

IAG97-01-2013
EVOLUCIÓN DEL GRADO PG EN LA CARACTERIZACIÓN DE
ASFALTOS.
PG DESEMPENHO GRAU NA CONSTRUÇÃO DE ASFALTO.

Ing. Israel Sandoval Navarro
LASFALTO S. de R.L. de C.V.
Guadalajara, México
israel@surfax.com.mx
Ing. Ignacio Cremades Ibáñez
SURFAX S.A. de C.V.

Resumen

Las metodologías para la caracterización de asfaltos para pavimentos, han intentado predecir, mediante diversos parámetros, el desempeño que éste tendrá en campo. Actualmente en México, el parámetro $G^*/\sin\delta$ es empleado para medir la resistencia de los asfaltos a la deformación permanente. Éste parámetro es parte de la clasificación de grado PG (**Perfomance Grade**), desarrollada en Estados Unidos por la FHWA (**Federal Highway Administration**) bajo el programa SHARP (**Strategic Highway Research Program**). $G^*/\sin\delta$ ha evolucionado a un nuevo parámetro: " J_{nr} " (**Non Recoverable Creep Compliance**), que a su vez deriva de una prueba de Creep Repetido Multi-esfuerzo, MSCR (**Multi Stress Creep and Recovery**), la cual simula de mejor manera las condiciones de trabajo a las que el asfalto será sometido en el pavimento, **haciendo énfasis en la resistencia a la deformación permanente**. Esta metodología simula mejor el mecanismo de falla, siendo ciega a la naturaleza del asfalto, es decir, que un asfalto podrá ser aceptado siempre y cuando cumpla con las exigencias que han sido definidas para fines de garantizar la vida útil del proyecto. Adicionalmente se propone una clasificación por niveles de tráfico, así, un asfalto será seleccionado dependiendo de las condiciones del clima y del número de ejes equivalentes considerados en el proyecto. En el presente trabajo se evalúan diferentes asfaltos mediante $G^*/\sin\delta$ y J_{nr} , se determina su clasificación bajo estos dos métodos y las condiciones de tráfico para las cuales podrían trabajar adecuadamente en el pavimento.

Resumo

Metodologias de Caracterização para pavimentação de asfalto, têm tentado prever, através de vários parâmetros, isto terá o desempenho no campo. Atualmente no México, o parâmetro $G^*/\sin\delta$ é usado para medir a resistência do asfalto a uma deformação permanente. Este parâmetro faz parte da classificação de grau de PG (**Grade Perfomance**), desenvolvido nos Estados Unidos pelo FHWA (**Administração Federal Highway**) no âmbito do programa SHARP (**Programa de Pesquisa Estratégica da estrada**). $G^*/\sin\delta$ evoluiu para um novo parâmetro: " J_r " (**Compliance Creep não recuperável**), que por sua vez deriva repetida Creep Teste Multi-esforço, MSCR (**Multi Estresse Creep e Recuperação**), que melhor simula forma como as condições de trabalho a que o asfalto será submetido na calçada, com ênfase na resistência à deformação permanente. Esta abordagem melhor simula o mecanismo de falha, ser cego à natureza do asfalto, ou seja, asfalto pode ser aceite, desde que preencham os requisitos que foram definidos para fins de garantir a vida do projeto. Além disso, propomos uma níveis de classificação de tráfego, bem como, um asfalto serão selecionados dependendo das condições climáticas e do número de eixos equivalentes considerados no projeto. Neste trabalho, avaliar diferentes asfaltos por $G^*/\sin\delta$ e

Jnr, a classificação é determinada por estes dois métodos e condições de tráfego que poderia funcionar bem no asfalto.

INTRODUCCIÓN

La clasificación de asfaltos por grado PG ha tomado gran importancia en México. Es bien sabido que la metodología para clasificación de asfaltos por grado PG presenta algunas debilidades, ya que no permite discernir entre asfaltos que, aunque cumplen con el grado PG, no tendrán un buen desempeño en el pavimento en términos de su vida útil. En Estados Unidos se ha evolucionado a técnicas mejoradas como la PG Plus con la intención de evitar el uso de asfaltos “endurecidos”. Dicha técnica exige que, no solo se solicite un grado PG para el asfalto, sino que adicionalmente se realice una prueba de recuperación elástica por ductilómetro. Recientemente se ha incorporado el **parámetro “J_{nr}”** con la finalidad de reforzar el grado PG, ya que predice de mejor forma el comportamiento futuro del asfalto en el pavimento. Con la finalidad de mejorar la exactitud para predecir el desempeño del asfalto en un pavimento y que éste cumpla con la vida útil diseñada para el mismo, “J_{nr}” (Non-recoverable Creep Compliance) existe como un parámetro efectivo y probado. “J_{nr}” es la deformación no recuperable (deformación permanente) generada al aplicar una unidad de esfuerzo. Este valor es calculado de la siguiente manera:

$$J_{nr} = \frac{\text{Deformación no recuperada}}{\text{Esfuerzo aplicado}}$$

“A menor J_{nr}, menor será la deformación permanente al aplicar una carga”.

Este parámetro se calcula a partir de los datos obtenidos de la prueba de MSCR.

El uso de la clasificación por grado PG en conjunto con “J_{nr}”, ofrece información mucho más valiosa ya que permite evaluar propiedades del asfalto como: Deformación permanente generada por unidad de esfuerzo, respuesta elástica, dependencia del comportamiento a diferentes niveles de esfuerzo, memoria elástica, capacidad elástica real, deformación total acumulada.

Éste conjunto de propiedades permite, **a partir de las condiciones climatológicas existente en la zona del proyecto y del número de ejes equivalentes** considerados para el mismo, seleccionar **asfaltos óptimos**. Es importante recordar que esta prueba se corre en la pastilla de asfalto RTFO en la que se determino G*/senδ y a la misma temperatura por lo que no hay que manipular la muestra, requiriendo solo de un minuto de reposo antes de que inicie la prueba MSCR. Dado el limitado espacio para estos documentos técnicos no se explica el procedimiento detallado, se recomienda revisar la metodología ASTM y/o AASHTO.

Prueba de creep repetido multi-esfuerzo, MSCR (Multi-Stress Creep & Recovery).

Es muy importante resaltar, que durante el periodo “recovery”, el reómetro de corte dinámico no realiza otra acción más que la de medir la respuesta del asfalto, por lo que las mediciones en el segmento de recuperación, dependen totalmente de la “memoria elástica” del asfalto. Esto no ocurre en la metodología actual para determinar G*/senδ en la que el reómetro se encarga de regresar el material a la posición original.

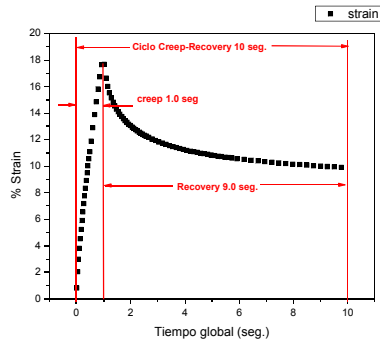


Fig. 1- Tiempos ciclo Creep-Recovery.

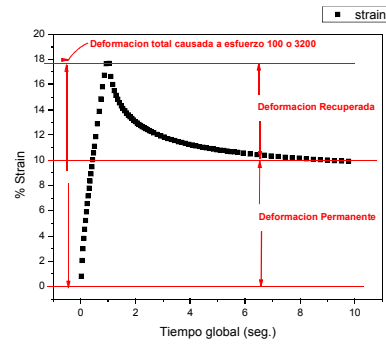


Fig.2- Deformaciones ciclo Creep-Recovery.

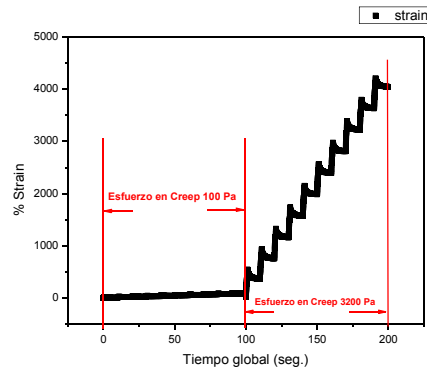


Fig. 3- Ciclos Creep-Recovery a 100 Pa y, ciclos Creep-Recovery a 3200 Pa.

Al aplicar dos niveles de esfuerzo, 100 y 3200 Pa, se puede evaluar la dependencia de la capacidad elástica del asfalto ante el esfuerzo de corte. La diferencia entre el comportamiento elástico del asfalto a los dos niveles de esfuerzo, junto con la deformación total alcanzada al final de la prueba, dan información sobre la estabilidad y fuerza de la estructura del asfalto.

Análisis de datos.

En cada ciclo Creep-Recovery es necesario registrar cada uno de los siguientes parámetros:

ϵ_0 Valor inicial para la deformación en el principio del segmento Creep para cada ciclo.

ϵ_c Valor de la deformación al final del segmento Creep para cada ciclo.

ϵ_1 Valor de la deformación total en el segmento Creep de cada ciclo, calculado como $\epsilon_c - \epsilon_0$.

ϵ_r Valor de la deformación al final del segmento de recuperación de cada ciclo, es la deformación total acumulada hasta este ciclo.

ϵ_{10} Valor de la deformación al final del segmento de recuperación de cada ciclo, calculado como $\epsilon_r - \epsilon_0$, es la deformación no recuperada en cada ciclo.

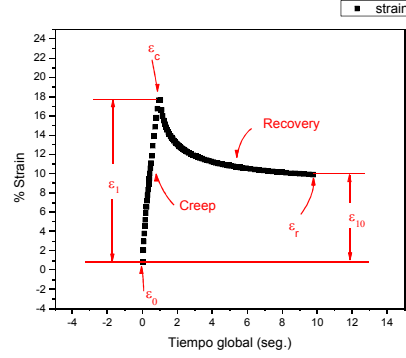


Fig. 6-Datos a registrar en un ciclo Creep-Recovery.

Cálculos para obtener respuesta elástica:

La respuesta elástica para cada uno de los ciclos a 100 Pa y 3200 Pa, se calcula de acuerdo a las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$RE(100, N) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) * 100}{\varepsilon_1} \quad RE(3200, N) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) * 100}{\varepsilon_1}$$

Con estos resultados se calcula el promedio de las respuestas elásticas (RE) para los dos niveles de esfuerzo, 100 y 3200 Pa, según las ecuaciones siguientes:

$$\%RE(100, prom.) = \Sigma(RE(100, N))/10 \quad N = 1 \text{ a } 10$$

$$\%RE(3200, prom.) = \Sigma(RE(3200, N))/10 \quad N = 1 \text{ a } 10$$

El valor absoluto de la diferencia entre los porcentajes de respuesta elástica a 100 y 3200 Pa, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Rdif(100Pa - 3200Pa) = \%RE(100, prom.) - \%RE(3200, prom.)$$

- El valor obtenido muestra la susceptibilidad de la respuesta elástica a la variación del esfuerzo aplicado.
- Un valor elevado en la susceptibilidad de la respuesta elástica al nivel de esfuerzo, indica debilidad en la estructura del asfalto.

Cálculos para J_{nr} (Non-Recoverable Creep Compliance)

Para cada uno de los ciclos a 100 Pa y 3200 Pa es posible calcular J_{nr100} y J_{nr3200} como sigue, respectivamente:

$$J_{nr,100}(100, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{100} \quad J_{nr,3200}(3200, N) = \frac{\varepsilon_{10}}{3200}$$

Con estos resultados se calcula el promedio de J_{nr} para los diez ciclos en los dos niveles de esfuerzo, 100 y 3200 Pa.

$$J_{nr,100}(100, prom.) = \Sigma(J_{nr,100}(100, N))/10 \quad N = 1 \text{ a } 10$$

$$J_{nr,3200}(3200, prom.) = \Sigma(J_{nr,3200}(3200, N))/10 \quad N = 1 \text{ a } 10$$

Diferencia en porcentaje entre J_{nr} a 100 y 3200 Pa

$$Jnr_{dif}(100Pa - 3200Pa) = \frac{J_{nr,3200}(3200, prom.) - J_{nr,100}(100, prom.)}{J_{nr,100}(100, prom.)} \bullet 100$$

Diferencias grandes de “Jnr” entre 100 y 3200 Pa, indica facilidad para acumular deformaciones.

Es importante tomar en cuenta la deformación total acumulada al final de los 20 ciclos. Este dato pone de manifiesto **la resistencia del asfalto a la deformación**, así como **su capacidad de recuperarse ante las deformaciones**.

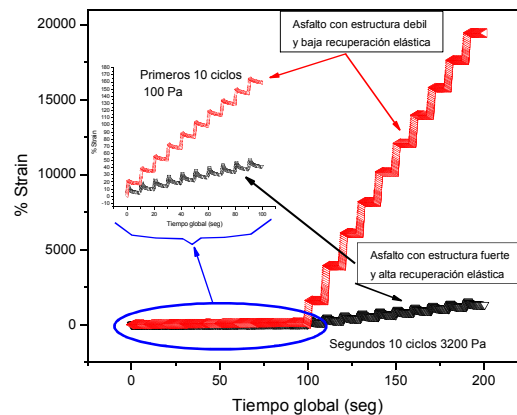


Fig.7- Deformación total acumulada o deformación permanente.

“Jnr” como herramienta para el diseño de pavimentos

Como se explicó anteriormente, “Jnr” funciona en conjunto con la metodología actual de grado PG. El asfalto se selecciona de acuerdo al clima, tal y como lo designa el procedimiento de Superpave y a éste se le suma la variable del tráfico (número de ejes equivalentes) contemplado en el proyecto, de acuerdo a los siguientes niveles:

Temperatura	Intensidad de tráfico (ejes equivalentes)	Grado	“J _{nr,3200} ”	RE ₃₂₀₀ (%)
Seleccionada de acuerdo al mapa de regiones geográficas (zonas por clima)		No cumple	> 4	
	< 3 millones	Estándar (S)	2 a 4	>0
	> 3 < 10 millones	Pesado (H)	1 a 2	>25
	> 10 < 30 millones	Muy Pesado (V)	0.5 a 1	>30
	> 30 millones	Extremo (E)	> 0.5	>40

RE₃₂₀₀: Respuesta elástica a 3200Pa.

Entonces:

- Si por clima se requiere un asfalto PG 70-22 y el tráfico esperado es mayor que diez pero menor que 30 millones de ejes equivalentes, el asfalto deberá cumplir un valor de “Jnr” entre 1,0 y 0,5 y por lo tanto, se clasificará como un PG 70-22V.

A continuación se presentan las posibles variantes, dependiendo del nivel de tráfico contemplado en el diseño. Para este ejemplo:

Ejemplo de clasificación por intensidad de tráfico para un PG 70-22			
70-22 S Tráfico Estándar	70-22 H Tráfico Pesado	70-22 V Tráfico Muy Pesado	70-22 E Tráfico Extremo

De tal manera que la selección de un asfalto para un proyecto determinado va direccionada tanto por el clima como por los ejes equivalentes.

PARTE EXPERIMENTAL

Para la realización de este estudio se emplearon cinco asfaltos diferentes. Este parámetro es “ciego” ante el proceso de producción por el cual ha pasado el asfalto y los productos que se han empleado para producirlo.

Estos asfaltos se identificaron como “A”, “B”, “C”, “D” y “F” y solo se hace referencia a ciertas características empíricas y a su desempeño. Todos estos asfaltos fueron clasificados como PG76-16, excepto el “A” que es PG64-16. Los resultados se presentan más adelante:

Análisis empírico

Se realizó un análisis empírico a todas las muestras, que incluye las siguientes pruebas, se emplearon metodologías de la normativa mexicana:

Resultados

PRUEBA	A	B	C	D	F
Penetración a 25°C (1/10mm)	51	43	46	45	36
Reblandecimiento (°C)	50	63	57	58	60
Rec. Elástica por Torsión 25°C (%)	6	53	29	12	54
Viscosidad Rotacional 135°C (cps)	462	1900	868	903	1170
Pérdida de masa por calentamiento (%)	1,67	1,45	1,60	1,57	1,50
Penetración a 25°C (1/10mm)	15	20	20	15	15
Rec. Elástica por Ductilometro 25°C (%)	4	63	20	8	73

Los resultados del análisis empírico muestran:

- Las diferencias existentes entre en las recuperaciones elásticas, por torsión y ductilometro.
- “B” y “F” presentan recuperaciones elásticas altas, a diferencia de los “A”, “C” y “D”.

Clasificación por grado PG

Se determinó el grado de desempeño empleando el método SHRP-SUPERPAVE conforme a la metodología AASHTO TP-5 o su homólogo en la normativa Mexicana M-MMP-4-05-025/02, se emplearon metodologías ASTM:

Resultados

PRUEBA	A	B	C	D	F
Análisis al asfalto original					
Módulo reológico de corte dinámico 76°C [G*/senδ]	1,51 (64°C)	1,62	1,12	1,30	1,39
Ángulo de fase (δ) 76°C (°)	84,23 (64°C)	63,76	82,80	78,50	80,65
Análisis del residuo de la prueba de la película delgada RTFO ASTM D 2872					
Pérdida de masa por calentamiento 163 °C (%)	1,67	1,45	1,60	1,57	1,50
Módulo reológico de corte dinámico 76°C [G*/senδ]	8,67 (64°C)	4,64	4,48	5,08	6,24
Ángulo de fase (δ) 76°C (°)	76,91 (64°C)	58,40	75,35	68,79	66,70
Análisis del residuo de la prueba de envejecimiento a presión PAV ASTM D 6521					
Módulo reológico de corte dinámico 34 °C [G*/senδ]	3625 (28°C)	1691	1954	1958	1458
Rigidez en creep -6°C, 60s S(t), (MPa)	96,19	140,65	140,63	95,81	117,77
Valor m(t) A -6°C, 60s, (adimensional)	0,335	0,307	0,302	0,330	0,328
GRADO	PG64-16	PG76-16	PG76-16	PG76-16	PG76-16

Los resultados de la caracterización por grado PG muestran las diferencias existentes entre los diferentes asfaltos analizados, principalmente **en ángulos de fase**:

- “B” presenta ángulos de fase más bajos, lo cual denota un comportamiento más elástico que los demás, así como una mayor resistencia a la deformación y mayor capacidad de recuperarse ante las deformaciones.
- “B” y “F” presentan viscosidades más altas, lo que representa mayor resistencia al flujo.

Cabe señalar que los asfaltos “B”, “C”, “D” y “F” están clasificados como PG76-16 lo que desde el punto de vista de la clasificación actual de grado PG, se esperaría que presentaran comportamientos similares.

Prueba de creep repetido multi-esfuerzo, MSCR (Multi-Stress Creep and Recovery)

Esta metodología se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones (ASTM 7405-10):

- Se realizaron 20 ciclos Creep-Recovery divididos en 2 segmentos de 10 ciclos cada uno:
 - **Primeros 10 ciclos:** Esfuerzo de 100 Pa, período de Creep de 1 segundo y 9 segundos en el período de Recovery (Recuperación).
 - **Segundos 10 ciclos:** Se empleó un esfuerzo de 3200 Pa con un periodo de Creep de 1 segundo y 9 segundos en el periodo de Recovery (Recuperación).

Resultados:

Cálculos para respuesta elástica.

En la siguiente sección se presenta un comparativo entre los resultados de respuesta elástica en Creep Repetido, a 100 y 3200 Pa, para los diferentes asfaltos, así como la diferencia entre las respuestas elásticas a estos dos niveles de esfuerzo:

Resultados a 76°C

Tipo de Asfalto	Temp. de Prueba	RE a 100 Pa (%)	RE a 3200 Pa (%)	Rdif (100Pa-3200Pa) (%)
A	64	9	8	1
B	76	75	72	3
C	76	16	0 (-5)	21
D	76	37	7	30
F	76	21	7	14

RE : Respuesta elástica en Creep Repetido. Rdif : Diferencia entre RE a 100 Pa y RE a 3200 Pa.

Los números negativos indican que al retirar el esfuerzo el asfalto se sigue deformando.

Es importante establecer un valor mínimo a la respuesta elástica a 3200 Pa, porque algunos asfaltos pueden presentar buena elasticidad a 100 Pa, pero al aumentar el nivel de esfuerzo, se produce una caída importante en este parámetro (respuesta elástica).

La diferencia entre la respuesta elástica a 100 y 3200 Pa, se debe tomar en cuenta porque así se garantiza que la estructura del asfalto es resistente y estable al recibir una carga. La estabilidad puede estimarse basándose en la linealidad de su comportamiento elástico al variar el esfuerzo.

Cálculos para J_{nr} (non-recoverable creep compliance)

En la siguiente sección se presenta un comparativo entre los resultados de los diferentes asfaltos, J_{nr} (non-recoverable creep compliance), a 100 y 3200 Pa, la diferencia entre J_{nr} a estos dos niveles de esfuerzo, la respuesta elástica y la deformación máxima acumulada.

Resultados a 76°C

Tipo de Asfalto	Temp. de Prueba	J_{nr} a 100 Pa	J_{nr} a 3200 Pa	J_{nr} dif (100Pa-3200Pa) (%)	RE a 3200 Pa (%)	Def. máxima acumulada
-----------------	-----------------	-------------------	--------------------	---------------------------------	------------------	-----------------------

A	64	0,874	1,001	14,55	8	3244
B	76	0,253	0,237	0	72	964
C	76	1,948	5,002	156,70	0 (-5)	16300
D	76	0,645	1,053	63,11	7	3501
F	76	0,974	1,292	32,58	7	4329

Jnr : Creep Compliance. Jnr_{dif} : Diferencia entre Jnr a 100 Pa y Jnr a 3200 Pa. RE: Respuesta elástica.

Def. máxima acumulada: Deformación alcanzada al final de los 20 ciclos Creep-Recovery.

Como se puede apreciar en la tabla anterior:

- Los resultados de “J_{nr}” tienen una directa relación con la deformación acumulada.
- A menor valor de “J_{nr}”, menor es la deformación acumulada.
- El asfalto “B” presenta los valores más bajos de “J_{nr}”.
- El asfalto “C” a 100 Pa presenta un valor de “Jnr” intermedio.
- El asfalto “D” tiene buenos valores de “Jnr”.
- El asfalto “F” tiene buenos valores de “Jnr”.

Más adelante en éste documento, se determina el nivel de tráfico para el cual son aptos estos asfaltos, ya que son PG76-16, y a esta temperatura se clasifica el nivel de tráfico basado en “Jnr”.

A continuación se presentan las gráficas comparativas de los resultados obtenidos en la prueba MSCR con los diferentes asfaltos RTFO.

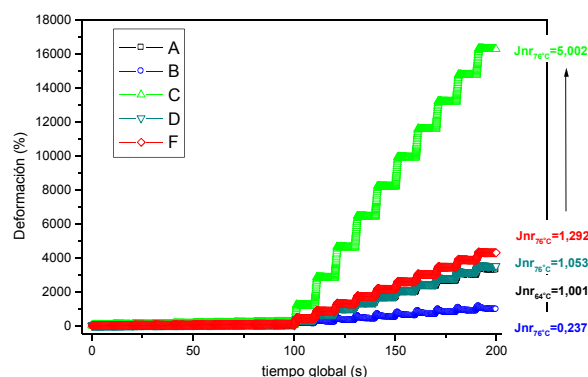


Fig. 8-Deformación vs tiempo a 76°C.

En los valores graficados de deformación se observa claramente la relación entre “Jnr” y la deformación permanente: a menor “Jnr”, menor deformación permanente.

Nivel de tráfico basado en Jnr.

No obstante que los asfaltos “B”, “C”, “D” y “F” son iguales bajo el protocolo de PG 76-16, son aptos para condiciones de tráfico diferentes, lo que se confirma a través de su valor “Jnr”:

Temperatura	Intensidad de tráfico (ejes equivalentes)	Grado	“J _{nr,3200} ”	RE ₃₂₀₀ (%)
Seleccionada de acuerdo al mapa de regiones geográficas (zonas por clima)		No cumple	> 4	
	< 3 millones	Estándar (S)	2 a 4	>0
	> 3 < 10 millones	Pesado (H)	1 a 2	>25
	> 10 < 30 millones	Muy pesado (V)	0.5 a 1	>30
	> 30 millones	Extremo (E)	> 0.5	>40

RE₃₂₀₀: Respuesta elástica a 3200Pa.

Grado de desempeño pg y nivel de tráfico.

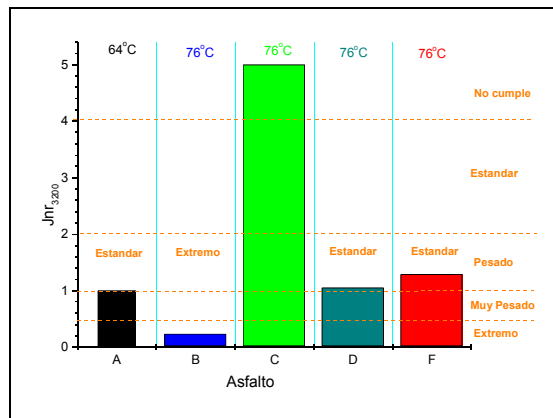


Fig. 10- "Jnr₃₂₀₀" para los asfaltos RTFO.

Dado que los asfaltos "A", "D" y "F", presentan Respuestas elásticas bajas, son aptos para tráfico Estandar.

Asfalto	PG	Jnr ₃₂₀₀	RE a 3200 Pa (%)	Intensidad de tráfico	Grado
A***	PG 64-16	1,001	8	< 3 millones	PG 64-XX S
B*	PG 76-16	0,237	72	> 30 millones	PG 76-XX E
C**	PG 76-16	5,002	0 (-5)	No cumple*	No cumple*
D***	PG 76-16	1,053	7	< 3 millones	PG 76-XX S
F***	PG 76-16	1,292	7	< 3 millones	PG 76-XX S

* El asfalto "B" presenta valores de J_{nr,3200} y RE₃₂₀₀ adecuados para un tráfico extremo.

* *C no es apto para trabajar como un PG76-16. Posiblemente a una temp. más baja, cumpla con éstos parámetros.

*** Estos asfaltos aunque tienen valores de J_{nr,3200} "aceptables", presentan valores de respuesta elástica bajos, por lo que se clasifican como aptos para tráfico estándar.

El asfalto a utilizar en el diseño de un proyecto, se selecciona por criterios de clima y nivel de tráfico.

CONCLUSIONES.

- 1- Dado que la vida útil de un pavimento asfáltico está directamente relacionada con el número de ejes equivalentes considerados en el diseño de un proyecto, el parámetro "Jnr" se convierte en una herramienta fundamental y determinante para alcanzar dicho objetivo.
- 2- La metodología de Creep Repetido (MSCR) ofrece información más exacta y por ende, más valiosa, sobre el desempeño esperado de un asfalto en el pavimento.
- 3- Esta metodología puede evitar el uso de asfaltos "endurecidos" que no tendrán un buen desempeño en el pavimento. Además, podrá disminuir el tiempo y el costo de los análisis, asegurando la selección adecuada de un asfalto dependiendo de las condiciones climatológicas y de tráfico a las que será sometido el pavimento.

- 4- El parámetro “Jnr” (non-recoverable Creep compliance) determina de manera más exacta y más práctica, la resistencia de un asfalto ante la deformación permanente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. J. D’Angelo, R. Dongre, G. Reinke, “Evaluation of Repeated Creep and Recovery Test Method as an alternative to SHRP+ requirements for polymer Modified Asphalt Binders.
2. J. D’ Angelo, R. Kluttz, R. Dongre. K. Stephens, L. Zanzotto., “Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Recovery Test”.
3. D’Angelo, J., Dongre, R., “Development of a High Temperature Performance Based Binder Specification in the United States”.
4. Guidance on the Use of the MSCR Test with the AASHTO M320 Specification Asphalt Institute, Dec. 2010.
5. Sandoval I. Cremades I., “Caracterización de asfaltos mediante creep repetido multi-esfuerzo en reómetro de corte dinámico”. V Congreso Mexicano del Asfalto, Agosto 2007.