

## La importancia de considerar las deformaciones para predecir el comportamiento de una mezcla asfáltica en servicio Caso de estudio: variación de las propiedades de las mezclas asfálticas modificando el cemento asfáltico.

Fensel, Enrique A

Enrique A Fensel  
efensel@frlp.utn.edu.ar  
LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP-  
CIC PBA, Argentina

**Ingenio Tecnológico**  
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina  
ISSN-e: 2618-4931  
Periodicidad: Frecuencia continua  
vol. 5, 038, 2023  
ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 07 Julio 2023  
Aprobación: 15 Julio 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2663842002/>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

**Resumen:** Se analiza cómo los ensayos normalizados, recomendados y de uso frecuente, pueden conducir a resultados que no son consistentes con el comportamiento del material analizado.

Se hace una comparación con resultados obtenidos a través de otros ensayos que se sabe que responden bien al comportamiento en servicio de las mezclas asfálticas.

Para ello, se relacionan los resultados del ensayo de Tracción Indirecta (sobre núcleos y probetas Marshall de mezcla asfáltica densa en caliente CAC D-19, según la Dirección Nacional de Vialidad) con las deformaciones plásticas permanentes obtenidas con el ensayo de rodadura.

Se establece la incidencia de los diferentes tipos de cemento asfáltico utilizados, única variable introducida en la mezcla asfáltica, manteniendo constante la estructura granular (curva granulométrica de los áridos) y utilizando en todos los casos los mismos áridos y filler.

Finalmente, se evalúa la respuesta del material por Tracción Indirecta y se comparan los resultados con los obtenidos con el ensayo de rodadura.

**Palabras clave:** Mezclas Asfálticas, NFU, Tracción Indirecta, Deformaciones Permanentes, Energía.

**Abstract:** It analyzes how standardized, recommended and frequently used tests can lead to results that are not consistent with the behavior of the analyzed material.

A comparison is made with results obtained through other tests that are known to respond well to the service behavior of asphalt mixes.

For this, the results of the Indirect Traction test (on cores and Marshall specimens of hot dense asphalt mixture CAC D-19, according to the Dirección Nacional de Vialidad) are related to the permanent plastic deformations obtained with the rolling test.

The incidence of the different asphalt types of cement used, the only variable introduced in the asphalt mix, is established, keeping the granular structure constant (grading curve of the aggregates) and using the same aggregates and filler in all cases. Finally, the response of the material is evaluated by Indirect Traction and the results are compared with those obtained with the rolling test.

**Keywords:** Asphalt Mixtures, NFU, Indirect Traction, Permanent Deformations, Energy.

## INTRODUCCIÓN

En el marco del PID+i (Proyecto de Investigación, Desarrollo e Innovación) “Utilización de diferentes polímeros como modificadores de cementos asfálticos y su incidencia en el desempeño de mezclas asfálticas densas y semidensas” desarrollado en el LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP-CIC PBA en el que se plantea valorar su desempeño mediante ensayos característicos a mezclas asfálticas en las que se mantuvo cuasi constante su dosificación, su curva granulométrica, tipo y características del agregado (ya que estos procedían de un mismo lote de producción) y a las que únicamente se procedió a variar el ligante asfáltico utilizado. Todos los materiales fueron debidamente caracterizados según lo especifica la normativa argentina e internacional y dentro de la amplia gama de ensayos efectuados a las mezclas asfálticas se encuentran los de Tracción Indirecta y el de rueda cargada, el Wheel Tracking Test (WTT), que en la presente publicación se analiza su relación.

Para ello se describe sucintamente las características de los materiales utilizados, la mezcla asfáltica realizada y de los ensayos ejecutados sobre la misma que se describe para este caso y se analizan los resultados obtenidos. No se abunda sobre la caracterización de los materiales utilizados y la conformación de las mezclas asfálticas realizadas, dado que es más de interés para los especialistas en la materia. Se realizan las mezclas asfálticas utilizando un cemento asfáltico CA 20, base comparativa para evaluar la acción de los distintos aditivos al cemento asfáltico a través de valorar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas, a este cemento asfáltico base se lo ha aditivado en el LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP-CIC PBA, con polvo de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) (Botasso, 2007), con mezcla de polímeros vírgenes SBS y NFU; y por último un cemento asfáltico modificado con SBS (AM3).

## 1. MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS

### 1.1. Los cementos asfálticos

Es sabido que el ligante en una mezcla asfáltica es el cemento asfáltico, el porcentaje de intervención en la misma difiere en un amplio rango dependiendo del tipo de mezcla asfáltica que se quiera lograr, existiendo una gran variedad de posibilidades, pero para el lector no especializado en la materia se puede referir que en una mezcla asfáltica “clásica” ronda en un 5% en peso del total de la mezcla de áridos, lo que habla del potencial del cemento asfáltico y de allí la importancia de establecer las características del mismo a través de analizar sus propiedades. Estas propiedades del cemento asfáltico (así como los demás materiales que componen una mezcla asfáltica) pueden definir el comportamiento que pueden tener las mezclas asfálticas en servicio. De allí que permanentemente se busca mejorar las prestaciones de este mediante la aditivación con distintos productos, como es el caso que llevara a plantear el PID+i ya citado.

En la Tabla 1 se puede observar los valores obtenidos en los cementos asfálticos con cada tipo de modificación sobre parámetros que normalmente se valoran. Se puede destacar que se generan cambios en la penetración, los puntos de ablandamiento y la recuperación elástica por torsión. Analizando las exigencias para cada tipo de asfalto modificado, se observa que la adición de polvo de NFU, provoca un asfalto del tipo AC-2, según norma IRAM 6673. Luego se elaboró el asfalto modificado AM-3 según norma IRAM 6596 con aporte de SBS como modificador. A posteriori, se procedió a disminuir la dosis de SBS e ir reemplazándola por polvo de NFU hasta lograr un asfalto del tipo AM-2. En esta condición, se ha seguido el criterio de que

cuando un asfalto modificado utiliza polvo de NFU, la clasificación que logre satisfacer se le asigna la letra C. Por lo tanto, se ha designado a ese ligante modificado como AM-2-C.

**TABLA 1**  
Clasificación de los asfaltos utilizados

Ensayo	Método	Unidad	Asfalto	Asfalto	Asfalto	Asfalto
			Base	+ NFU	+ SBS+ NFU	+ SBS
Resultados						
Viscosidad 60 °C	IRAM 6836	dPa s	1889	---	---	---
Índice de Penetración de Pfeiffer	IRAM 6604	---	-0,3	---	---	---
Viscosidad 135 °C	IRAM 6836	mPa.s	412	---	---	---
Oliensis	IRAM 6594		negativo	---	---	---
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	IRAM 6576	0,1 mm	---	56	54	70
Punto de Ablandamiento	IRAM 6841	°C	---	55	60	70
Recuperación Elástica Torsional	IRAM 6830	%	---	20	49	76
Viscosidad Rotacional a 170 °C	IRAM 6837	mPa.s	---	512	---	---
Sobre el Residuo de RTFOT IRAM 6839						
Índice de durabilidad	5,3	---	2	---	---	---
Ductilidad a 25 °C, 5 cm / min., (cm)	IRAM 6579	cm	> 100	---	---	---
Penetración (respecto de la penetración original) Retenida	IRAM 6576	%	---	91	70	91
Variación del punto de ablandamiento	IRAM 6841	°C	---		4	2
Pérdida de Masa	IRAM 6839	%	---	0,5	0,6	0,2
Ensayo de estabilidad al almacenamiento IRAM 6840						
Diferencia de Punto de Ablandamiento	IRAM 6841	°C	---	3	4	1
Diferencia de penetración	IRAM 6576	0,1 mm	---		8	4
Clasificación			CA - 20	AC-2	AM 2-C	AM 3

## 1.2. Las mezclas asfálticas

Como se había comentado, se elige trabajar con una mezcla del tipo densa que clasifica según las especificaciones 2017 de la DNV como CAC-D19 R (Concreto Asfáltico en Caliente; tipo Denso; Tamaño máximo nominal del agregado pétreo = 19 mm; capa de Rodamiento) con Cementos Asfálticos clasificados como: CA-20; AC-2; AM-2-C y AM 3. Si bien es esperable que las mezclas asfálticas no tengan un buen

comportamiento a las deformaciones permanentes utilizando un cemento asfáltico como el CA-20, la razón de realizarlas es que éste es un muy buen receptor para ser aditivado, por lo que en el contexto general del PID+i es válida su realización y tomar a esta mezcla asfáltica como comparativa para evaluar la acción de las modificaciones realizadas (Botasso, 2018).

Se diseña una mezcla asfáltica por el método Marshall donde la variable serán los tipos de asfaltos y los áridos del tipo granítico del mismo proveedor y lote de despacho, lo que asegura una muy buena uniformidad en la conformación de la estructura de los áridos en la mezcla asfáltica. En la Tabla 2 se muestran las curvas límites y la adoptada para la combinación de los agregados que la componen y su gráfica correspondiente (Figura 1).

TABLA 2  
Curva granulométrica de la mezcla utilizada

Ensayo	Método	Unidad	Asfalto	Asfalto	Asfalto	Asfalto
			Base	+ NFU	+ SBS+ NFU	+ SBS
Resultados						
Viscosidad 60 °C	IRAM 6836	dPa s	1889	---	---	---
Índice de Penetración de Pfeiffer	IRAM 6604	---	-0,3	---	---	---
Viscosidad 135 °C	IRAM 6836	mPa.s	412	---	---	---
Oliensis	IRAM 6594		negativo	---	---	---
Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	IRAM 6576	0,1 mm	---	56	54	70
Punto de Ablandamiento	IRAM 6841	°C	---	55	60	70
Recuperación Elástica Torsional	IRAM 6830	%	---	20	49	76
Viscosidad Rotacional a 170 °C	IRAM 6837	mPa.s	---	512	---	---
Sobre el Residuo de RTFOT IRAM 6839						
Índice de durabilidad	5,3	---	2	---	---	---
Ductilidad a 25 °C, 5 cm / min., (cm)	IRAM 6579	cm	> 100	---	---	---
Penetración (respecto de la penetración original) Retenida	IRAM 6576	%	---	91	70	91
Variación del punto de ablandamiento	IRAM 6841	°C	---		4	2
Pérdida de Masa	IRAM 6839	%	---	0,5	0,6	0,2
Ensayo de estabilidad al almacenamiento IRAM 6840						
Diferencia de Punto de Ablandamiento	IRAM 6841	°C	---	3	4	1
Diferencia de penetración	IRAM 6576	0,1 mm	---		8	4
Clasificación			CA - 20	AC-2	AM 2-C	AM 3

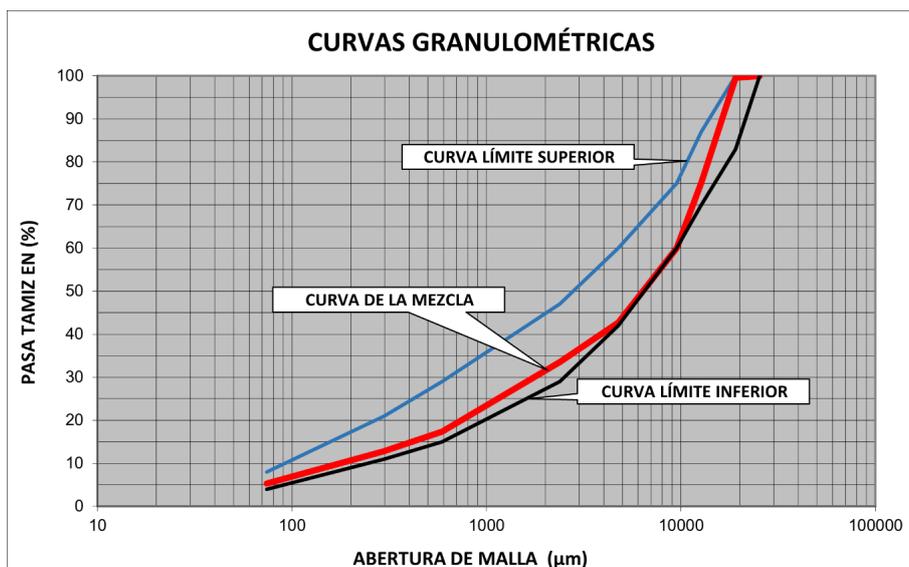


FIGURA 1  
Curva granular y límites de especificación patrón

Las mezclas conformadas por los distintos cementos asfálticos modificados conservan la cuasi misma dosificación de áridos que la mezcla base con CA-20, compuesta para este caso con un porcentaje de 4,1% de cemento asfáltico, porcentaje éste determinado en su diseño para cumplir con los límites establecidos en todos los parámetros del PET 2017 de la DNV Argentina (Ministerio de Transporte, 2017), con una temperatura de mezclado de 155°C y de 145°C para la compactación. Luego varía el contenido de ligante teniendo un 4,3% de cemento asfáltico modificado para cada mezcla respectivamente, con una temperatura de mezclado de 175°C y de 165°C para la compactación como se reflejan las dosificaciones para cada tipo de mezcla en la Tabla 3.

TABLA 3  
Dosificaciones de las mezclas

AGREGADOS	DENOMINACIÓN	DOSIFICACIÓN ÁRIDOS	DOSIFICACIÓN TOTAL	
			(%)	
Piedra Partida	06:20	50,0	47,95	47,85
Piedra Partida	12:20	9,0	8,63	8,61
Arena de Trituración	0:6	40,0	38,36	38,28
Filler	CAL	1,0	0,96	0,96
			4,10	4,30
		Asfalto	CA-20	CA-20+8%NFU
				CA20+2% SBS+2,66% NFU
				AM3
	Temperatura (°C)	Compactación	145	155
		Mezclado	155	165

## RESULTADOS

### 1. Descripción del Ensayo de Wheel Tracking Test (WTT)

El ensayo de rodadura conocido como Wheel Tracking Test se caracteriza por aplicar una carga dinámica a través de una rueda que simula las condiciones de tránsito, sobre una probeta prismática de 300 mm de cada lado y 50 mm de espesor. Se registran las deformaciones verticales sufridas por la mezcla asfáltica a lo largo de 10.000 ciclos de carga. La temperatura de ensayo está estipulada en 60 °C. La carga de la rueda es de 700 Newton, los cuales se aplican con una frecuencia de movimiento de 26,5 ciclos por minuto. Las características de la rueda están dadas por su diámetro de 200 mm, su ancho de 50 mm, el espesor de la cubierta de 20 mm y la dureza de la cubierta de 80 IRHD (Norma UNE EN 12697-22:2008+A1:2008).

Para el moldeo de la probeta de ensayo se utilizó el procedimiento establecido en las Normas UNE EN 12697-32 (2007) con el Roller Compact visible en la Figura 3. Para el ensayo de “Wheel Tracking Test” (Figura 3) se ha utilizado como metodología la citada para dispositivos pequeños como lo describe la Norma UNE-EN 12697-22 – Procedimiento B, en aire. Los parámetros que se miden son:

H5000 = Profundidad de la huella a 5000 ciclos

H10.000 = Profundidad de la huella a 10.000 ciclos

(WTS AIRE) [mm/1000 ciclos de carga] = Pendiente Media de Deformación en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos

(PRD) [%] = Profundidad Media de la Huella

Se denomina valor de ensayo al valor obtenido propiamente en el ensayo y al valor de cálculo a una regresión de la curva que permite establecer la tendencia, descartando valores individuales que se separen de la misma, adoptando este criterio en el LEMaC.

#### 1.1. Valoraciones para el caso en estudio

Conceptualmente el ensayo de Wheel Tracking Test (WTT) consiste en someter a la probeta a ciclos de sollicitación por medio de una rueda de caucho cargada, la cual simula el paso del tránsito. Este ensayo arroja como resultado una curva que indica el ahuellamiento a lo largo del tiempo (ciclos). Esto permite obtener parámetros característicos de la mezcla analizada, como son: la profundidad de huella correspondiente a los ciclos totales (RD), la profundidad de la huella proporcional al espesor de la probeta para el número de ciclos totales (PRD) y la pendiente promedio de ahuellamiento (WTS). Es decir que para menores valores resultantes en los parámetros señalados se obtiene una mezcla asfáltica más eficiente en el tiempo, desde este punto de vista. Las normativas fijan valores límites de deformación en función del nivel de tránsito y de la posición que ocupa la mezcla asfáltica en el paquete estructural. Tal es el caso de los límites fijados por el Pliego de Especificaciones Técnicas (2017) de la DNV con valores de WTS aire  $\leq 0,08$  y PRD  $\leq 5\%$  para el tipo de mezcla asfáltica como capa de rodamiento analizada en este trabajo. En la Tabla 4 se exponen los valores numéricos y en la Figura 2 se grafican los valores hallados de los parámetros evaluados en el ensayo de WTT, reflejando las líneas rojas horizontales los máximos permitidos señalados.

TABLA 4  
Valores resultantes de WTT

		CA 20	CA 20 + 8% NFU	CA 20 + 2% SBS + 2,66% NFU	AM3
WTT	Rd <sub>aire</sub> mm	3,15	2,28	1,86	1,37
	WTS <sub>aire</sub> mm/10 <sup>3</sup>	0,142	0,068	0,044	0,030
	PRD <sub>aire</sub> %	6,30	4,55	3,71	2,73

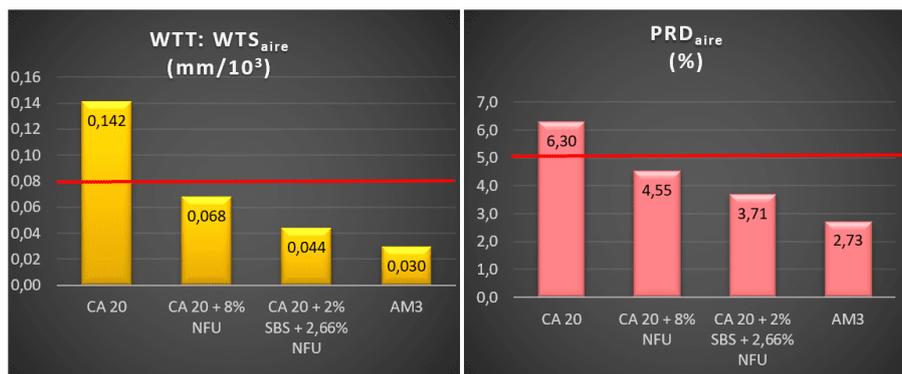


FIGURA 2  
Gráfico de valores de WTT

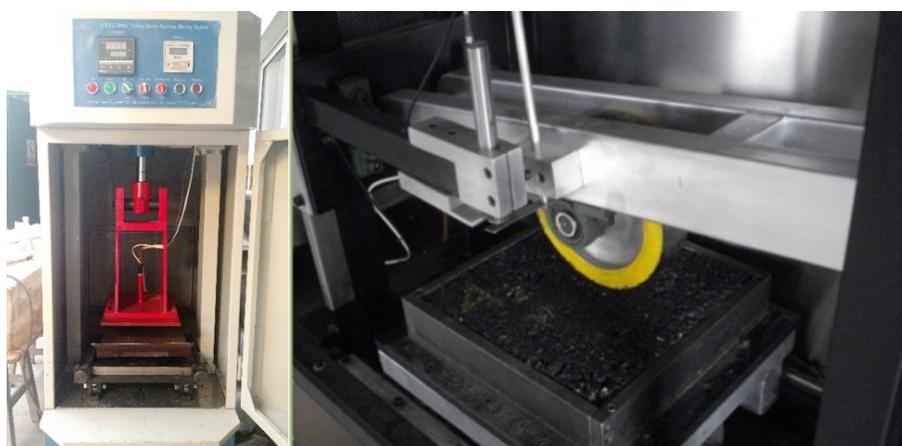


FIGURA 3  
Vista del compactador y equipo de WTT del LEMaC

## 2. Descripción del Ensayo de Tracción Indirecta

Este ensayo consiste en deformar por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa, de tal manera que los esfuerzos aplicados a la probeta se ubiquen sobre dos generatrices opuestas a lo largo de un plano diametral vertical.

A una velocidad constante de desplazamiento esta forma de carga desarrolla una tensión de tracción uniforme y perpendicular a la dirección de la carga aplicada a lo largo del plano vertical diametral, que finalmente causa el fallo de la muestra por fractura en ese plano vertical (Figura 4). El parámetro resultante es la carga de rotura de la probeta ITS (1), determinada en función de la carga aplicada, su espesor y el diámetro (Norma UNE EN 12697-23:2018).

$$ITS \text{ (GPa)} = \frac{2P \text{ (kN)}}{\pi t \text{ (mm)} d \text{ (mm)}}$$

(1)

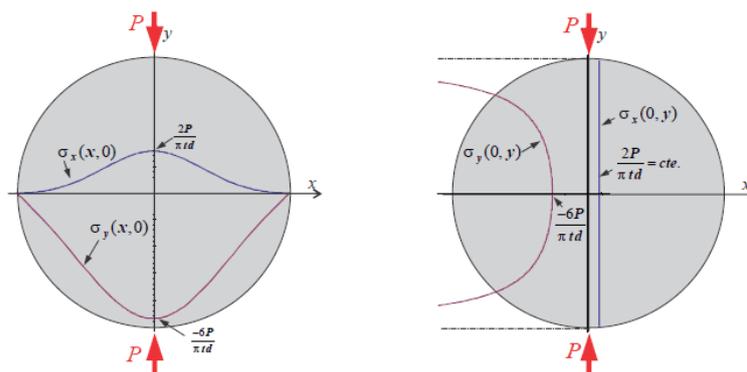


FIGURA 4  
Distribución de tensiones sobre ejes coordenados

### 2.1 Valoraciones para el caso en estudio

El ensayo de Tracción Indirecta reproduce el estado de tensiones bajo la carga en la zona más crítica de una capa asfáltica situada sobre la fibra inferior de la misma que es la denominada zona de tracción. Se describe la evaluación realizada mediante esta metodología sobre probetas Marshall y sobre núcleos calados obtenidos de las probetas de WTT luego de ser ensayadas. Los testigos se calaron sobre la zona no deformada por el paso de la rueda del WTT, con lo que se asegura una uniformidad en la mezcla asfáltica utilizada para ambos ensayos, dado que el moldeo para ambas series de probetas fuera realizado con el mismo pastón de mezcla asfáltica. Los especímenes para los ensayos se han acondicionado a  $5^{\circ}\text{C} \pm 2$  durante dos horas (Martínez Reguero, 2000), y éste se ha llevado a cabo en una prensa Marshall Automática, con adquisición de datos de carga a través de una celda de carga y con LVDT's para la medición de las deformaciones, lo cual es una condición necesaria dado que, realizando este ensayo a esta temperatura, la mezcla se comporta como un material más bien rígido. Otros autores (Martínez Reguero, 2000) aseguran que a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  la mezcla reduce su resistencia a menos de la mitad y su deformación a la rotura se incrementa casi al doble. La susceptibilidad térmica del cemento asfáltico es la causa de este cambio tan notable del comportamiento de la mezcla al elevar la temperatura de ensayo.

Se presenta en la Tabla 5 los resultados promedios obtenidos de los ensayos a las 3 (tres) probetas Marshall y a los 4 (cuatro) testigos extraídos (Figura 6) de las probetas de WTT para el ensayo de Tracción Indirecta, tal como indica la normativa asociada a ambos ensayos, y se adicionó en Tracción Indirecta el valor de la Resistencia a Tracción en unidades de  $\text{kg}/\text{cm}^2$  por ser ésta, como criterio generalizado, una unidad que se puede magnificar de acuerdo con el costumbrismo de la profesión como lo refleja la Figura 5. Las resistencias a la Tracción Indirecta expresadas son los valores promedios máximos hallados sin una dispersión de resultados a considerar, estando dentro de los parámetros permitidos por la normativa.

TABLA 5  
Valores resultantes de TI

			CA 20	CA 20 + 8% NFU	CA 20 + 2% SBS + 2,66% NFU	AM3
TRACCIÓN INDIRECTA TESTIGOS	Espesor	cm	5,43	5,30	5,23	5,28
	Diámetro	cm	9,42	9,42	9,42	9,40
	Densidad	gr/cm <sup>3</sup>	2,422	2,442	2,450	2,458
	Carga	kN	32,0	21,8	28,3	26,1
	Deformación	mm	0,55	1,13	1,01	1,66
	Tipo de Rotura		Combinación	Combinación	Combinación	Combinación
	Resistencia a la Tracción	GPa	0,00399	0,00278	0,00347	0,00334
	Resistencia a la Tracción	kg/cm <sup>2</sup>	40,7	28,3	35,4	34,1
TRACCIÓN INDIRECTA PROBETAS	Espesor	cm	6,12	6,07	6,04	6,10
	Diámetro	cm	10,35	10,35	10,35	10,35
	Densidad	gr/cm <sup>3</sup>	2,441	2,426	2,441	2,433
	Carga	kN	41,3	24,9	32,8	32,9
	Deformación	mm	0,71	1,09	1,03	1,49
	Tipo de Rotura		Combinada	Combinada	Combinada	Combinada
	Resistencia a la Tracción	GPa	0,00415	0,00253	0,00334	0,00332
	Resistencia a la Tracción	kg/cm <sup>2</sup>	42,35	25,75	34,09	33,89

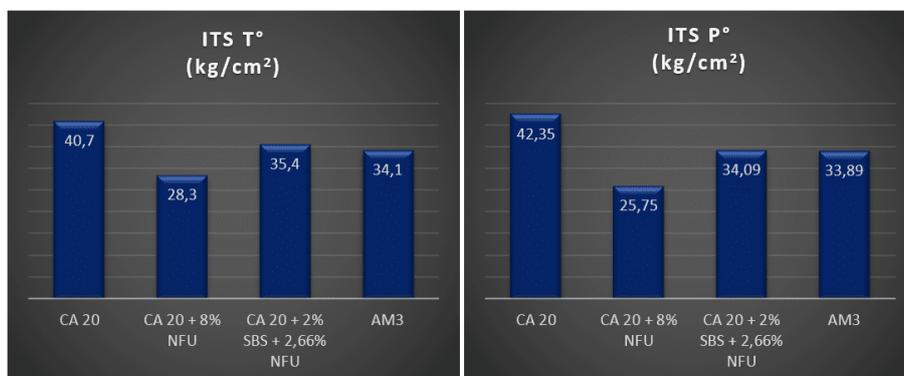


FIGURA 5  
Gráfico de valores de Tracción Indirecta



FIGURA 6  
Extracción de los núcleos sobre las probetas de WTT y Ensayo de Tracción Indirecta en el LEMaC

## DISCUSIÓN

Al analizar los resultados obtenidos bajo las condiciones expresadas se encuentra que para la mezcla asfáltica con el cemento asfáltico base CA-20 se obtienen los mayores valores de Resistencia a la Tracción respecto a cualquier otro cemento asfáltico modificado de los considerados, lo que provocó la repetición del moldeo y ensayos en dónde se obtuvieron similares valores y a raíz de esto se plantea analizar los resultados obtenidos en esta situación dado que “a priori” no eran los resultados esperables, en especial dado que en un amplio grupo

de ensayos realizados dentro del proyecto se reflejaban los beneficios de las aditivaciones al cemento asfáltico en el desempeño de las distintas mezclas asfálticas. Esto llevó a una revisión bibliográfica de lo actuado por otros investigadores que ahondaron en el ensayo de Tracción Indirecta analizando distintas variables como las de temperaturas de ensayo y compactación, energía y métodos de compactación, tipos y contenido de cementos asfálticos utilizados, velocidad de carga, etc. Por ello se decide valorar la energía puesta en juego en el ensayo de Tracción Indirecta evaluando la respuesta de los especímenes, ya no sólo tomando los valores de Resistencia a la tracción con sus deformaciones tomadas como datos aislados, sino valorando ambos en forma conjunta y conformando la expresión de la energía de rotura a Tracción Indirecta.

Para ejemplificar el proceso de valoración de la energía se presenta un caso en forma detallada, considerando la mezcla asfáltica con ligante AM3 valorada sobre las probetas Marshall. Tomando los datos emitidos por la prensa Marshall automática se confeccionaron las curvas Carga-Deformación para luego trazar las curvas de tendencia, resultando un polinomio de grado 4 para los testigos y de grado 3 para las probetas los que más se ajustaban al desarrollo teniendo en todos los casos un R2 mayor a 0,99 lo que asegura una gran representatividad de la curva original (Figura 7). Una vez obtenido el polinomio se realizó la integración del mismo entre los límites de origen 0-0 y la deformación máxima detectada para de esta forma hallar el área bajo la curva (Tabla 6; Figura 8: ejemplificada con la Probeta N°1) que representa el trabajo (energía) medido en Joule (J = N.m = kN.mm, medida esta última que da directamente el equipo empleado para el ensayo), y desarrollado por la probeta ante las carga de compresión diametral y la deformación en ese sentido, lo que produce la tracción buscada ante las deformaciones horizontales producidas.

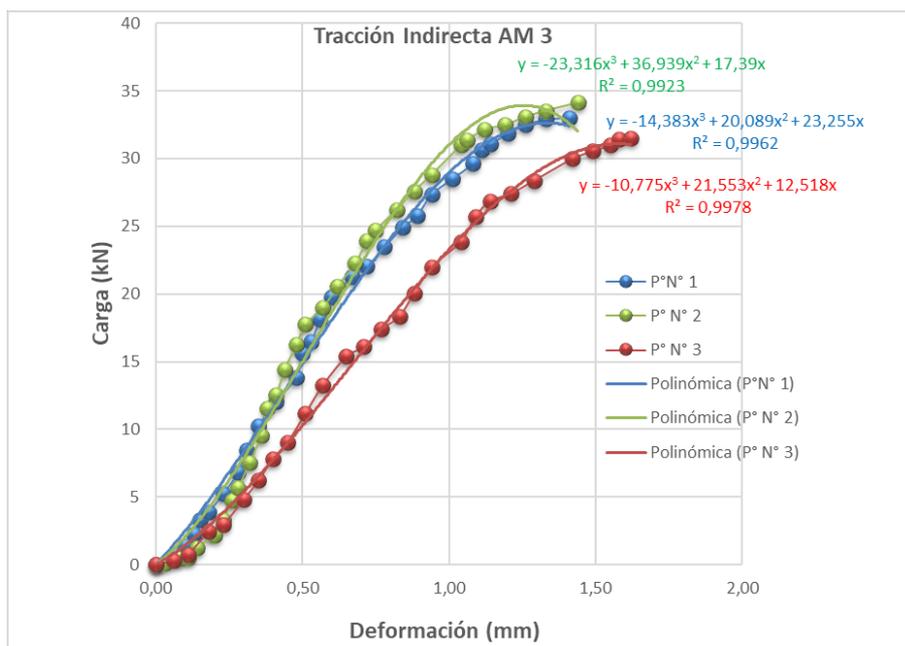


FIGURA 7  
Curvas de carga-deformación de TI sobre MA con AM3

TABLA 6  
Cálculo mediante integrales del área bajo la curva

P° N°	Curva de Tendencia Polinómica	AREA	Carga	Deformación
1	$y = -14,383x^3 + 20,089x^2 + 23,255x$	27,68	33,02	1,41
2	$y = -23,316x^3 + 36,939x^2 + 17,39x$	29,73	34,12	1,44
3	$y = -10,775x^3 + 21,553x^2 + 12,518x$	28,42	31,46	1,62
<b>Promedio General =</b>		<b>28,61</b>	<b>32,87</b>	<b>1,49</b>

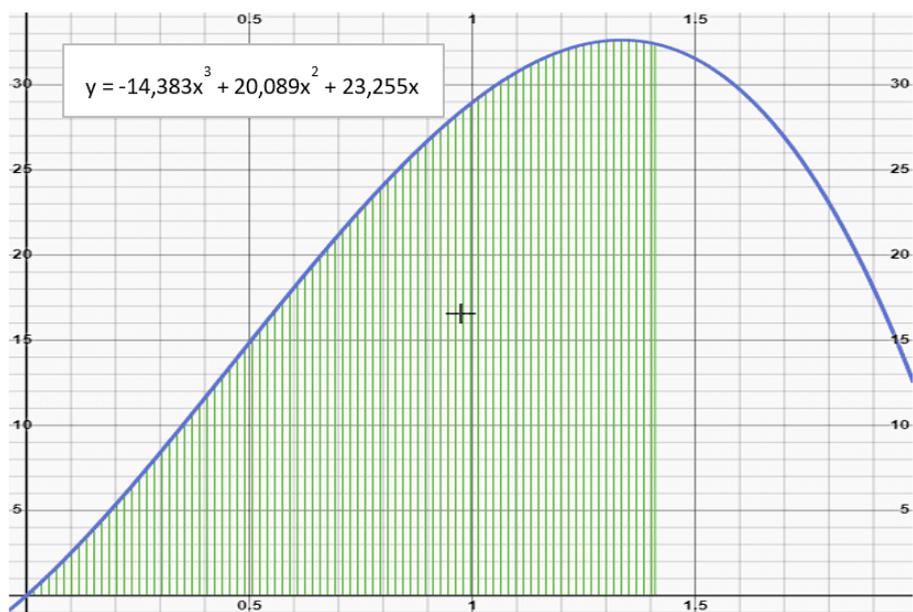


FIGURA 8  
Área bajo la curva probeta N°1

El área bajo la curva representa la energía absorbida por los especímenes. De esta forma se operó en forma análoga para cada uno de los especímenes de los núcleos calados y de las probetas Marshall y para las distintas mezclas asfálticas obteniéndose los resultados generales promedios representados en la Tabla 7 y gráficamente en la Figura 9.

TABLA 7  
Valores resultantes de Energía por TI

			CA 20	CA 20 + 8% NFU	CA 20 + 2% SBS + 2,66% NFU	AM3
TRACCIÓN INDIRECTA TESTIGOS	Carga	kN	32,03	21,75	26,9	26,07
	Deformación	Mm	0,55	1,13	0,91	1,66
	Energía	Joule	9,09	15,02	16,80	22,26
TRACCIÓN INDIRECTA PROBETAS	Carga	kN	41,33	24,93	32,80	32,87
	Deformación	mm	0,71	1,09	1,03	1,49
	Energía	Joule	14,68	17,21	19,44	28,61

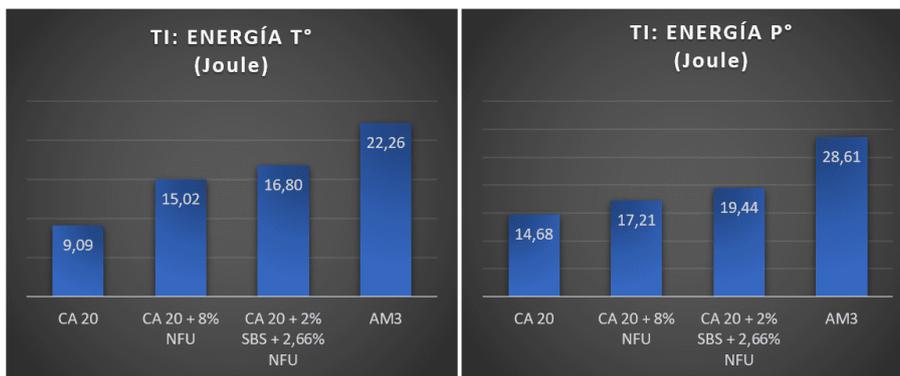


FIGURA 9  
Gráfico de Energías mediante TI

Al valorar el parámetro de la energía absorbida en el ensayo de Tracción Indirecta se pone de manifiesto un comportamiento de la mezcla asfáltica más acorde a los valores hallados en toda una batería de ensayos realizados a estas mezclas y que condicen con el comportamiento demostrado en este ensayo bajo el parámetro citado, por ejemplo, se establece la comparativa con los valores hallados para la pendiente de deformación del ensayo de WTT (Figura 10).

Como los valores de la resistencia a la Tracción Indirecta están asociados a la resistencia a la fisuración en las mezclas asfálticas en servicio se puede advertir que desde este punto de vista la valoración de la energía es un parámetro para tener en cuenta y en este sentido la incorporación de modificadores de los cementos asfálticos pasa a ser un elemento importante a considerar.

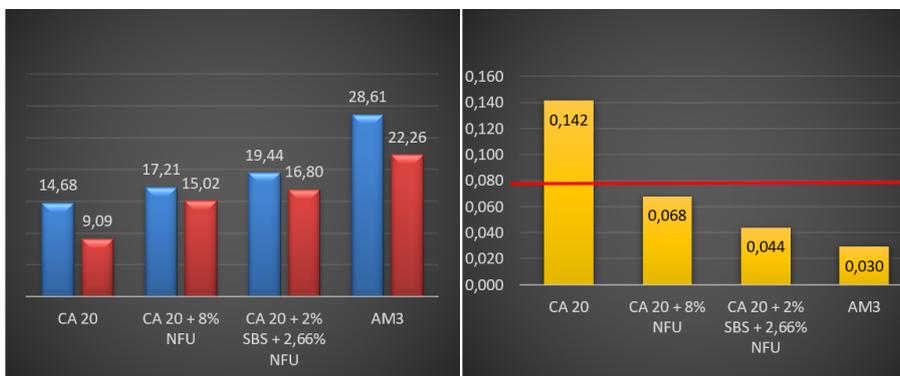


FIGURA 10  
Energías calculadas y Comparativas con parámetros del WTT

Las deformaciones registradas en el ensayo de tracción indirecta, en donde el espécimen ensayado desarrolla libremente su deformación sin ningún tipo de contención lateral, pone en evidencia la resistencia de la cohesión interna de la mezcla, en estos casos modificada por el tipo de ligante asfáltico. Si se analiza la incorporación del caucho molido de NFU al cemento asfáltico, la de SBS como polímero virgen, o la combinación de ambos, se pone de manifiesto que producen beneficios en el desempeño de la mezcla asfáltica que pueden ser evaluados por medio de un sencillo ensayo de Tracción Indirecta, con la salvedad realizada de considerar las energías puestas en juego, como es el caso en estudio, y que ponen en evidencia el desarrollo de fuerzas cohesivas en la mezcla.

Es conocido en la tecnología vial, que cambios en la cantidad y tipo de ligante, en la granulometría de la mezcla, en la temperatura de compactación, en el proceso de compactación, generan cambios en el desempeño de las mezclas colocadas en la calzada. En este caso se pone en evidencia que los cambios producidos son

debido al tipo de ligante, manifestado en la tendencia de crecimiento de la energía puesta en juego y su relación con la evolución de la pendiente media de ahuellamiento.

## CONCLUSIONES

En virtud de los resultados obtenidos bajo las condiciones y particularidades descriptas durante la investigación se concluye que:

- Para la carga de rotura de las probetas (ITS) con el cemento asfáltico CA-20 y comparando este parámetro con las demás mezclas asfálticas ha sido el disparador para observar que valorar este parámetro en forma aislada puede llevar a conclusiones que no reflejan fielmente el desempeño de una mezcla asfáltica respecto a las deformaciones permanentes.
- Bajo las condiciones expresadas a lo largo de este trabajo se puede inferir que es deseable para evaluar una mezcla asfáltica tomando las comparativas descriptas el considerar la energía puesta en juego según la carga de sollicitación y la deformación producida en esa dirección.
- El crecimiento de las fuerzas cohesivas, medidas por medio de la energía de rotura en el ensayo de Tracción Indirecta, es inversamente proporcional a los valores de la pendiente media de ahuellamiento medida con el equipo de WTT, lo que condice con el comportamiento esperable en las mezclas asfálticas modificadas.
- El ensayo de Tracción Indirecta por su simplicidad de ejecución es una buena metodología para obtener valores característicos de una mezcla asfáltica y se puede observar la variación de la cohesión, según se introduzcan diferentes tipos de modificadores en el ligante, considerando las deformaciones como se ha expuesto.
- Se puede considerar como estrategia de control de calidad, calar núcleos en las probetas del ensayo de ahuellamiento, en este caso WTT, y determinar la energía de rotura en el ensayo de Tracción Indirecta. Estos valores obtenidos pueden ser referenciales para valorar la capa asfáltica colocada mediante la extracción de núcleos que se realicen en obra. Los cambios generados en las mezclas patrones pueden considerarse como de referencia en un proceso de diseño y comparar con los resultados obtenidos en la mezcla colocada en la obra y exigir un umbral de cumplimiento.
- Con el concepto de energía absorbida por la mezcla asfáltica tal como ha sido planteado en el análisis realizado, se puede tener una valoración de ésta en función de la resistencia a la fisuración que puede desarrollar la mezcla en servicio.

## AGRADECIMIENTOS

A todo el Personal del LEMaC que estuvo involucrado en el PID+i de referencia en la persona del Dr. Ing. Gerardo Botasso, Director del mismo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Botasso, G.H. (2007). Inclusión de caucho reciclado en mezclas asfálticas. Tesis para Magíster en Ingeniería Ambiental. Resolución 182-04 del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación (Argentina).
- Botasso, G.H. (2018). Empleo del polvo de NFU en Mezclas asfálticas. *Revista SLTCaucho*, (27), pp. 26-30.
- Ministerio de Transporte (2017). Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos. Vialidad Nacional. Presidencia de la Nación Argentina.
- Martínez Reguero, A.H. (2000). Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio.

Norma UNE-EN 12697-22:2008+A1:2008. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura.

Norma UNE-EN 12697-33:2006+A1:2007. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa.

Norma UNE-EN 12697-23:2018. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.