

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO - CHILE



**MODIFICACIÓN DE ASFALTO CA-24 CON POLÍMERO ESTIRENO-
BUTADIENO-ESTIRENO PARA EVALUACIÓN POR DESEMPEÑO EN BASE
AL ENSAYO MULTI STRESS CREEP AND RECOVERY**

Memoria de titulación presentada por

FELIPE IGNACIO PINTO GONZÁLEZ

Como requisito para optar al título de

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

RODRIGO DELGADILLO STURLA

Diciembre de 2018

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIA

RESUMEN

Actualmente, debido al incremento de los volúmenes y cargas de tránsito en caminos asfálticos es que se ha debido requerir nuevos métodos de especificación de materiales y mezclas, siendo el conjunto de metodologías y requerimientos SUPERPAVE el más revolucionario. Sin embargo, esta metodología, aún con todos sus avances, tiene problemas que derivan de la complejidad que conlleva la naturaleza visco elástica propia de los asfaltos, además de no estar validados para asfaltos modificados. En este marco es que se han realizado modificaciones en la metodología de ensayo y especificación de los ligantes a alta temperatura en base al ensayo Multi Stress Creep and Recovery (MSCR).

En consideración de lo anterior, el presente trabajo realiza un estudio sobre un asfalto modificado con estireno-butadieno-estireno (SBS), con el fin de fijar las bases para el proceso de modificación de asfalto con este material, y además establecer valores límite para una especificación chilena en base al ensayo MSCR. Para esto se llevó a cabo una recopilación de especificaciones por desempeño vigentes en otros países y se compararon las que presentaron condiciones climáticas similares a Chile para obtener valores aplicables en el país. Además se produjeron mezclas con distintas concentraciones de polímero, con el fin de obtener datos de los efectos de la modificación sobre la resistencia al ahuellamiento y poder entregar recomendaciones para la modificación de asfaltos con SBS, además, estos resultados fueron usados para determinar la capacidad de los materiales disponibles en Chile para cumplir los valores especificados.

Para la mezcla se utilizó un mezclador de corte de alta velocidad junto con un mecanismo para control de temperatura. Los parámetros controlados para este procedimiento fueron temperatura (180 °C), velocidad del mezclado (5000 r.p.m.) y tiempo de mezclado (60 min).

Una vez terminadas las tareas fijadas para el estudio, se puede concluir que los valores especificados en la norma AASHTO M 332 son aplicables a Chile, debido a la similitud de las condiciones climáticas existentes entre varios estados norteamericanos y Chile. Sin embargo, los resultados obtenidos de los ensayos muestran problemas para cumplir con los valores especificados, que indican que se debe modificar el método de mezclado del asfalto, ya sea los parámetros de temperatura, velocidad del mezclador y de tiempo de mezclado, o bien cambiando los instrumentos usados para el procedimiento. Además, se propone la modificación del método de

ensayo para el test MSCR, aumentando la cantidad de ciclos de carga-descarga, para disminuir la variabilidad.

ABSTRACT

Currently, due to the increase in traffic volumes and loads in asphalt is that it must have required new methods of specification, being the set of methodologies and requirements SUPERPAVE the most revolutionary. However, this methodology, even with all its advances, has problems that derive from the complexity that comes with the visco-elastic nature of asphalt binders, as well as not being validated for modified asphalts. In this context, modifications have been made to the testing methodology and specification of high temperature binders based on the Multi Stress Creep and Recovery (MSCR) test.

In consideration of the above, this work makes a study on a modified asphalt with styrene-butadiene-styrene (SBS), in order to set the bases for the process of modification of asphalt with this material, and also establish limit values for a chilean specification based on the MSCR test. For this, a compilation of current performance specifications from other countries was carried out, and those that presented similar climatic conditions to Chile were compared to obtain applicable values in the country. In addition, mixtures with different concentrations of polymer (2, 4 and 6%) were produced, in order to obtain data on the effects of the modification on the resistance to deterioration at high temperature and to be able to deliver recommendations for the modification of asphalts with SBS, also the results were used to verify that the chilean materials are able to achieve the selected values for especification.

For the mixture, a high speed cutting mixer was used together with a mechanism for temperature control. The parameters controlled for this procedure were temperature (180 ° C), mixing speed (5000 r.p.m.) and mixing time (60 min).

Once the tasks set for the study have been completed, it can be concluded that the values specified in the AASHTO M 332 standard are applicable to Chile, due to the similarity of the climatic conditions existing between several North American states and Chile. However, the results obtained from the tests show problems, which indicate that the mixing method of the asphalt must be modified, either the parameters of temperature, mixer speed and mixing time, or by changing the instruments used for the procedure. In addition, it is proposed to modify the test method for the MSCR test, increasing the number of charge-discharge cycles, in order to reduce the variability.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES GENERALES.....	1
1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. ASFATOS MODIFICADOS.....	4
2.1.1. SBS: ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO.....	4
2.1.1.1. MÉTODO DE INCORPORACIÓN	5
2.2. METODOLOGÍA SUPERPAVE	6
2.2.1. ENSAYOS SUPERPAVE	7
2.2.2. ESPEFICICACIÓN SUPERPAVE.....	13
2.2.3. SUPERPAVE PLUS (SHRP+)	16
2.2.4. DEFICIENCIAS DE LA ESPECIFICACIÓN SUPERPAVE	17
2.2.4.1. $G^*/\text{SEN}(\delta)$ COMO PARÁMETRO DE ALTA TEMPERATURA	17
2.2.4.2. AUMENTO DE GRADO	17
2.2.4.3. APLICACIÓN A ASFALTOS MODIFICADOS	18
2.3. ENSAYO MULTI STRESS CREEP AND RECOVERY	18

2.3.1.	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	19
2.3.2.	ESPECIFICACIÓN EN BASE AL ENSAYO MSCR	20
2.3.2.1.	NUEVO PARAMETRO DE ALTA TEMPERATURA.....	20
2.3.2.2.	ELIMINACIÓN DEL AUMENTO DE GRADO.....	22
2.3.2.3.	APLICACIÓN A ASFALTOS MODIFICADOS	25
2.3.3.	ESPECIFICACIONES ESTATALES NORTEAMÉRICANAS.....	26
2.3.3.1.	AASHTO M332.....	28
2.4.	TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	33
2.5.	CONFIABILIDAD	36
3.	FASE EXPERIMENTAL	37
3.1.	MATERIALES	37
3.1.1.	LIGANTE ASFÁLTICO.....	37
3.1.2.	ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO	37
3.2.	METODOLOGÍA.....	38
3.2.1.	ETAPA PRELIMINAR	38
3.2.1.1.	CARACTERIZACIÓN ASFALTO BASE	38
3.2.2.	ETAPA DE MEZCLADO	38
3.2.3.	OBTENCIÓN DE J_{nr} 3.2 Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	39
3.2.4.	ENSAYOS FINALES Y CONCLUSIONES	40
3.3.	EQUIPOS.....	42
3.3.1.	ETAPA PREELIMINAR	42
3.3.2.	ETAPA DE MEZCLADO	42
4.	RESULTADOS	47
4.1.	RESULTADOS LIGANTE BASE.....	47
4.2.	RESULTADOS MEZCLA 2%.....	47
4.3.	RESULTADOS MEZCLA 4% A.....	48
4.4.	RESULTADOS MEZCLA 4% B.....	48

4.5.	RESULTADOS MEZCLA 4% C.....	48
4.6.	RESULTADOS MEZCLA 6%.....	49
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
5.1.	Jnr3.2	49
5.1.1.	VARIABILIDAD MUESTRAS	49
5.1.1.1.	REPETITIVIDAD	49
5.1.1.2.	DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS	51
5.1.2.	CONFECCIÓN CURVA Jnr3.2 VS %SBS.....	53
5.1.3.	CURVA POR TIPO DE REGRESIÓN.....	53
5.1.4.	CURVA POR NIVEL DE CONFIABILIDAD	55
5.1.5.	RESPUESTA ELÁSTICA	61
5.2.	Jnrdiff.....	63
5.3.	%Rec3.2.....	64
6.	CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO MSCR	66
6.1.	RESULTADOS MODIFICADOS LIGANTE BASE.....	66
6.2.	RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 2%	67
6.3.	RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 4% A	67
6.4.	RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 4% B	67
6.5.	RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 4% C	68
6.6.	RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 6%	68
6.7.	EFFECTO DE DISMINUCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS	68
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
8.	ANEXOS	74
8.1.	ENSAYOS SUPERPLAVE PLUS POR ESTADO.....	74
8.2.	AASHTO T 350: Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Revert (MSCR) Test of Asphalt Binder Using Shear Rheometer (DSR)	78
9.	REFERENCIAS.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Horno HPDR.	7
Figura 2-2: Equipo de envejecimiento PAV	8
Figura 2-3: Reómetro de corte dinámico.	9
Figura 2-4: Comportamiento de materiales elásticos, viscosos y visco elásticas ante esfuerzo sinusoidales.....	10
Figura 2-5: Viscosímetro rotacional Brookfield.	11
Figura 2-6: Reómetro de viga en flexión.	12
Figura 2-7: Ensayo de tracción directa.	13
Figura 2-8: Gráfico Deformación vs Tiempo para 10 ciclos de carga-recuperación elástica...19	
Figura 2-9: Gráfico Jnr vs Esfuerzo para dos asfaltos.	21
Figura 2-10: Nivel de implementación del ensayo MSCR por estado.	26
Figura 2-11: Distribución normal con niveles de confiabilidad.....	36
Figura 3-1: Polímero SBS entregado por OIL MALAL.	37
Figura 3-2: Plan de la etapa experimental.....	41
Figura 3-3: Horno con sistema de circulación de aire.	42
Figura 3-4: Dispersor de inmersión marca Kinematica utilizado.	43
Figura 3-5: Unidad de control marca Kinematica.	44
Figura 3-6: Bandeja térmica.	45
Figura 3-7: Balanza (arriba), vasos y termómetro (izquierda) y baño de aceite (derecha)	45
Figura 3-8: Sistema de mezclado montado.	46
Figura 5-1: Gráfico de distribuciones acumuladas para contraste de hipótesis.	52
Figura 5-2: Curva Jnr3.2 vs %SBS con ajuste lineal.	54
Figura 5-3: Curva Jnr3.2 vs %SBS con ajuste exponencial.	54
Figura 5-4: Curva Jnr3.2 vs %SBS con ajuste logarítmico.....	54
Figura 5-5: Curva Jnr3.2 vs %SBS para 50% de confiabilidad.....	56
Figura 5-6: Curva Jnr3.2 vs %SBS para un 75% de confiabilidad.....	57
Figura 5-7: Curva Jnr3.2 vs %SBS para un 95% de confiabilidad.....	58
Figura 5-8: Jnr3.2 vs %SBS por nivel de carga, para una confiabilidad de 50%.....	59

Figura 5-9: Jnr3.2 vs %SBS por nivel de carga, para una confiabilidad de 75%.....	60
Figura 5-10: Jnr3.2 vs %SBS por nivel de carga, para una confiabilidad de 95%.....	60
Figura 5-11: Gráfico %Rec3.2 vs Jnr3.2	62
Figura 5-12: Gráfico %SBS vs %Rec3.2.....	62
Figura 5-13: Gráfico Jnr3.2 vs %Rec3.2.	65
Figura 6-1: Coeficiente de variación de los resultados del ensayo MSCR por número de ciclos.	69
Figura 6-2: Variación de resultados de Jnr _{diff} por número de ciclos.	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Especificación por grado de desempeño (PG) de ligantes asfálticos.	14
Tabla 2-2: Especificación por grado de desempeño (PG) de ligantes asfálticos, continuación.	15
Tabla 2-3: $Jnr_{3.2}$ para varios ligantes ensayados a su grado de alta temperatura.	22
Tabla 2-4: Distintas mediciones del cambio del ahuellamiento al reducir $Jnr_{3.2}$	23
Tabla 2-5: Condiciones para los niveles de carga en la especificación en base al ensayo MSCR.	24
Tabla 2-6: Equivalencia de la especificación SUPERPAVE actual (AASHTO M320) con la especificación en base al MSCR.....	24
Tabla 2-7: Grados PG especificados por agencia estatal.	27
Tabla 2-8: Resumen de valores límite por nivel de desempeño en AASHTO M332.	29
Tabla 2-9: Especificación por desempeño en base al ensayo MSCR.....	30
Tabla 2-10: Especificación por desempeño en base al ensayo MSCR (continuación).....	31
Tabla 2-11: Especificación por desempeño en base al ensayo MSCR (continuación).....	32
Tabla 2-12: Tablas de $c\alpha$ según nivel de significancia y modelo.	35
Tabla 2-13: Tabla de $k(n)$ según modelo.	35
Tabla 3-1: Mezclas a ensayar en el estudio.	39
Tabla 4-1: Resultados ensayo MSCR para ligante base.	47
Tabla 4-2: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 2% de SBS.	47
Tabla 4-3: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (A).	48
Tabla 4-4: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (B).	48
Tabla 4-5: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (C).	48
Tabla 4-6: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 6% de SBS.	49
Tabla 5-1: Resultados del ensayo MSCR para mezclas con 2% de SBS.	49
Tabla 5-2: Datos ingresados al modelo ANOVA.	50
Tabla 5-3: Resultados ensayo MSCR para asfalto modificado con 4% de SBS.	50
Tabla 5-4: Valores calculados para el modelo ANOVA.	50
Tabla 5-5: Contraste de hipótesis de los resultados de $Jnr_{3.2}$ con una distribución normal.	52

Tabla 5-6: Puntos a considerar en la curva <i>Jnr</i> 3.2 vs %SBS.	53
Tabla 5-7: Puntos para curva <i>Jnr</i> 3.2 vs %SBS, para 50% de confiabilidad.	55
Tabla 5-8: Puntos para curva <i>Jnr</i> 3.2 vs %SBS, para 75% de confiabilidad.	56
Tabla 5-9: Puntos para curva <i>Jnr</i> 3.2 vs %SBS, para 95% de confiabilidad.	57
Tabla 5-10: Concentraciones de SBS requeridos por nivel de carga y según confiabilidad. ...	58
Tabla 5-11: Valores de flexibilidad en fluencia y recuperación elástica.	61
Tabla 5-12: Resultados de <i>Jnr</i> diff para asfaltos modificados.	63
Tabla 6-1: Resultados modificados ensayo MSCR para ligante base.	66
Tabla 6-2: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 2% de SBS.	67
Tabla 6-3: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (A).	67
Tabla 6-4: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (B).	67
Tabla 6-5: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (C).	68
Tabla 6-6: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 6% de SBS.	68
Tabla 8-1: Ensayos SUPERPAVE PLUS por estado.	74
Tabla 8-2: Ensayos SUPERPAVE PLUS por estado (continuación).	75
Tabla 8-3: Ensayos SUPERPAVE PLUS por estado (continuación).	76
Tabla 8-4: Ensayos SUPERPAVE PLUS por estado (continuación).	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

En la actualidad, uno de los métodos de especificación para ligantes asfálticos más avanzados corresponde a la metodología SUPERPAVE. Este método, desarrollado por la NCHRP (National Cooperative Research Program) bajo el marco del estudio SHRP (Strategic Highway Research Program), es una especificación basada en el desempeño, donde los ligantes son caracterizados en función de las condiciones climáticas y de tránsito previstas para el pavimento. Para esto se exigen ciertas propiedades reológicas al asfalto, las cuales son constantes pero deben ser cumplidas a distintas temperaturas según sea el caso. De esta forma, un ligante con PG 64-22 (PG=Performance Grade) corresponde a un ligante que se desempeñará de forma correcta en un rango de temperatura entre los -22 °C (grado de baja temperatura) y 64 °C (grado de alta temperatura). Estas temperaturas extremas están asociadas a dos de los deterioros más comunes de los pavimentos asfálticos, que son el agrietamiento térmico (baja temperatura) y el ahuellamiento (alta temperatura).

Si bien los asfaltos tradicionales han presentado propiedades satisfactorias, el creciente incremento de las cargas y volumen de tránsito, así como de la necesidad de optimizar la inversión inicial y disminuir los costos de mantenimiento ha provocado que las propiedades de los materiales utilizados hasta ahora resulten, en algunos casos, insuficientes. Es por esto que se han debido incluir nuevos métodos y materiales, dando lugar así a los llamados Asfaltos Modificados. Estos nuevos ligantes son asfaltos tradicionales a los cuales se le han agregados ciertos agentes, que modifican sus propiedades, por ejemplo aumentando su recuperación elástica, mejorando así su resistencia al ahuellamiento y por ende aumentando el grado de alta temperatura.

Sin embargo, el conjunto de especificaciones y ensayos SUPERPAVE fueron desarrollados principalmente en estudios a asfaltos tradicionales, por lo que su aplicación a asfaltos modificados ha sido constantemente cuestionada (D'Angelo, "New High-Temperature Binder Specification Using Multistress Creep And Recovery", 2010). Debido a esto es que se debió establecer una serie de ensayos adicionales, y opcionales, denominados SHRP+ o SUPERPAVE PLUS. Estos nuevos ensayos tienen como finalidad indicar la presencia de agentes modificadores en el asfalto, pero es importante notar que estos ensayos no se relacionan con el desempeño, solo se limitan a indicar la presencia o ausencia de un agente modificador sin indicar el beneficio real de su aplicación ni sus

efectos sobre las propiedades del asfalto. Esto puede provocar un aumento de costos al especificar un asfalto modificado, sin un beneficio real en el resultado final (D'Angelo, "Modified Binders and Superpave Plus Specifications").

Para determinar los efectos de un modificante sobre el asfalto es que se desarrolló un nuevo ensayo para el grado de alta temperatura, el ensayo MSCR (Multi Stress Creep and Recovery=Recuperación Elástica a Varios Esfuerzos). Este ensayo consiste en realizar ciclos de esfuerzo y relajación con el DSR (Reómetro de Corte Dinámico) con el fin de analizar la capacidad de recuperación elástica del asfalto y relacionarlo con su desempeño frente al ahuellamiento. Este nuevo método viene a reemplazar lo especificado a alta temperatura y temperatura intermedia, o sea el parámetro $G^*/\sin(\delta)$ y $G*\sin(\delta)$ respectivamente, manteniendo el resto de los criterios de especificación a baja temperatura sin cambios.

Este nuevo método desarrollado por la FHA (Federal Highway Administration) ha demostrado ser capaz de demostrar las diferencias en el desempeño frente al ahuellamiento tanto para asfaltos tradicionales como modificados, por lo que se debe analizar la validez de estos estudios para los materiales utilizados en Chile. Asimismo, es importante hacer un estudio sobre la factibilidad de implementación de asfaltos modificados a escala industrial en el país.

El objetivo de este estudio consiste en determinar los criterios de aplicación y especificación de asfaltos en base al ensayo MSCR mediante la realización de una mezcla con un asfalto tradicional y un polímero para distintos niveles de carga, y relacionarlos con el desempeño.

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

- Establecer la concentración de SBS requerida para alcanzar los criterios establecidos por la especificación en base al ensayo Multi Stress Creep and Recovery para distintos niveles de carga.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Validar el criterio norteamericano de especificación en base al ensayo Multi Stress Creep and Recovery para Chile para los materiales disponibles en Chile.
- Establecer una metodología para una especificación en base al ensayo Multi Stress Creep and Recovery en Chile.
- Identificar posibles problemas y mejoras para la aplicación del ensayo MSCR en Chile.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y MARCO TEÓRICO

2.1. ASFATOS MODIFICADOS

Los asfaltos modificados corresponden a aquellos ligantes que son mezclados con otros materiales para mejorar sus características reológicas cuando estos no logran alcanzar los requerimientos mínimos para un buen desempeño, o que requieren mejoras ante situaciones de condiciones extremas, como rangos de temperatura muy amplios, grandes cargas y volúmenes de tráfico o bajas velocidades de tránsito, por lo que son combinados con polímeros, caucho, ácidos u otra sustancia que aumente su rigidez, su elasticidad, adherencia, o cualquier propiedad de interés.

En el caso de polímeros, se utilizan materiales químicos de alto peso molecular formados por la unión de pequeñas moléculas llamadas monómeros. Estas uniones forman redes de diversas formas las cuales entregan características al asfalto que dependen de la clasificación entregada a continuación:

- Tipo I: Mejora el comportamiento a alta y baja temperatura.
- Tipo II: Aumenta el comportamiento a baja temperatura.
- Tipo III: Disminuye la susceptibilidad térmica y mejora su comportamiento a alta temperatura.

El resultado final de la modificación de la concentración del polímero, peso molecular, composición química y orientación molecular (compatibilidad asfalto-polímero). También depende del asfalto, su fuente, proceso de refinación y el grado PG base.

Si bien no existe cuestionamiento sobre el beneficio de modificar un asfalto con polímeros, este procedimiento puede aumentar el costo del ligante entre un 30% y un 100%, con un aumento sobre el costo final de la mezcla de entre un 10% y un 40%, por lo que es imperativo realizar una evaluación para determinar si este costo es realmente útil o no (D'Angelo, "Modified Binders and Superpave Plus Specifications").

2.1.1. SBS: ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO

El Estireno Butadieno Estireno (SBS=Styrene Butadiene Styrene) es un elastómero termoplástico sintético. Esto significa que tiene por un lado propiedades elastoméricas pudiendo

deformarse bajo la acción de fuerzas sin presentar deformaciones permanentes, y también propiedades termoplásticas, lo que significa que puede ablandarse por acción del calor y endurecerse al enfriarse de forma reversible. Debido a estas propiedades y al buen comportamiento que tiene al mezclarse con ligantes es uno de los polímeros más utilizados en la actualidad.

Corresponde a un polímero tipo I, que mejora el comportamiento tanto a alta como a baja temperatura y se usa principalmente en carpetas delgadas y paquetes estructurales con elevados índices de tránsito y grandes cargas. También se utiliza para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

Su uso se hace importante debido al creciente incremento del volumen y las cargas de tránsito, donde las propiedades de los asfaltos tradicionales resultan insuficientes, por ejemplo, al adoptar ligantes más rígidos se corre el riesgo de aparición de agrietamiento térmico, sin que esto signifique que la dureza del ligante sea suficiente para prevenir la aparición de ahuellamiento. Debido a las características del SBS el resultado final es un asfalto más rígido, pero con propiedades elásticas a altas temperaturas lo que disminuye el ahuellamiento, mientras que a bajas temperaturas mantiene su rigidez, pero aumenta su elasticidad disminuyendo el agrietamiento térmico y por fatiga. Además es un ligante que presenta una buena compatibilidad con la mayoría de los ligantes y mejora la adherencia con el agregado.

2.1.1.1. MÉTODO DE INCORPORACIÓN

El proceso de modificación depende del tipo del polímero seleccionado. En el caso del SBS, este tiene que pasar por un proceso de molienda y/o homogeneización, lo que hace necesario el uso de mezcladores de corte de alta velocidad. A continuación, de manera general se mencionan las etapas más importantes del proceso de modificación (Rodríguez, 2008):

- 1) Evaluación del asfalto base: Ensayos al asfalto base, con el fin de obtener sus características propias y comparar con los resultados finales.
- 2) Incrementar la temperatura del asfalto a la temperatura de mezclado: Se debe aumentar la temperatura del asfalto a la temperatura de mezclado antes de agregar el polímero.
- 3) Proceso de moliendo y/o homogeneización asfalto-polímero: Se agrega el polímero y se mezcla a temperatura constante. Durante este proceso el SBS absorbe los compuestos más

ligeros del asfalto, lo que sumado a la temperatura de mezclado producen la fusión de este y su posterior emulsión en la mezcla.

- 4) Control de calidad a través de microscopía óptica: Se revisa mediante microscopio la dispersión de la red del polímero en el asfalto.
- 5) Finalización de la reacción: Se debe esperar un mínimo de 24 horas antes de realizar ensayos a la mezcla final.

La literatura indica una temperatura de mezclado es de 180 °C (Ruiz, 2010), con una velocidad del mezclador de 5000 r.p.m durante 45 minutos (Fernandes, Carmargo Forte, & Mathias, 2008).

2.2. METODOLOGÍA SUPERPAVE

La metodología SUPERPAVE (SUPERior PERforming Asphalt PAVement) corresponde a un conjunto de ensayos y especificaciones, realizados por la SHRP (Strategic Highway Research Program), que tienen por objetivo el realizar una especificación de los materiales y diseño de una mezcla asfáltica en relación con el desempeño que tendrán frente a los deterioros más comunes que afectan a este tipo de pavimentos.

Este nuevo sistema incorpora una serie de equipos de laboratorio, además de criterios de envejecimiento del ligante, los que buscan recrear las condiciones climáticas que afectarán al pavimento con el fin de determinar el comportamiento real de este y verificar que se cumplan los requerimientos mínimos del ligante tanto a alta como a baja temperatura, obteniendo de esta forma el rango de temperatura donde se garantiza no existirán los deterioros más comunes que afectan a los pavimentos asfálticos, tales como el ahuellamiento, agrietamiento térmico y agrietamiento por fatiga.

El rango determinado se expresa en el nombre con el cual se especifica el ligante, donde por ejemplo un PG 64-22 tendrá un buen desempeño entre los -22 [°C] (llamado grado de baja temperatura) y los 64 [°C] (llamado grado de alta temperatura), sin presentar ahuellamiento a temperaturas del pavimento menores a 64 [°C] ni agrietamiento térmico a temperaturas mayores que -22 [°C]. Por otro lado, un PG 76-22 aumenta este rango, teniendo un buen desempeño frente al ahuellamiento a temperaturas menores a 76 [°C], y manteniendo la resistencia a agrietamiento térmico a temperaturas mayores a los -22 [°C].

2.2.1. ENSAYOS SUPERPAVE

Parte importante de la metodología SUPERPAVE es el criterio de envejecimiento del asfalto. Para esto existen dos instrumentos de envejecimiento para cumplir con este objetivo. Primero se tiene el Horno de Película Delgada Rotativa (RTFO=Rolling Thin Film Oven), Figura 2-1, el cual tiene como objetivo simular el envejecimiento que sufre el asfalto durante el proceso de mezclado, colocación y compactación, de forma de obtener las propiedades que tendrá el ligante al inicio de su periodo de servicio. El otro instrumento corresponde a la Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV=Pressure Aging Vessel), figura 2-2, la cual se utiliza para simular el envejecimiento por oxidación que afecta al pavimento a lo largo de su periodo de servicio.



Figura 2-1: Horno HPDR.



Figura 2-2: Equipo de envejecimiento PAV.

Luego, las propiedades físicas del ligante se miden mediante cuatro instrumentos, los cuales realizan la caracterización a distintas temperaturas. Estos instrumentos se detallan a continuación:

- **Reómetro de Corte Dinámico (DSR=Dyamic Shear Rehometer)**

Este instrumento se emplea para caracterizar las propiedades viscoelásticas del ligante, midiendo el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) de una muestra sometida a tensiones de corte oscilante. La muestra se ubica entre dos discos paralelos y mide la respuesta de deformación específica del corte del espécimen sometido a un torque.

El objetivo de este ensayo es controlar la rigidez tanto a altas temperaturas, mediante el valor de $G^*/\text{sen}(\delta)$, y a temperatura intermedia, mediante el valor de $G^*\text{sen}(\delta)$, con el fin de controlar la aparición de ahuellamiento y agrietamiento por fatiga, respectivamente.



Figura 2-3: Reómetro de corte dinámico.

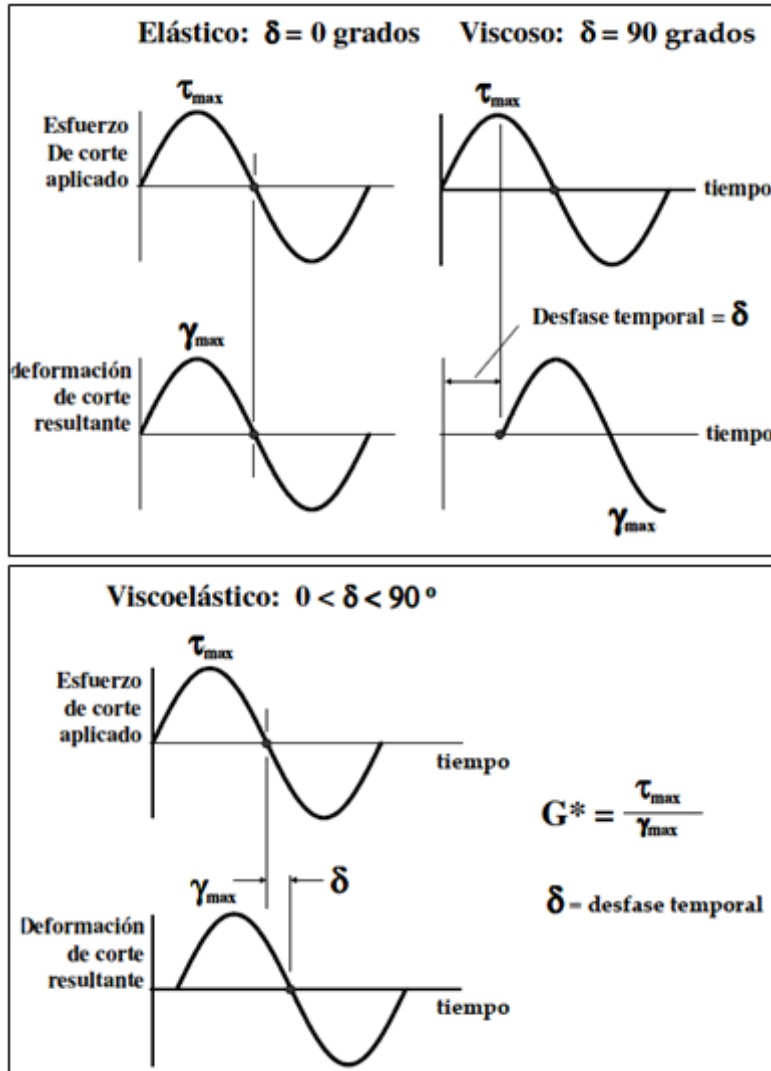


Figura 2-4: Comportamiento de materiales elásticos, viscosos y visco elásticos ante esfuerzo sinusoidales.

- **Viscosímetro Rotacional (RV=Rotational Viscometer)**

Caracteriza la rigidez del asfalto a 135 [°C], temperatura a la cual este es prácticamente un fluido. Consiste en un cilindro rotacional coaxial, que mide la viscosidad por medio del torque requerido para rotar un eje, sumergido en una muestra de asfalto caliente. La especificación exige una viscosidad menor a 3 [Pa·s], con el fin de garantizar un asfalto bombeable y manejable durante su elaboración y colocación.



Figura 2-5: Viscosímetro rotacional Brookfield.

- **Reómetro de Viga en Flexión (BBR=Bending Beam Rehometer)**

El reómetro de viga en flexión se utiliza para caracterizar las propiedades del ligante a baja temperatura. Mide la rigidez en creep (ensayo a esfuerzo constante), “S”, y el logaritmo de la deformación en creep (razón mínima de cambio de la rigidez [MPa/S]), “m”. Esto se hace aplicando una carga en creep a una pequeña probeta de ligante, en forma de viga. Al conocer la carga aplicada y la deformación de la viga, se puede conocer la rigidez en creep mediante la aplicación de los conceptos de mecánica de materiales. La especificación especifica límites de la rigidez en creep y a “m” dependiendo del clima de la zona donde se aplicará el pavimento.

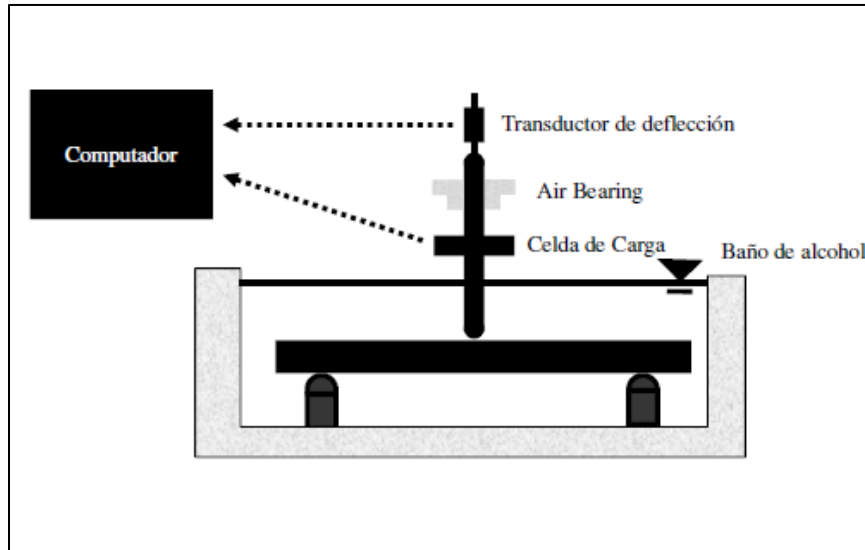


Figura 2-6: Reómetro de viga en flexión.

- **Ensayo de Tracción Directa (DTT=Direct Tension Test)**

Se utiliza para caracterizar el comportamiento de los ligantes, particularmente los modificados, a bajas temperaturas ya que en estas condiciones aumentan su rigidez siendo más susceptibles al agrietamiento térmico, por lo que se hace necesario verificar su capacidad de deformación. Debido a esto es que la especificación tolera una alta rigidez en creep si puede verificarse, por medio del DTT, que los ligantes son suficientemente dúctiles a bajas temperaturas. Este ensayo provee la deformación de rotura, medida sobre una muestra pequeña alargada, la cual es estirada hasta que se corta. El DTT asegura, al igual que el BBR, la máxima resistencia del ligante al agrietamiento a baja temperatura.

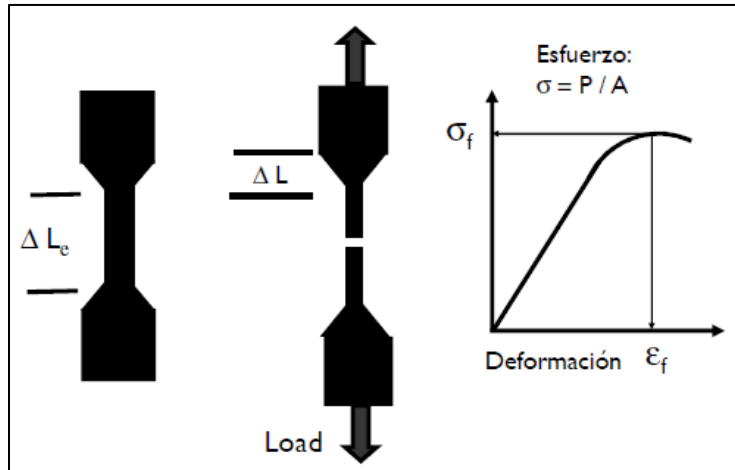


Figura 2-7: Ensayo de tracción directa.

Este método se encuentra normado por las normas AASHTO M320: Performance-Graded Asphalt Binder y ASTM D6373: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. En Chile los procedimientos se encuentran incluidos en el Volumen 8 del Manual de Carreteras, más específicamente en las secciones 8.302.22-26.

2.2.2. ESPECIFICACIÓN SUPERPAVE

A continuación se muestra la tabla con especificaciones para asfaltos de acuerdo a la AASHTO M320: Performance-Graded Asphalt Binder, en ella se puede ver los límites que se deben cumplir para distintas temperaturas. En el caso del grado de alta temperatura, que es el parámetro de interés en este estudio, el valor límite es $G^*/\sin(\delta)$, el cual debe tener valores de 1.0 kPa y 2.2 kPa, para el ligante original y envejecido mediante HPDR, respectivamente.

Tabla 2-1: Especificación por grado de desempeño (PG) de ligantes asfálticos.

Table 1—Performance-Graded Asphalt Binder Specification

Performance Grade	PG 46					PG 52					PG 58					PG 64					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Average 7-day max pavement design temp, °C ^a	<46																				
Min pavement design temperature, °C ^b	≥-34	≥-40	≥-46	≥-10	≥-16	≥-22	≥-28	≥-34	≥-40	≥-46	≥-16	≥-22	≥-28	≥-34	≥-40	≥-10	≥-16	≥-22	≥-28	≥-34	≥-40
Flash point temp, T 48, min °C	Original Binder 230																				
Viscosity, T 316: ^c max 3 Pa·s, test temp, °C	135																				
Dynamic shear, T 315: ^d G* min ^e , min 1.00 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	46																				
Dynamic shear, T 315: ^d G* min ^e , min 2.30 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	52																				
Dynamic shear, T 315: ^d G* min ^e , min 3.80 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	58																				
Dynamic shear, T 315: ^d G* min ^e , min 5.00 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	64																				
Mass change, ^f max, percent	Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240) 1.00																				
PAV aging temperature, °C ^g	90 (100, 110)																				
Dynamic shear, T 315: ^d G* min ^e , max 5000 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Creep stiffness, T 313: ^h S, max 300 MPa m-value, min 0.300 test temp @ 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Direct tension, T 314: ⁱ Failure strain, min 1.0% test temp @ 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

^a Pavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the LTPP Bind program, may be provided by the specifying agency, or by following the procedures as outlined in M 233 and R 335.

^b This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.

^c For quality control of unmodified asphalt binder production, measurement of the viscosity of the original asphalt binder may be used to supplement dynamic shear measurements of G* (min) at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid.

^d G* (min) = high temperature stiffness and G* (max) = intermediate temperature stiffness.

^e The mass change shall be less than 1.00 percent for either a positive (mass gain) or a negative (mass loss) change.

^f The PAV aging temperature is based on anticipated climatic conditions and is one of three temperatures, 90°C for climates requiring PG 52-xx and below, 100°C for climates requiring PG 58-xx to PG 70-xx, or 110°C for climates requiring PG 76-xx and above. Normally the PAV aging temperature is specified based on the PG grade. However, when the binder is being used in a different climate due to grade bumping or used for other binder due to blending, the PAV aging temperature may be specified as 100°C when used in climates requiring PG 58-xx to PG 70-xx, or 110°C when used in climates requiring PG 76-xx and above.

^g If the creep stiffness is below 300 MPa, the direct tension test is not required. If the creep stiffness is between 300 and 600 MPa, the direct tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement. The m-value requirement must be satisfied in both cases.

Continued on next page.

Tabla 2-2: Especificación por grado de desempeño (PG) de ligantes asfálticos, continuación.

Performance Grade	PG 70							PG 76							PG 82													
	10	16	22	28	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	52	10	16	22	28	34	40	46	52					
Average 7-day max pavement design temperature, °C ^a	<70																											
Min pavement design temperature, °C ^b	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-52	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-52					
Original Binder																												
Flash point temp, T 48, min °C	230																											
Viscosity, T 316 ^c max 3 Pa·s, test temp. °C	135																											
Dynamic shear, T 315: ^d G* min 5, max 1.00 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	70							76							82													
Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)																												
Mass change ^e max, percent	1.00																											
Dynamic shear, T 315: ^d G* min 5, max 2.20 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	70							76							82													
Pressurized Aging Vessel Residue (R 28)																												
PAV aging temperature, °C ^f	110 (100)																											
Dynamic shear, T 315: ^d G* min 5, max 5000 kPa test temp @ 10 rad/s, °C	34	31	28	25	22	19	16	37	34	31	28	25	22	19	16	13	40	37	34	31	28	25	22	19	16	13	10	
Creep stiffness, T 313: ^g S, max 300 MPa m-value, min 0.300 test temp @ 60 s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-42	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-42	-48	-54	-60		
Direct tension, T 314: ^h Failure strain, min 1.0% test temp @ 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-42	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-42	-48	-54	-60		

^a Pavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the LTPP Bind program, may be provided by the specifying agency, or by following the procedures as outlined in M 323 and R 35.

^b This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.

^c For quality control of unmodified asphalt binder production, measurement of the viscosity of the original asphalt binder may be used to supplement dynamic shear measurements of G* (min) at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid.

^d G* (min) = high temperature stiffness and G* (max) = intermediate temperature stiffness.

^e The mass change shall be less than 1.00 percent for either a positive (mass gain) or a negative (mass loss) change.

^f The PAV aging temperature is based on anticipated climatic conditions and is one of three temperatures, 90°C for climates requiring PG 52-xx and below, 100°C for climates requiring PG 58-xx to PG 70-xx, or 110°C for climates requiring PG 76-xx and above. Normally the PAV aging temperature is specified based on the PG grade. However, when the binder is being used in a different climate due to grade bumping or used for softer binder due to blending, the PAV aging temperature may be specified as 100°C when used in climates requiring PG 58-xx to PG 70-xx, or 110°C when used in climates requiring PG 76-xx and above.

^g If the creep stiffness is below 300 MPa, the direct tension test is not required. If the creep stiffness is between 300 and 600 MPa, the direct tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement. The m-value requirement must be satisfied in both cases.

2.2.3. SUPERPAVE PLUS (SHRP+)

Como se dijo anteriormente, el sistema SUPERPAVE entrega resultados satisfactorios de especificación, los cuales se relacionan directamente con el desempeño que tendrá el pavimento en su vida útil. Sin embargo, este método se basó inicialmente en asfaltos tradicionales. Debido a esto es que las agencias de autopistas norteamericanas han establecido ensayos adicionales, llamados SUPERPAVE PLUS (SHRP+), los cuales están enfocados a ligantes modificados con el fin de asegurar que un determinado modificador (polímeros, cauchos, ácido, etc) sea agregado a la mezcla. Entre los métodos más utilizados están se mencionan a continuación (D'Angelo, "Modified Binders and Superpave Plus Specifications"):

- Recuperación Elástica (ER=Elastic Recovery): AASHTO T301
- Fuerza y Ductilidad (FD=Force Ductility): AASHTO T300
- Dureza y Tenacidad (T&T=Toughness and Tenacity): ASTM D5801
- Angulo de Fase (PA=Phase Angle): AASHTO T315

Al aplicar uno o más de estos ensayos las agencias esperan tener información sobre la modificación aplicada a un ligante, sin embargo, se debe notar que la especificación SHRP+ depende de la agencia estatal, por lo que varía dependiendo de la zona donde se aplique, y más importante, no relacionan los resultados obtenidos de estos ensayos con el desempeño real de la mezcla, por lo que no se puede asegurar que el alcanzar los requisitos establecidos en las especificaciones garantice una resistencia mejorada a los deterioros de ahuellamiento, agrietamiento térmico ni agrietamiento por fatiga (D'Angelo, "New High-Temperature Binder Specification Using Multistress Creep And Recovery", 2010).

Estos ensayos están especificados para Norteamérica por estado, donde cada agencia estatal las indica de acuerdo a sus intereses. Debido a que no existe una norma estandarizada de especificación AASHTO o ASTM, es que estos ensayos varían dependiendo del nivel de implementación de cada estado, donde en algunos casos se indican hasta 8 ensayos SUPERPAVE PLUS, y en otros no es específica ninguno. En la Tabla 8-1 se encuentra un resumen de los ensayos por estado. Como se observa, no existe un consenso sobre los ensayos más efectivos para determinar la presencia de un modificador en el asfalto, y esto sumado a que de hecho estos ensayos no se relacionan con el desempeño, llevan a la conclusión que pueden ser descartados sin mayor análisis.

2.2.4. DEFICIENCIAS DE LA ESPECIFICACIÓN SUPERPAVE

A pesar del gran avance que la especificación SUPERPAVE ha presentado con respecto a su predecesor, la especificación por viscosidad, esta aún presenta deficiencias que pueden mejorarse. Esto se debe principalmente a que el asfalto, al ser un material viscoelástico con propiedades termo dependientes es complicado de caracterizar con parámetros simples. Además, es de interés que estos ensayos tengan una correlación con el desempeño que mostrarán los materiales al en el pavimento ya construido.

2.2.4.1. $G^*/\text{sen}(\delta)$ COMO PARÁMETRO DE ALTA TEMPERATURA

La primera deficiencia que se puede encontrar es el parámetro que se utiliza para la caracterización a alta temperatura, donde se usa el parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$. Este valor se obtiene con la metodología indicada en la norma AASHTO T315, mediante un ensayo que se realiza en base al DSR, a la temperatura máxima que exhibirá el pavimento en función de su ubicación geográfica, y que consiste en medir la respuesta de un espécimen ubicado entre dos platos sometido a un esfuerzo de torque utilizando el Reómetro de Corte Dinámico. Para la realización del ensayo se establece un valor constante de torque o deformación y permite caracterizar rigideces entre 0,1 [kPa] y 10000 [kPa]. El torque se aplica de forma sinusoidal con frecuencias entre 1 y 100 [rad/s], siendo la frecuencia especificada en el método AASHTO M-320 de 10 [rad/s].

2.2.4.2. AUMENTO DE GRADO

Como se explicó anteriormente, la especificación SUPERPAVE consiste en etiquetar un asfalto con el rango de temperaturas donde presentará un desempeño aceptable frente a los deterioros más comunes del pavimento, por ejemplo PG 64-22 corresponde a un pavimento que puede utilizarse en una ubicación geográfica donde la temperatura del pavimento no exceda los 64 °C, ni sea inferior a los -22 °C. Debido a que hasta este momento estas características dependen solo de las condiciones climáticas del proyecto final, se implementó un “aumento de grado” para considerar el nivel de carga al que será sometido el pavimento.

Este aumento de grado consiste en especificar el grado de alta temperatura con un incremento de 6 °C por sobre la temperatura esperada cuando aumenta la exigencia de tránsito. Por ejemplo, un pavimento que exija un PG 64-22 por condiciones climáticas, pero que tenga una

condición de tránsito alto, con más de 30 millones de EE, debe especificarse, y por lo tanto ensayarse, como un PG 70-22, aumentando 6 °C el grado de alta temperatura y manteniendo constante el de baja temperatura y los criterios de ensayo. Si además de esto, la velocidad de tránsito es muy baja, por ejemplo en una zona de peaje, se debe volver a aumentar el grado de alta temperatura, especificando así un PG 76-22.

Este procedimiento se basa en las suposiciones que un aumento de 6 °C en el grado de alta temperatura al mantener constante los criterios de ensayo prácticamente duplica la rigidez del asfalto, y de que la sensibilidad de todos los asfaltos es similar. Se ha demostrado que estas suposiciones son poco acertadas, y por ende el aumento de grado no representará las propiedades reales a la temperatura esperada del pavimento (D'Angelo, 2010).

2.2.4.3. APLICACIÓN A ASFALTOS MODIFICADOS

Al igual que el resto de los ensayos SUPERPAVE, este método fue validado para asfaltos tradicionales (D'Angelo, 2010). Esto se hizo con mediciones en el rango visco elástico, lo que significa que para asfaltos tradicionales se trabaja en un rango lineal que no depende del nivel de esfuerzo aplicado. Por otro lado, para los asfaltos modificados la respuesta no es lineal y si depende del nivel de esfuerzo aplicado debido a que las redes poliméricas pueden reordenarse sustancialmente, o hasta romperse a esfuerzos mayores, lo que afectará las propiedades reológicas del asfalto modificado (D'Angelo, 2010).

2.3. ENSAYO MULTI STRESS CREEP AND RECOVERY

El ensayo MSCR (Multi Stress Creep and Recovery=Recuperación Elástica a Varios Esfuerzos) es un ensayo basado en el uso del DSR, desarrollado por la FHA, para reemplazar el método de especificación del grado de alta temperatura existente en la AASHTO M320. Este método fue desarrollado con el fin de solucionar los principales problemas de la especificación SUPERPAVE actual y como alternativa a los ensayos SHRP+, por lo que a diferencia de sus predecesores está relacionado al desempeño, es aplicable y está verificado para asfaltos modificados y elimina el aumento de grado para considerar la carga de tránsito del pavimento. En resumen, este es un

ensayo que caracteriza las propiedades fundamentales de un asfalto, relacionándolo con el desempeño, de forma fácil y rápida (D'Angelo, 2010).

2.3.1. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

El ensayo se encuentra normado por las normas AASHTO T350 (Anexo 8.2) y ASTM D7405. Este utiliza el DSR (Reómetro de Corte Dinámico) para determinar las propiedades a alta temperatura de los asfaltos. El ensayo MSCR utiliza ciclos de 1 segundo de carga y 9 segundos de relajación para determinar la capacidad de recuperación elástica a distintos niveles de carga, 0.025, 0.050, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8 y 25.6 kPa, usando 10 ciclos para cada nivel de carga. El ensayo se inicia al nivel de carga más bajo, pasando al siguiente nivel de carga cada 10 ciclos, sin dejar intermedios entre niveles. Luego se divide el promedio de la deformación no recuperada para los 10 ciclos de cada nivel de carga por el esfuerzo aplicado, obteniendo así la “Flexibilidad en Fluencia no Recuperada” (Non-recovered Creep Compliance), o J_{nr} .

A continuación se muestra un gráfico Deformación vs Tiempo para los 10 ciclos de un mismo nivel de esfuerzo a modo de ejemplo.

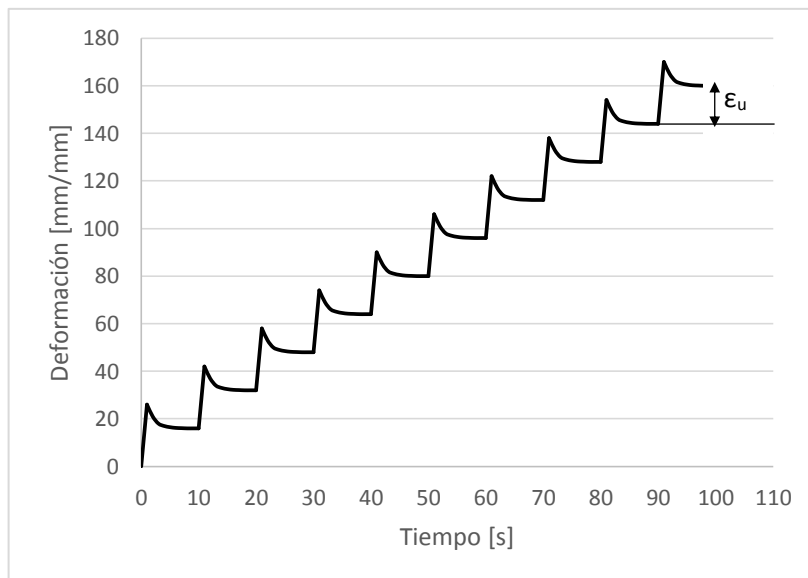


Figura 2-8: Gráfico Deformación vs Tiempo para 10 ciclos de carga-recuperación elástica.

ε_u = Deformación no recuperada en cada ciclo [mm/mm].

σ = Esfuerzo aplicado durante los ciclos carga-descarga [kPa].

$$J_{nr} = \frac{\overline{\varepsilon_u}}{\sigma} [kPa^{-1}]$$

El detalle de la metodología de aplicación del ensayo se puede encontrar en el anexo.

2.3.2. ESPECIFICACIÓN EN BASE AL ENSAYO MSCR

Para el desarrollo de la especificación en base al MSCR fue necesario especificar por un lado los parámetros del ensayo, tales como esfuerzo, número de ciclos, etc, y también los límites de los resultados obtenidos. De esto es que se desarrolla la AASHTO M332, la cual indica los métodos para llevar a cabo la especificación por desempeño de asfaltos tanto tradicionales como modificados. Una de las características de este método es que deja sin alteraciones las especificaciones a baja temperatura, cambiando solo el método de especificación del grado de alta temperatura.

2.3.2.1. NUEVO PARAMETRO DE ALTA TEMPERATURA

El principal cambio que presenta este nuevo método de especificación es que elimina $G^*/\text{sen}(\delta)$ como parámetro de las propiedades del asfalto a alta temperatura, para reemplazarlo con J_{nr} . Como se vio anteriormente, el ensayo MSCR se puede desarrollar a niveles de esfuerzo que están entre los 0.025 y los 25.6 kPa, por lo que antes de determinar cualquier parámetro se debió determinar a qué esfuerzo se debe realizar el ensayo en especificación basada en este. Para esto se analizaron dos asfaltos comúnmente utilizados en Estados Unidos y se ensayaron a distintos niveles de esfuerzo, y a una temperatura igual al grado de alta temperatura, con el fin de ver cómo se comporta la flexibilidad en fluencia en estos casos (D'Angelo, 2010):

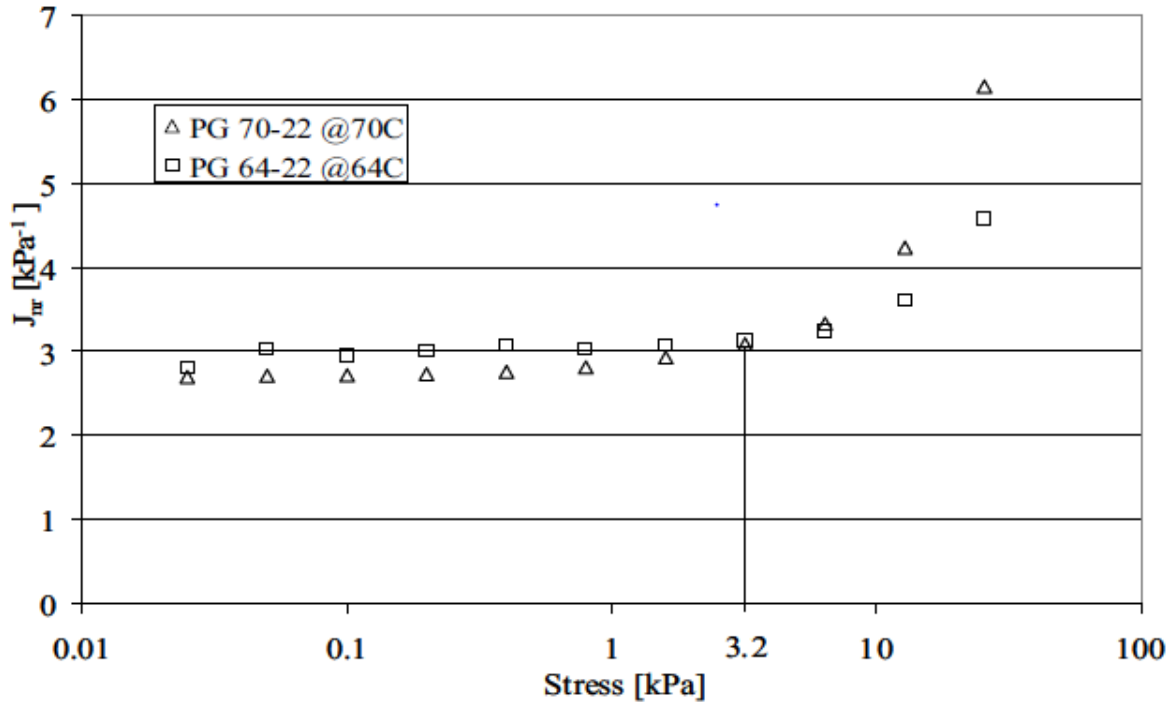


Figura 2-9: Gráfico J_{nr} vs Esfuerzo para dos asfaltos.

En la Figura 2-9: Gráfico J_{nr} vs Esfuerzo para dos asfaltos. se observa que la flexibilidad en fluencia presenta un comportamiento lineal hasta un esfuerzo de 3.2 kPa, mientras que a partir de este punto el valor de J_{nr} comienza a ser mucho más dependiente del nivel de esfuerzo, por lo que se considera que J_{nr} a 3.2 kPa (J_{nr3.2}) puede ser un buen indicador del ahuellamiento.

Este nuevo indicador presenta una mejora considerable en la correlación con el ahuellamiento para cualquier tipo de asfalto, llegando a un R²=0.7453 (Development of A Performance Based Binder Specification in The United States). Además, para el desarrollo de este estudio se utilizaron tanto asfaltos tradicionales como modificados, lo que permite aplicarlo para ambos casos, independiente del tipo de modificación.

Una vez verificado el beneficio de usar J_{nr3.2} como parámetro de las propiedades del asfalto a alta temperatura se debió indicar el valor límite para la especificación. Esto se hizo ensayando una serie de asfaltos, tradicionales y modificados, con el fin de obtener el valor de J_{nr3.2} que garantice un buen desempeño frente al ahuellamiento. Esto sobre la base que la especificación SUPERPAVE está validada para asfaltos ensayados a su grado de alta temperatura, por lo que el valor de J_{nr3.2}

obtenido a esta temperatura, es comparable con la especificación actual y debiese, por lo tanto, ser el valor que permite evitar la aparición de ahuellamiento.

Tabla 2-3: $J_{nr,3.2}$ para varios ligantes ensayados a su grado de alta temperatura.

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

De la Tabla 2-3: $J_{nr,3.2}$ para varios ligantes ensayados a su grado de alta temperatura. se observa que $J_{nr,3.2}$ a la temperatura donde los asfaltos presentan un $G^*/\text{sen}(\delta)$ de 2.2 kPa es, en promedio, 4.2 kPa⁻¹ con un coeficiente de variación de 12%. Este análisis indica que especificar un $J_{nr,3.2}=4.0$ kPa⁻¹ garantizará asfaltos con una rigidez equivalente a la actual especificación SHRP. Dicho esto, para el caso de asfaltos tradicionales la especificación se mantiene igual, solo cambiaría el método de especificación. En el caso de ligantes modificados esto cambia, ya que han demostrado ser más sensibles al esfuerzo (D'Angelo, 2010).

2.3.2.2. ELIMINACIÓN DEL AUMENTO DE GRADO

Como se dijo anteriormente el concepto de aumento de grado para considerar las cargas de tránsito es una deficiencia que puede llevar a errores que no permiten una buena caracterización

de las propiedades del material, por lo que uno de los objetivos de una nueva especificación es obtener un parámetro que elimine el aumento de grado.

En primer lugar se tiene claro que las cargas de tránsito no afectan la temperatura, por lo que una nueva especificación debiese mantener la temperatura de ensayo como el grado de alta temperatura, pero cambiar el criterio. En este sentido se espera que al especificar un $J_{nr3.2}$ más bajo entregue asfaltos más resistentes al ahuellamiento, ya que esto significaría una disminución de la deformación no recuperable.

Anteriormente, se estableció un $J_{nr3.2}=4.0 \text{ kPa}^{-1}$ como equivalente a un $G^*/\text{sen}(\delta)=2.2 \text{ kPa}$, por lo que este valor se especificaría para condiciones normales de tráfico, menores a 30 millones de EE. Para esto se analizaron los efectos de disminuir el J_{nr} en el ahuellamiento mediante 3 estudios, I-55 en Mississippi, FHWA ALF polymer study, y el MnRoad Hamburg mix study. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 2-4: Distintas mediciones del cambio del ahuellamiento al reducir $J_{nr3.2}$.

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

Se observa de estos resultados que una reducción del 50% del $J_{nr3.2}$ de entre un 30 y un 50% del ahuellamiento. De estos estudios el más importante es el ALF Polymer Study, ya que este corresponde a una pista de prueba, la cual fue cargada mediante una rueda, con una carga de 80 kN y a una velocidad de 19 km/h a 64 °. Esta es una condición de carga bastante extrema, que supera con creces cualquier situación que un pavimento real pueda experimentar en la vida real, por lo que se puede decir que una reducción del 50% de $J_{nr3.2}$ reducirá en un 50% el ahuellamiento (D'Angelo, "New High-Temperature Binder Specification Using Multistress Creep And Recovery", 2010).

De esta forma, al reducir el valor de $J_{nr3.2}$ a la mitad se puede duplicar la resistencia al ahuellamiento y ensayar los asfaltos al grado de alta temperatura, a diferencia de la especificación

SUPERPAVE donde los asfaltos se podía ensayar hasta 18 °C por sobre la temperatura que realmente afectará el pavimento. Para especificar estos cambios del nivel de carga se incluyen en esta especificación niveles de carga: S (Standard=Estandar), H (Heavy=Pesado), V (Very Heavy=Muy Pesado) y E (Extreme=Extremo), los cuales reemplazarán el aumento de grado, según se indica a continuación.

Tabla 2-5: Condiciones para los niveles de carga en la especificación en base al ensayo MSCR.

Nivel de Carga	Sigla	Condición de tránsito
Standard	S	EE < 10 millones V > 70 km/h
Heavy	H	10 millones < EE < 30 millones 20 km/h < V < 70 km/h
Very Heavy	V	EE > 30 millones V < 20 km/h
Extreme	E	EE > 30 millones V < 20 km/h Plazas de peaje Instalaciones industriales y portuarias

Con esto se puede establecer una equivalencia entre ambas especificaciones el con el fin de entenderlas más fácilmente.

Tabla 2-6: Equivalencia de la especificación SUPERPAVE actual (AASHTO M320) con la especificación en base al MSCR (AASHTO M332).

Nivel de carga	AASHTO M 320		AASHTO M 332	
	Especificación	Temperatura de ensayo [°C]	Especificación	Temperatura de ensayo [°C]
S	PG 64 -22	64	PG 64S -22	64
H	PG 70 -22	70	PG 64H -22	64
V	PG 76 -22	76	PG 64V -22	64
E	PG 82 -22	82	PG 64E -22	64

2.3.2.3. APLICACIÓN A ASFALTOS MODIFICADOS

Otro de los desafíos de la nueva especificación corresponde a su aplicación a los asfaltos modificados. Esto es por un lado determinar un método que, a diferencia de los ensayos SHRP+, pueda relacionar el efecto de la modificación con el desempeño frente al ahuellamiento, y que por otro lado considere la sensibilidad que puede tener un asfalto modificado frente al nivel de esfuerzo aplicado. Además se debe reconocer que aumentar la resistencia al ahuellamiento no es la única motivación para modificar un asfalto, por lo que si bien el ensayo MSCR es efectivo para determinar la capacidad de recuperación elástica de un asfalto, se debe buscar una forma para que este indique la calidad de la dispersión del polímero en el ligante.

En primer lugar, para especificar la sensibilidad del asfalto al nivel de esfuerzo aplicado se introduce un nuevo parámetro: $J_{nr_{diff}}$. Este nuevo parámetro, medido en %, es simplemente la diferencia porcentual entre el $J_{nr_{3.2}}$ y $J_{nr_{0.1}}$ según la siguiente ecuación:

$$J_{nr_{diff}} = \frac{(J_{nr_{3.2}} - J_{nr_{0.1}}) \times 100}{J_{nr_{0.1}}}$$

Este parámetro sirve para limitar la tendencia ascendente de J_{nr} al aumentar el esfuerzo aplicado (ver Figura 2-2), sirviendo como factor de seguridad frente al ahuellamiento e indicador de la calidad de la red formada por el polímero. Este valor se especifica como un valor máximo.

Por último, el parámetro final que forma parte de esta especificación corresponde al porcentaje de recuperación a 3.2 kPa. Este parámetro viene a reemplazar el ensayo de recuperación elástica para asfaltos modificados. Dependiendo la agencia puede cambiar su especificación, pero en la especificación AASHTO M332 se incluye una curva que está basada en asfaltos utilizados en norte américa que se considera tienen una recuperación elástica satisfactoria (AASHTO, "Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)", 2015).

2.3.3. ESPECIFICACIONES ESTATALES NORTEAMERICANAS

Para determinar los límites aplicables a la especificación MSCR se hizo una base de datos de las especificaciones norteamericanas en base al ensayo MSCR y comparar las que tengan exigencias climáticas similares a Chile. En primer lugar, se revisó la implementación por estado del ensayo a partir de la información entregada por el Instituto Norteamericano del Asfalto (Asphalt Institute).

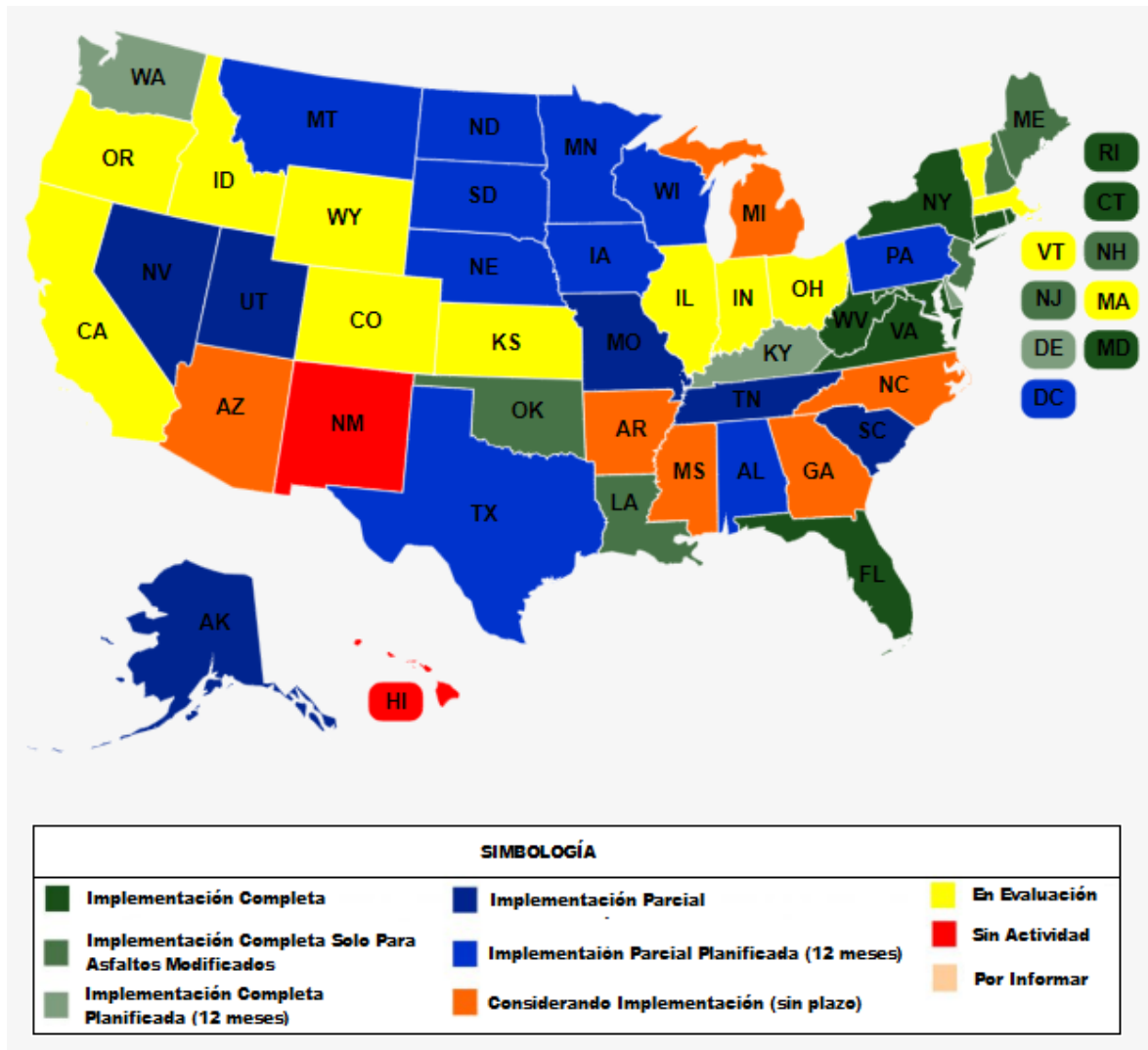


Figura 2-10: Nivel de implementación del ensayo MSCR por estado.

Luego se revisaron los estados con mayor grado de implementación con el fin de encontrar estados con condiciones climáticas que abarquen un rango de grados de desempeño similar a los

encontrados en Chile, donde de acuerdo a estudios anteriores se puede cubrir las necesidades de diseño de pavimentos con asfaltos PG 58-28, PG 64-22, PG 52-34 y PG 52-34 (Segovia, 2015).

Tabla 2-7: Grados PG especificados por agencia estatal.

Estado	Grado AASHTO M320	GRADO AASHTO M332
Connecticut	58-28	58S-28
	64-22	64S-22
	76-22	64E-22
Washington DC	64-22	64S-22
	70-22	64H-22
	76-22	64E-22
Delaware	58-28	64S-22
	64-22	64H-22
	70-22	64V-22
	76-22	64E-22
Maryland	58-28	58S-28
	64-22	64S-22
	70-22	64H-22
	76-22	64E-22
Missouri	64-22	64S-22
	70-22	64H-22
	76-22	64V-22
Nueva Jersey	64-22	64S-22
	76-22	64E-22
Nueva York	64-22	64S-22
	70-22	64H-22
	64-22P(*)	64V-22
	76-22	64E-22
Oklahoma	64-22	64V-22
Pennsylvania	58-28	58S-28
	64-22	64S-22
	76-22	64E-22
Carolina del Sur	76-22	64V-22
Virginia	64-22	64S-22
	70-22	64H-22
	76-22	64E-22

*Requiere modificación con polímero.

En general de la tabla se observa que algunas agencias (Connecticut y Washington entre otras) no consideran el nivel de carga Very Heavy, pasando desde un PG 64S-22=PG 64-22 a un PG 64E-22=PG 76-22, donde se hubiese esperado un PG 64V-22=PG 76-22.

También se observa que las agencias que usan PG 58-28 no consideran otros niveles de carga más allá de S, sin embargo se recomienda considerarlo ya que el nivel de carga es independiente de las condiciones climáticas de la zona del pavimento. No existe razón para considerar varios niveles de carga para un PG 64-22 y no para un PG 58-28.

Para todas las especificaciones estatales se encontraron valores límite similares. Los asfaltos base requieren un $J_{nr_{3.2}}$ menor a 4.5 kPa^{-1} , para un nivel de carga S. Luego se especificaban $J_{nr_{3.2}}$ valores menores a 2, 1 y 0.5 kPa^{-1} para los niveles de carga H, V y E, respectivamente.

Para el parámetro $J_{nr_{diff}}$ hubo más diferencias. Por un lado hay estados, como Delaware, que solo especificó este parámetro para el nivel de carga E, otros como Washington DC, Connecticut o Virginia lo especificaban para todos los niveles de carga. En todos los casos, de todas formas, estaba especificado un máximo de $J_{nr_{diff}}$ 75%.

Por último el parámetro $\%Rec_{3.2}$ se especifica para todos los estados solo para el caso de carga E, siendo Nueva York y Carolina de Sur los únicos casos donde se indica además para el nivel V. Nueva York es además el único estado donde el valor mínimo de este valor no depende de $J_{nr_{3.2}}$. Para el resto de los casos se especifica $\%Rec_{3.2} > 29.371 \cdot J_{nr_{3.2}}^{-0.263}$.

2.3.3.1. AASHTO M332

A continuación se revisa la especificación AASHTO M33, la cual establece el método de especificación por desempeño de un asfalto, en base al ensayo MSCR. Esta especificación, al igual que la especificación SUPERPAVE (AASHTO M320), y las especificaciones estatales, indica la temperatura a la que se tienen que cumplir determinadas propiedades reológicas del asfalto. Esta no presenta grandes diferencias con respecto a las especificaciones estatales.

En resumen, e independiente de la temperatura, los límites establecidos son los que se indican a continuación:

Tabla 2-8: Resumen de valores límite por nivel de desempeño en AASHTO M332.

Nivel de Carga	$J_{nr_{3.2}} [kPa^{-1}]$	$J_{nr_{diff}} [\%]$	$\%Rec_{3.2} [\%]^*$
S	4.5	75	$\%Rec_{3.2} \geq 29.371 \cdot J_{nr_{3.2}}^{-0.2633}$
H	2	75	
V	1	75	
E	0.5	75	

*En esta norma, la especificación del $\%Rec_{3.2}$ no depende del nivel de carga, sino de la presencia de polímero en el asfalto.

Debido a la similitud entre los valores límite de la especificación AASHTO y las especificaciones estatales, se puede decir que estos valores pueden garantizar un asfalto con un buen desempeño frente al ahuellamiento.

2.3.3.1.1. TEMPERATURA INTERMEDIA

Si bien los cambios aplicados a la normativa SUPERPAVE fueron aplicados a la especificación del grado de alta temperatura, esto de forma indirecta considera un cambio a la especificación de temperatura intermedia, la cual tiene como indicador el parámetro $G^* \text{sen}(\delta)$. Este parámetro se obtiene de forma similar a $G^*/\text{sen}(\delta)$, usando el mismo instrumento, el reómetro de corte dinámico, y regidos por la misma especificación, AASHTO T315. A continuación se muestra un extracto de las especificaciones donde se observa la diferencia entre ambas.

El cambio es que en el caso de la especificación actual es específica $G^* \text{sen}(\delta)$ máximo de 5000 kPa, por otro lado, en la especificación MSCR mantiene este valor solo para el nivel de carga S, mientras que para H, V y E (que se pueden considerar asfaltos modificados) aumenta este valor a 6000 kPa. Esto se hace ya que al aplicar el método AASHTO M332 no se cambia el grado de alta temperatura por nivel de carga, por lo que la forma de medir la susceptibilidad térmica cambia, y por ende este valor varía dependiendo de la categoría de la carga de tráfico.

Tabla 2-9: Especificación por desempeño en base al ensayo MSCR.

Table 1—Performance-Graded Asphalt Binder Specification^a

Performance Grade	PG 46			PG 52						PG 58					
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40
Average 7-day max pavement design temp, °C ^b	<46			<52						<58					
Min pavement design temp, °C ^b	>=34	>=40	>=46	>=10	>=16	>=22	>=28	>=34	>=40	>=46	>=16	>=22	>=28	>=34	>=40
Original Binder															
Flash point temp, T 48, min °C	230														
Viscosity, T 316: ^c max 3 Pa·s, test temp, °C	135														
Dynamic shear, T 315: ^d G*/sinδ, min 1.00 kPa ^e test temp @ 10 rad/s, °C	46			52						58					
Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)															
Mass change, max, percent ^f	1.00														
MSCR, T 350: Standard Traffic "S" J _{nr3.2} , max 4.5 kPa ⁻¹ J _{nr4.75} , max 75% test temp, °C	46			52						58					
MSCR, T 350: Heavy Traffic "H" J _{nr3.2} , max 2.0 kPa ⁻¹ J _{nr4.75} , max 75% test temp, °C	46			52						58					
MSCR, T 350: Very Heavy Traffic "V" J _{nr3.2} , max 1.0 kPa ⁻¹ J _{nr4.75} , max 75% test temp, °C	46			52						58					
MSCR, T 350: Extremely Heavy Traffic "E" J _{nr3.2} , max 0.5 kPa ⁻¹ J _{nr4.75} , max 75% test temp, °C	46			52						58					
Pressurized Aging Vessel Residue (R 28)															
PAV aging temp, °C ^g	90			90						100					
Dynamic shear, T 315: "S" G* sinδ, max 5000 kPa ^e test temp @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13
Dynamic shear, T 315: "H," "V," "E" G* sinδ, max 6000 kPa ^e test temp @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13
Creep stiffness, T 313: ^h S, max 300 MPa m-value, min 0.300 test temp @ 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30
Direct tension, T 314: ^h Failure strain, min 1.0% test temp @ 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30

^a MSCR testing on RTFO residue should be performed at the PG grade based on the environmental high pavement temperature. Grade bumping is accomplished by requiring a lower J_{nr} value while testing at the environmental temperature.

^b Pavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the LTPP Bind program, may be provided by the specifying agency, or by following the procedures as outlined in M 323 and R 35, excluding the provisions for "grade bumping."

^c This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.

^d For quality control of unmodified asphalt binder production, measurement of the viscosity of the original asphalt binder may be used to supplement dynamic shear measurements of G*/sinδ at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid.

^e G*/sinδ = high temperature stiffness and G* sinδ = intermediate temperature stiffness.

^f The mass change shall be less than 1.00 percent for either a positive (mass gain) or a negative (mass loss) change.

^g The PAV aging temperature is based on simulated climatic conditions and is one of three temperatures, 90°C, 100°C, or 110°C. Normally the PAV aging temperature is 100°C for PG 58-xx and above. However, in desert climates, the PAV aging temperature for PG 70-xx and above may be specified as 110°C.

^h If the creep stiffness is below 300 MPa, the direct tension test is not required. If the creep stiffness is between 300 and 600 MPa, the direct tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement. The m-value requirement must be satisfied in both cases.

Continued on next page.

Tabla 2-10: Especificación por desempeño en base al ensayo MSCR (continuación).

Table 1—Performance-Graded Asphalt Binder Specification^a (continued)

Performance Grade	PG 64						PG 70					
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Average 7-day max pavement design temp, °C ^b	<64						<70					
Min pavement design temp, °C ^b	>=10	>=16	>=22	>=28	>=34	>=40	>=10	>=16	>=22	>=28	>=34	>=40
Original Binder												
Flash point temp, T 48, min °C	230											
Viscosity, T 316: ^c max 3 Pa·s, test temp, °C	135											
Dynamic shear, T 315: ^d G*/sinδ, min 1.00 kPa ^e test temp @ 10 rad/s, °C	64						70					
Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)												
Mass change, max, percent ^f	1.00											
MSCR, T 350: Standard Traffic "S" J _{sr,3} , max 4.5 kPa ⁻¹ J _{sr,diff} , max 75% test temp, °C	64						70					
MSCR, T 350: Heavy Traffic "H" J _{sr,3} , max 2.0 kPa ⁻¹ J _{sr,diff} , max 75% test temp, °C	64						70					
MSCR, T 350: Very Heavy Traffic "V" J _{sr,3} , max 1.0 kPa ⁻¹ J _{sr,diff} , max 75% test temp, °C	64						70					
MSCR, T 350: Extremely Heavy Traffic "E" J _{sr,3} , max 0.5 kPa ⁻¹ J _{sr,diff} , max 75% test temp, °C	64						70					
Pressurized Aging Vessel Residue (R 28)												
PAV aging temp, °C ^g	100						100 (110)					
Dynamic shear, T 315: "S" G* sinδ, max 5000 kPa ^e test temp @ 10 rad/s, °C	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19
Dynamic shear, T 315: "H," "V," "E" G* sinδ, max 6000 kPa ^e test temp @ 10 rad/s, °C	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19
Creep stiffness, T 313: ^h S, max 300 MPa m-value, min 0.300 test temp @ 60 s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Direct tension, T 314: ^h Failure strain, min 1.0% test temp @ 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

- ^a MSCR test on RTFO residue should be performed at the PG grade based on the environmental high pavement temperature. Grade bumping is accomplished by requiring a lower J_{sr} value while testing at the environmental temperature.
- ^b Pavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the LTPP Bind program, may be provided by the specifying agency, or by following the procedures as outlined in M 323 and R 35, excluding the provisions for "grade bumping."
- ^c This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.
- ^d For quality control of unmodified asphalt binder production, measurement of the viscosity of the original asphalt binder may be used to supplement dynamic shear measurements of G*/sinδ at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid.
- ^e G*/sinδ = high temperature stiffness and G* sinδ = intermediate temperature stiffness.
- ^f The mass change shall be less than 1.00 percent for either a positive (mass gain) or a negative (mass loss) change.
- ^g The PAV aging temperature is based on simulated climatic conditions and is one of three temperatures, 90°C, 100°C, or 110°C. Normally the PAV aging temperature is 100°C for PG 58-xx and above. However, in desert climates, the PAV aging temperature for PG 70-xx and above may be specified as 110°C.
- ^h If the creep stiffness is below 300 MPa, the direct tension test is not required. If the creep stiffness is between 300 and 600 MPa, the direct tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement. The m-value requirement must be satisfied in both cases.

Continued on next page.

Tabla 2-11: Especificación por desempeño en base al ensayo MSCR (continuación).

Table 1—Performance-Graded Asphalt Binder Specification^a (continued)

Performance Grade	PG 76					PG 82				
	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Average 7-day max pavement design temp, °C ^b	<76					<82				
Min pavement design temp, °C ^c	>=10	>=16	>=22	>=28	>=34	>=10	>=16	>=22	>=28	>=34
Original Binder										
Flash point temp, T 48, min °C	230									
Viscosity, T 316: ^d max 3 Pa·s, test temp, °C	135									
Dynamic shear, T 315: ^e G*/sin δ, min 1.00 kPa ^f test temp @ 10 rad/s, °C	76					82				
Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)										
Mass change, max, percent/ ^g	1.00									
MSCR, T 350: Standard Traffic "S" J _{nr3.2} , max 4.5 kPa ⁻¹ J _{ordiff} , max 75% test temp, °C	76					82				
MSCR, T 350: Heavy Traffic "H" J _{nr3.2} , max 2.0 kPa ⁻¹ J _{ordiff} , max 75% test temp, °C	76					82				
MSCR, T 350: Very Heavy Traffic "V" J _{nr3.2} , max 1.0 kPa ⁻¹ J _{ordiff} , max 75% test temp, °C	76					82				
MSCR, T 350: Extremely Heavy Traffic "E" J _{nr3.2} , max 0.5 kPa ⁻¹ J _{ordiff} , max 75% test temp, °C	76					82				
Pressurized Aging Vessel Residue (R 28)										
PAV aging temp, °C ^h	100 (110)					100 (110)				
Dynamic shear, T 315: "S" G* sin δ, max 5000 kPa ^f test temp @ 10 rad/s, °C	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Dynamic shear, T 315: "H," "V," "E" G* sin δ, max 6000 kPa ^f test temp @ 10 rad/s, °C	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Creep stiffness, T 313: ^h S, max 300 MPa m-value, min 0.300 test temp @ 60 s, °C	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Direct tension, T 314: ^h Failure strain, min 1.0% test temp @ 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

^a MSCR test on RTFO residue should be performed at the PG grade based on the environmental high pavement temperature. Grade bumping is accomplished by requiring a lower J_{nr} value while testing at the environmental temperature.

^b Pavement temperatures are estimated from air temperatures using an algorithm contained in the LTPP Bind program, may be provided by the specifying agency, or by following the procedures as outlined in M 323 and R 35, excluding the provisions for "grade bumping."

^c This requirement may be waived at the discretion of the specifying agency if the supplier warrants that the asphalt binder can be adequately pumped and mixed at temperatures that meet all applicable safety standards.

^d For quality control of unmodified asphalt binder production, measurement of the viscosity of the original asphalt binder may be used to supplement dynamic shear measurements of G*/sin δ at test temperatures where the asphalt is a Newtonian fluid.

^e G*/sin δ = high temperature stiffness and G* sin δ = intermediate temperature stiffness.

^f The mass change shall be less than 1.00 percent for either a positive (mass gain) or a negative (mass loss) change.

^g The PAV aging temperature is based on simulated climatic conditions and is one of three temperatures, 90°C, 100°C, or 110°C. Normally the PAV aging temperature is 100°C for PG 58-xx and above. However, in desert climates, the PAV aging temperature for PG 70-xx and above may be specified as 110°C.

^h If the creep stiffness is below 300 MPa, the direct tension test is not required. If the creep stiffness is between 300 and 600 MPa, the direct tension failure strain requirement can be used in lieu of the creep stiffness requirement. The m-value requirement must be satisfied in both cases.

2.4. TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

El test de Kolmogorov-Smirnov corresponde a un test de hipótesis, utilizado para juzgar si una propiedad que se supone a una población estadística es compatible con el observado en una muestra de dicha población, que determina la bondad de ajuste de una distribución de probabilidad.

Este test cuantifica la distancia entre los valores empíricos de la función de distribución, y los valores acumulados de la muestra de referencia. En otras palabras, se compara la distribución normalizada de un conjunto de datos y se compara con una distribución estandarizada para ver si los datos se ajustan a una distribución probabilística determinada.

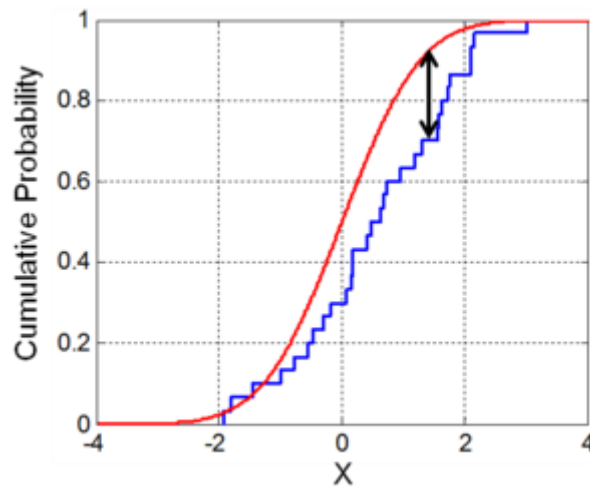


Ilustración 2-1: Contraste de distribución de probabilidades estándar con distribución real de un grupo de datos.

El método para su aplicación se explica a continuación.

- Hipótesis a contrastar:
 H_0 : Los datos analizados siguen una distribución M.
 H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución M.

- Estadístico de contraste:

$$D = \sup_{1 \leq i \leq n} |\hat{F}_n(x_i) - F_0(x_i)|$$

Donde:

- x_i es el i -ésimo valor observado en la muestra (cuyos valores se han ordenado previamente de mayor a menor).
- $\hat{F}_n(x_i)$ es un estimador de la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_i .
- $F_o(x_i)$ es la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_i cuando H_0 es cierta.

Así pues, D es la mayor diferencia absoluta observada entre la frecuencia acumulada observada $\hat{F}_n(x_i)$ y la frecuencia acumulada teórica $F_o(x_i)$, obtenida a partir de la distribución de probabilidad que se especifica como hipótesis nula.

Si los valores observados $\hat{F}_n(x_i)$ son similares a los esperados $F_o(x_i)$, el valor D será pequeño. Cuanto mayor sea la discrepancia entre la distribución empírica $\hat{F}_n(x_i)$ y la distribución teórica, mayor será el valor de D .

Por tanto, el criterio para la toma de la decisión entre las dos hipótesis será de la forma:

$$\text{Si } D \leq D_\alpha \rightarrow \text{Aceptar } H_0$$

$$\text{Si } D > D_\alpha \rightarrow \text{Rechazar } H_0$$

Donde el valor D_α se elige de tal manera que:

$$P(\text{Rechazar } H_0/H_0 \text{ es cierta}) = P(D > D_\alpha/\text{Los datos siguen la distribución } M) = \alpha$$

Siendo α el nivel de significación del contraste, o sea, la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera.

Los valores comunes de significación son 0.05, 0.01 y 0.001. Diferentes niveles de α tienen distintas ventajas y desventajas. Cuanto menor sea el nivel de significación, más fuerte será la evidencia de que un hecho no se debe a una mera coincidencia, pero a su vez hacen correr mayores riesgos de equivocarse al rechazar una hipótesis nula verdadera.

El valor de D_α depende del tipo de distribución a probar y del número de datos y se encuentra tabulado. En general es de la forma:

$$D_\alpha = \frac{c_\alpha}{k(n)}$$

Donde c_α y $k(n)$ se encuentran en las tablas a continuación:

Tabla 2-12: Tablas de c_α según nivel de significancia y modelo.

c_α	α		
	0.1	0.05	0.01
Modelo			
General	1.224	1.358	1.628
Normal	0.819	0.895	1.035
Exponencial	0.990	1.094	1.308
Weibull n=10	0.760	0.819	0.944
Weibull n=20	0.779	0.843	0.973
Weibull n=50	0.790	0.856	0.988
Weibull n=∞	0.803	0.874	1.007

Tabla 2-13: Tabla de $k(n)$ según modelo.

Modelo que se contrasta	$k(n)$
General. Parámetros conocidos.	$k(n) = \sqrt{n} + 0.12 + \frac{0.11}{\sqrt{n}}$
Normal	$k(n) = \sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}}$
Exponencial	$k(n) = \sqrt{n} + 0.12 + \frac{0.11}{\sqrt{n}}$
Weibull	$k(n) = \sqrt{n}$

2.5. CONFIABILIDAD

La confiabilidad corresponde al porcentaje de probabilidad de que un elemento aleatorio de una muestra de datos no exceda cierto valor determinado. En otras palabras, es la probabilidad que X (variable aleatoria) sea menor que un valor de referencia.

Por ejemplo, en una distribución normal, el promedio tiene una confiabilidad del 50%, ya que existe un 50% de probabilidades que un valor X sea menor que este. Un valor con 95% de confiabilidad en cambio, significa que existe un 95% de probabilidades que el valor no sea excedido por un elemento elegido aleatoriamente. Un dato extremo mínimo tendría un 0% de confiabilidad, ya que no existe probabilidad de tener datos menores a esta, mientras que un máximo tendría una confiabilidad del 100%, con todos los datos de la muestra menores a este.

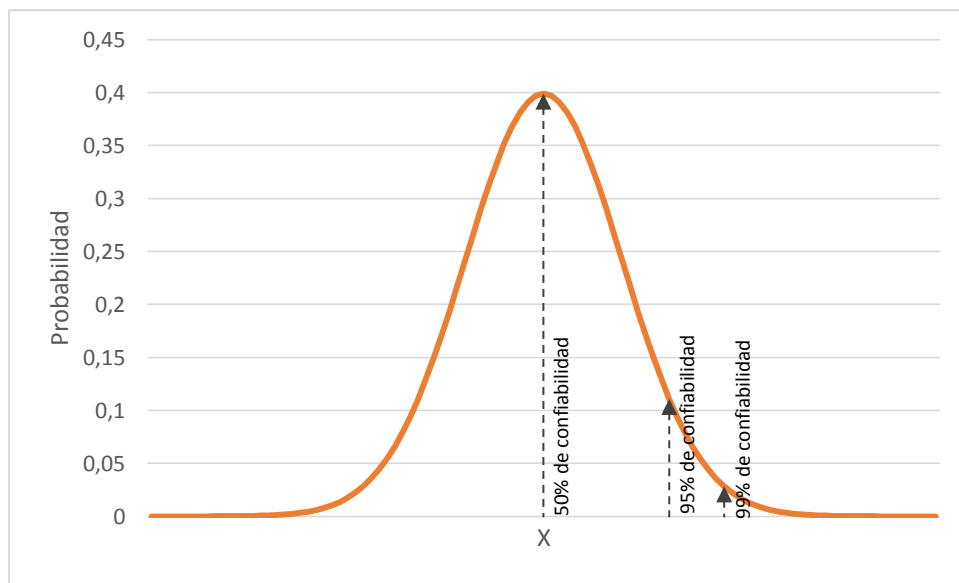


Figura 2-11: Distribución normal con niveles de confiabilidad.

3. FASE EXPERIMENTAL

A continuación se indica la descripción de la etapa experimental del estudio. Con esta se busca determinar la cantidad de ensayos a realizar y definir los análisis a realizar a los resultados de estos. Además se indican los materiales e instrumentos a utilizar.

3.1. MATERIALES

3.1.1. LIGANTE ASFÁLTICO

El asfalto a utilizar corresponde a un CA-24, el cual fue provisto por la empresa OIL MALAL planta San Antonio. La especificación por viscosidad fue realizada por la empresa y no se tiene un informe al respecto. Sin embargo, como parte del estudio se realizó una caracterización PG en el Laboratorio de Ensayos y Control de Obras (LEMCO) de la Universidad Técnica Federico Santa María.

3.1.2. ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO

El polímero a utilizar para el estudio será el SBS (Estireno-Butadieno-Estireno). Este polímero muestra una compatibilidad bastante aceptable con los asfaltos. La empresa, misma que entregó el ligante asfáltico, cedió una cantidad de 1 kg para la realización del estudio, la cual gracias a las bajas concentraciones necesarias para obtener efectos sobre la mezcla fue más que suficiente.



Figura 3-1: Polímero SBS entregado por OIL MALAL.

3.2. METODOLOGÍA

La fase experimental se divide en cuatro etapas principales, Etapa Preliminar, Etapa de Mezclado, Obtención de $J_{nr_{3.2}}$ y Análisis de Resultados, y por último la etapa de Ensayos Finales Conclusiones. Los objetivos y pasos de cada etapa se describen a continuación:

3.2.1. ETAPA PRELIMINAR

Esta fase tiene por objetivo establecer los criterios de trabajo y determinar las propiedades reológicas del asfalto base, con el fin de determinar la temperatura a la cual se ensayarán los asfaltos. Para esto se aplicarán las metodologías AASHTO M320 y AASHTO T350, para obtener el grado PG y $J_{nr_{3.2}}$, respectivamente.

3.2.1.1. CARACTERIZACIÓN ASFALTO BASE

Se realizará, en primer lugar, una caracterización SUPERPAVE tradicional según la metodología AASHTO M320. Esto por un lado permitirá definir las propiedades reológicas del ligante sin modificar para compararlas con el asfalto modificado y por otro lado para determinar la temperatura a la que se realizará el ensayo MSCR, ya que este ensayo se realiza a la misma temperatura del grado de alta temperatura.

En segundo lugar se realizará una caracterización mediante el ensayo MSCR mediante la metodología AASHTO T350, esto servirá por un lado para obtener el primer punto de la curva $J_{nr_{3.2}}$ vs %SBS. Además, con este procedimiento se tendrá un parámetro que permitirá establecer la calidad del asfalto base y analizar el efecto de la modificación en base a polímeros.

3.2.2. ETAPA DE MEZCLADO

En esta fase se realizarán las mezclas de acuerdo las concentraciones y los parámetros indicados. De acuerdo a la revisión bibliográfica se sabe que la concentración óptima de SBS está entre un 4% (D'Angelo, "New High-Temperature Binder Specification Using Multistress Creep And Recovery", 2010) y 4.5% (Changjiang Kou & Wuhong, 2015). Debido a que no se indica a que se refiere con el punto óptimo, se decide que inicialmente se trabajará con 3 concentraciones distintas,

2%, 4% y 6%. Esto es para tener como dato central el 4% óptimo y tener datos por encima y por debajo de este punto.

Además se incluirá un set de 3 mezclas de 4%, con el fin de analizar la variabilidad y capacidad de repetitividad del ensayo MSCR.

Tabla 3-1: Mezclas a ensayar en el estudio.

Mezcla	% SBS*	Proveedor
Ligante Base	0	OIL MALAL
A	2	
B1	4	
B2	4	
B3	4	
C	6	

*Porcentaje con respecto a la masa de asfalto base.

3.2.3. OBTENCIÓN DE $J_{nr_{3,2}}$ Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta etapa se analizarán los resultados obtenidos. El objetivo principal de esta etapa es obtener una curva que pueda predecir el desempeño al ahuellamiento de un asfalto modificado. Entre los objetivos secundarios están el analizar la repetitividad del ensayo MSCR, identificar problemas de aplicación y determinar la capacidad de los materiales de cumplir con los límites establecidos.

Para la primera parte se realizará mediante una regresión a un gráfico $J_{nr_{3,2}}$ vs %SBS, cuyos pares ordenados corresponden a los resultados de los ensayos a realizar. Se verificarán varios tipos de regresión, lineal, exponencial y de tercer grado con el fin de ver correlaciones y otras consideraciones para seleccionar el mejor ajuste.

Para analizar la variabilidad se realizará una test de confiabilidad Kolmogorov-Smirnov para determinar la distribución que tienen los resultados del ensayo realizado a 3 mezclas de igual concentración de SBS. Con esto se busca obtener la curva $J_{nr_{3,2}}$ para distintas confiabilidades, además de tener datos sobre la repetitividad del ensayo.

La metodología utilizada es la ASTM D 7405, la cual está incluida en el anexo.

3.2.4. ENSAYOS FINALES Y CONCLUSIONES

La última etapa de la fase experimental tiene por finalidad verificar la curva obtenida en la etapa anterior y realizar acotaciones sobre la aplicación del ensayo con el fin de proponer una metodología para la realización del ensayo en el futuro.

Para verificar la curva obtenida se realizará una mezcla para cada nivel de carga S, H, V y E, buscando obtener $J_{nr_{3.2}}$ de 4.0, 2.0, 1.0 y 0.5 kPa^{-1} respectivamente. Estos valores deben ser alcanzados utilizando los porcentajes de SBS predichos por la curva creada.

Por último, se analizarán los resultados de los otros parámetros de interés del ensayo, $J_{nr_{diff}}$ y $\%Rec_{3.2}$, para realizar observaciones sobre su repetividad y sobre la capacidad de los materiales de alcanzar los valores establecidos en la normativa actual.

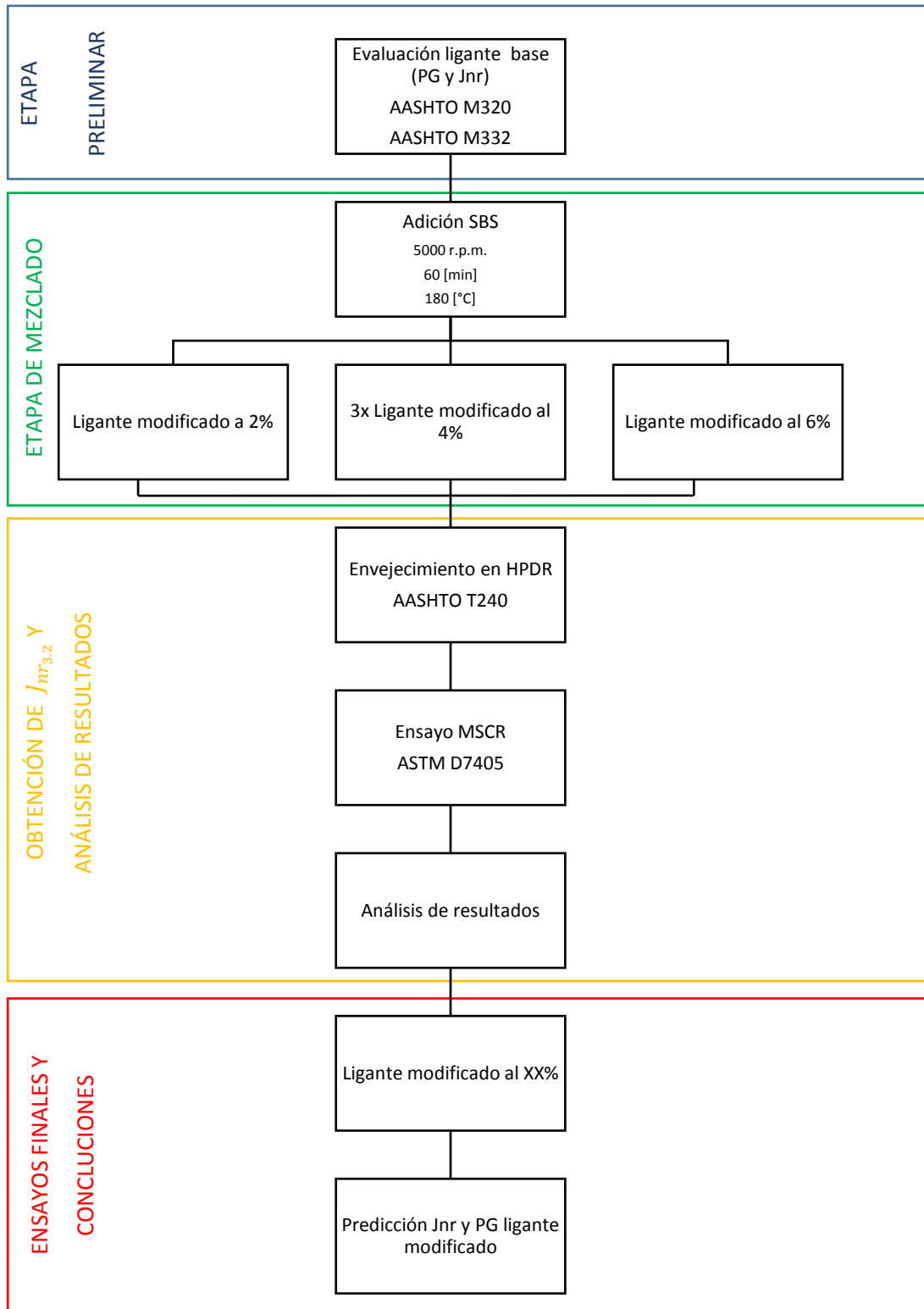


Figura 3-2: Plan de la etapa experimental.

3.3. EQUIPOS

3.3.1. ETAPA PRELIMINAR

Durante esta etapa se realiza una caracterización del ligante base mediante grado de desempeño (AASHTO M320) y $J_{nr_{3,2}}$ (AASHTO T332 y ASTM D7405). Para esto se utilizan los equipos indicados en la sección 2.2.1.

3.3.2. ETAPA DE MEZCLADO

Para la etapa de mezclado se utiliza un mezclador de corte de alta velocidad, una bandeja térmica para mantener la temperatura de mezclado, e instrumentos de laboratorio como termómetro, vaso precipitado, entre otros, los que se indican a continuación.

- Horno

Horno de alta temperatura, dotado de un sistema de recirculación de aire. Se utilizó para llevar el asfalto a la temperatura de mezclado (180 °C).



Figura 3-3: Horno con sistema de circulación de aire.

- Dispersor de inmersión

Mezclador marca KINEMATICA, modelo POLYTRON AGGREGATE TYPE PT-DA 30/2EC-F250. Tiene un diámetro de 30 mm, longitud de 250 mm y un volumen de trabajo de 100 a 4000 ml. Está compuesto en su totalidad de metal, lo que permite que pueda trabajar a las altas temperaturas requeridas por el asfalto.



Figura 3-4: Dispersor de inmersión marca Kinematica utilizado.

- Unidad de control

El mezclador debe montarse en un soporte regulador (unidad de control), marca KINEMATICA modelo POLYTRON PT 10-35 GT. Este regulador posee un control de revoluciones que varía entre 0 y 30.000 r.p.m.



Figura 3-5: Unidad de control marca Kinematica.

- Bandeja térmica

La bandeja utilizada consiste en una placa con un regulador de temperatura que permite calentarla entre 0 y 400 °C. Es de marca TERMO SCIENTIFIC, modelo HP131530-33. Para mantener la temperatura de mezclado en 180 °C se reguló la bandeja a 230 °C, lo que permitió obtener una temperatura fija, que dependiendo de las condiciones ambientales de temperatura y del porcentaje de polímero, se mantuvo a 180 ± 5 °C.



Figura 3-6: Bandeja térmica.

- Otros
 - Termómetro
 - Vaso precipitado
 - Baño maría de aceite de silicona
 - Balanza



Figura 3-7: Balanza (arriba), vasos y termómetro (izquierda) y baño de aceite (derecha).



Figura 3-8: Sistema de mezclado montado.

4. RESULTADOS

Los resultados del ensayo MSCR se obtuvieron mediante la metodología ASTM D7405. Este ensayo se realizó a 64 °C, de acuerdo con el grado de alta temperatura. El detalle de los resultados entregados por el ensayo se puede ver en el anexo.

4.1. RESULTADOS LIGANTE BASE

Tabla 4-1: Resultados ensayo MSCR para ligante base.

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR 0,1 [1/kPa]	JNR 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	6.972	1.066	2.040	2.318	84.710	13.603
Muestra 2	8.694	1.346	2.060	2.404	84.523	16.717
Muestra 3	7.653	1.340	2.200	2.347	82.496	6.676
Desviación Estándar	0.867	0.160	0.087	0.044	1.228	5.140
Promedio	7.773	1.251	2.100	2.356	83.910	12.332
CV 1S%	11.157	12.790	4.151	1.857		

4.2. RESULTADOS MEZCLA 2%

Tabla 4-2: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 2% 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	22.282	16.348	0.634	0.552	26.630	-12.924
Muestra 2	23.720	18.578	0.584	0.519	21.676	-11.087
Muestra 3	23.853	17.387	0.651	0.598	27.108	-8.079
Desviación Estándar	0.871	1.116	0.035	0.040	3.008	2.446
Promedio	23.285	17.438	0.623	0.556	25.138	-10.697
CV 1S%	3.741	6.399	5.590	7.132		

4.3. RESULTADOS MEZCLA 4% A

Tabla 4-3: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (A).

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR 0,1 [1/kPa]	JNR 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	24.625	18.967	0.416	0.415	22.977	-0.210
Muestra 2	23.808	18.993	0.453	0.417	20.223	-7.926
Desviación Estándar	0.578	0.018	0.026	0.001	1.947	5.456
Promedio	24.217	18.980	0.435	0.416	21.600	-4.068
CV 1S%	2.386	0.097	6.021	0.340		

4.4. RESULTADOS MEZCLA 4% B

Tabla 4-4: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (B).

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR 0,1 [1/kPa]	JNR 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	21.683	17.558	0.495	0.438	19.022	-11.585
Muestra 2	24.005	18.283	0.493	0.472	23.837	-4.241
Desviación Estándar	1.642	0.513	0.001	0.024	3.405	5.193
Promedio	22.844	17.921	0.494	0.455	21.430	-7.913
CV 1S%	7.187	2.861	0.286	5.284		

4.5. RESULTADOS MEZCLA 4% C

Tabla 4-5: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (C).

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR 0,1 [1/kPa]	JNR 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	18.771	12.392	0.609	0.578	33.979	-5.116
Muestra 2	24.697	15.841	0.345	0.477	35.859	38.179
Desviación Estándar	4.190	2.439	0.187	0.071	1.329	30.614
Promedio	21.734	14.117	0.477	0.528	34.919	16.532
CV 1S%	19.280	17.276	39.135	13.539		

4.6. RESULTADOS MEZCLA 6%

Tabla 4-6: Resultados ensayo MSCR para mezcla con 6% 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	44.706	34.384	0.245	0.245	23.088	-0.064
Muestra 2	44.202	34.819	0.253	0.237	21.226	-6.411
Desviación Estándar	0.356	0.308	0.006	0.006	1.317	4.488
Promedio	44.454	34.602	0.249	0.241	22.157	-3.238
CV 15%	0.802	0.889	2.272	2.347		

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. $J_{nr3,2}$

5.1.1. VARIABILIDAD MUESTRAS

5.1.1.1. REPETITIVIDAD

Para analizar la repetitividad del ensayo se realizaron 3 muestras con 4% de SBS. Los resultados de $J_{nr3,2}$ para estas mezclas, se muestran a continuación (Tabla 5-1). Para cada mezcla se extrajeron 2 probetas para ensayar.

Tabla 5-1: Resultados del ensayo MSCR para mezclas con 2% de SBS.

Mezcla	Probeta	$J_{nr3,2}$ [kPa⁻¹]
2% A	1	0.415
	2	0.417
2% B	1	0.438
	2	0.472
2% C	1	0.578
	2	0.477

A partir de estos datos se realiza un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa en el promedio del valor de $J_{nr3,2}$ entre los ensayos (con 95% de confiabilidad).

- Planteamiento de hipótesis:

H_0 : El promedio del valor de $J_{nr3.2}$ de las tres mezclas no presenta diferencias significativas.

H_1 : Al menos uno de los promedios por ensayo presenta diferencias significativas con los otros dos.

Tabla 5-2: Datos ingresados al modelo ANOVA.

Mezcla	N	Promedio	Varianza
2% A	2	0.4160	0.000002
2% B	2	0.4550	0.000578
2% C	2	0.5275	0.005101
Total	6	0.4662	-

Tabla 5-3: Resultados ensayo MSCR para asfalto modificado con 4% de SBS.

Mezcla	Muestra	$J_{nr3.2}$
2% A	1	0.415
	2	0.417
2% B	1	0.495
	2	0.493
2% C	1	0.578
	2	0.477
Promedio		0.479
Desviación estándar		0.060
n		6

Tabla 5-4: Valores calculados para el modelo ANOVA.

Tipo de Variación	Suma Cuadrados	Grados de Libertad	Promedio de Cuadrados	F
Entre Grupos	0.0128063	2	0.006403	3.38
Dentro de los grupos	0.005681	3	0.001894	
Total	0.0184868	5		

A partir de estos valores, el estadístico F calculado es 3.38. Por otro lado, para un 95% de confiabilidad, se tiene que el valor crítico de F es 9.55. Por ende, como $F < F_{\text{crítico}}$, se acepta la hipótesis nula, por lo que no existe una diferencia estadísticamente significativa del valor promedio de $J_{nr3.2}$ obtenido en mezclas con mismo porcentaje de SBS.

5.1.1.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS

Con el fin de determinar la curva $J_{nr_{3,2}}$ vs %SBS por confiabilidad, se aplica un test Kolmogorov-Smirnov a los datos de las 3 mezclas de 4%, B1, B2 y B3 para determinar el tipo de distribución de los resultados del ensayo. Para esto se consideran los 6 especímenes ensayados con 4% de SBS, para trabajar sobre una mayor cantidad de datos. El modelo seleccionado inicialmente corresponde al modelo normal.

- Planteamiento de hipótesis:
 H_0 : Los datos analizados siguen una distribución Normal.
 H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución Normal.
- Estadístico de contraste:

A continuación se compara la distribución probabilidad de los valores ordenados de mayor a menor, con la estimación dada por la función propia de la distribución normal, dada por la ecuación:

$$\hat{F}_n(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Donde:

- μ : Media o promedio de los datos testeados.
- σ : Desviación estándar.
- σ^2 : Varianza.

Tabla 5-5: Contraste de hipótesis de los resultados de $J_{nr3.2}$ con una distribución normal.

$J_{nr3.2}$ [kPa ⁻¹]	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	$F_o(x_i)$	$\hat{F}_n(x_i)$	D
0.415	1	1	0.167	0.144	0.023
0.417	1	2	0.333	0.151	0.182
0.477	1	3	0.500	0.486	0.014
0.493	1	4	0.667	0.591	0.076
0.495	1	5	0.833	0.604	0.230
0.578	1	6	1.000	0.949	0.051
$D_{m\acute{a}x}$					0.230

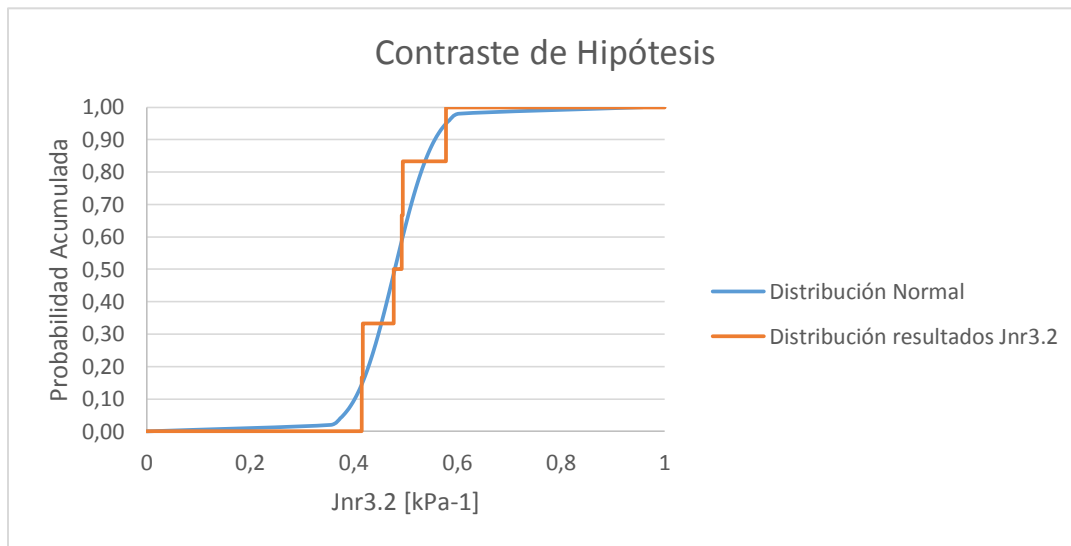


Figura 5-1: Gráfico de distribuciones acumuladas para contraste de hipótesis.

Luego, para 6 datos en un modelo normal, con una significancia $\alpha=0.05$ se tiene un $D_\alpha=0.519$.

De esta forma se tiene:

$$D_{m\acute{a}x} < D_\alpha$$

\therefore No existe evidencia estadística para rechazar H_0 .

De esta forma se puede asumir que los resultados entregados por el ensayo MSCR para $J_{nr3.2}$ se ajustan a una distribución normal.

5.1.2. CONFECCIÓN CURVA $J_{nr3.2}$ VS %SBS

Para la confección de la curva $J_{nr3.2}$ vs %SBS se considerarán distintos parámetros, con el fin de determinar distintos tipos de ajuste y varios niveles de confiabilidad. Primero se realizará la curva con el valor promedio de cada porcentaje, ajustando los datos a varios tipos de curva, con el fin de determinar cuál es la que mejor describe la variación de la flexibilidad en fluencia en función de la concentración de SBS. Luego se realizará el ajuste que entregue una mejor correlación, pero ahora se hará para distintos niveles de confiabilidad, aplicando el modelo normal a los datos obtenidos en el ensayo.

5.1.3. CURVA POR TIPO DE REGRESIÓN

Para la creación de la curva $J_{nr3.2}$ vs %SBS se utilizarán los siguientes puntos, determinados a partir del promedio de la flexibilidad en fluencia obtenida para cada porcentaje de SBS.

Tabla 5-6: Puntos a considerar en la curva $J_{nr3.2}$ vs %SBS.

Mezcla	%SBS	$J_{nr3.2}$
Ligante Base	0	2.356
2%	2	0.556
4% A	4	0.416
4% B	4	0.455
4% C	4	0.528
6%	6	0.241

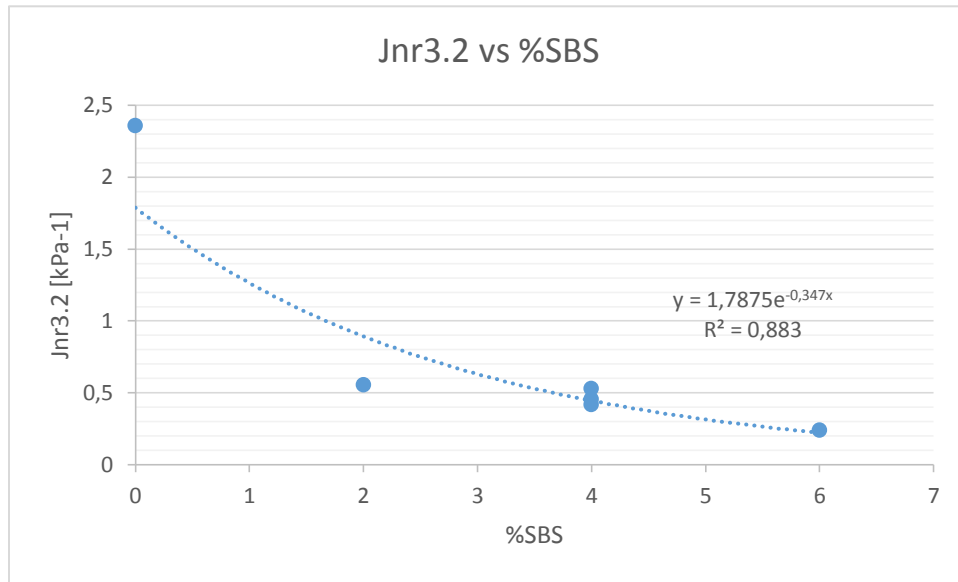


Figura 5-3: Curva Jnr3.2 vs %SBS con ajuste exponencial.

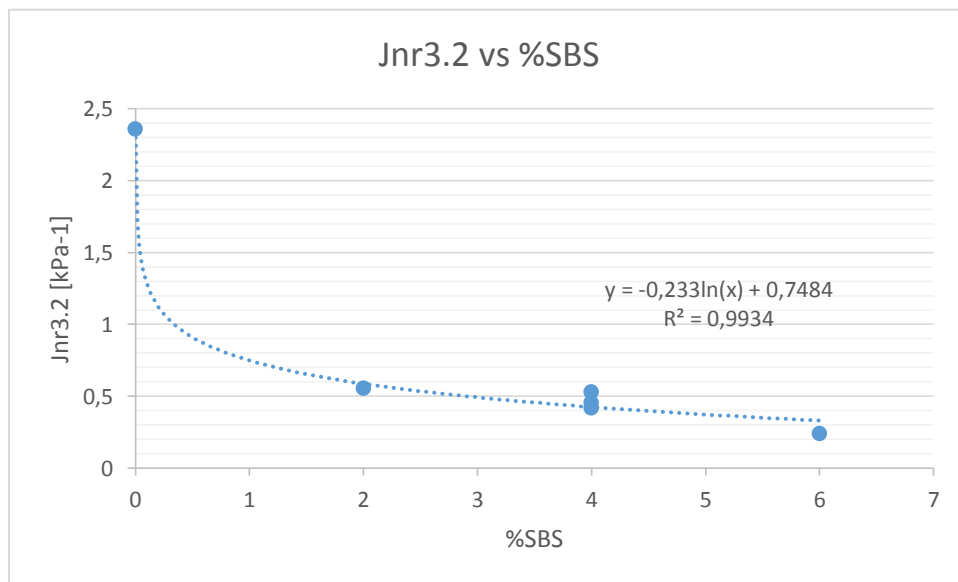


Figura 5-4: Curva Jnr3.2 vs %SBS con ajuste logarítmico.

A pesar de que las regresiones tienen correlaciones que son por lo menos aceptables, los valores son cuestionados debido a la poca diferencia que existe entre los valores obtenidos por las

mezclas a 2, 4 y 6%. Además, debido a la baja cantidad de puntos, existen concentraciones donde la curva no podría efectivamente predecir la flexibilidad en fluencia.

5.1.4. CURVA POR NIVEL DE CONFIABILIDAD

Luego se desarrolla la curva en base a un ajuste logarítmico, ya que corresponde a la regresión que presenta la correlación más alta ($R^2=0.9934$). Estas curvas se realizan calculando el valor en base a un modelo de distribución normal, con el respectivo promedio y desviación estándar para cada concentración de SBS para obtener puntos, y con estos determinar la curva de manera similar a lo desarrollado en la sección 5.1.3.

Tabla 5-7: Puntos para curva $J_{nr3.2}$ vs %SBS, para 50% de confiabilidad.

Nivel de carga	$J_{nr3.2}$ [kPa ⁻¹]	%SBS
S	4	0
H	2	0.005
V	1	0.339
E	0.5	2.894

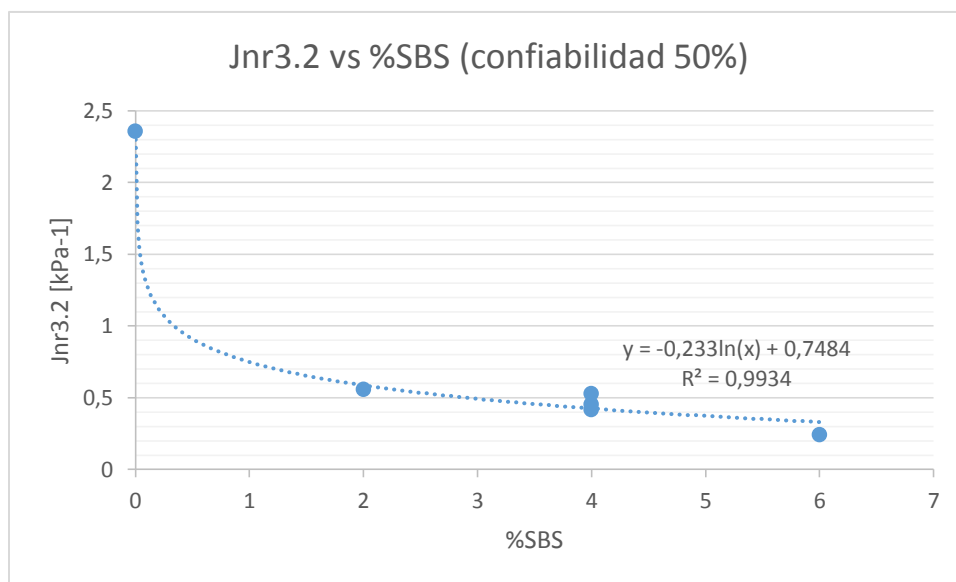


Figura 5-5: Curva Jnr3.2 vs %SBS para 50% de confiabilidad.

Tabla 5-8: Puntos para curva Jnr3.2 vs %SBS, para 75% de confiabilidad.

Nivel de carga	$J_{nr3.2}$ [kPa ⁻¹]	%SBS
S	4	0
H	2	0.005
V	1	0.373
E	0.5	3.160

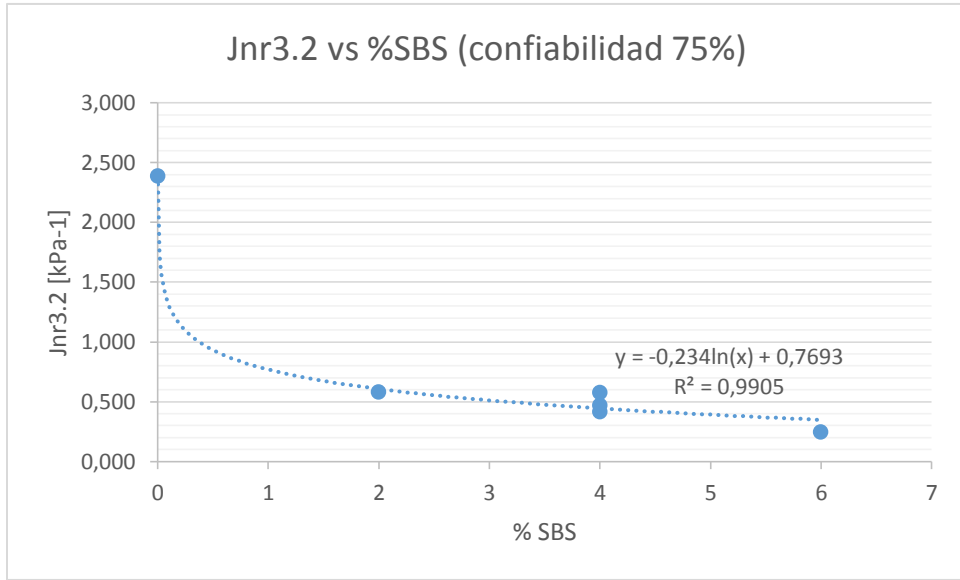


Figura 5-6: Curva Jnr3.2 vs %SBS para un 75% de confiabilidad.

Tabla 5-9: Puntos para curva Jnr3.2 vs %SBS, para 95% de confiabilidad.

Nivel de carga	J _{nr3.2} [kPa ⁻¹]	%SBS
S	4	0
H	2	0.006
V	1	0.407
E	0.5	3.387

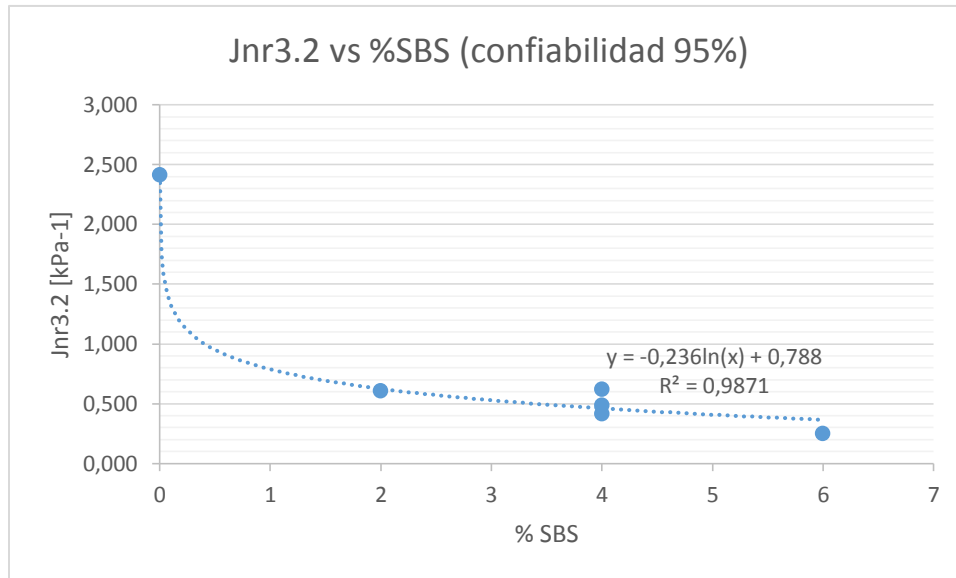


Figura 5-7: Curva Jnr3.2 vs %SBS para un 95% de confiabilidad.

A partir de estas curvas se puede determinar el porcentaje necesario de SBS para obtener mezclas para cada uno de los niveles de carga de tránsito de la especificación MSCR. Estos valores se entregan a continuación para comparar según el nivel de confiabilidad.

Tabla 5-10: Concentraciones de SBS requeridos por nivel de carga y según confiabilidad.

Nivel de Carga	%SBS por confiabilidad		
	50%	75%	95%
S	0	0	0
H	0.005	0.005	0.006
V	0.339	0.373	0.407
E	2.894	3.160	3.387

Al observar la tabla se nota, de forma trivial, que no se requiere adición de SBS para un nivel de carga S, debido a que los valores registrados para el ligante base no exceden los 4 [kPa⁻¹]. Para el caso del nivel de carga H se nota que se requiere una cantidad mínima de SBS para lograr los valores requeridos de flexibilidad en fluencia, esto debido a que los valores de flexibilidad en fluencia para

el ligante base son bastante cercanos a 2, independiente de la confiabilidad. Para el nivel de carga V se observa que aumenta tanto el porcentaje de SBS requerido para el aumento de nivel de carga, tanto como el requerido para lograr el mismo nivel de carga con una mayor confiabilidad. Esto se repite para un nivel de carga E, donde las diferencias se hacen más claras.

A partir de estos valores, se indica a continuación gráficamente las concentraciones de SBS requeridas para lograr los distintos niveles de carga, en función de la confiabilidad.

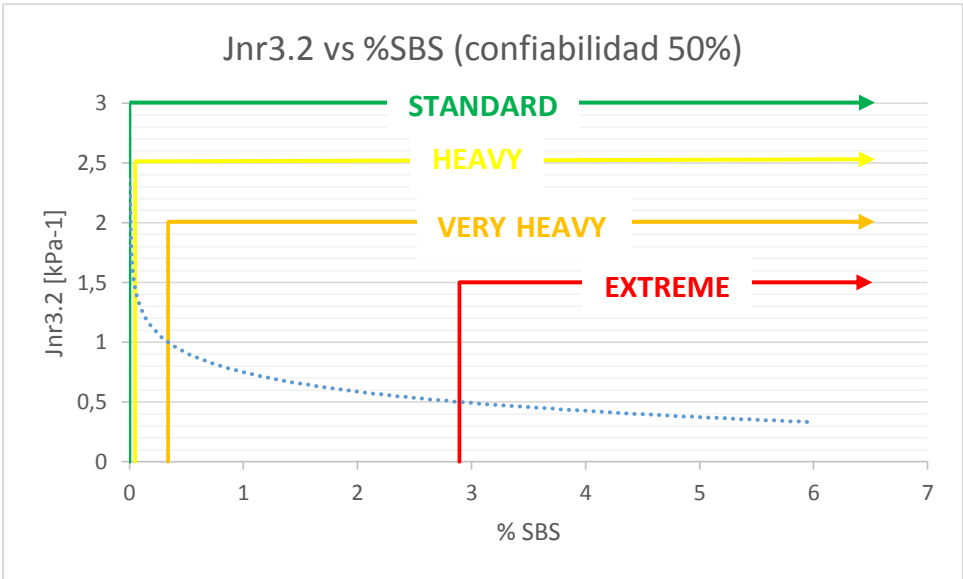


Figura 5-8: Jnr3.2 vs %SBS por nivel de carga, para una confiabilidad de 50%.

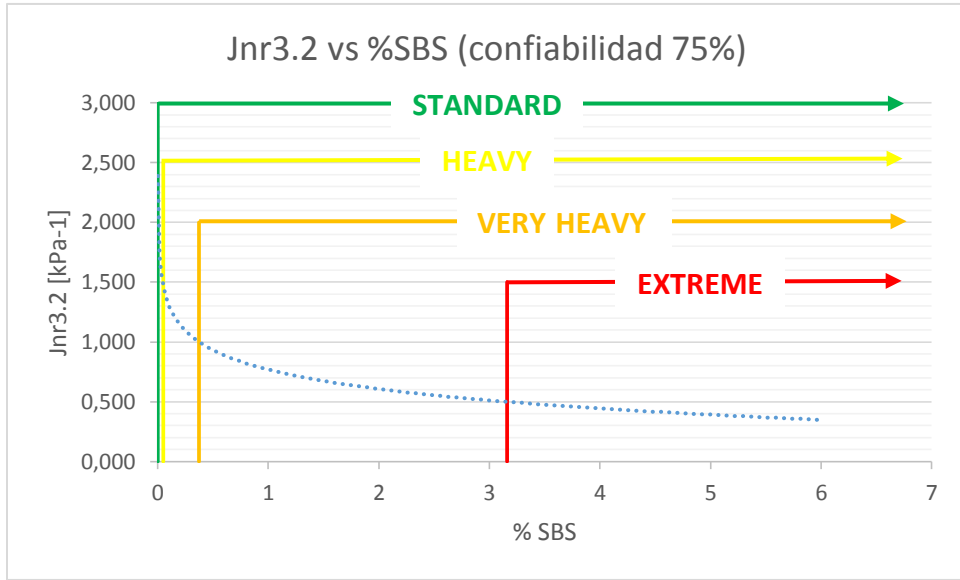


Figura 5-9: Jnr3.2 vs %SBS por nivel de carga, para una confiabilidad de 75%.

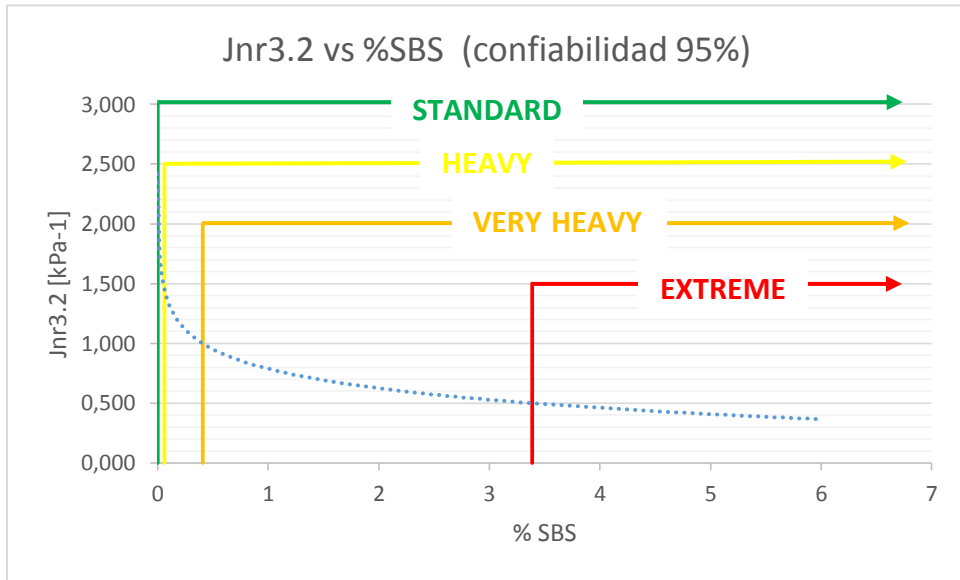


Figura 5-10: Jnr3.2 vs %SBS por nivel de carga, para una confiabilidad de 95%.

A partir de los datos obtenidos y del comportamiento de la curva en función de la concentración de SBS se deduce que estos materiales no presentan problemas en cumplir con los valores límite especificados para $J_{nr3.2}$ por nivel de carga.

5.1.5. RESPUESTA ELÁSTICA

Es importante verificar la capacidad del parámetro $J_{nr3.2}$ para determinar la capacidad de recuperación elástica de las mezclas. Para esto se utilizan los valores obtenidos para la flexibilidad en fluencia a 3.2 kPa, $J_{nr3.2}$, y para $\%Rec_{3.2}$, que corresponde al porcentaje de recuperación elástica al mismo esfuerzo. Además se buscará, si existe, una relación entre el porcentaje de SBS y el valor obtenido de $\%Rec_{3.2}$, con el fin de determinar cómo se ve afectada la respuesta elástica con la adición de polímero.

Tabla 5-11: Valores de flexibilidad en fluencia y recuperación elástica.

Mezcla	%SBS	%Rec3.2 [%]	Jnr3.2 [kPa-1]
Ligante Base	0	1.07	2.32
	0	1.35	2.40
	0	1.34	2.35
2%	2	16.35	0.55
	2	18.58	0.52
	2	17.39	0.60
4% A	4	18.97	0.42
	4	18.99	0.42
4% B	4	17.56	0.44
	4	18.28	0.47
4% C	4	12.39	0.58
	4	15.84	0.48
6%	6	34.38	0.25
	6	34.82	0.24

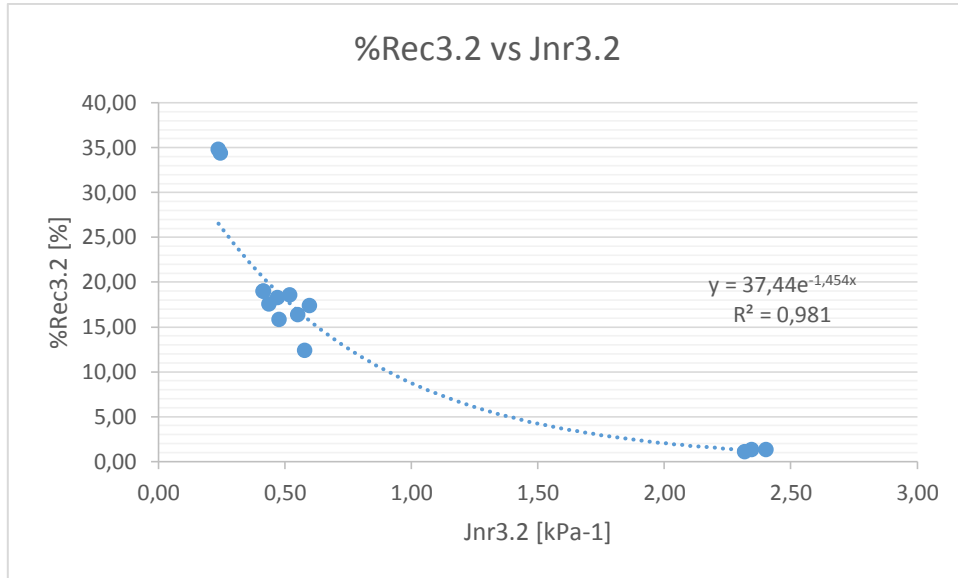


Figura 5-11: Gráfico %Rec3.2 vs Jnr3.2

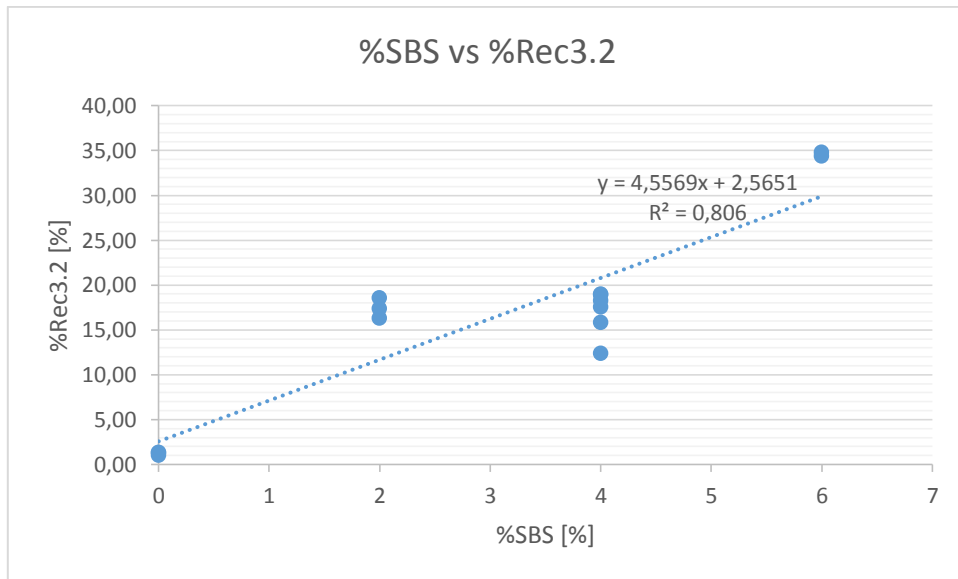


Figura 5-12: Gráfico %SBS vs %Rec3.2.

Como se puede observar en la Figura 5-11 existe, hay una muy buena correlación entre la flexibilidad en fluencia y la recuperación elástica, con $r^2=0,981$, por lo que se puede concluir que el parámetro $J_{nr3.2}$ representa correctamente la capacidad de recuperación elástica. Por otro lado, en la Figura 5-12, se observa que la relación entre la recuperación elástica y la concentración de SBS

tiene un ajuste lineal, con una correlación $r^2=0.806$. A partir de este gráfico se puede concluir, por un lado, que la modificación con SBS aumenta efectivamente la capacidad de recuperación elástica, con un aumento de aproximadamente 4.6% del valor de $\%Rec_{3,2}$ al aumentar la concentración de SBS en un 1%.

En ambos caso se repite lo visto en la Figura 5-7, donde existe muy poca diferencia entre los valores obtenidos para las muestras con 2% y 4% de SBS. Esto puede significar problemas en el proceso de mezclado, ya sea de temperatura o tiempo de mezclado y de instrumentos utilizados.

5.2. $J_{nr,diff}$

El siguiente parámetro analizado corresponde a $J_{nr,diff}$. Para este parámetro, se especificó un máximo de 75% para asfaltos modificados con polímeros. Los resultados de este valor se indican a continuación:

Tabla 5-12: Resultados de $J_{nr,diff}$ para asfaltos modificados.

Mezcla	Muestra	%SBS	$J_{nr,3,2}$ [kPa^{-1}]	$J_{nr,diff}$ [%]
2%	1	2	0.552	-12.924
	2	2	0.519	-11.087
	3	2	0.598	-8.079
4% A	1	4	0.415	-0.210
	2	4	0.417	-7.926
4% B	1	4	0.438	-11.585
	2	4	0.472	-4.241
4% C	1	4	0.578	-5.116
	2	4	0.477	38.179
6%	1	6	0.245	-0.064
	2	6	0.237	-6.411

Acá se observa que los resultados obtenidos $J_{nr,diff}$ contienen valores negativos, lo que da a entender que para estos especímenes los valores de $J_{nr,3.2}$ son menores que para $J_{nr,0.1}$. Este caso corresponde a una anomalía ya que se espera que se produzca un efecto contrario, o sea que la flexibilidad en fluencia aumente cuando aumenta el esfuerzo aplicado, como se ve en la Figura 2-9.

Este comportamiento en la práctica se traduce capacidad de recuperar deformaciones del asfalto es mayor al ensayarse en más esfuerzos, siendo que es esperable lo contrario, que el aumento de esfuerzos disminuya la capacidad de recuperar deformaciones. Existen estudios similares al realizado donde se producen casos similares de $J_{nr,diff}$ negativos, donde se le atribuye este fenómeno a reacciones entre el polímero y el asfalto. En ninguna de estas referencias se considera desechar los resultados obtenidos, sin embargo se considera importante determinar el origen de estos valores.

5.3. **%Rec_{3,2}**

El último parámetro de interés corresponde al porcentaje de recuperación a 3.2 [kPa]. Este parámetro se aplica a todas las mezclas sin considerar el asfalto base debido a que no tiene polímero. Este parámetro se usa para determinar la efectividad de la modificación, exigiendo un mínimo de %Rec_{3,2} para los asfaltos modificados. El valor exigido se establece como $\%Rec_{3,2} \geq 29.371 \cdot J_{nr,3.2}^{-0.263}$.

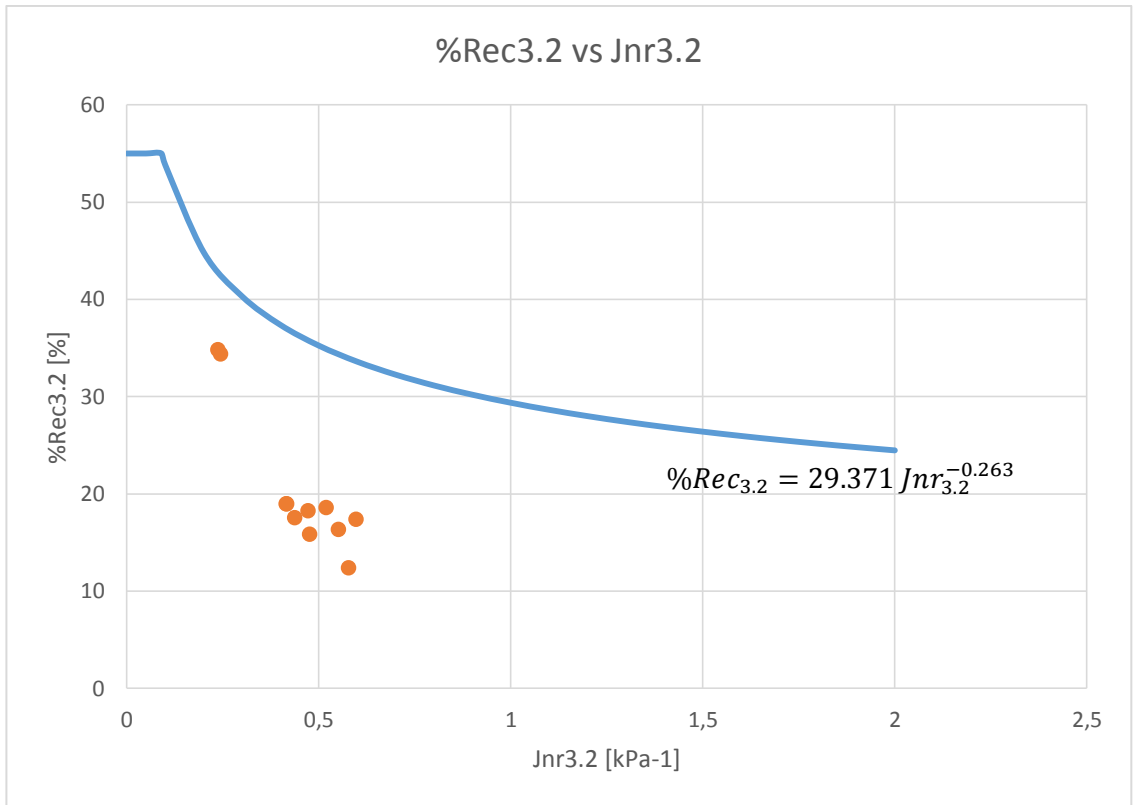


Figura 5-13: Gráfico Jnr_{3.2} vs %Rec_{3.2}.

De la Figura 5-13 se puede observar la incapacidad que tienen las mezclas para alcanzar el valor mínimo especificado para %Rec_{3.2}. Esto se puede atribuir al proceso de mezclado, el cual no permite obtener una buena dispersión de la red polimérica y por lo tanto la mezcla no logra alcanzar una respuesta elástica satisfactoria.

6. CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO MSCR

Debido a la alta variabilidad y los problemas de alcanzar los niveles se evalúan algunas consideraciones presentadas en el estudio “Considerations Toward Better Implementation of the Multiple Stress Creep and Recovery Test” (Golalipour, Bahia, & Tabatabaee, 2016). Estos cambios consisten en modificar la cantidad de ciclos que se aplican en el ensayo, aumentando de 10 a 20 los ciclos de acondicionamiento, debido a que de acuerdo al estudio los 10 ciclos no son suficientes para lograr un valor estable de la flexibilidad en fluencia no recuperar. Adicionalmente recomiendo utilizar los últimos 5 ciclos de cada nivel de carga. Por último, se recomienda agregar un nivel adicional de carga más alto, de 10 kPa, ya que se considera que los pavimentos experimentan niveles de esfuerzo mayores a 3.2 kPa, con el fin de caracterizar de mejor manera la sensibilidad a esfuerzo.

A continuación, se entregan los resultados de los ensayos mostrados en sección de resultados, pero calculados con los últimos 5 ciclos de cada nivel de carga, con el fin de evaluar esta consideración para la implementación del ensayo.

6.1. RESULTADOS MODIFICADOS LIGANTE BASE

Tabla 6-1: Resultados modificados ensayo MSCR para ligante base.

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR 0,1 [1/kPa]	JNR 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	8.182	1.085	2.020	2.281	86.742	12.933
Muestra 2	8.933	1.319	2.040	2.338	85.229	14.583
Muestra 3	7.984	1.326	2.080	2.325	86.742	12.933
Desviación Estándar	0.500	0.138	0.031	0.030	0.873	0.953
Promedio	8.366	1.244	2.047	2.315	86.237	13.483
CV 15%	5.982	11.059	1.493	1.276	-	-

6.2. RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 2%

Tabla 6-2: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 2% 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	24.118	15.667	0.542	0.538	35.043	-0.830
Muestra 2	25.625	18.941	0.494	0.508	26.084	2.859
Muestra 3	25.702	17.391	0.556	0.594	32.336	6.790
Desviación Estándar	0.893	1.638	0.033	0.044	4.595	3.811
Promedio	25.149	17.333	0.531	0.546	31.154	2.940
CV 1S%	3.551	9.450	6.128	7.962	-	-

6.3. RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 4% A

Tabla 6-3: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (A).

	R% 0,1 [KPA]	R% 3,2 [KPA]	JNR 0,1 [1/kPa]	JNR 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	25.902	18.967	0.378	0.413	26.227	9.127
Muestra 2	25.759	19.108	0.392	0.413	25.819	5.230
Desviación Estándar	0.101	0.100	0.010	0.000	0.289	2.756
Promedio	25.830	19.038	0.385	0.413	26.023	7.178
CV 1S%	0.390	0.525	2.571	0.000	-	-

6.4. RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 4% B

Tabla 6-4: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (B).

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR 0,1 [1/kPa]	JNR 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	23.334	17.898	0.434	0.428	23.300	-1.498
Muestra 2	25.769	18.836	0.438	0.466	26.905	6.307
Desviación Estándar	1.722	0.664	0.003	0.027	2.549	5.519
Promedio	24.552	18.367	0.436	0.447	25.102	2.405
CV 1S%	7.013	3.613	0.649	6.037	-	-

6.5. RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 4% C

Tabla 6-5: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 4% de SBS (C).

	R% 0,1 [kPa]	R% 3,2 [kPa]	JNR 0,1 [1/kPa]	JNR 3,2 [1/kPa]	R DIFF %	Jnr DIFF
Muestra 1	20.312	12.436	0.542	0.571	38.777	5.281
Muestra 2	24.204	15.041	0.376	0.490	37.858	30.319
Desviación Estándar	2.752	1.842	0.117	0.057	0.650	17.704
Promedio	22.258	13.738	0.459	0.530	38.317	17.800
CV 15%	12.362	13.407	25.573	10.750	-	-

6.6. RESULTADOS MODIFICADOS MEZCLA 6%

Tabla 6-6: Resultados modificados ensayo MSCR para mezcla con 6% 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	48.486	35.608	0.198	0.236	26.559	19.318
Muestra 2	48.460	36.207	0.196	0.227	25.285	15.753
Desviación Estándar	0.018	0.424	0.001	0.007	0.901	2.521
Promedio	48.473	35.908	0.197	0.232	25.922	17.535
CV 15%	0.037	1.180	0.718	2.863	-	-

6.7. EFECTO DE DISMINUCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS

A continuación se realizará un análisis para ver los efectos de considerar los últimos 5 ciclos. Para esto, en primer lugar se realiza una comparación de los valores del coeficiente de variación (CV) para los parámetros principales entregados por el ensayo para cada mezcla, al ser calculados con 10 ciclos de carga-descarga (resultados originales), y con las consideraciones propuestas por Golalipour, con 5 ciclos de carga descarga (resultados modificados).

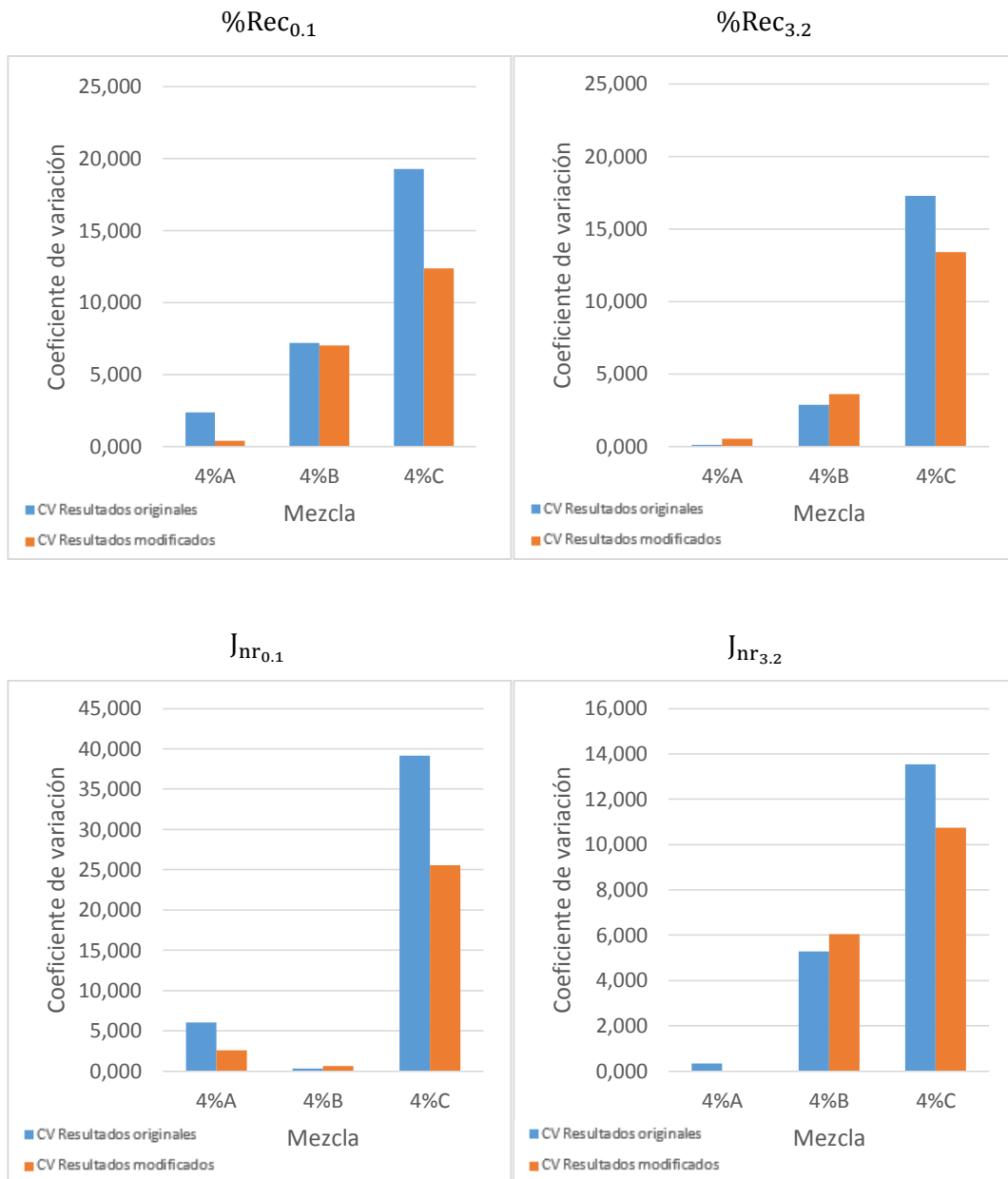


Figura 6-1: Coeficiente de variación de los resultados del ensayo MSCR por número de ciclos.

Al observar los gráficos de la Figura 6-1, se observa que en casi todos los casos, el considerar los últimos 5 ciclos, en lugar de 10, disminuye la variación de los resultados obtenido en el ensayo, lo que sirve para que los valores alcancen las variabilidades mínimas especificadas en la metodología AASHTO T 350.

Con respecto a los valores de $J_{nr_{3,2}}$, los valores obtenidos tienen variaciones despreciables, prácticamente manteniendo los valores independientemente de la cantidad de ciclos usados para calcularlo.

Así mismo, no existe una tendencia marcada con lo que ocurre con los valores de $\%Rec_{3,2}$, sin embargo, se puede decir que la disminución del número de ciclos no tiene efectos mayormente positivos además de la disminución de la variabilidad, no existiendo evidencia para concluir que la recomendación facilita el cumplimiento del valor especificado.

Por último, se analiza el efecto de la reducción del número de ciclos sobre el resultado de $J_{nr_{diff}}$, el cual es, por mucho, los resultados menos favorables obtenidos en el ensayo. Para esto se entrega el resultado obtenido por mezcla, obtenido mediante el método original y el método modificado.

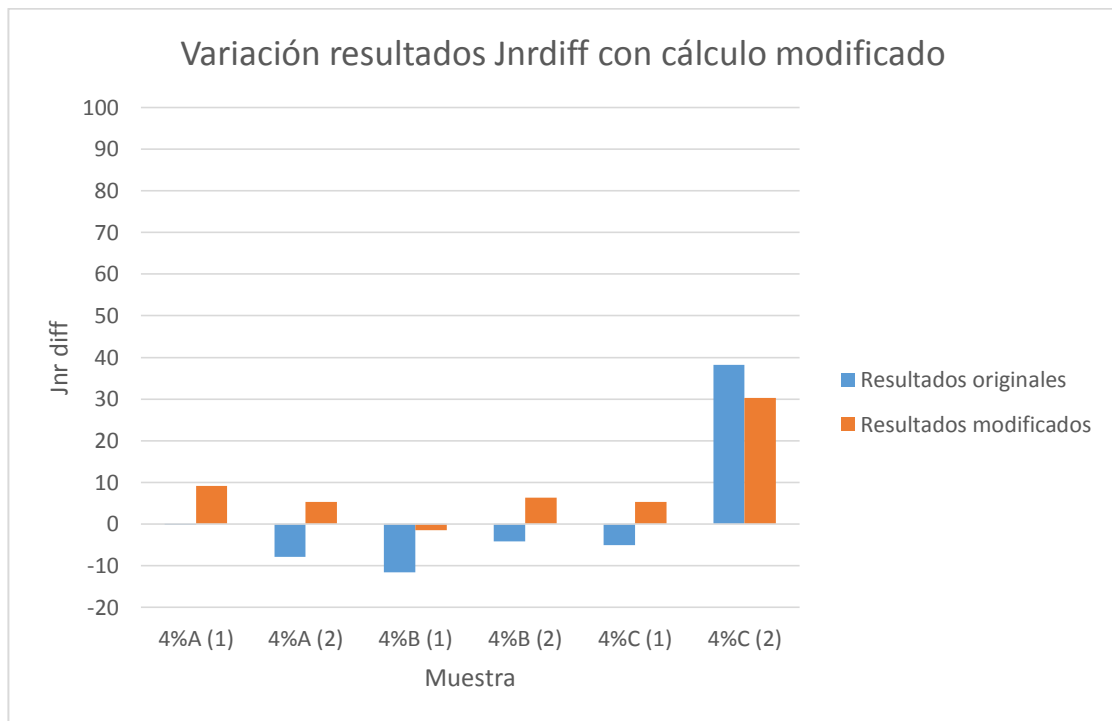


Figura 6-2: Variación de resultados de $J_{nr_{diff}}$ por número de ciclos.

De la Figura 6-2 se observa que la disminución del número de ciclos, de 10 a 5, disminuye considerablemente la posibilidad de obtener resultados negativos para $J_{nr_{diff}}$. También es importante notar que esta modificación disminuye el valor absoluto de este parámetro, por lo que esta consideración es bastante beneficiosa en el cálculo de este parámetro.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La primera parte de esta memoria consistió en determinar la metodología para la especificación de ligantes asfálticos en base al ensayo MSCR. Para esto se revisaron especificaciones norteamericanas para determinar, en base a los ligantes más utilizados en dicha región, la factibilidad de adoptar los valores especificados para cada nivel de carga.

Una vez revisadas las especificaciones se observa que los valores especificados son similares para todos los estados, además de ser concordantes con las especificaciones AASHTO M332, por lo que los valores son adoptables para los asfaltos chilenos con los valores indicados en esta última.

Con respecto al procedimiento experimental y los resultados obtenidos, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- El proceso de mezclado entregó resultados insatisfactorios, ya que se considera que las diferencias entre las distintas concentraciones tienen diferencias en la flexibilidad en fluencia menores a las esperadas. Esto puede deberse a que se requieren distintos tiempos de mezclado para las distintas concentraciones, aumentando el tiempo necesario para la incorporación del SBS en función de la concentración.
- Con respecto a los resultados del ensayo MSCR se observa una relación inversamente proporcional de la resistencia al ahuellamiento con respecto a la concentración de polímero, lo que se ajusta a lo esperado.
- Los valores de variación se escapan de los valores estipulados en la norma ASTM D 7405. Esto puede indicar problemas en el proceso de mezclado, lo que puede solucionarse ya sea modificando el proceso de mezclado, instrumentos utilizados, el equipo mezclador y de control de temperatura específicamente, o aumentando el tiempo de mezclado para concentraciones más altas, o bien utilizando las modificaciones en la metodología de ensayo propuesta por Amir Golalipour indicadas en la sección 6. Esta alta variabilidad también puede dificultar la aplicación de la curva obtenida para obtener la concentración de SBS requerida para cumplir las especificaciones por nivel de carga, por lo que se recomienda solucionar este problema en para futuros estudios.
- Sobre la curva de concentración vs flexibilidad en fluencia no recuperable, se observa que a pesar de la variabilidad comentada anteriormente, la correlación entre las variables es

bastante buena, por lo que los valores se ajustan a la regresión realizada y esta permite obtener una aproximación del nivel de carga en función de la concentración de SBS.

- Los resultados del ensayo MSCR tienen una distribución normal para mezclas de igual concentración de SBS, por lo que los resultados del ensayo se pueden expresar en función de la confiabilidad aplicando la distribución al promedio y la desviación estándar de los resultados obtenidos.
- Las variables de mezclado, revoluciones por minuto, temperatura y tiempo de mezclado deben ser cuidadosamente controlados durante este proceso. Para esto se recomienda en estudios futuros utilizar instrumentos más especializados para este procedimiento, ya que los disponibles no tuvieron un desempeño que se pueda considerar satisfactorio.
- Sobre la capacidad de los materiales disponibles en Chile para alcanzar los límites recomendados, se concluye a partir de los resultados obtenidos que estos pueden cumplir con la capacidad de recuperación elástica, en base a $J_{nr_{3.2}}$, para todos los niveles de carga. Sin embargo existen problemas para alcanzar los límites de $J_{nr_{diff}}$ y $\%Rec_{3.2}$, lo que en la práctica indica que las mezclas tienen una capacidad de recuperación elástica menor a lo especificado, así como una red polimérica poco desarrollada. Esta conclusión no es definitiva, ya que se espera que al mejorar el método de mezclado y aplicando los cambios propuestos por Amir Goliloup se solucionen estos problemas.

Con respecto a las consideraciones propuestas por Amir Goliloup son, en general, beneficiosas tanto para reducir la variabilidad del ensayo como para lograr cumplir con los valores especificados. Se recomienda realizar un estudio para la validación de estas consideraciones, relacionándolas con el desempeño.

8. ANEXOS

8.1. ENSAYOS SUPERPLAVE PLUS POR ESTADO

Tabla 8-1: Ensayos SUPERPAVE PLUS por estado.

Estado	Abreviación	Estado Ligante	Ensayo	Temperatura [°C]	Método de Ensayo: AASHTO (T), ASTM (D), u otro.
Alabama	AL	Original	Polymer content	-	AL DOT 408
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	10	T301
Alaska	AK	Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
Arizona	AZ	Original	Elastic Recovery, %	10	T301
			Softening Point, °C	-	T53
			Solubility, %	-	D2042
Arkansas	AR	Original	Elastic Recovery, %	25	T301
			Polymer type	-	-
California	CA	Original	Solubility, %	-	-
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
Carolina del Norte	NC	Original	Specific Gravity	15.6	D70
			Polymer type	-	-
Carolina del Sur	SC	Original	Specific Gravity	15.6	D70
Colorado	CO	Original	Ductility, cm	4	T51
			Toughness and Tenacity	25	CP-L 2210
			Acid or Base Modification	-	CP-L
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
			Ductility, cm	4	T51
Connecticut*	CT				
Dakota del Norte*	ND				
Dakota del Sur	SD	Original	Specific Gravity	15.6 – 25	D70
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
Delaware*	DE				

*Estados sin implementación de ensayos SUPERPAVE PLUS.

Tabla 8-2: Ensayos SUPERPAVE PLUS por estado (continuación).

Estado	Abreviación	Estado Ligante	Ensayo	Temperatura [°C]	Método de Ensayo: AASHTO (T), ASTM (D), u otro.
Florida	FL	Original	Solubility, %	-	T44
Georgia	GA	Original	Separation of Polymer, °C	-	D7173
Hawái*	HI				
Idaho	ID	Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
Illinois	IL	Original	Force Ductility. Force Ratio	4	T300
			Toughness and Tenacity	25	D5801
			Separation of polymer	-	IL DOT
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	D6084
Indiana*	IN				
Iowa*	IA				
Kansas*	KS				
Kentucky	KY	Original	Solubility, %	-	T44
Luisiana	LA	Original	Force Ductility	4	T300
			Softening Point, °C	-	T53
			Separation of Polymer, °C	-	D5976
			Solubility, %	-	T44
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
			Ductility, cm	25	T51
Maine*	ME				
Maryland	MD				
Massachusetts	MA	Original	Polymer Content Type	-	-
Michigan	MI	Original	Force Ductility, Force Ratio	4	T300
			Separation of polymer, °C	-	D5976
			Solubility, %	-	T44
			Toughness and Tenacity	-	D5801
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
Minnesota*	MN				
Mississippi	MS	Original	Polymer Content		

*Estados sin implementación de ensayos SUPERPAVE PLUS.

Tabla 8-3: Ensayos SUPERPAVE PLUS por estado (continuación).

Estado	Abreviación	Estado Ligante	Ensayo	Temperatura [°C]	Método de Ensayo: AASHTO (T), ASTM (D), u otro.
Misuri	MO	Original	Separation of Polymer, % diff	-	D5976
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
Montana	MT	Original	Specific Gravity	15.6	D70
		Residual RTFO AASHTO T240	Ductility, cm	25	T51
Nebraska	NE	Original	Specific Gravity	15.6	D70
Nevada	NV	Original	Ductility, cm	4	Nev. T746
			Toughness and Tenacity	25	Nev. T745
			Solubility, %	-	T44
			Sieve Particulates Retained	-	Nev. T730
			Polymer Content, %	-	T302
Residual RTFO Nev. T728	Ductility, cm	4	Nev. T746		
Nueva Jersey	NJ	Original	Specific Gravity	15.6	T228
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	D6084
Nueva York	NY	Original	Specific Gravity	15.6	D70
Nuevo Hampshire*	NH				
Nuevo México	NM	Original	Specific Gravity	25	T228-06
Ohio	OH	Original	Phase Angle, °	Grado Especificado	T315
			Penetration, tenths of mm	25	T49
			Ductility, cm	4	T51
			Toughness and Tenacity	25	D5801
			Separation of Polymer, °F	-	D7173
			Solubility, %	-	T44
			Homogeneity	-	-
			GTR, %	-	-
Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301		

*Estados sin implementación de ensayos SUPERPAVE PLUS.

Tabla 8-4: Ensayos SUPERPAVE PLUS por estado (continuación).

Estado	Abreviación	Estado Ligante	Ensayo	Temperatura [°C]	Método de Ensayo: AASHTO (T), ASTM (D), u otro.
Oklahoma	OK	Original	Specific Gravity	15.6	T228
			Separation of Polymer	-	D5976
			Solubility, %	-	T44
			Spot Test	-	T102
Oregón	OR	Original	Specific Gravity	15.6	D70
			Penetration, tenths of mm	25	T49
			Elastic Recovery, %	10	ODOT TM 429
			force Ductility, Force Ratio	4	ODOT TM 427
			Viscosity, Poise	60	ODOT TM 430
			Kinematc Viscosity, Pa.S	135	T316
		Polymer Content, %	-	-	
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
Pensilvania	PA	Original	Separation of Polymer	-	D5976
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	D6084
Rhode Island	RI	Original	Elastic Recovery, %	4	T301
Tennessee	TN	Original	Specific Gravity	15.6	D70
Texas	TX	Original	Specific Gravity	15.6	D70
			Elastic Recovery, %	10	D6084
Utah	UT	Original	Specific Gravity	15.6	D70
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
Vermont	VT	Original	Specific Gravity	25	T228
Virginia	VA	Original	Specific Gravity	15.6	D70
Virginia Occidental	WV	Original	Specific Gravity	15.6	D70
Washington	WA	Original	Specific Gravity	15.6	D70
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301
Wisconsin	WI	Original	Specific Gravity	15.6	D70
Wyoming	WY	Original	Specific Gravity	15.6	D70
		Residual RTFO AASHTO T240	Elastic Recovery, %	25	T301

*Estados sin implementación de ensayos SUPERPAVE PLUS.

8.2. AASHTO T 350: Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recover (MSCR) Test of Asphalt Binder Using Shear Rheometer (DSR)

1. Alcances

- 1.1. Este método cubre la determinación del porcentaje de deformación recuperable y no recuperable de ligantes asfálticos mediante el ensayo MSCR. El ensayo MSCR se realiza usando el reómetro de corte dinámico (DSR) a una temperatura específica. Está pensado para usarse en residuos del T 240 (Horno de Película Delgada Rotatoria (HPDR)).
- 1.2. El porcentaje de recuperación está destinado a entregar un medio para determinar la respuesta elástica y dependencia al esfuerzo tanto en ligantes asfálticos modificados con polímeros y tradicionales.
- 1.3. Los valores indicados en el sistema internacional de unidades (SI) son considerados estándar.
- 1.4. Esta norma no pretende abordar todos los problemas de seguridad, si los hay, asociados a su uso. Es responsabilidad del usuario establecer prácticas apropiadas de seguridad y salud, y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.

2. Referencias

2.1. Normas AASHTO

- M 320, Performance-Graded Asphalt Binder
- M 332, Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test.
- R 28, Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV).
- T 240, Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test).
- T 315, Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR).

2.2. Normas ASTM

- D 8, Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements.

3. Terminología

3.1. Definiciones:

- 3.1.1. Las definiciones de los términos utilizados en la práctica se encuentran en la norma ASTM D 8, determinadas a partir del inglés común, o una combinación de ambas.

3.2. Definiciones específicas de esta norma:

- 3.2.1. Creep and Recovery (Fluencia y Recuperación) – Protocolo de ensayo reológico estándar mediante el cual una muestra es sometida a una carga constante durante un periodo

de tiempo fijo y luego permitir una recuperación a una carga cero constante durante un periodo fijo de tiempo.

- 3.2.2. Nonrecoverable Creep Compliance (Flexibilidad en Fluencia No Recuperable) – La deformación residual de un espécimen, después de un ciclo de fluencia y recuperación, dividido por el esfuerzo aplicado, kPa^{-1} .

4. Resumen del método de ensayo

- 4.1. Este método de ensayo se usa para determinar la presencia de respuesta elástica en un ligante asfáltico, mediante una fluencia y recuperación de corte, a dos niveles de esfuerzo a una temperatura específica. Para asfaltos especificados por nivel de desempeño (PG), la temperatura especificada normalmente corresponde al grado de alta temperatura, determinada en concordancia con la norma AASHTO M 332, sección 4. Para más indicaciones referirse a la Nota 3 en M 332.
- 4.2. El ligante asfáltico primero debe condicionarse usando el método AASHTO T 240 (HPDR). Una muestra de ligante envejecido mediante HPDR se ensaya usando T 315 (DSR). Se utiliza una configuración de discos paralelos de 25 mm de diámetro, con una separación de 1 mm. La probeta se ensaya a dos niveles de esfuerzo constante, seguidos de un intervalo de recuperación para cada nivel de esfuerzo. Los niveles de esfuerzo usados son 0.1 kPa y 3.2 kPa. El intervalo de carga dura 1 s, el cual se seguido por un intervalo de recuperación de 9 s. Se realizan diez ciclos de carga y descarga para cada nivel de esfuerzo.

5. Significancia y uso

- 5.1. Este método está diseñado para identificar la presencia de respuesta elástica en un ligante, y el cambio de la respuesta elástica a dos niveles distintos de carga al ser sometido a diez ciclos de carga Creep and Recovery. La flexibilidad en fluencia no recuperada ha demostrado ser un indicador de la resistencia de un ligante asfáltico a la deformación permanente bajo cargas repetidas.

6. Aparatos

- 6.1. Utilizar los aparatos especificados en T 315.

7. Procedimiento

- 7.1. Acondicionamiento – Acondicionar el asfalto en concordancia con T 240 (HPDR).
- 7.2. Preparación de la muestra – La probeta para el ensayo MSCR se preparan de igual forma que las probetas para T 315 en platos de 25 mm. El control de temperatura también se debe hacer de acuerdo con los requerimientos de T 315.
 - 7.2.1. Este ensayo se puede realizar sobre la misma muestra utilizada previamente para determinar las propiedades mediante DSR del residuo HPDR, según lo especificado en M 320. Cuando se haga esto, se debe aplicar un intervalo de relajación de 1-min entre ensayos, antes de realizar el MSCR. Cuando se usa una muestra nueva, no es necesario el periodo de relajación de 1-min.
- 7.3. Protocolo de ensayo – Realizar el ensayo a la temperatura especificada con un esfuerzo constante durante 1.0-s seguido de un intervalo de recuperación con esfuerzo cero durante

9.0-s. Realizar el ensayo a 0.1 kPa y 3.2 kPa. Realizar 20 ciclos a 0.1-kPa seguidos de 10 ciclos a 3.2 kPa, obteniendo un total de 30 ciclos. Usar los primeros 10 ciclos a 0.1 kPa para acondicionar la probeta. No se deben incluir de descanso entre los ciclos creep and recovery, ni entre cambios de esfuerzo. El tiempo total requerido para completar los dos pasos de creep and recovery son 300 s.

Se debe medir el esfuerzo y deformación por lo menos cada 0.1 s para el ciclo de carga y cada 0.45 s para el ciclo de recuperación en forma acumulada. Medir el punto a la máxima deformación a 1.0 s y la deformación recuperada a 10.0 s, medidos desde el inicio de cada ciclo. Extrapolar los datos previos para determinar la deformación a 1.00 s y 10.00 s si el DSR no registra el máximo y la deformación recuperada según se especifica. Los datos extrapolados deben incluir un dato medido a no más de 0.1 s previo al tiempo requerido en un ciclo de carga, ni a más 0.5 s previo en el caso de un ciclo de recuperación.

7.4. Control de equipos – Se debe lograr el esfuerzo máximo dentro de los primeros 0.03 s de iniciado el ciclo de carga, certificado por el fabricante del equipo.

7.5. Análisis – Analizar y registrar el porcentaje de deformación recuperada para los niveles de esfuerzo de 0.1-kPa y 3.2-kPa como se indica a continuación:

7.5.1. Para cada uno de los últimos 10 ciclos a 0.1-kPa y los 10 ciclos a 3.2-kPa, registrar lo siguiente:

7.5.1.1. La deformación inicial de cada intervalo de carga para cada ciclo. Esta deformación se denominará ε_o .

7.5.1.2. La deformación final de cada intervalo de carga (después de 1.0 s) para cada ciclo. Esta deformación se denominará ε_c .

7.5.1.3. La deformación ajustada al final del intervalo de carga (después de 1.0 s) para cada ciclo (ε_1), que se calcula como se muestra a continuación:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_o$$

7.5.1.4. La deformación al final del intervalo de recuperación (después de 10.0 s) para cada ciclo. Esta deformación se denominará ε_r .

7.5.1.5. La deformación ajustada al final del intervalo de recuperación (después de 10.0 s) para cada ciclo (ε_{10}), que se calcula como se muestra a continuación:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_o$$

7.5.2. Para cada uno de los últimos 10 ciclos a 0.1 kPa, calcular lo siguiente:

7.5.2.1. Porcentaje de recuperación $\varepsilon_r(0.1, N)$ para $N=11$ a 20 :

$$\varepsilon_r(0.1, N) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \times 100}{\varepsilon_1}$$

7.5.3. Para cada uno de los 10 ciclos a 3.2 kPa:

7.5.3.1. Porcentaje de recuperación $\varepsilon_r(3.2, N)$ para $N=1$ a 10 :

$$\varepsilon_r(3.2, N) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \times 100}{\varepsilon_1}$$

8. Cálculos

8.1. Usando los resultados obtenidos en las secciones 7.4.2.1. y 7.4.3.1., determinar el porcentaje de recuperación promedio para el ligante asfáltico a 0.1 kPa y 3.2 kPa, tal como se muestra a continuación:

8.1.1. Calcular el porcentaje de recuperación promedio a 0.1 kPa:

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{11}^{20} \varepsilon_r(0.1, N)}{10}$$

8.1.2. Calcular el porcentaje de recuperación promedio a 3.2 kPa:

$$R_{3.2} = \frac{\sum_{1}^{10} \varepsilon_r(3.2, N)}{10}$$

8.2. Utilizando los resultados obtenidos en las secciones 7.4.2.1. y 7.4.3.1., determinar la flexibilidad en fluencia no recuperable entre 0.1 kPa y 3.2 kPa, como se muestra a continuación:

8.2.1. Para cada uno de los últimos 10 ciclos a 0.1 kPa, calcular la flexibilidad en fluencia no recuperable, $J_{nr}(0.1, N)$, kPa^{-1} , como deformación/esfuerzo:

$$J_{nr}(0.1, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{0.1}$$

8.2.2. Para cada uno de los 10 ciclos a 3.2 kPa, calcular la flexibilidad en fluencia no recuperable, $J_{nr}(3.2, N)$, kPa^{-1} , como deformación/esfuerzo:

$$J_{nr}(3.2, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{3.2}$$

8.2.3. Calcular la flexibilidad en fluencia no recuperable promedio a 0.1 kPa, $J_{nr0.1}$, kPa^{-1} :

$$J_{nr0.1} = \frac{\sum_{11}^{20} J_{nr}(0.1, N)}{10}$$

8.2.4. Calcular la flexibilidad en fluencia no recuperable promedio a 3.2 kPa, $Jnr_{3.2}$, kPa^{-1} :

$$Jnr_{3.2} = \frac{\sum_1^{10} Jnr(3.2, N)}{10}$$

8.2.5. Calcular la diferencia porcentual de la flexibilidad en fluencia no recuperada entre 0.1 kPa y 3.2 kPa, Jnr_{diff} :

$$Jnr_{diff} = \frac{[Jnr_{3.2} - Jnr_{0.1}]x100}{Jnr_{0.1}}$$

9. Informe

9.1. Informar la siguiente información:

- 9.1.1. Identificación de la muestra;
- 9.1.2. Grado de desempeño (PG) y temperatura de ensayo, al 0.1° más cercano;
- 9.1.3. Recuperación porcentual a 0.1 kPa, $R_{0.1}$;
- 9.1.4. Recuperación porcentual a 3.2 kPa, $R_{3.2}$;
- 9.1.5. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 0.1 kPa, $Jnr_{0.1}$, con dos cifras significativas, kPa^{-1} ;
- 9.1.6. Flexibilidad en fluencia no recuperable a 3,2 kPa, $Jnr_{3.2}$, con dos cifras significativas, kPa^{-1} ; y
- 9.1.7. Diferencia porcentual entre la flexibilidad en fluencia no recuperada a 0.1 kPa y 3.2 kPa, Jnr_{diff} , al 0.1% más cercano.

10. Precisión y tendencia

- 10.1. Precisión – Los estudios para estimar la precisión no han sido llevados a cabo.
- 10.2. Tendencia – Los estudios para estimar la tendencia no han sido llevados a cabo.

11. Palabras clave

- 11.1. Ligantes asfálticos, creep and recovery, flexibilidad en fluencia, reómetro de corte dinámico (DSR), identificación elastomérica, Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR), porcentaje de recuperación, modificación con polímero.

Apéndices

(Información no obligatoria)

X1. Cálculos de muestra

X1.1. Un gráfico común consistente de 10 ciclos de creep and recovery a un esfuerzo de 0.1- kPa se muestra en la figura X1.1. El gráfico para 3.2 kPa es similar al de la figura X1.1 y se muestra. Los datos para el ciclo número 9 se muestran en la figura X1.2 para mayor detalle.

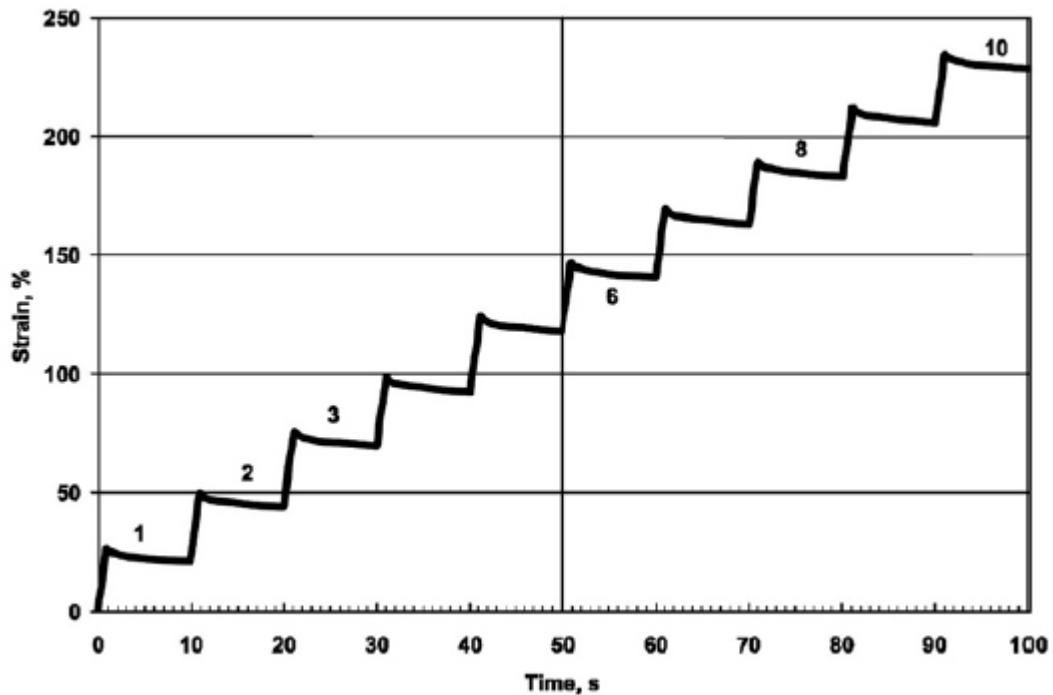


Ilustración X1.1 - Gráfico de datos mostrando 10 ciclos creep and recovery a un esfuerzo de 0.1 kPa.

X1.2. Cálculos de muestra:

X1.2.1. Cálculo de la recuperación porcentual para el ciclo 9 (ver figura X1.2).

1. Determinar deformación inicial: $\epsilon_0 = 183\%$
2. Determinar deformación a 1-s, final del ciclo de carga: $\epsilon_c = 212\%$
3. Determinar deformación ajustada a 1-s, final del ciclo de carga: $\epsilon_1 = (\epsilon_c - \epsilon_0) = (212-183)\% = 29\%$

4. Determinar deformación a 10-s, final del ciclo de recuperación: $\epsilon_r = 206.0\%$
5. Determinar la recuperación ajustada a 10-s, final del ciclo de recuperación: $\epsilon_{10} = (\epsilon_r - \epsilon_0) = (206-183)\% = 23\%$
6. Determinar el porcentaje de recuperación para el ciclo 9 a 0.1 kPa, $\epsilon_r(0.1, 9)$:

$$\epsilon_r(0.1, N) = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_{10}) \times 100}{\epsilon_1}$$

X1.2.2. Para el ciclo 9, con un esfuerzo de 0.1 kPa, el porcentaje de recuperación es:

$$\epsilon_r(0.1, N) = \frac{(29 - 23) \times 100}{29.0} = 21\%$$

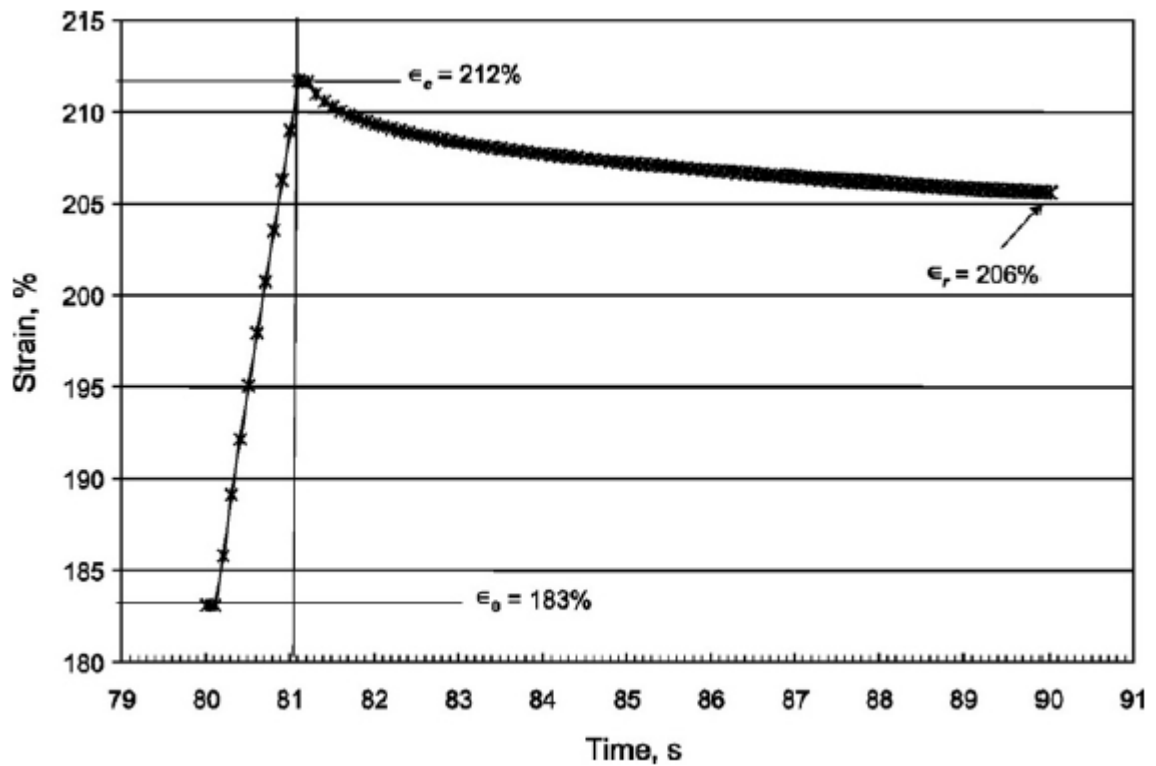


Ilustración X1.2 - Gráfico de datos mostrando el ciclo creep and recovery N°9, a un esfuerzo de 0.1 kPa.

9. REFERENCIAS

- AASHTO. (2014). *"Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)"*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2015). *"Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)"*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2015). *"Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder"*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM. (2015). *"Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer"*. West Conshohocken: American Society of Testing Materials.
- Changjiang Kou, A. K., & Wuhong, Z. (2015). *"Methods to Prepare Polymer Modified Bitumen Samples for Morphological Observation"*. Yangzhou: Yangzhou University.
- D'Angelo, J. (s.f.). *"Modified Binders and Superpave Plus Specifications"*. Federal Highway Administration.
- D'Angelo, J. (s.f.). *"Multi-Stress Creep and Recovery Test Method New Specification"*. Estados Unidos.
- D'Angelo, J. (2010). *"New High-Temperature Binder Specification Using Multistress Creep And Recovery"*. Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Fernandes, M. R., Carmargo Forte, M. M., & Mathias, L. L. (2008). *"Rheological Evaluation of Polymer-Modified Asphalt Binders"*.
- Golalipour, A., Bahia, H., & Tabatabaee, H. (2016). *Critical Considerations Toward Better Implementation of the Multiple Stress Creep and Recovery*. ASCE.

Katarawe, A., & Singh, D. (2015). *Rheological Performance of Asphalt Binders Under Different Creep and Recovery Periods in MSCR Test*. Chinese Society of Pavement Engineering.

Rodriguez, F. A. (2008). *"Análisis de Pavimento Asfáltico Modificado con Polímero"*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

Ruiz, I. V. (2010). *"Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros en los Asfaltos"*. Veracruz: Universidad Veracruzana.

Segovia, M. (2015). *"Zonificación SUPERPAVE para Chile y estudio preliminar de la influencia del cambio climático en el desempeño de pavimentos en Chile"*. Valparaíso: UTFSM.