

EVALUACIÓN DE UN ASFALTO COMERCIAL CON LA ADICIÓN DE NANOSILICA Y ANALISIS DEL DESEMPEÑO EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA.

]Francisco Morea¹, Teresa María Pique²

¹ Departamento de Construcciones, Facultad de ingeniería UNLP - CONICET, La Plata, Argentina, francisco.morea@ing.unlp.edu.ar, franciscomorea@conicet.gov.ar

² Instituto de Tecnología en Polímeros y Nanotecnología (ITPN UBA-CONICET), Laboratorio de Materiales y Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Resumen

La incorporación de nanocompuestos se utiliza para mejorar las características del asfalto para obtener una mezcla con mejor desempeño. El potencial de los nanocompuestos se puede evaluar estudiando el comportamiento reológico del asfalto "modificado" relacionado este con el desempeño en mezclas. En Argentina no hay investigaciones en este momento sobre la modificación del asfalto con nanocompuestos. En este trabajo, se estudió la incorporación de nanosilica a un convencional comercial. Estos representan un estudio preliminar sobre los cambios medidos por la incorporación de nanosilica en las propiedades tradicionales, así como en las medidas reológicas como el grado de desempeño y otras propiedades relacionadas con el rendimiento del asfalto como son: la low shear viscosity (LSV), Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), ensayos de fatiga entre otros. Además, se realizaron ensayos de desempeño (ahuellamiento, fractura, daño por humedad) en mezcla elaborada con estos asfaltos modificados. La nanosilica mejora las propiedades tradicionales como la viscosidad y el punto de ablandamiento como se esperaba. Se modificó el grado de desempeño (aumentó la temperatura de alta del PG y se presentó un mejor comportamiento a temperaturas bajas e intermedias). Los asfaltos modificados con nanosilica mostraron deformaciones permanentes más bajas en la prueba de MSCR y también mejoras en el comportamiento de fatiga del asfalto.

Palabras Clave: Asfaltos, Nanosilica, desempeño de mezclas

1 Introducción

Los pavimentos asfálticos son uno de los elementos más costosos en la construcción de carreteras. Además, son los que más inversión en mantenimiento requieren. El buen desempeño de un concreto asfáltico es crucial para ofrecer óptima resistencia frente las cargas de los vehículos, reducir la tensión hacia las capas inferiores y soportar los cambios de temperatura y condiciones climáticas [1]. Se requiere un concreto asfáltico adecuado y duradero. Una forma de conseguirlo es obteniendo o mejorando el comportamiento de los ligantes asfálticos. Una forma de mejorarlos son los nanomateriales. Los nanomateriales se utilizan ampliamente en ingeniería para optimizar las propiedades de los materiales de construcción tradicionales como el acero y el hormigón [2-5]. La adición o incorporación al asfalto de nanocompuestos no es la excepción. El asfalto modificado con nanomateriales se puede encontrar en

diferentes investigaciones [6-12]. Su adición mejora el comportamiento del asfalto y la mezcla asfáltica frente al ahuellamiento, fatiga, fisuración y daño por humedad. Además, se encontró que la adición de nanomateriales también produce mejoras en el envejecimiento [8], la autocuración [9] y el comportamiento reológico del ligante [12].

La Nanosilica es un nanocompuesto que es como se denomina generalmente al polvo amorfo de dióxido de silicio de tamaño nanométrico con una gran área específica. Se produce bajo diferentes métodos de producción, como sol-gel, vaporización, precipitación o procesos biológicos [13]. La nanosilica se puede utilizar en forma de polvo o suspensión coloidal [14]. Yao et al. [15] y Zafari et al. [16] estudiaron la adición de nanosilica a un asfalto y concluyeron que la nanosilica se puede utilizar para mejorar las propiedades anti envejecimiento. Además, otros investigadores demostraron el efecto beneficioso de la nanosilica en las propiedades del asfalto y el comportamiento en mezcla asfáltica.

El potencial de los nanomateriales puede evaluarse estudiando el comportamiento reológico del asfalto modificado. Se ha demostrado que las propiedades reológicas, que contribuyen significativamente al desempeño final del pavimento asfáltico, están relacionadas con las estructuras del asfalto a micro y nano escala [17]. Las mediciones reológicas relacionadas con el comportamiento de asfaltos modificados con nanosilica pueden proporcionar información útil para caracterizarlo [18-19].

Actualmente, no hay investigaciones en Argentina sobre asfaltos modificados con nanomateriales. En este estudio se estudió la incorporación de nanosilica a un asfalto convencional comercial. Los resultados obtenidos representan un estudio preliminar sobre los cambios medidos en el asfalto cuando se modifica con este nanocompuesto. Se midieron propiedades tradicionales y reológicas del asfalto (como el grado de desempeño y otras propiedades relacionadas con el desempeño como Low Shear Viscosity, Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), ensayos de fatiga). Adicionalmente, se realizaron pruebas de desempeño sobre una mezcla asfáltica elaborada con estos ligantes con nanomateriales en lo que hace al ahuellamiento y fractura.

2 EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

El estudio se desarrolló sobre un asfalto convencional CA-30 (IRAM-IAPG 6835) al que se incorporó una nanosilica (NS) comercial. Las tablas 1 y 2 muestran las principales características de estos materiales. Se incorporó la NS al asfalto en dosis de 1, 2 y 4% en peso de ligante mediante un mezclador Silverson L5M-A siguiendo el siguiente procedimiento. Se calentó el asfalto en horno hasta 160 ° C y luego se colocó en una placa caliente para mantener la temperatura. Se añadió un tensoactivo al asfalto para obtener una dispersión adecuada de la NS. Luego se incorporó lentamente la NS al asfalto mezclando durante una hora a una velocidad de agitación de 3000 RPM.

Con el objetivo de una mejor caracterización, se realizó una muestra del asfalto solo, sin NS (control), en el Silverson con el surfactante durante una hora para exponerlo al mismo procedimiento y potencial envejecimiento que sufren los asfaltos con NS. Los diferentes asfaltos fueron sometidos al proceso de envejecimiento en RTFOT (IRAM 6839) y PAV (AASHO R28) para su posterior caracterización.

Tabla 1. Principales propiedades del asfalto CA30.

Penetración a 25 °C (0.1mm)	IRAM 6576	58
Punto de ablandamiento (°C)	IRAM 6841	51,8
Viscosidad a 60 °C (Pa.s)	IRAM 6837	304,5
performance Grade (PG)	AASHTO M320	64-22

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de la nanosilica.

Superficie Especifica BET (m2/g)	200±15
Valor de pH en 4% dispersión	3,8-4,2
Perdida en secado (105°C, 2h) (%Peso)	≤ 1,5
Perdida en ignición (1000°C, 2h) (%Peso)	≤ 2
SiO ₂ (wt%)	99,9
Densidad Aparente (g/l)	40-46

Los estudios de comportamiento sobre mezcla asfáltica se realizaron sobre la base de un concreto asfáltico denso (CAC D19). La proporción de agregados y las principales propiedades de esta mezcla se muestran en la Tabla 3.

Table 3. Asphalt concrete characteristics.

Proporciones de la mezcla		CACD19
Agregado grueso 6-20 mm (Granítico)	[%]	25,7
Agregado grueso 6-12 mm (Granítico)	[%]	11,4
Agregado fino 0-6 mm (Granítico)	[%]	55,2
Filler (Calcáreo)	[%]	2,86
Asfalto	[%]	4,80
Principales propiedades		
Densidad	[g/cm ³]	2,420
Vacios	[%]	3,9
Vacios del agregado mineral	[%]	15,7
Estabilidad	[kN]	17,3
Fluencia	[mm]	3,0

Las mezclas y los asfaltos se identificaron según las siguientes nomenclaturas; C para control (sin NS) y NS1, NS2 y NS4 en referencia a la dosis de NS (1, 2 y 4% respectivamente).

2.2 Ensayos

El objetivo principal del trabajo es evaluar la mejora potencial que se genera sobre un ligante convencional mediante la adición de un nanocompuesto como es la NS. Se realizaron varias pruebas tradicionales y reológicas a los diferentes asfaltos y sobre mezclas asfálticas elaboradas con los mismos. La Tabla 4 muestra el plan de ensayos seguido.

Tabla 4. Plan de ensayos.

Ensayos tradicionales	Norma	T (°C)
Penetración	IRAM 6576	25
Punto de ablandamiento	IRAM 6841	-
Ductilidad	IRAM 6579	25
Viscosidad	IRAM 6837	60-135-150-170
Ensayos reológicos		
Grado de desempeño (PG)	ASTHO M320	-
Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	[19]	60
Low Shear Viscosity (LSV)	[20]	60
Barrido de frecuencias	[21]	10 a 70
Barrido de tiempo	[21]	20 y 30
Ensayos de desempeño		
Wheel tracking	IRAM 6850	60
Fractura	[22]	0
Resistencia a tracción indirecta	IRAM	25

3 RESULTADOS

3.1 Propiedades de los ligantes con NS

El objetivo de este trabajo fue observar el impacto en varias propiedades de un asfalto convencional por la adición de NS en diferentes dosis. Inicialmente se investigaron las propiedades de caracterización tradicionales. La Tabla 5 muestra los resultados de las principales propiedades. Se observa allí como la incorporación de NS disminuye la penetración y aumenta el punto de ablandamiento, así como la viscosidad a 60 ° C. La viscosidad se incrementó en todas las temperaturas medidas; aumentando notablemente mientras aumenta la dosis de NS. Esto ofrece ventajas frente al ahuellamiento. La ductilidad de los asfaltos con NS en estado original no se ve afectada con dosis de 1 y 2% de NS. Después de RTFOT, la ductilidad de los asfaltos con NS se ve afectada, pero cumplió con los requisitos de la especificación. En el asfalto NS4 la ductilidad se vio afectada tanto en estado original como envejecido en RTFOT. En carácter general se observa que la pérdida de masa en los asfaltos con NS es pequeña, del mismo orden e incluso inferior a la del asfalto convencional. Un aspecto interesante es que el índice de durabilidad sigue siendo el mismo para todos los betunes estudiados a pesar del aumento de viscosidad. Se puede observar que la adición de NS aumenta la temperatura de elaboración del asfalto. En el caso de NS4, esta temperatura podría resultar poco propicias.

Tabla 5. Resultados de propiedades tradicionales de los ligantes.

		C	NS1	NS2	NS4
Penetración	(0.1 mm)	51	50	47	45
Punto de ablandamiento	(°C)	52,8	55,6	56,4	56,0
Ductilidad	(cm)	>150	>150	>150	110
Viscosidad	(Pa.s)				
T (°C)					
60		371,9	406,0	497,0	644,0
135		0,61	0,66	0,85	1,14
150		0,30	0,35	0,42	0,56
170		0,14	0,16	0,19	0,25
T° de mezclado	(°C)	166	169	174	182
T° de compactación	(°C)	154	157	161	168
RTFOT					
Pérdida de masa	(%)	0,19	0,19	0,14	0,13
Ductilidad	(cm)	>150	100	72	85
Viscosidad @ 60 °C	(Pa.s)	744,0	786,0	1024,0	1374,0
Índice de Durabilidad		2,0	1,9	2,1	2,1

Según la clasificación por grados de desempeño de Superpave, todos los asfaltos con NS son PG 64-22 como el asfalto de control. Sin embargo, la NS influye en el comportamiento del asfalto base. La Figura 1 muestra lo que se denomina la temperatura de alta verdadera del PG. Ésta es la temperatura a la que se alcanzan los valores de umbral del parámetro $G^* / \sin \delta$ de la clasificación para los estados original y RTFOT. Se puede observar cómo la adición de NS mejoró el comportamiento del asfalto, aumentando las ventanas de alta temperatura en las que se puede exponer el asfalto sin sufrir ahuellamiento. Es interesante observar el delta de temperatura (ΔT) obtenido entre ambos estados, original y RTFOT. Se puede ver que C experimenta una ΔT más alta (4 °C). Mientras tanto, en los asfaltos con NS, ambas temperaturas están más cerca (ΔT alrededor de 1,6 a 2,4). Es importante recordar que la menor de ambas temperaturas determina la calificación final de PG a alta temperatura. Está claro que C sufre una mayor degradación que los asfaltos con NS. La NS tienen un efecto positivo sobre el envejecimiento del asfalto.

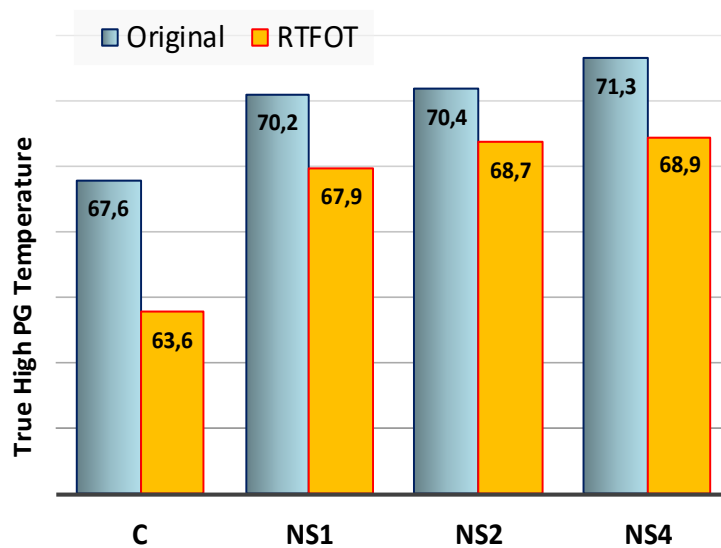


Figura 1. Temperatura alta verdadera del PG.

Con respecto al comportamiento a fatiga de los asfaltos, la Tabla 6 muestra los valores de $G^* \cdot \text{sen} \delta$ medidos a diferentes temperaturas para la clasificación PG. Se puede observar cómo los asfaltos con NS presentan valores inferiores al de control (C) a todas las temperaturas estudiadas. En consecuencia, los asfaltos modificados deberían tener un mejor comportamiento a la fatiga. Esta mejora se observó en los ensayos de time sweep (Figura 2). En la Figura 2 superior se puede observar cómo los asfaltos con NS resisten más ciclos de carga que C antes que el G^* comienza a caer. Al analizar el comportamiento a fatiga en términos de energía disipada (Dissipated Energy Ratio, DER), Figura 2 inferior, los asfaltos con NS acumulan menos energía disipada que C durante la prueba. En otras palabras, se produce menos daño en el betón para misma cantidad de ciclos de carga. Es importante mencionar que la curva DER-Ciclos de C está oculta por la curva de NS1 en el gráfico a $T = 20^\circ \text{C}$.

Tabla 6. $G^* \cdot \text{sen} \delta$ a diferentes temperaturas.

T (°C)	$G^* \cdot \text{sen} \delta$ (MPa) < 5 MPa [AASHTO M 320]			
	C	NS1	NS2	NS4
22	3,14	1,90	2,75	2,15
25	2,13	1,31	1,91	1,38
28	1,44	0,90	1,33	0,94

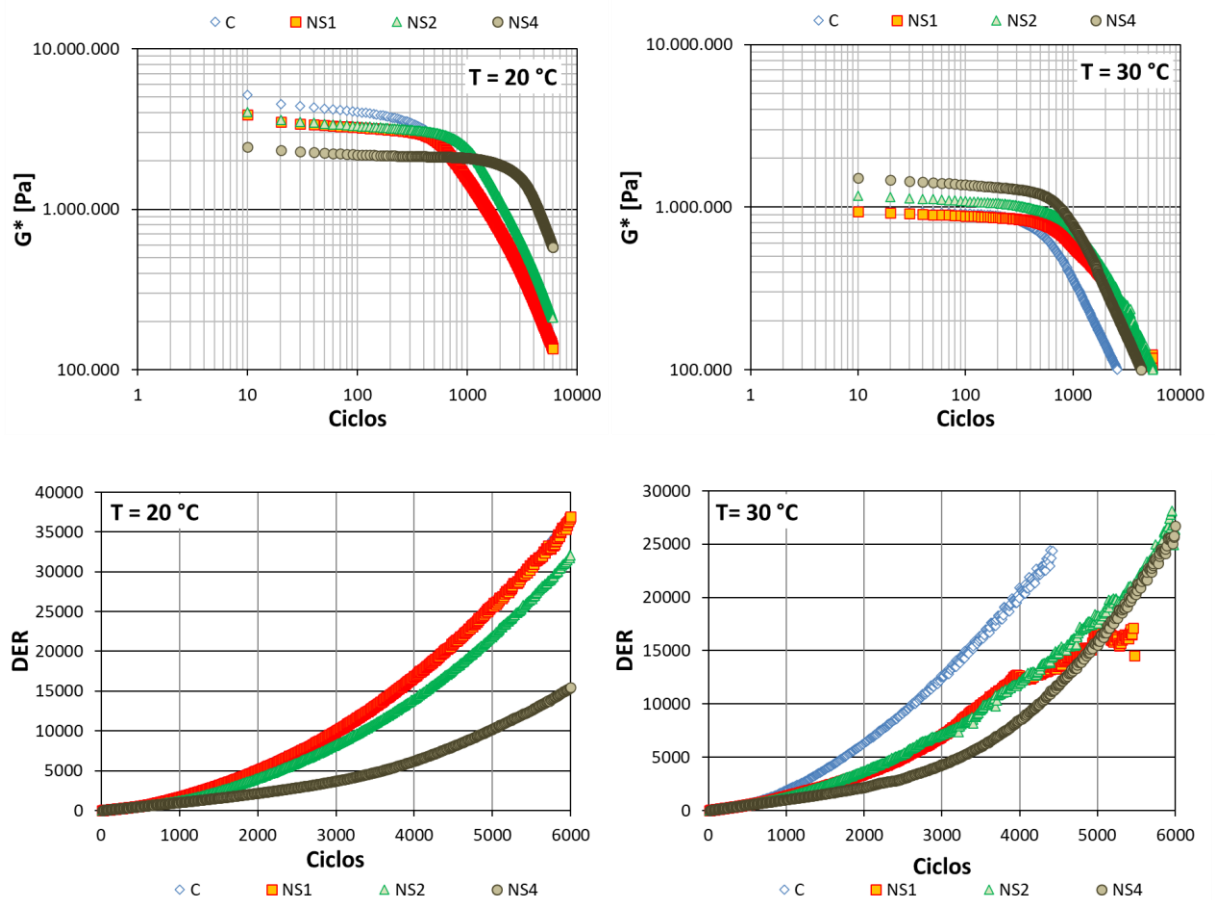


Figure 2. Resultados de ensayos de time sweep. Arriba: G^* vs Ciclos. abajo: Dissipated Energy Ratio (DER) vs ciclos.

Respecto a la prueba MSCR, la adición de NS mejora el comportamiento. Los asfaltos con NS mostraron una reducción en los valores de deformación final y $J_{nr3.2}$ en comparación con C (Tabla 7). Se observa que la NS solo aumentó la rigidez del asfalto; no afectó en absoluto la recuperación elástica. Cabe destacar que al ser C un asfalto convencional, no muestra una recuperación elástica en el MSCR. Los asfaltos con NS mantienen este comportamiento como se esperaba. El ensayo de MSCR realizado es una implementación desarrollado en el LEMIT y es similar a la prueba MSCR de ASTM D7405. Las principales diferencias están en el período de carga-reposo con 2-18 s en lugar de los 1-9 s de la norma ASTM. Por su parte, el número de ciclos aplicados en cada nivel de carga es 5 en vez de 10 ciclos de la norma ASTM. Estos cambios responden a problemas de resolución con el DSR del LEMIT para llevar a cabo la prueba MSCR con períodos de carga-descarga de 1-9 s.

Tabla 7. Resultados de MSCR

	C	NS1	NS2	NS4
Final strain	98,1 ± 6,3	91,9 ± 4,0	73,4 ± 1,9	57,1 ± 0,5
$J_{nr3.2}$	6,03 ± 0,43	5,70 ± 0,29	4,57 ± 0,13	3,52 ± 0,04

Otro ensayo reológico realizado sobre los asfaltos fue el de barridos de frecuencia a diferentes temperaturas. De estas pruebas se puede obtener una curva maestra. La

Figura 3 muestra estos resultados en forma de Diagrama de Black. Como se puede observar, todos los asfaltos presentan un comportamiento similar a bajas temperaturas o altas frecuencias (parte superior de la gráfica con valores altos de G^*). La incidencia de la NS se puede observar a altas temperaturas o rango de frecuencias bajas. La presencia de NS hace que el comportamiento de los betunes NS2 y NS4 sea más newtoniano. Sin embargo, estos cambios son poco significativos.

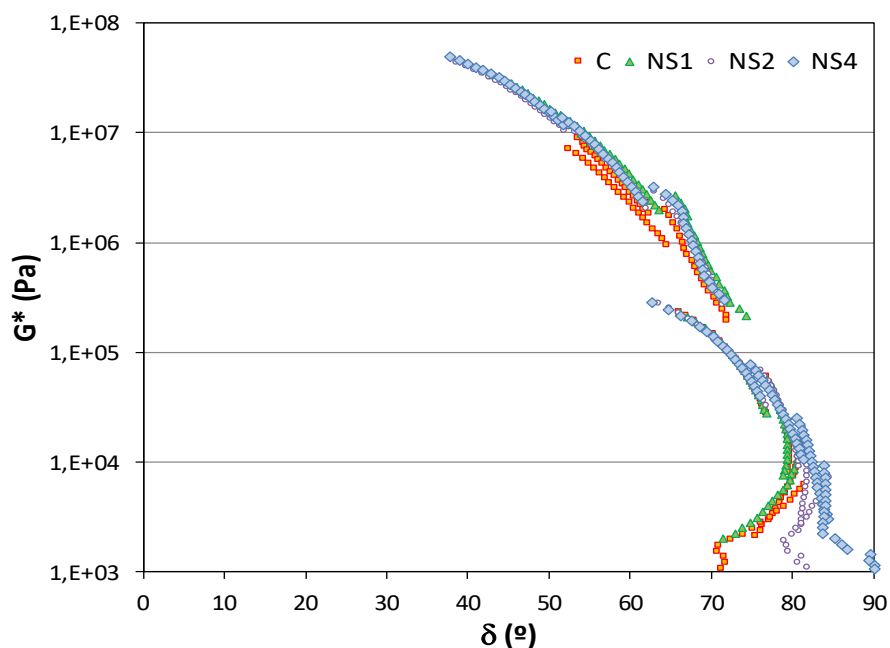


Figura 3. Diagrama de Black de los asfaltos estudiados.

A partir de trabajar con los barridos de frecuencia, se puede calcular la Low Shear Viscosity (LSV) de los asfaltos a diferentes temperaturas [20]. Tomando 60 °C como temperatura de referencia, las LSV de los betunes estudiados fue 414,1; 349,9; 418,9 y 630,8 para C, NS1, NS2 y NS4 respectivamente.

3.2 Desempeño en Mezcla asfáltica

Uno de los objetivos de esta investigación fue verificar el comportamiento de los asfaltos con NS para ver la potencial mejora a través de algunas pruebas de desempeño en una mezcla asfáltica. En la Figura 4 se observa los resultados de ensayos de ahuellamiento. Se puede observar cómo las mezclas con asfaltos con NS muestran una notable reducción de las deformaciones permanentes. Considerando los parámetros evaluados en el ensayo, se obtuvieron resultados de Wheel Tracking Slope (WTS) de 0,12; 0,059; 0,042 y 0,034 mm/10³ ciclos para C, NS1, NS2 y NS4 respectivamente. Se observa que la WTS se redujo a más de la mitad. De hecho, los resultados de los asfaltos NS2 y NS4 son comparables a resultados de una mezcla con asfalto modificado con polímero SBS. Considerando los límites del pliego de Vialidad Nacional Argentina [23], se observa que las mezclas con asfaltos con NS cumplen de manera competente sus requisitos más rigurosos. Con respecto a la

profundidad proporcional de huella (PRD) se observó una tendencia similar a la de WTS.

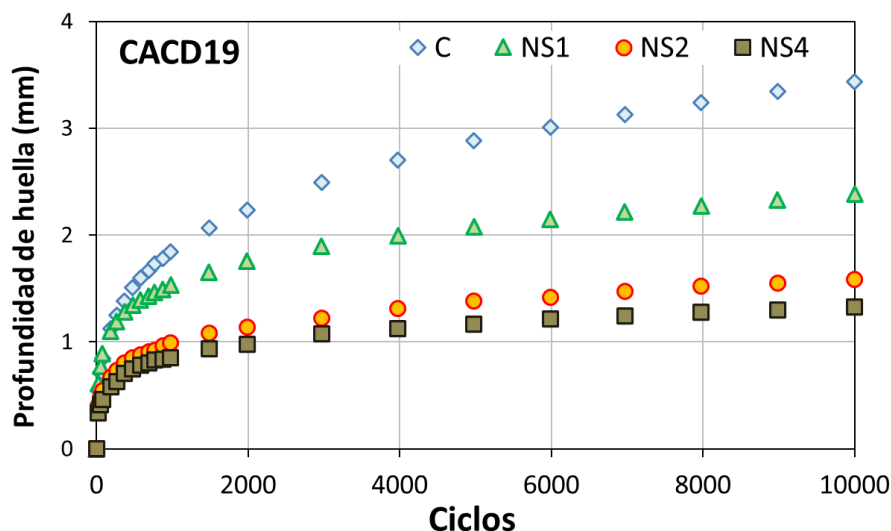


Figura 4. Ahuellamiento en el Wheel tracking test.

La Tabla 8 muestra resultados de los ensayos de fractura a 0 °C obtenido en las pruebas de flexión sobre vigas entalladas [22]. Los valores medios de varios ensayos de fractura de las diferentes mezclas se presentan en la Tabla 8. La tensión de pico es la máxima tensión de tracción que genera la iniciación de la fisura en la entalla de la viga. Luego, la prueba continúa hasta la falla la cual es controlada por el Desplazamiento de apertura de fisura (Crack opening displacement COD en inglés) a una velocidad de apertura constante de 1 mm/s hasta 4 mm de apertura total de la fisura. La tenacidad representa el área debajo de la curva tensión-COD hasta un COD de 3 mm. Como se puede observar, los mezclas con asfaltos con NS aumentaron los valores de tensión pico produciendo mejoras en la resistencia a la fractura (24, 30 y 38% más que la de control para NS1, NS2 y NS4 respectivamente). Además, estas mejoras no impactan desfavorablemente en la tenacidad de la mezcla que sigue siendo similar a la de la mezcla de control. En términos generales, se podría esperar que un aumento de la tensión máxima se traduzca en una respuesta más frágil (menor tenacidad). La Figura 5 muestra los resultados obtenidos de resistencia a tracción indirecta a 25 °C. Está claro que la incorporación de NS mejora la resistencia a la tracción de la mezcla.

Tabla 8. Resultados del ensayo de fractura

	Tensión de Pico	Tenacidad
	(Mpa)	(J/m ²)
C	6,6 ± 0,19	658,6 ± 49,0
NS1	8,2 ± 0,43	610,7 ± 53,8
NS2	8,7 ± 0,34	588,0 ± 68,1
NS4	9,2 ± 0,26	678,0 ± 60,0

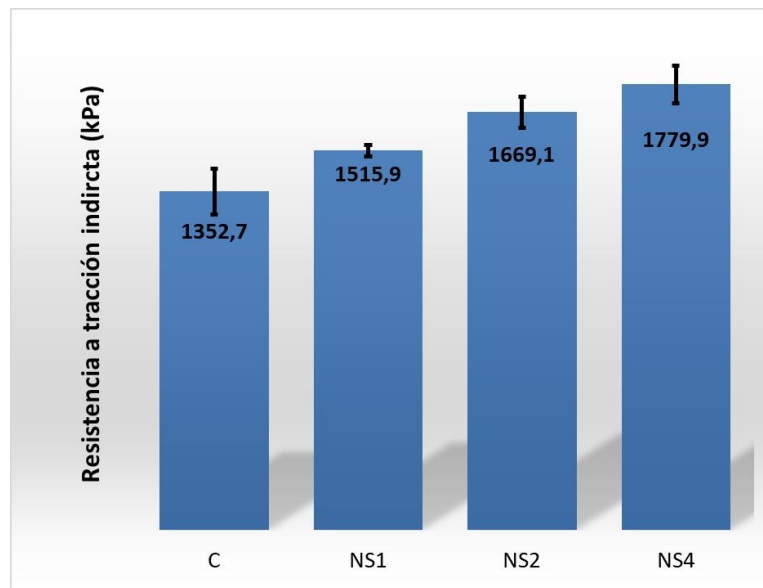


Figura 5. Tracción indirecta a 25 °C.

4 CONCLUSIONES

Esta investigación estudia la adición de nanosilica a un asfalto convencional. Se analizaron las propiedades tradicionales y reológicas de los asfaltos con nanosilica, así como el impacto del uso de estos asfaltos en el desempeño de un concreto asfáltico denso. Las principales conclusiones son:

La adición de nanosilica tuvo un impacto positivo en las principales propiedades del asfalto estudiado: reducción de la penetración, aumento de la viscosidad y punto de ablandamiento. Otras propiedades como ductilidad, índice de durabilidad o pérdida de masa no se vieron significativamente afectadas con la incorporación de nanosilica.

La clasificación de los asfaltos con nanosilica por grados de desempeño (PG) se vio mejorada a temperaturas altas y medias. Además, diferentes ensayos reológicos mostraron dichas mejoras. Se observó un mejor comportamiento en los ensayos reológicos relacionados a la fatiga y ahuellamiento.

Desde el punto de vista del desempeño en una mezcla asfáltica densa, la adición de nanosilica mejora el comportamiento al ahuellamiento observado en el Wheel Tracking Test, la resistencia a la fractura (sin afectar la tenacidad) y aumentos de la resistencia a tracción indirecta a 25 ° C.

Referencias

- [1] Pereira P., Pais J. Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. Vol 4-4, 2017, Pages 316-346.
- [2] Saji V. S., Thomas J. Nanomaterials for corrosion control. *Journal of Current Science*. Vol 92-1, 2007, Pages 51-55.
- [3] Mann S. Nanotechnology and Construction. *European Nanotechnology Gateway - NanoForum Report*, Institute of Nanotechnology. 2006, Pages 55.

- [4] Gómez Hoyos C., Zuluaga R., Gañán P., Pique T. M, Vazquez A. Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive. *Journal of Cleaner Production*. Vol 235, 2019, Pages 1540-1548.
- [5] Pique T. M., Vazquez A. Control of hydration rate of polymer modified cements by the addition of organically modified montmorillonites. *Cement and Concrete Composites*. Vol 37, 2013, pages 54-60.
- [6] Xiao F., Amirkhanian A. N., Amirkhanian S. N. Long-term ageing influence on rheological characteristics of asphalt binders containing carbon nanoparticles, *International Journal of Pavement Engineering*. Vol 12-6, 2011, Pages 533-541. DOI: 10.1080/10298436.2011.560267.
- [7] Hamedi G. H., Nejad F. M., Oveisi K. Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide. *Materials and Structures*. Vol 49-4, 2016, Pages 1165–1174.
- [8] Ali S.I.A., Ismail A., Karim M.R., Yusoff N.I.M., Al-Mansob R.A., Aburkaba E. Performance evaluation of Al₂O₃ nanoparticle-modified asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*. Vol 18-6, 2016, Pages 1251-1268. DOI:10.1080/14680629.2016.1208621.
- [9] Khattak M. J., Khattab A., Rizvi H. R., Zhang P. The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology. *Construction and Building Materials*. Vol 30, 2012, Pages 257–264. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.022.
- [10] Samsudin M. S., Arshad A. K., Ahmad J., Masri K. A. Microstructure of nanosilica modified binder by atomic force microscopy. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*. Vol 78-7–3, 2016, Pages 37–44.
- [11] Amin G. M., Esmail A. Application of nano silica to improve self-healing of asphalt mixes. *J. Cent. South Univ*. Vol 24, 2017, Pages 1019–1026. DOI: 10.1007/s11771-017-3504-y.
- [12] Moreno Navarro F., Iglesias G. R., Rubio Gamez M. C. Development of mechanomutable asphalt binders for the construction of smart pavements. *Materials and Design*. Vol 84, 2015, Pages 100–109.
- [13] Quercia G. y Brouwers H. J. H. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures, de 8th fib PhD Symposium in Civil Engineering, Kongens Lyngby, Dinamarca, 2010.
- [14] Rupasinghe M., San Nicolas R., Mendis P., Sofi M., Ngo T. Investigation of strength and hydration characteristics in nano-silica incorporated cement paste. *Cement and Concrete Composites*. Vol 80, 2017, Pages 17-30.
- [15] Yao. H., You. Z., Li. L., Lee. C. H., Wingard. D., Yap. Y. K., Shi. X., and Goh. S. W. Rheological properties and chemical bonding of asphalt modified with nanosilica. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol 25, 2013, Pages 1619-1630.
- [16] Zafari, F., Rahi, M., Moshtagh, N., and Nazockdast, H. The improvement of bitumen properties by adding nanosilica. *Journal of Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*. Vol 3, 2014, Pages 62-69.
- [17] Lesueur, D. The colloidal structure of bitumen; consequences on the mechanism of bitumen modification. *Advance in colloidal and interface science*. Vol 145, 2009, Pages 42-82.
- [18] Morea, F., Marcozzi, R., and Castaño, G. Rheological Properties of Asphalt Binders with Chemical Tensioactive Additives Used in Warm Mix Asphalts (WMAs). *Construction and Building Materials*. Vol 29, 2012, Pages 135–141. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.010.
- [19] Morea, F. Study of Asphalt Binder's Rheological Properties Extracted from Warm Mix Asphalts. *Advances in Civil Engineering Materials*. Vol 7-1, 2018, Pages 507–519. Doi:10.1520/ACEM20180010. ISSN 2379-1357.
- [20] Morea F., Agnusdei J., Zerbino R. Comparison of method for measuring zero shear viscosity (ZSV) in asphalts. *Materials and Structures* 43, 2010, Pages 499–507. doi:10.1617/s11527-009-9506-y
- [21] Bahia, H., Hanson, D., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M., and Anderson, R. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. *Transportation Research Board*

NCHRP 9–10 report 459, National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC, 2001, Pages 175.

- [22] Morea F., Zerbino R. Incorporation of synthetic macrofibres in Warm Mix Asphalt. Road Materials and Pavement Design, 2018, Pages 15. Online. DOI:10.1080/14680629.2018.1487874.
- [23] Pliego de especificaciones técnicas generales para mezclas densas y semidensas en caliente y semicaliente. Especificación de Vialidad Nacional Argentina, 2017, Pages 69.