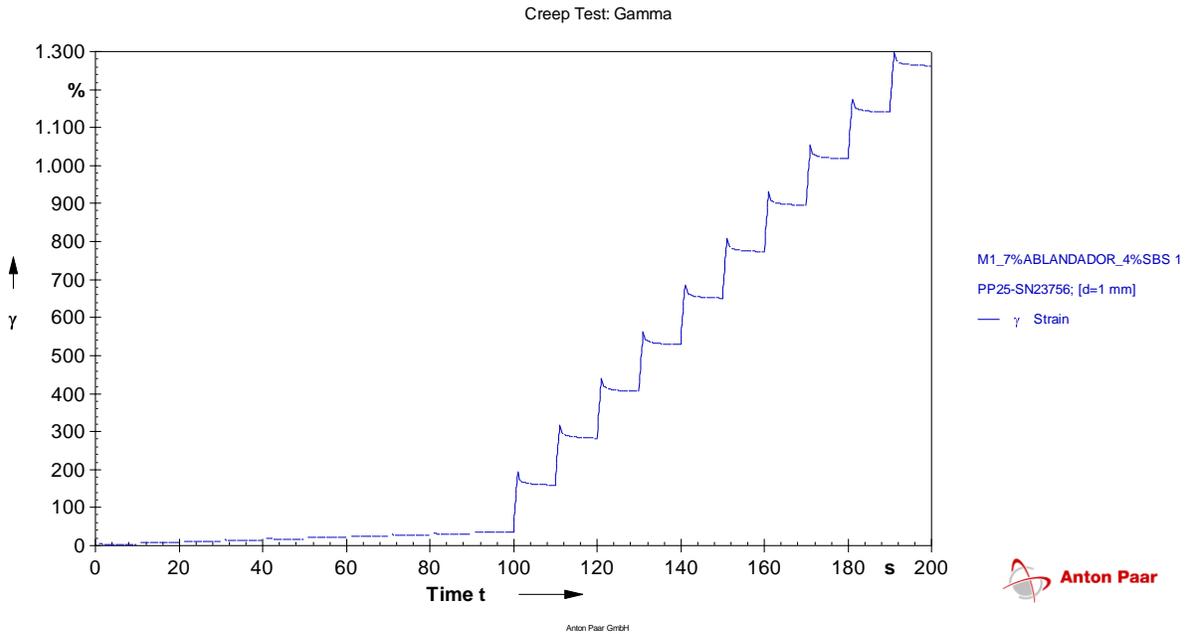
Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0,000	0,053	0,039	0,053	0,039	0,014	26,705		0,387	
2	0,039	0,091	0,077	0,053	0,038	0,015	27,619		0,380	
3	0,077	0,129	0,114	0,052	0,037	0,015	28,681		0,373	
4	0,114	0,166	0,151	0,052	0,037	0,015	28,846		0,370	
5	0,151	0,204	0,188	0,053	0,037	0,016	30,189		0,370	
6	0,188	0,241	0,225	0,053	0,037	0,016	30,189	28,818	0,370	0,372
7	0,225	0,277	0,262	0,052	0,037	0,015	28,846		0,370	
8	0,262	0,314	0,299	0,052	0,037	0,015	28,846		0,370	
9	0,299	0,351	0,336	0,052	0,037	0,015	28,846		0,370	
10	0,336	0,387	0,372	0,051	0,036	0,015	29,412		0,360	
11	0,372	2,080	1,740	1,708	1,368	0,340	19,906		0,428	
12	1,740	3,440	3,090	1,700	1,350	0,350	20,588		0,422	
13	3,090	4,790	4,440	1,700	1,350	0,350	20,588		0,422	
14	4,440	6,130	5,780	1,690	1,340	0,350	20,710		0,419	
15	5,780	7,480	7,130	1,700	1,350	0,350	20,588		0,422	
16	7,130	8,820	8,470	1,690	1,340	0,350	20,710	20,567	0,419	0,420
17	8,470	10,200	9,810	1,730	1,340	0,390	22,543		0,419	
18	9,810	11,500	11,200	1,690	1,390	0,300	17,751		0,434	
19	11,200	12,800	12,500	1,600	1,300	0,300	18,750		0,406	
20	12,500	14,200	13,800	1,700	1,300	0,400	23,529		0,406	
							Rdiff	28,633	Jnr-diff	12,802



8.3.5. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 4% DE SBS

8.3.5.1. Muestra 1

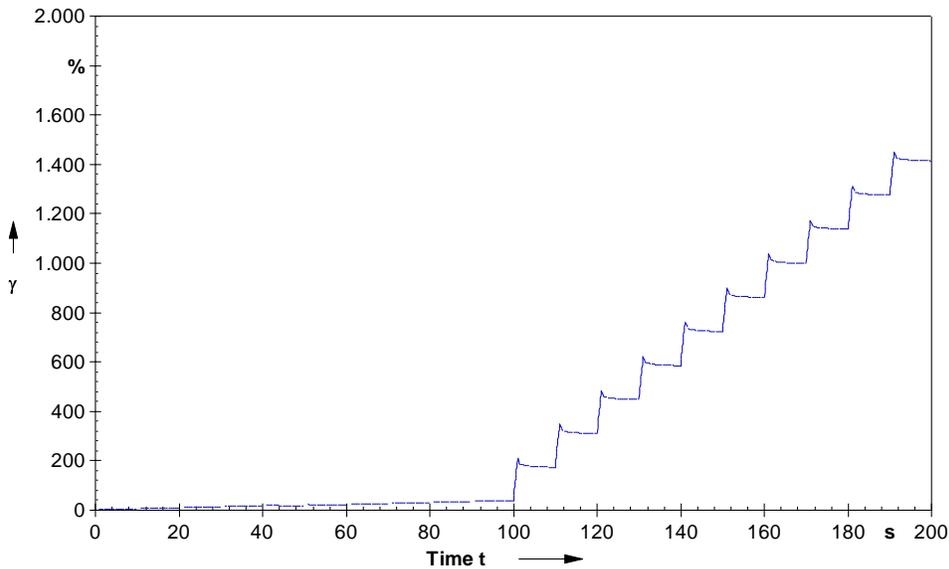
Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	R	Jnr	Jnr
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]
1	0,000	0,049	0,036	0,049	0,036	0,014	27,733	29,909	0,357	0,342
2	0,036	0,085	0,071	0,049	0,035	0,014	28,921		0,349	
3	0,071	0,120	0,105	0,049	0,034	0,015	30,364		0,344	
4	0,105	0,154	0,139	0,049	0,034	0,015	30,612		0,340	
5	0,139	0,188	0,174	0,049	0,035	0,014	28,571		0,350	
6	0,174	0,222	0,207	0,048	0,033	0,015	31,250		0,330	
7	0,207	0,256	0,241	0,049	0,034	0,015	30,612		0,340	
8	0,241	0,290	0,275	0,049	0,034	0,015	30,612		0,340	
9	0,275	0,323	0,309	0,048	0,034	0,014	29,167		0,340	
10	0,309	0,357	0,342	0,048	0,033	0,015	31,250		0,330	
11	0,342	1,940	1,590	1,598	1,248	0,350	21,902	0,390	0,383	
12	1,590	3,180	2,820	1,590	1,230	0,360	22,642	0,384		
13	2,820	4,410	4,060	1,590	1,240	0,350	22,013	0,388		
14	4,060	5,630	5,290	1,570	1,230	0,340	21,656	0,384		
15	5,290	6,860	6,510	1,570	1,220	0,350	22,293	0,381		
16	6,510	8,080	7,730	1,570	1,220	0,350	22,293	0,381		
17	7,730	9,310	8,960	1,580	1,230	0,350	22,152	0,384		
18	8,960	10,500	10,200	1,540	1,240	0,300	19,481	0,388		
19	10,200	11,800	11,400	1,600	1,200	0,400	25,000	0,375		
20	11,400	13,000	12,600	1,600	1,200	0,400	25,000	0,375		
							Rdiff	24,963	Jnr-diff	12,007



8.3.5.2. Muestra 3

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]
1	0,000	0,053	0,039	0,053	0,039	0,015	27,632		0,385	0,367
2	0,039	0,091	0,076	0,053	0,038	0,015	28,977		0,375	
3	0,076	0,129	0,113	0,053	0,037	0,016	30,189		0,370	
4	0,113	0,166	0,150	0,053	0,037	0,016	30,189		0,370	
5	0,150	0,202	0,186	0,052	0,036	0,016	30,769	30,102	0,360	
6	0,186	0,239	0,223	0,053	0,037	0,016	30,189		0,370	
7	0,223	0,275	0,259	0,052	0,036	0,016	30,769		0,360	
8	0,259	0,311	0,295	0,052	0,036	0,016	30,769		0,360	
9	0,295	0,347	0,331	0,052	0,036	0,016	30,769		0,360	
10	0,331	0,383	0,367	0,052	0,036	0,016	30,769		0,360	
11	0,367	2,100	1,740	1,733	1,373	0,360	20,773		0,429	
12	1,740	3,470	3,100	1,730	1,360	0,370	21,387		0,425	
13	3,100	4,850	4,480	1,750	1,380	0,370	21,143		0,431	
14	4,480	6,220	5,850	1,740	1,370	0,370	21,264		0,428	
15	5,850	7,600	7,230	1,750	1,380	0,370	21,143	20,848	0,431	
16	7,230	8,980	8,610	1,750	1,380	0,370	21,143		0,431	
17	8,610	10,400	9,990	1,790	1,380	0,410	22,905		0,431	
18	9,990	11,700	11,400	1,710	1,410	0,300	17,544		0,441	
19	11,400	13,100	12,800	1,700	1,400	0,300	17,647		0,438	
20	12,800	14,500	14,100	1,700	1,300	0,400	23,529		0,406	
							Rdiff	30,743	Jnr-diff	16,936

Creep Test: Gamma



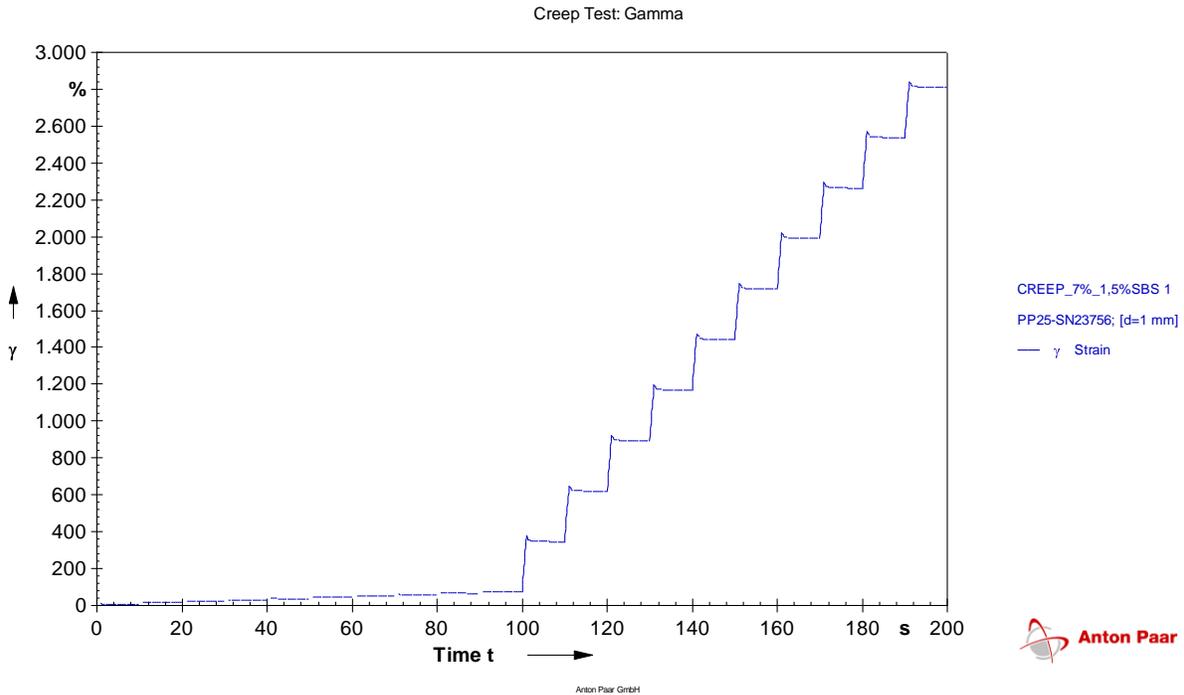
M3_7%ABLANDADOR_4%SBS 1
PP25-SN23756; [d=1 mm]
— γ Strain



8.3.6. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 1,5% DE SBS

8.3.6.1. Muestra 1

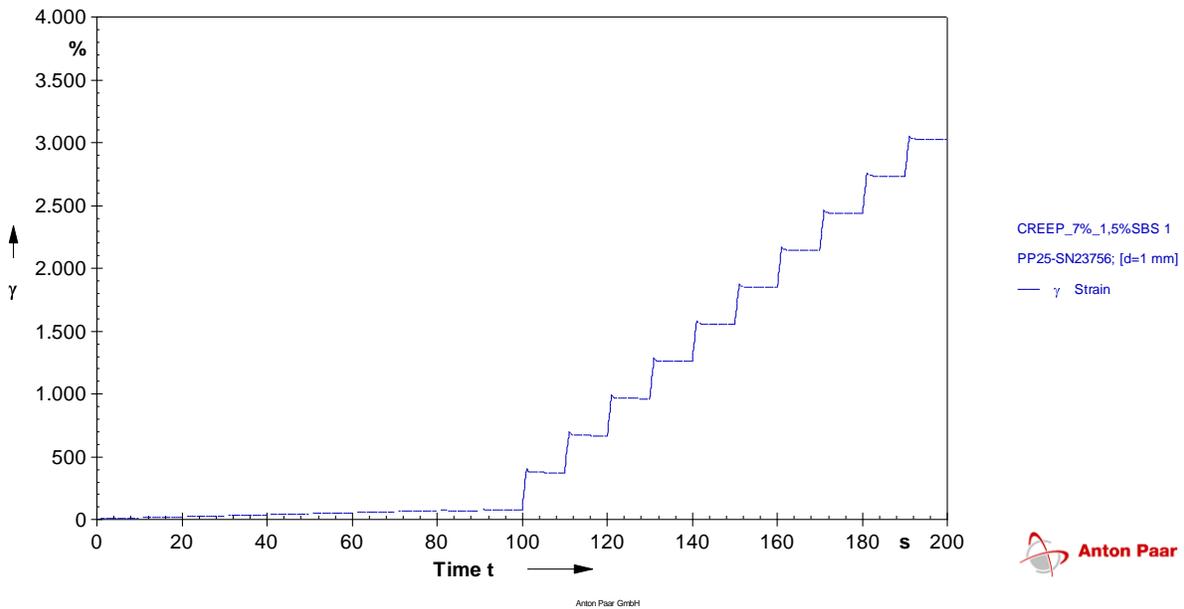
Nº Ciclos	ϵ_0	ϵ_c	ϵ_r	ϵ_1	ϵ_{10}	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	$\epsilon_r(\text{Carga,N})$	R	Jnr	Jnr
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]
1	0,000	0,092	0,075	0,092	0,075	0,017	18,607	19,988	0,748	0,729
2	0,075	0,166	0,149	0,091	0,074	0,017	18,640		0,742	
3	0,149	0,240	0,222	0,091	0,073	0,018	19,780		0,730	
4	0,222	0,313	0,295	0,091	0,073	0,018	19,780		0,730	
5	0,295	0,386	0,368	0,091	0,073	0,018	19,780		0,720	
6	0,368	0,459	0,440	0,091	0,072	0,019	20,879		0,730	
7	0,440	0,531	0,513	0,091	0,073	0,018	19,780		0,720	
8	0,513	0,604	0,585	0,091	0,072	0,019	20,879		0,720	
9	0,585	0,676	0,657	0,091	0,072	0,019	20,879		0,720	
10	0,657	0,748	0,729	0,091	0,072	0,019	20,879		0,720	
11	0,729	3,770	3,450	3,041	2,721	0,320	10,523	9,998	0,850	0,855
12	3,450	6,500	6,190	3,050	2,740	0,310	10,164		0,856	
13	6,190	9,230	8,920	3,040	2,730	0,310	10,197		0,853	
14	8,920	12,000	11,700	3,080	2,780	0,300	9,740		0,869	
15	11,700	14,700	14,400	3,000	2,700	0,300	10,000		0,844	
16	14,400	17,500	17,200	3,100	2,800	0,300	9,677		0,875	
17	17,200	20,200	19,900	3,000	2,700	0,300	10,000		0,844	
18	19,900	22,900	22,600	3,000	2,700	0,300	10,000		0,844	
19	22,600	25,700	25,400	3,100	2,800	0,300	9,677		0,875	
20	25,400	28,400	28,100	3,000	2,700	0,300	10,000		0,844	
							Rdiff	49,982	Jnr-diff	17,331



8.3.6.2. Muestra 2

Nº Ciclos	ϵ_0 [1]	ϵ_c [1]	ϵ_r [1]	ϵ_1 [1]	ϵ_{10} [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [1]	$\epsilon_r(\text{Carga}, N)$ [%]	R [%]	Jnr [1/kPa]	Jnr [1/kPa]	
1	0,000	0,098	0,081	0,098	0,081	0,017	17,653		0,807		
2	0,081	0,178	0,160	0,097	0,079	0,018	18,499		0,793		
3	0,160	0,258	0,240	0,098	0,080	0,018	18,367		0,800		
4	0,240	0,337	0,318	0,097	0,078	0,019	19,588		0,780		
5	0,318	0,415	0,397	0,097	0,079	0,018	18,557		0,790		
6	0,397	0,494	0,475	0,097	0,078	0,019	19,588	18,978	0,780	0,787	
7	0,475	0,572	0,554	0,097	0,079	0,018	18,557		0,790		
8	0,554	0,650	0,631	0,096	0,077	0,019	19,792		0,770		
9	0,631	0,728	0,709	0,097	0,078	0,019	19,588		0,780		
10	0,709	0,806	0,787	0,097	0,078	0,019	19,588		0,780		
11	0,787	4,030	3,720	3,243	2,933	0,310	9,559		0,917		
12	3,720	6,970	6,670	3,250	2,950	0,300	9,231		0,922		
13	6,670	9,920	9,620	3,250	2,950	0,300	9,231		0,922		
14	9,620	12,900	12,600	3,280	2,980	0,300	9,146		0,931		
15	12,600	15,800	15,500	3,200	2,900	0,300	9,375	9,285	0,906	0,919	
16	15,500	18,800	18,500	3,300	3,000	0,300	9,091		0,938		
17	18,500	21,700	21,400	3,200	2,900	0,300	9,375		0,906		
18	21,400	24,700	24,400	3,300	3,000	0,300	9,091		0,938		
19	24,400	27,600	27,300	3,200	2,900	0,300	9,375		0,906		
20	27,300	30,500	30,200	3,200	2,900	0,300	9,375		0,906		
								Rdiff	51,074	Jnr-diff	16,792

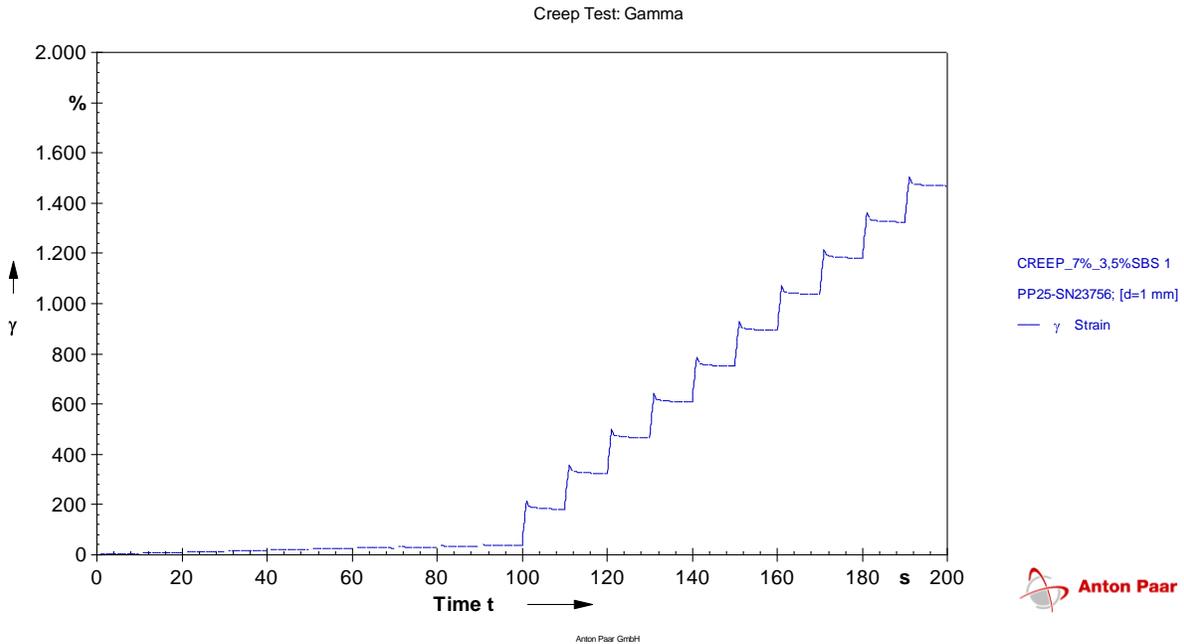
Creep Test: Gamma



8.3.7. LIGANTE CON 7% DE ABLANDADOR Y 3,5% DE SBS

8.3.7.1. 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	Jnr
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]
1	0,000	0,054	0,040	0,054	0,040	0,014	26,151	27,990	0,401	0,388
2	0,040	0,094	0,080	0,054	0,039	0,015	27,037		0,394	
3	0,080	0,133	0,118	0,054	0,039	0,015	28,037		0,385	
4	0,118	0,172	0,157	0,054	0,039	0,015	27,778		0,390	
5	0,157	0,211	0,196	0,054	0,039	0,015	27,778		0,390	
6	0,196	0,250	0,234	0,054	0,038	0,016	29,630		0,380	
7	0,234	0,288	0,273	0,054	0,039	0,015	27,778		0,390	
8	0,273	0,327	0,311	0,054	0,038	0,016	29,630		0,380	
9	0,311	0,365	0,350	0,054	0,039	0,015	27,778		0,390	
10	0,350	0,403	0,388	0,053	0,038	0,015	28,302		0,380	
11	0,388	2,160	1,820	1,772	1,432	0,340	19,187	0,448	0,447	
12	1,820	3,590	3,240	1,770	1,420	0,350	19,774	0,444		
13	3,240	5,010	4,660	1,770	1,420	0,350	19,774	0,444		
14	4,660	6,430	6,090	1,770	1,430	0,340	19,209	0,447		
15	6,090	7,860	7,510	1,770	1,420	0,350	19,774	0,444		
16	7,510	9,290	8,940	1,780	1,430	0,350	19,663	0,447		
17	8,940	10,700	10,400	1,760	1,460	0,300	17,045	0,456		
18	10,400	12,200	11,800	1,800	1,400	0,400	22,222	0,438		
19	11,800	13,600	13,200	1,800	1,400	0,400	22,222	0,438		
20	13,200	15,000	14,700	1,800	1,500	0,300	16,667	0,469		
							Rdiff	30,140	Jnr-diff	15,271



8.3.7.2. 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	Jnr
	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[%]	[%]	[1/kPa]	[1/kPa]
1	0,000	0,056	0,042	0,056	0,042	0,014	25,445		0,419	
2	0,042	0,098	0,083	0,056	0,041	0,015	26,655		0,410	
3	0,083	0,139	0,123	0,056	0,040	0,016	28,520		0,401	
4	0,123	0,179	0,164	0,056	0,041	0,015	26,786		0,410	
5	0,164	0,220	0,204	0,056	0,040	0,016	28,571		0,400	
6	0,204	0,260	0,244	0,056	0,040	0,016	28,571	27,883	0,400	0,404
7	0,244	0,300	0,284	0,056	0,040	0,016	28,571		0,400	
8	0,284	0,340	0,324	0,056	0,040	0,016	28,571		0,400	
9	0,324	0,380	0,364	0,056	0,040	0,016	28,571		0,400	
10	0,364	0,420	0,404	0,056	0,040	0,016	28,571		0,400	
11	0,404	2,240	1,890	1,836	1,486	0,350	19,063		0,464	
12	1,890	3,710	3,360	1,820	1,470	0,350	19,231	19,070	0,459	0,462
13	3,360	5,190	4,840	1,830	1,480	0,350	19,126		0,463	
14	4,840	6,670	6,320	1,830	1,480	0,350	19,126		0,463	
15	6,320	8,140	7,800	1,820	1,480	0,340	18,681		0,463	
16	7,800	9,620	9,270	1,820	1,470	0,350	19,231		0,459	
17	9,270	11,100	10,700	1,830	1,430	0,400	21,858		0,447	
18	10,700	12,600	12,200	1,900	1,500	0,400	21,053		0,469	
19	12,200	14,000	13,700	1,800	1,500	0,300	16,667		0,469	
20	13,700	15,500	15,200	1,800	1,500	0,300	16,667		0,469	
							Rdiff	31,608	Jnr-diff	14,449

Creep Test: Gamma

