



JORNADAS RECICLAJE

B O G O T Á 2 0 2 5

Los desafíos técnicos y ambientales en el uso responsable de MBR con polvo de NFU en capas de pavimento: una visión integral para la sostenibilidad vial en Latinoamérica

Manuel S. Ocampo-Terreros
Andrés J. Arias- Gómez



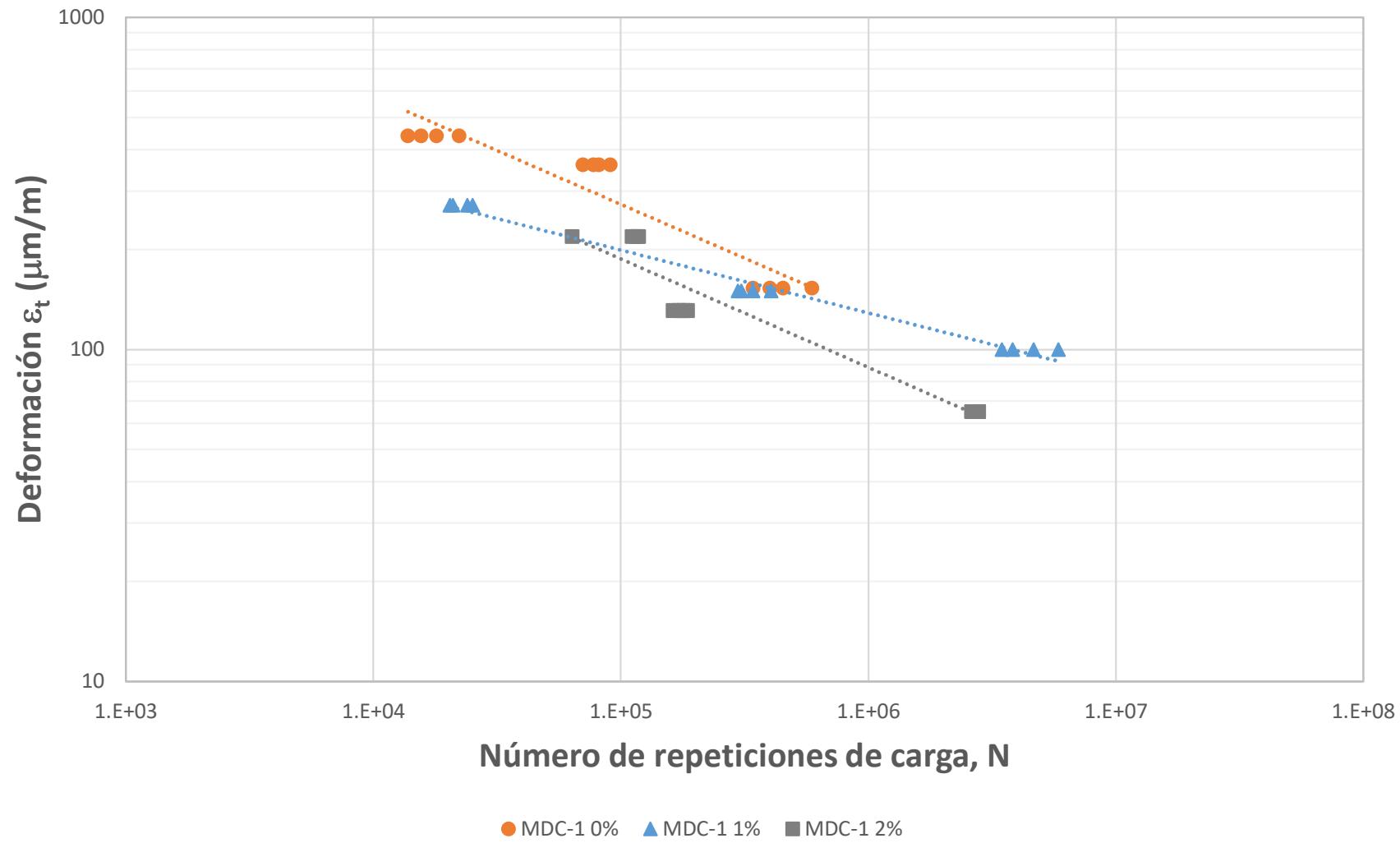
MEZCLAS ASFÁLTICAS MEJORADOS CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MDC-1 + GCR - Fatiga (NFP-98-260)

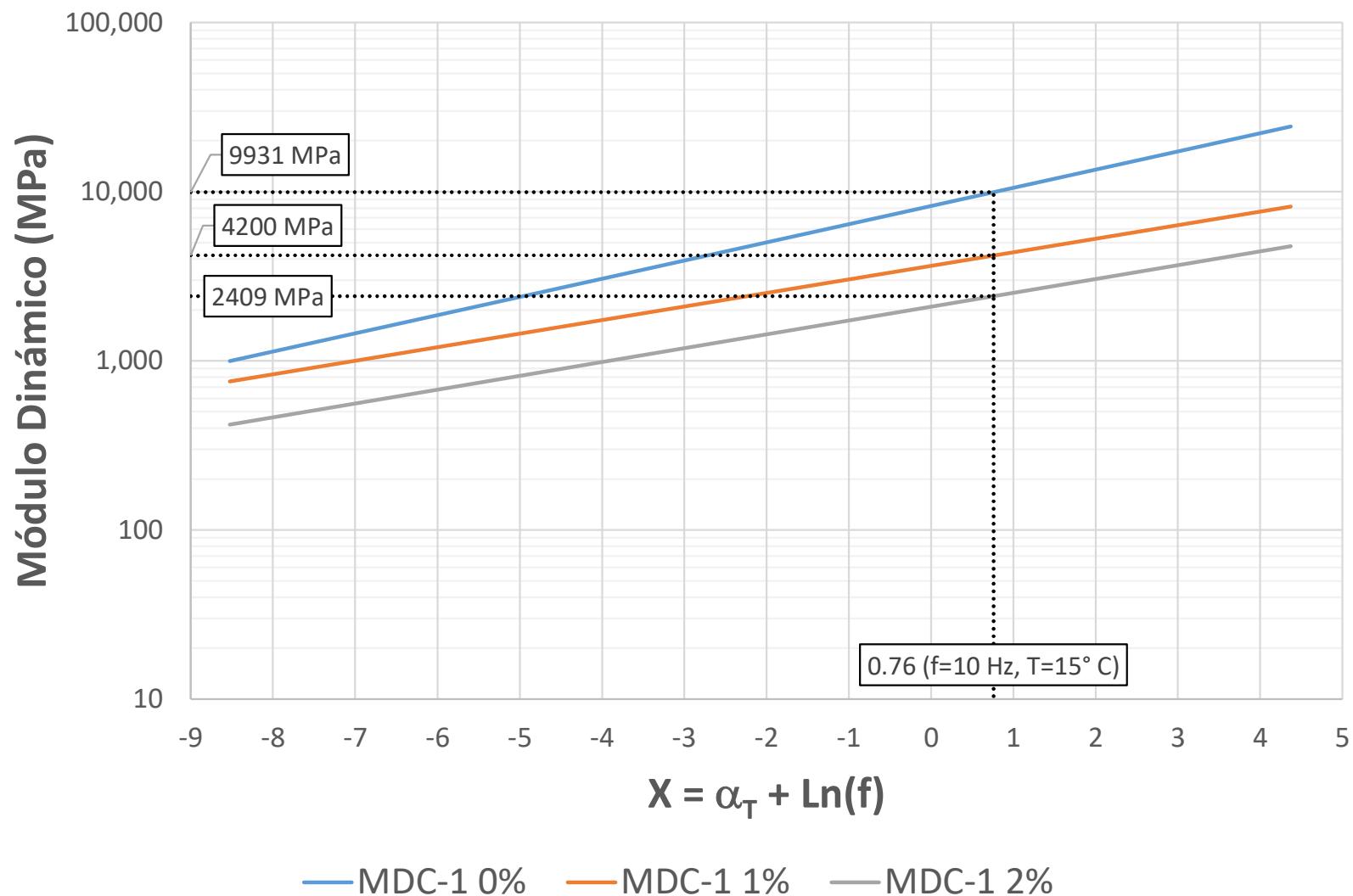


Contrato IDU 366-01



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MDC-1 + GCR – Módulo Dinámico (INV E-754-96)

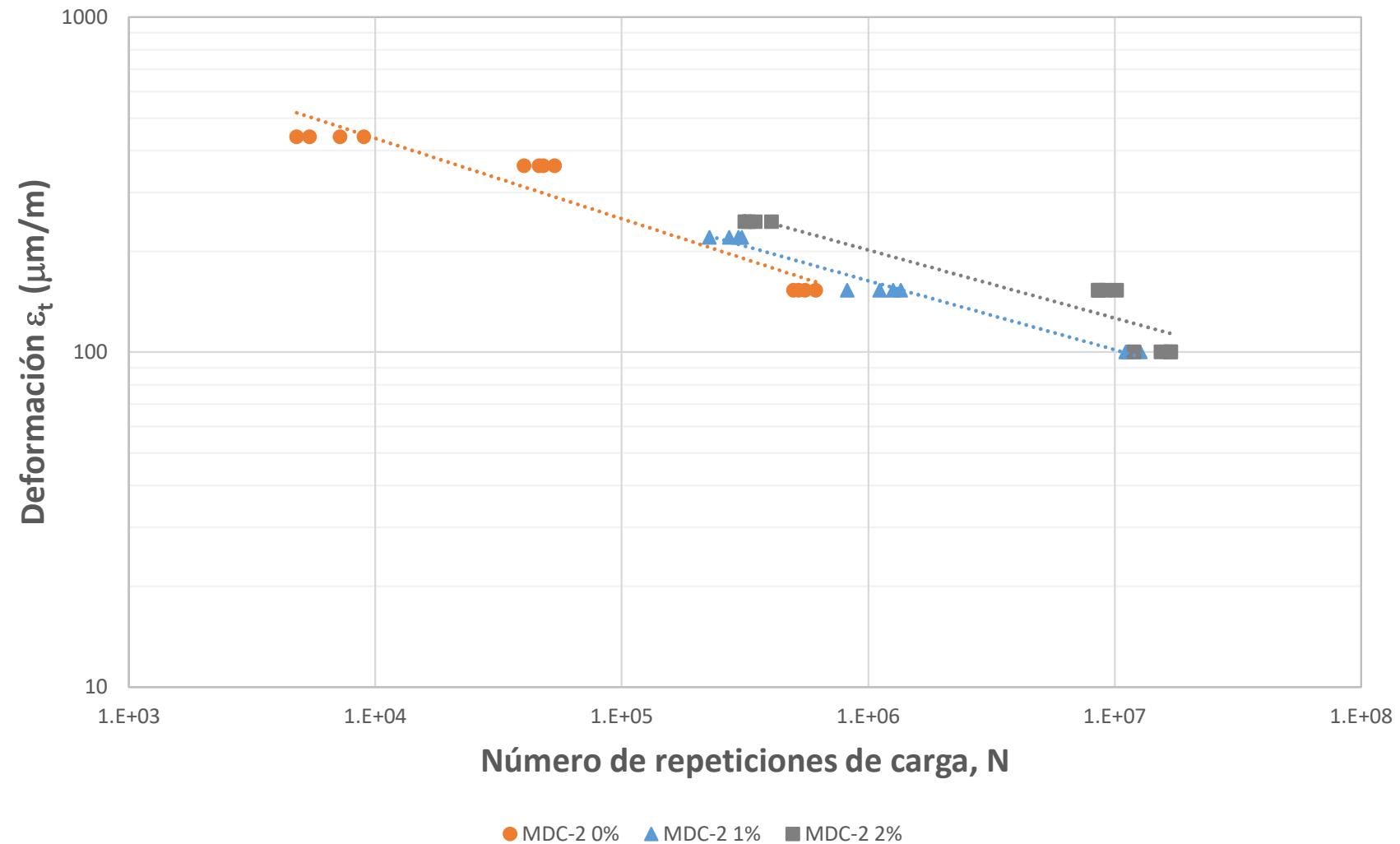


Contrato IDU 366-01



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MDC-2 + GCR – Fatiga (NFP-98-260)

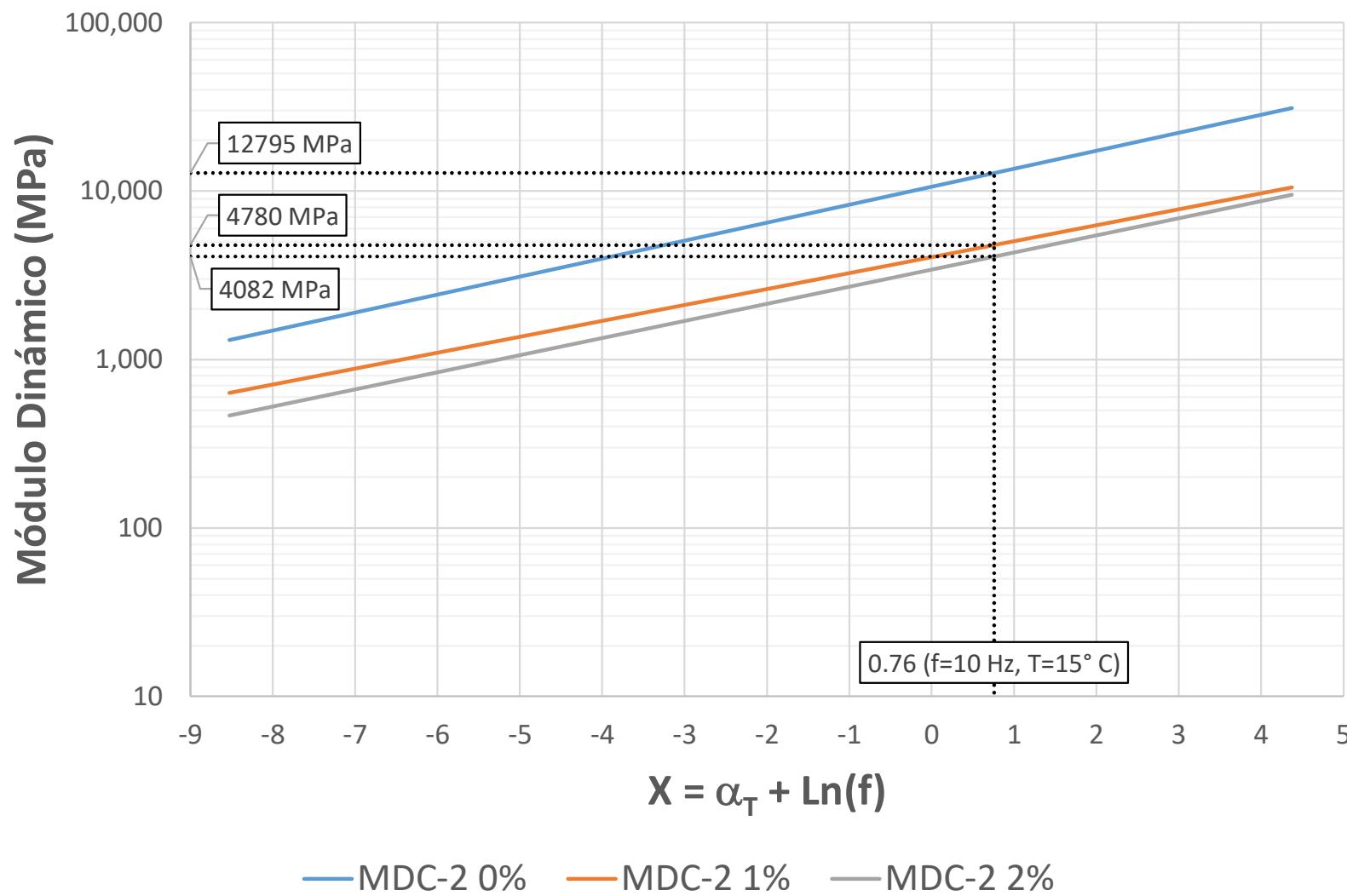


Contrato IDU 366-01



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MDC-2 + GCR – Módulo Dinámico (INV E-754-96)



Contrato IDU 366-01



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MATERIALES RECICLADOS MBR PARA USO EN CAPAS ASFÁLTICAS

**PISTA PARA PRUEBA ACELERADA DE
PAVIMENTO (APT)**

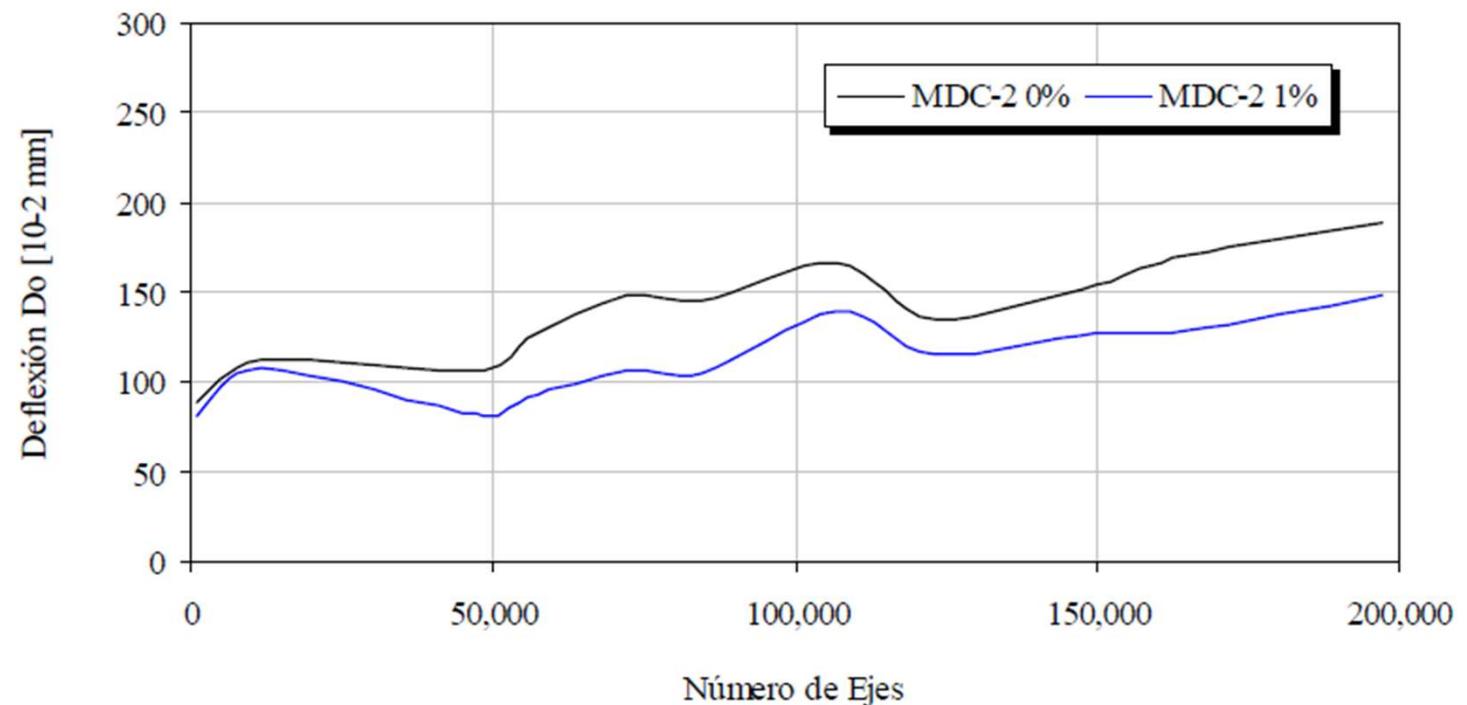
Deflexiones



Antiguo equipo de pista Universidad de Los Andes



VARIACIÓN DE LA DEFLEXIÓN Do RESPECTO AL NÚMERO DE EJES



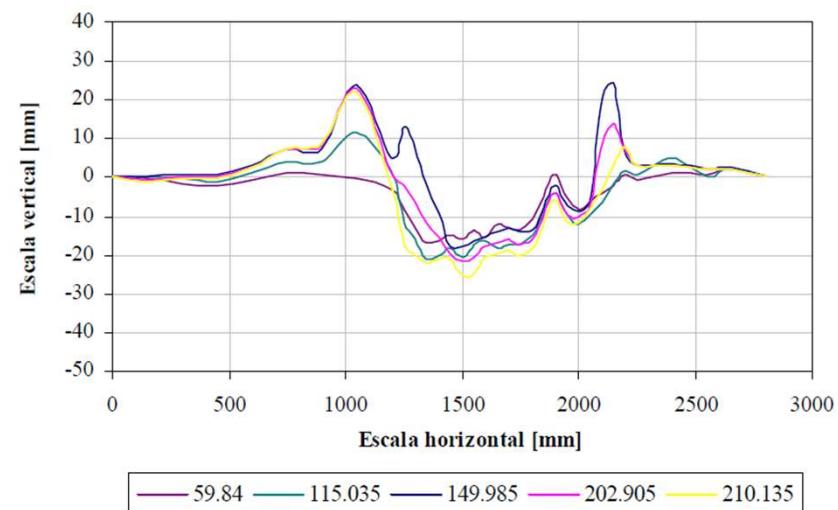
Contrato IDU 366-01



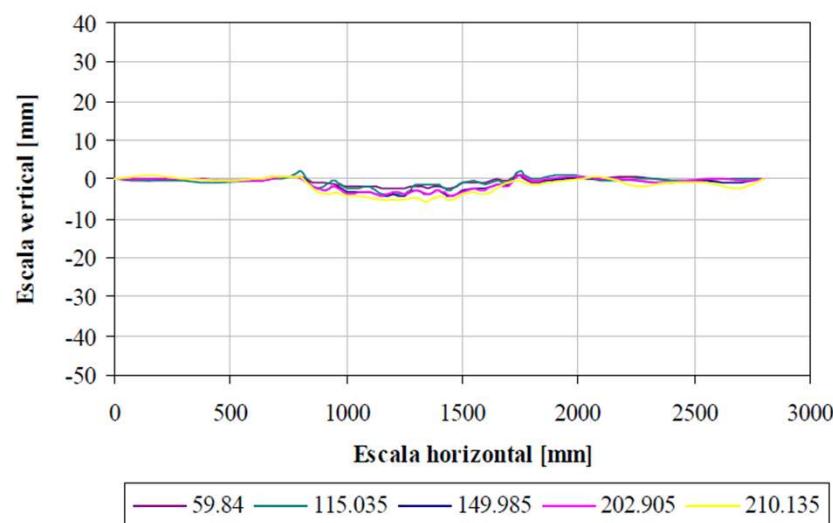
JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

Ahuellamiento

Antiguo equipo de pista Universidad de Los Andes



MDC-2 + 0% NFU



MDC-2 + 2% NFU

Contrato IDU 366-01



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

Densidad de Fisuración

Antiguo equipo de pista Universidad de Los Andes



MDC-2 + 0% NFU



MDC-2 + 2% NFU

Contrato IDU 366-01



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025



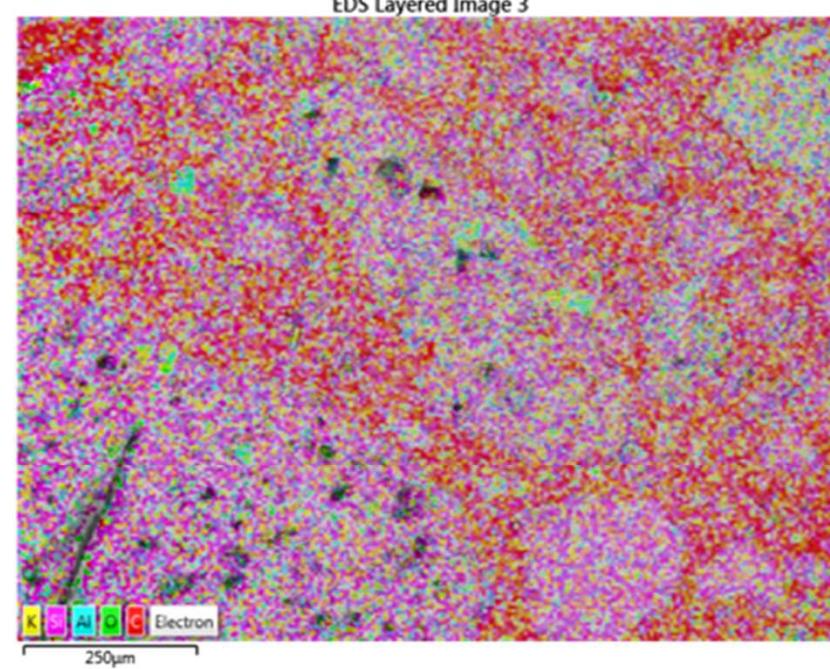
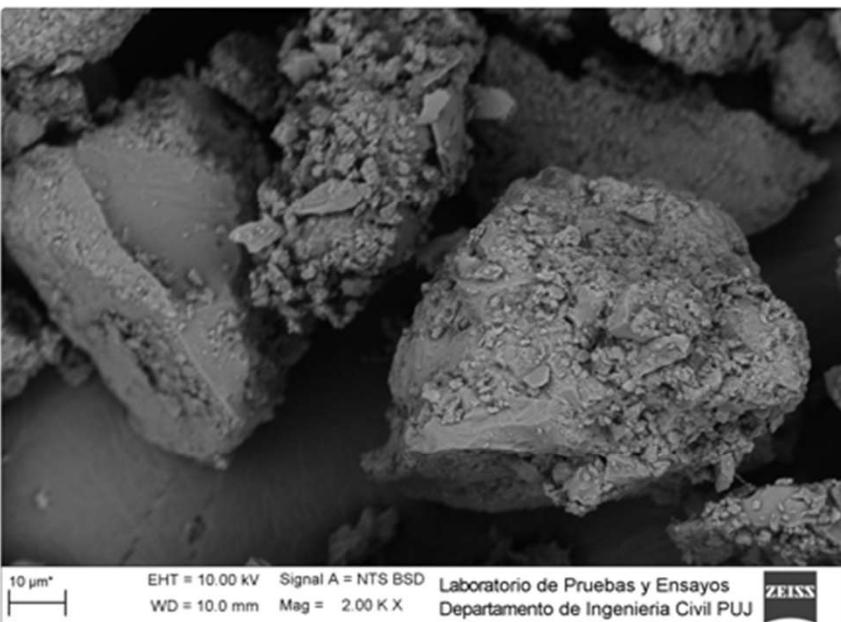
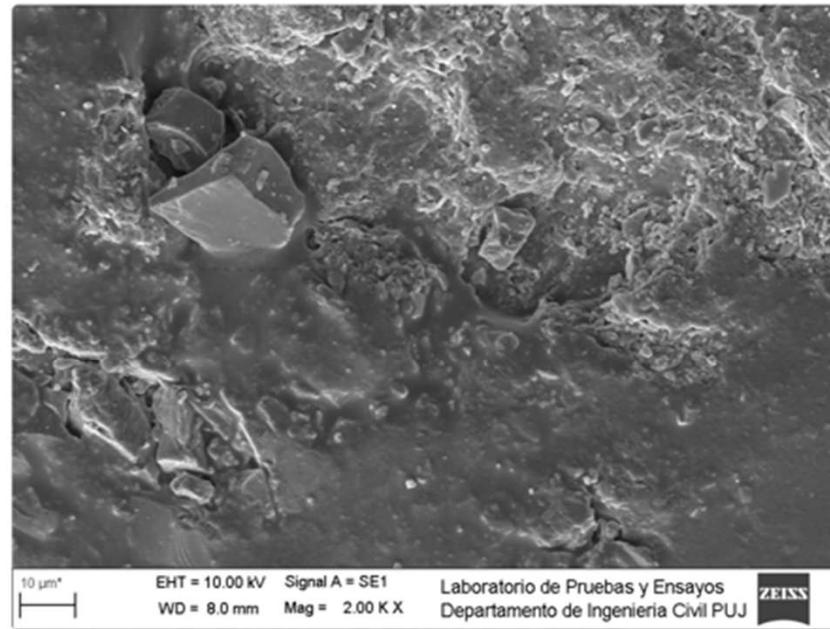
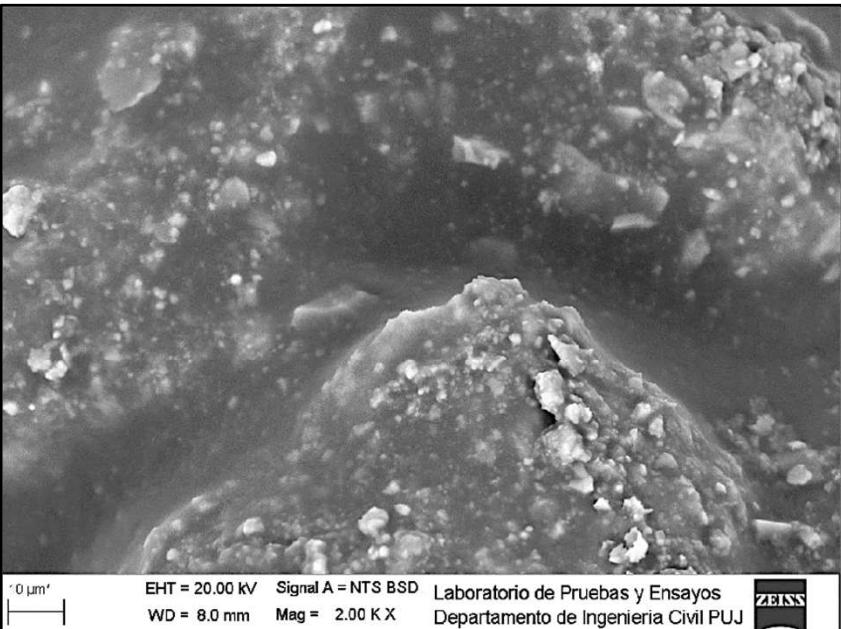
Material Bituminoso Reciclado

MBR

- Ligante
- Agregado con ligante
- Agregado sin ligante



MBR - Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)



JORNADAS RECICLAJE
B O G O T Á 2 0 2 5



MATERIALES RECICLADOS MBR PARA USO EN CAPAS ASFÁLTICAS

Mezclas en Caliente

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica



**JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025**

MD19 + MBR – Tamaños de partículas

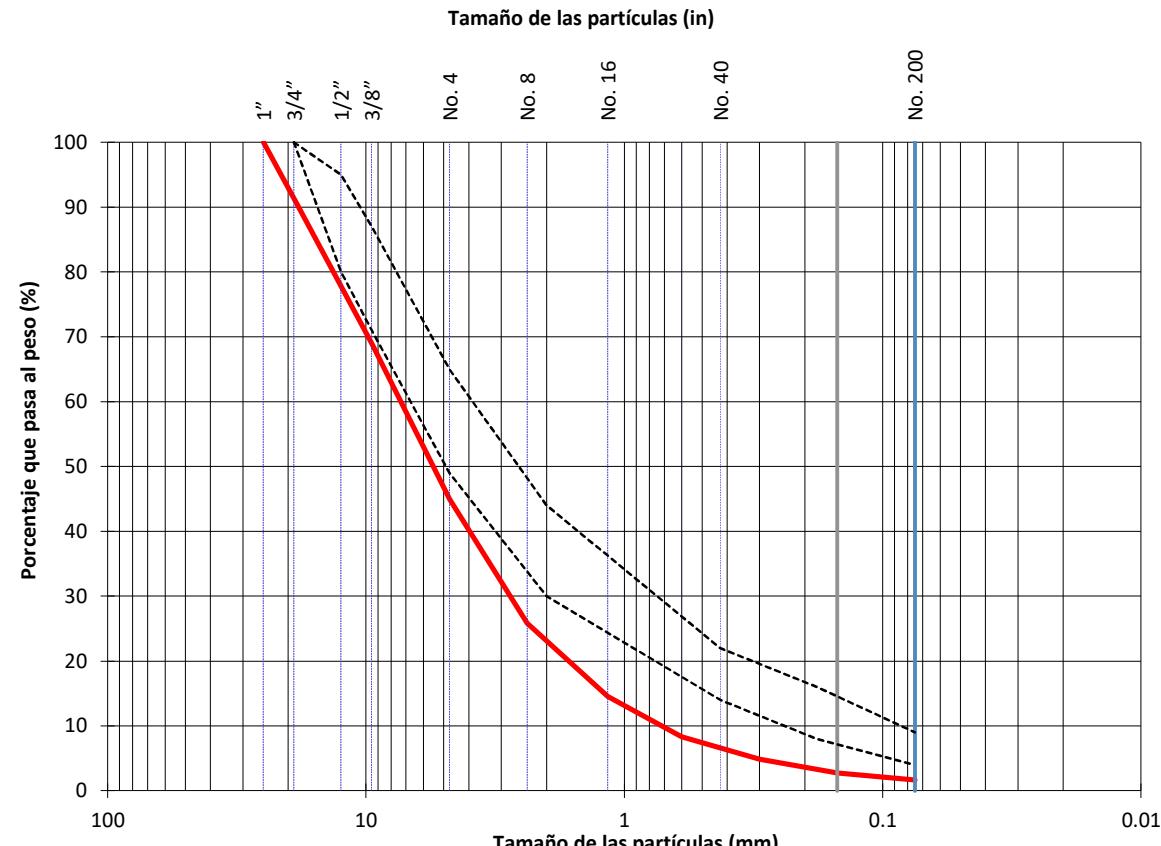
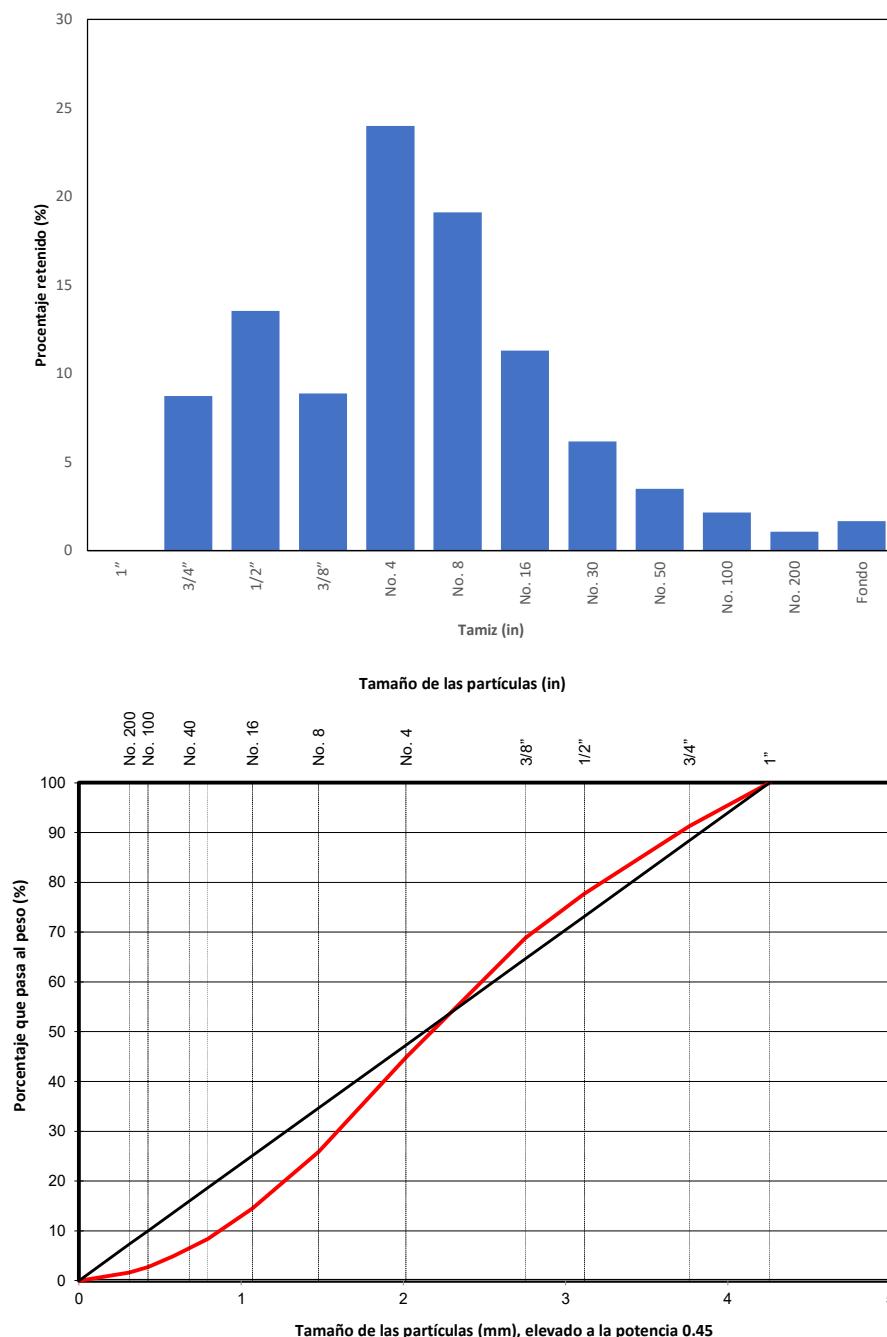


Tabla 620.4
Granulometría de agregados combinados para mezclas asfálticas en caliente

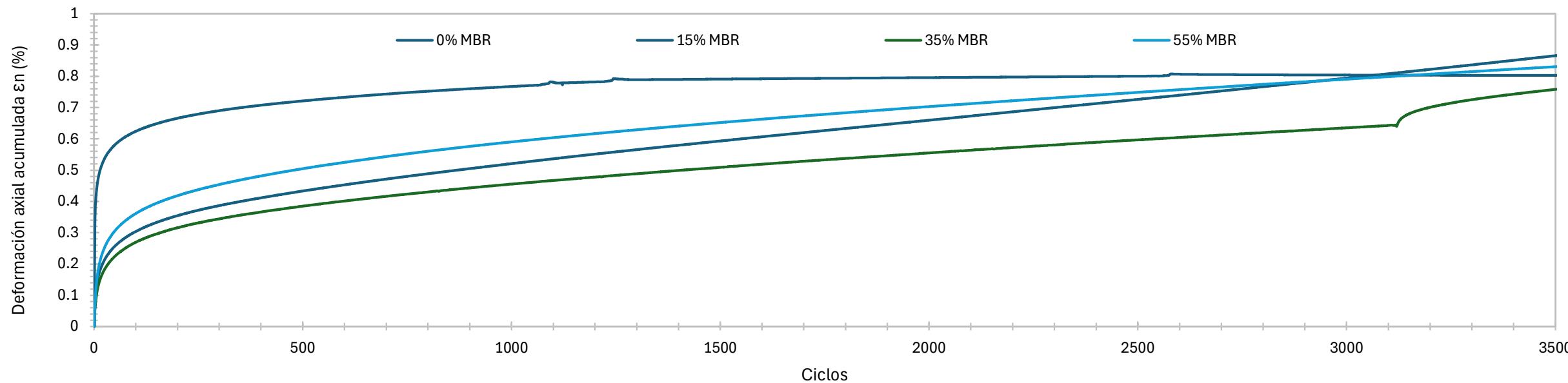
Tipo de mezcla	Tamiz (mm / U.S. Standard)										
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075	
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200	
Densa	MD13				100	80-95	59-76	36-51	15-25	9-18	5-10
	MD19			100	80-95	71-87	49-65	30-44	14-22	8-16	4-9
	MD25		100	80-95	66-82	59-75	42-58	27-41	12-22	8-16	4-9
Tolerancias		± 4.00				± 3.00				± 1.00	

Contrato IDU 1677-22



JORNADAS RECICLAJE
B O G O T Á 2 0 2 5

MD19 + MBR – Deformación plástica (EN 12697-25:2019 Método A1)

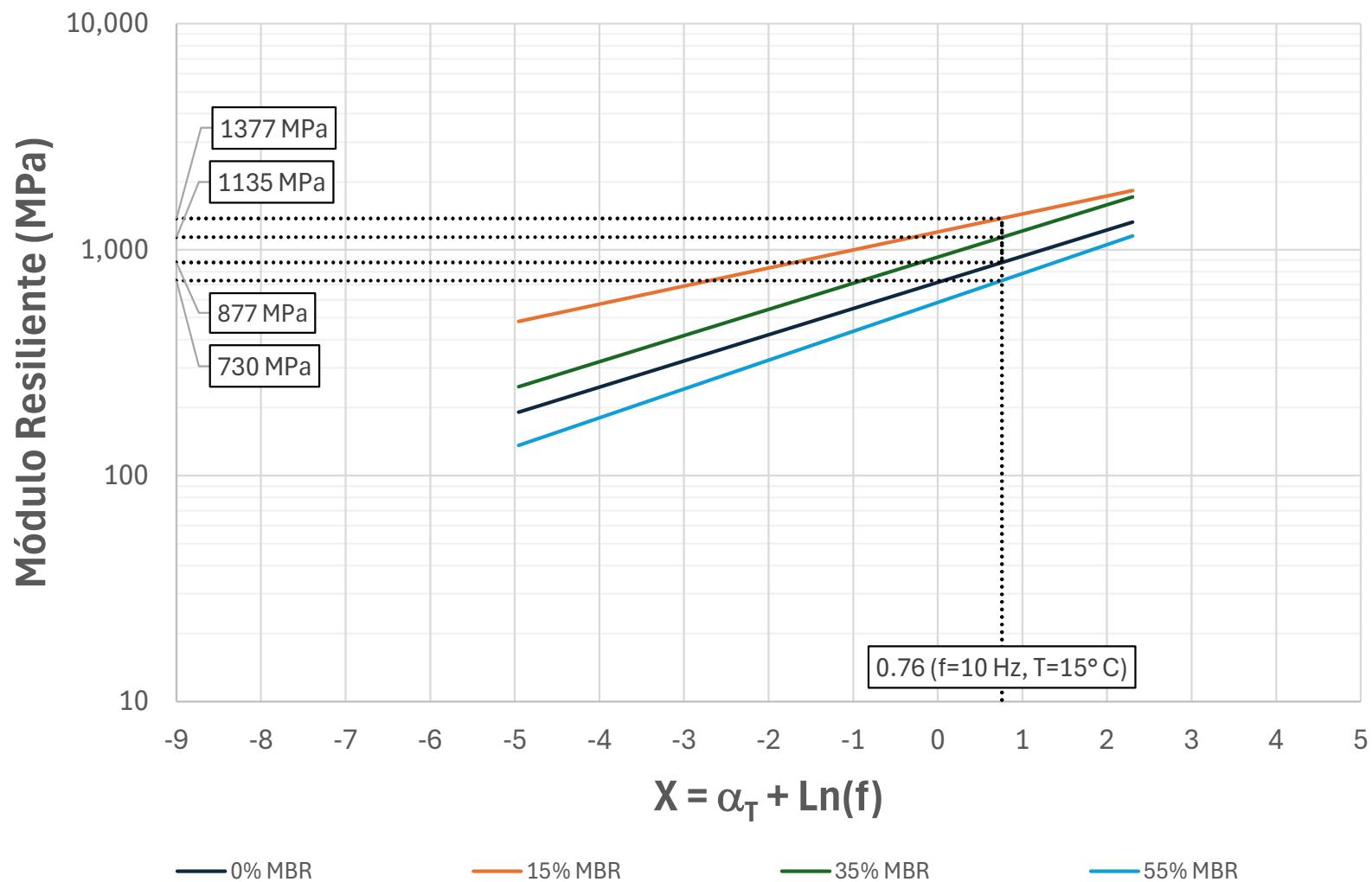


Mezcla	ε_n (%)	f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)
0% MBR	0.88	1.38
15% MBR	0.82	0.22
35% MBR	0.77	0.99
55% MBR	0.84	1.12

ε_n : Deformación axial acumulada a $n = 3600$ ciclos (%). Para mezclas densas, se sugiere menor a 4%.

f_c : Velocidad de fluencia ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$). Para mezclas densas, se sugiere menor a 1 $\mu\epsilon/\text{ciclo}$.

MD19 + MBR – Módulo Resiliente (EN 12697-25:2019 Método A1)

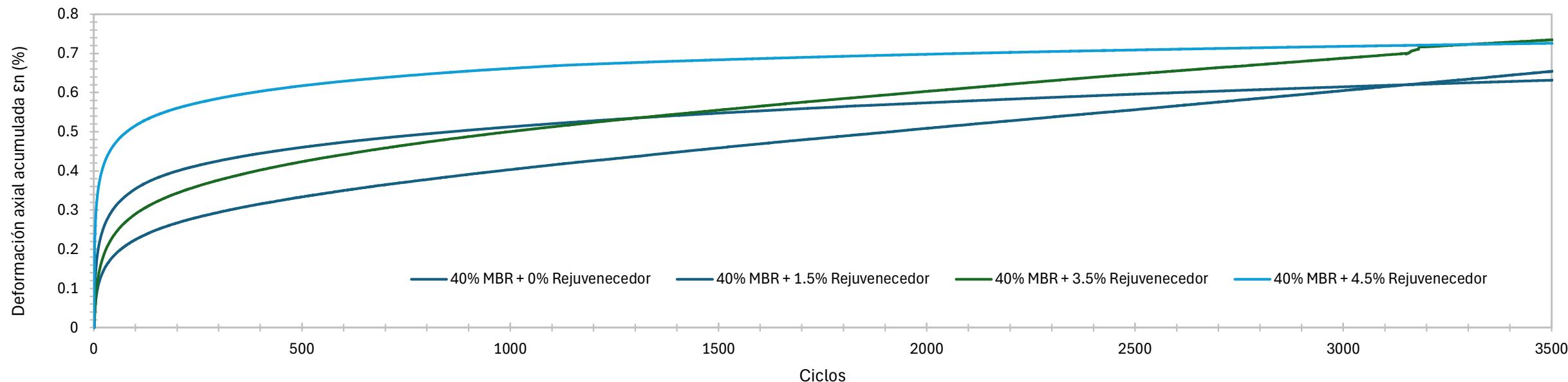


Contrato IDU 1677-22



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MD19 + 40% MBR + Rejuvenecedor – Deformación plástica (EN 12697-25:2019 Método A1)



Mezcla	ε_n (%)	f_c ($\mu\epsilon$ /ciclo)
40% MBR + 0% Rejuv.	0.66	1.05
40% MBR + 1.5% Rejuv.	0.64	0.61
40% MBR + 3.5% Rejuv.	0.75	1.02
40% MBR + 4.5% Rejuv.	0.73	0.34

ε_n : Deformación axial acumulada a $n = 3600$ ciclos (%). Para mezclas densas, se sugiere menor a 4%.

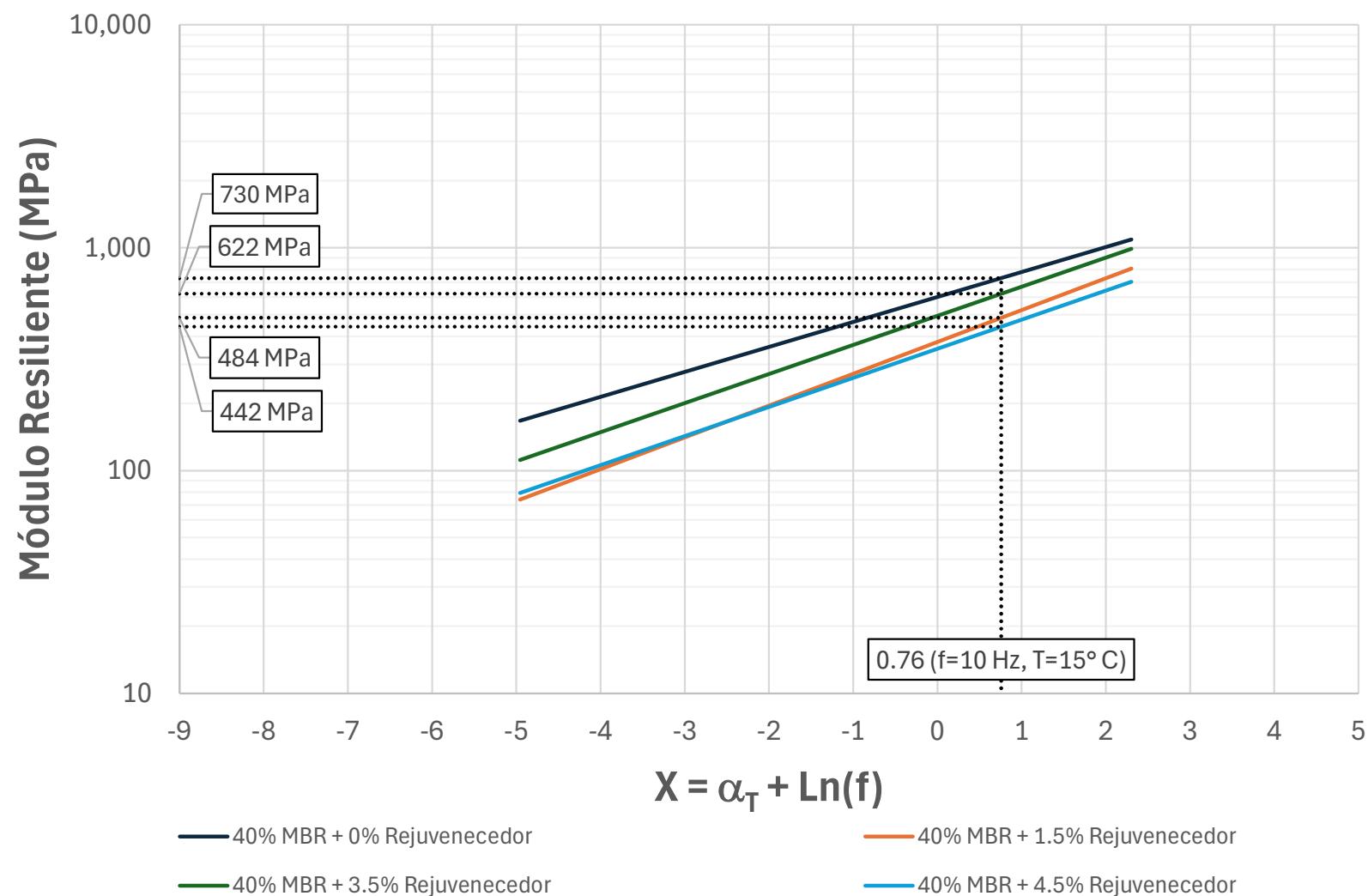
f_c : Velocidad de fluencia ($\mu\epsilon$ /ciclo). Para mezclas densas, se sugiere menor a 1 $\mu\epsilon$ /ciclo.

Contrato IDU 1677-22



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

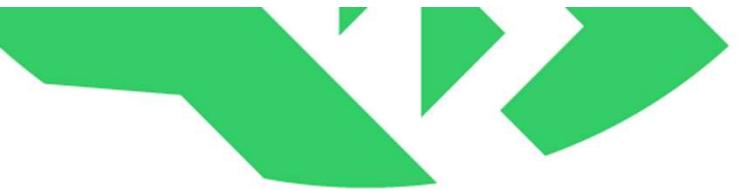
MD19 + 40% MBR + Rejuvenecedor – Módulo Resiliente (EN 12697-25:2019 Método A1)



Contrato IDU 1677-22



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025



MATERIALES RECICLADOS MBR PARA USO EN CAPAS ASFÁLTICAS

Mezclas en Frío

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica



**JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025**

MDF19 + MBR – Tamaños de partículas

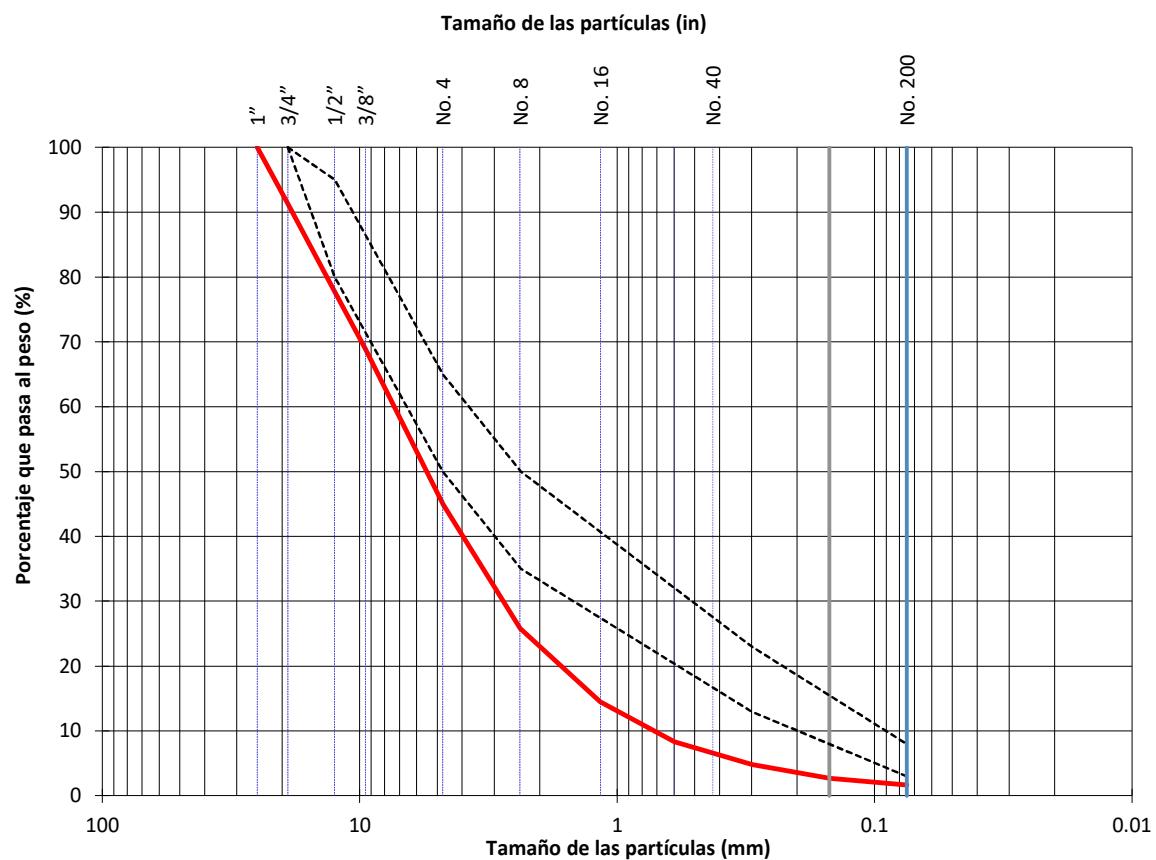
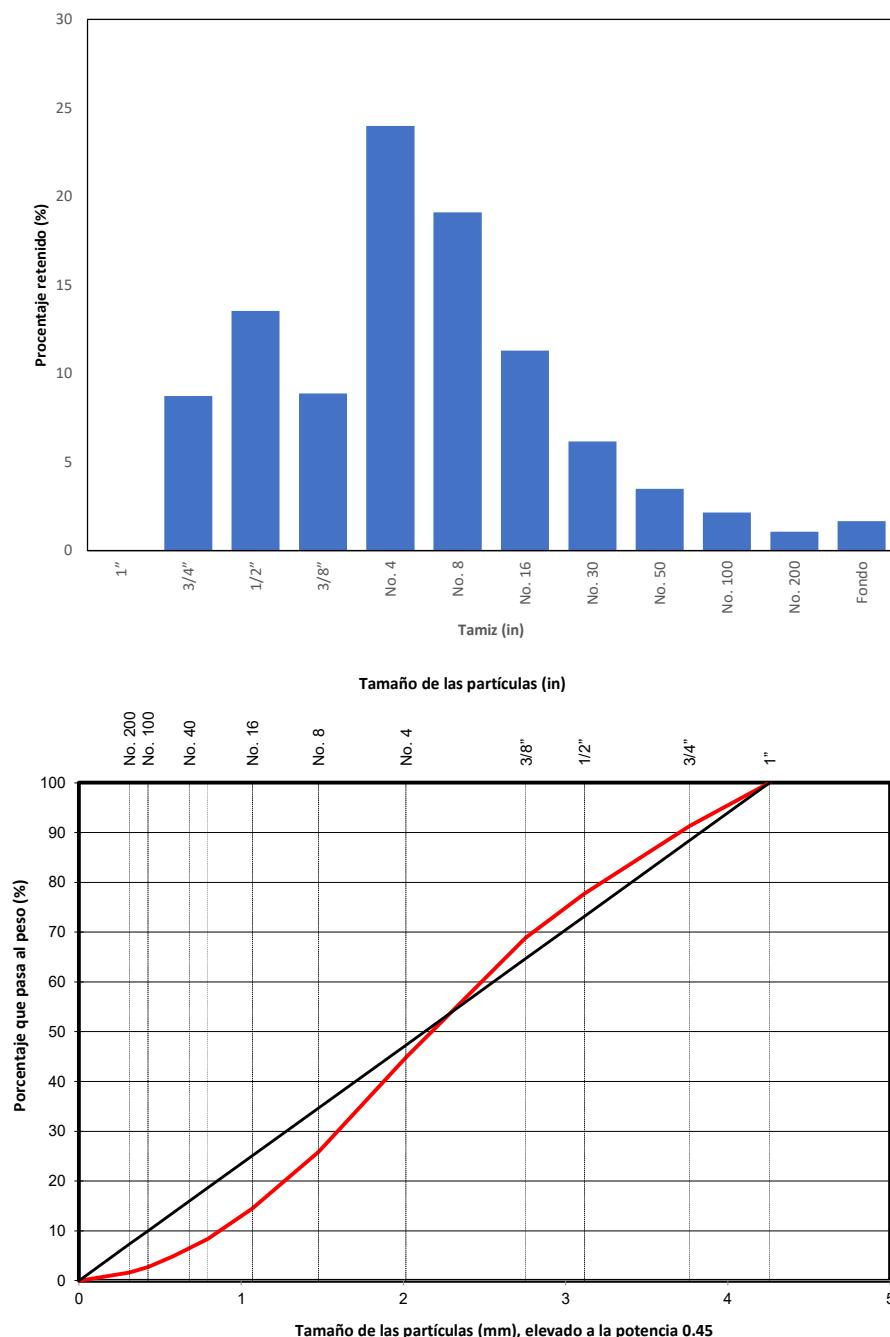


Tabla 628.4
Granulometría de agregados combinados para mezclas asfálticas en frío

Tipo de Mezcla	Tamiz (mm / U.S. Standard)								
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.36	0.300	0.075
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 50	No. 200
% Pasa									
MDF19			100	80-95	-	50-65	35-50	13-23	3-8
MDF25		100	80-95	-	60-75	47-62	35-50	13-23	3-8
MDF38	100	80-95	-	62-77	-	45-60	35-50	13-23	3-8
Tolerancias					± 4.0			± 3.0	± 1.0

Contrato IDU 1677-22

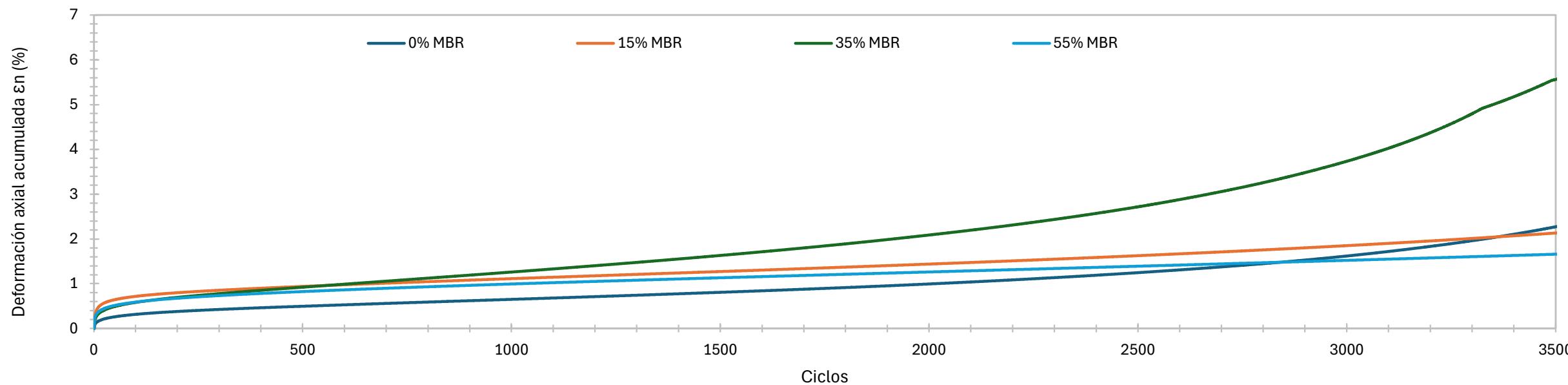
9

(IDU 628-18)



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MDF19 + MBR – Deformación plástica (EN 12697-25:2019 Método A1)

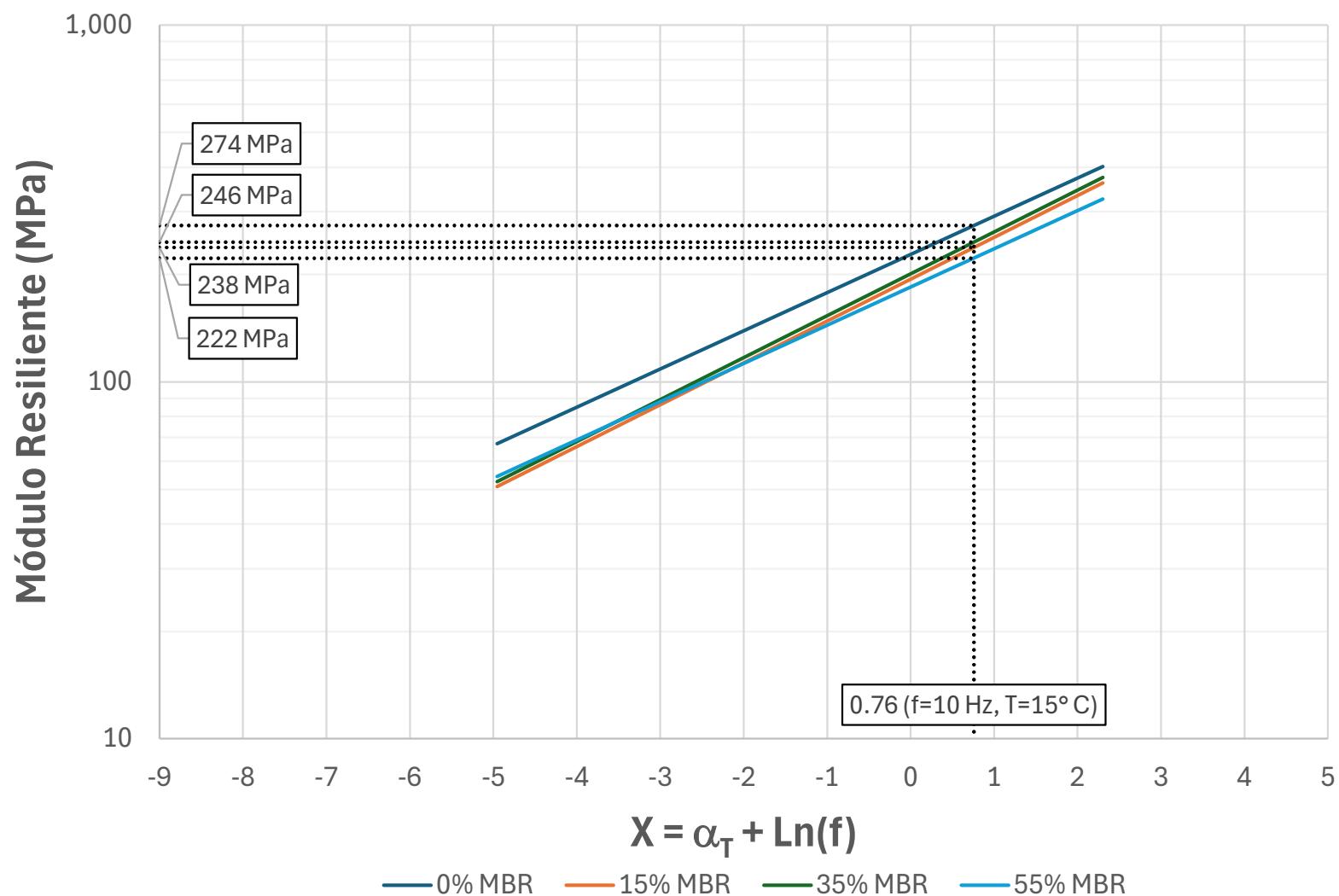


Mezcla	ε_n (%)	f_c ($\mu\epsilon$ /ciclo)
0% MBR	2.47	4.85
15% MBR	2.20	3.24
35% MBR	6.37	8.17
55% MBR	1.69	2.67

ε_n : Deformación axial acumulada a $n = 3600$ ciclos (%). Para mezclas densas, se sugiere menor a 4%.

f_c : Velocidad de fluencia ($\mu\epsilon$ /ciclo). Para mezclas densas, se sugiere menor a 1 $\mu\epsilon$ /ciclo.

MDF19 + MBR – Módulo Resiliente (EN 12697-25:2019 Método A1)



Contrato IDU 1677-22



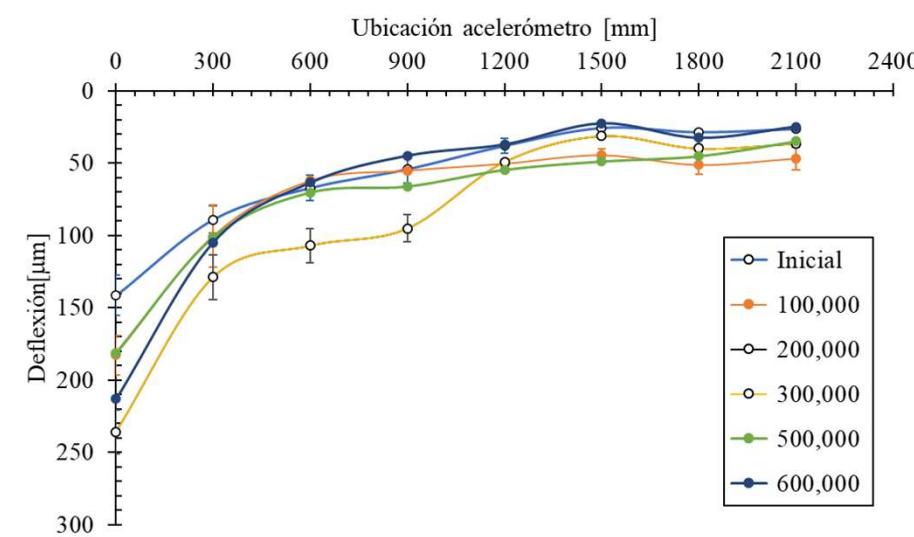
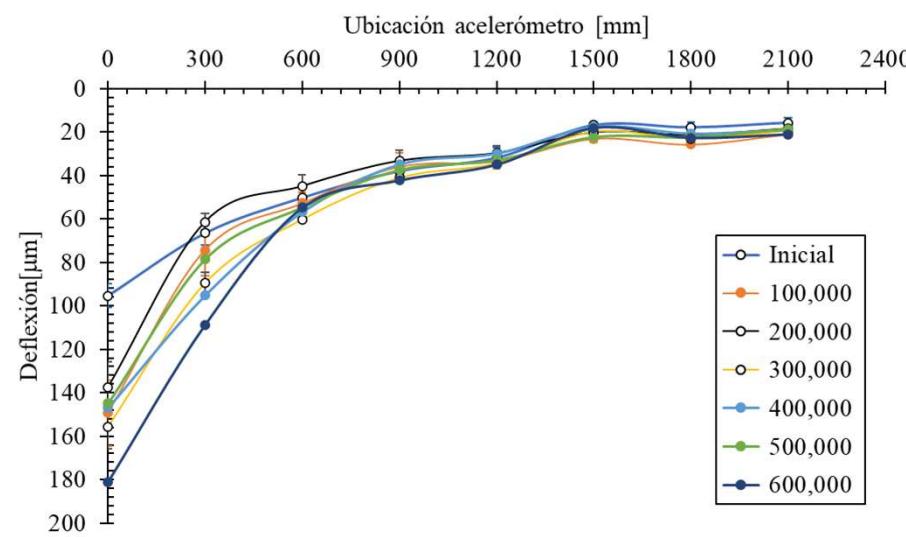
JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MATERIALES RECICLADOS MBR PARA USO EN CAPAS ASFÁLTICAS

**PISTA PARA PRUEBA ACELERADA DE
PAVIMENTO (APT)**

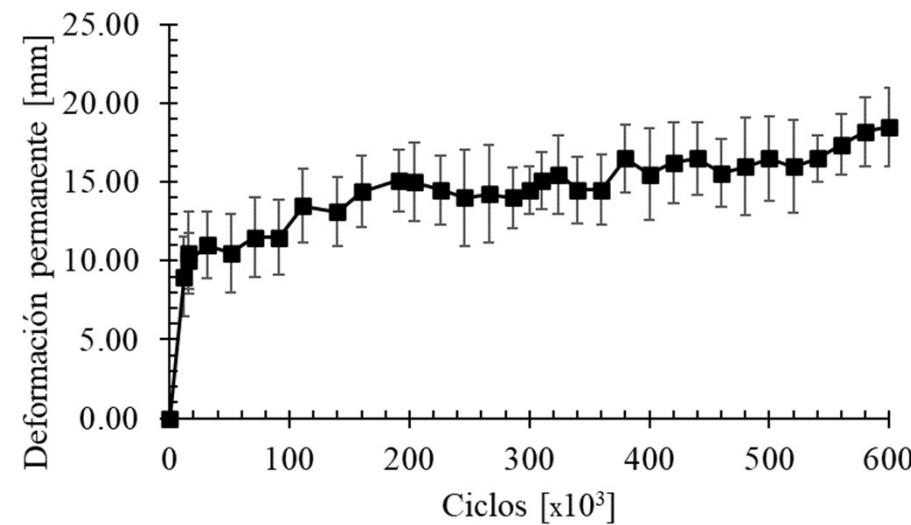
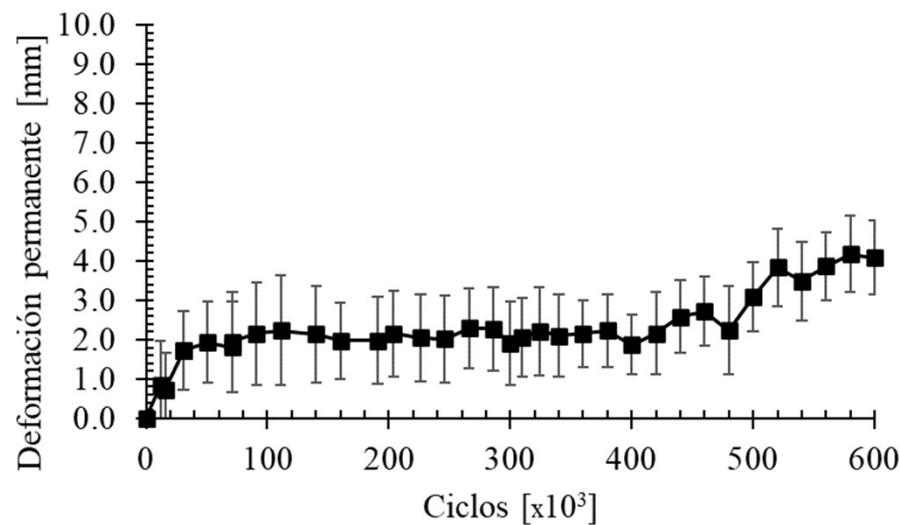
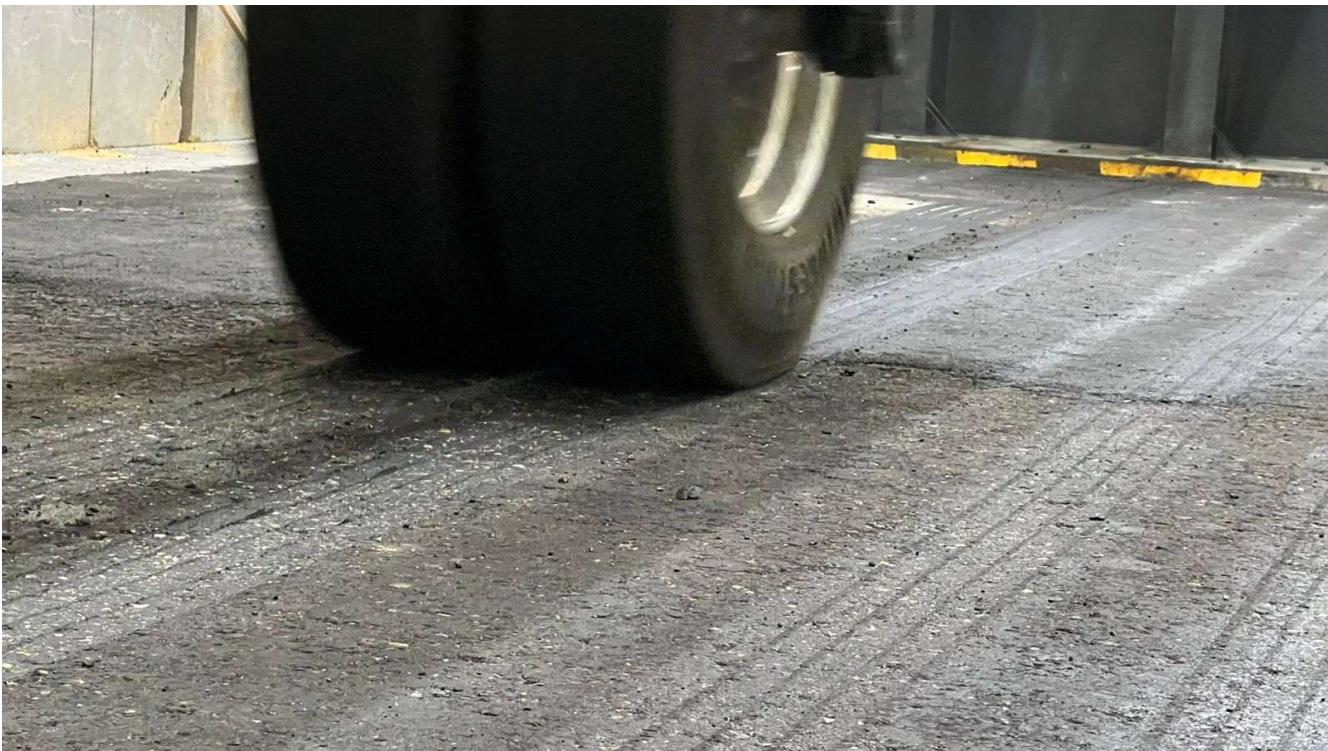
Deflexiones

Equipo de pista Pontificia Universidad Javeriana



Ahuellamiento

Equipo de pista Pontificia Universidad Javeriana



Contrato IDU 1677-22



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025



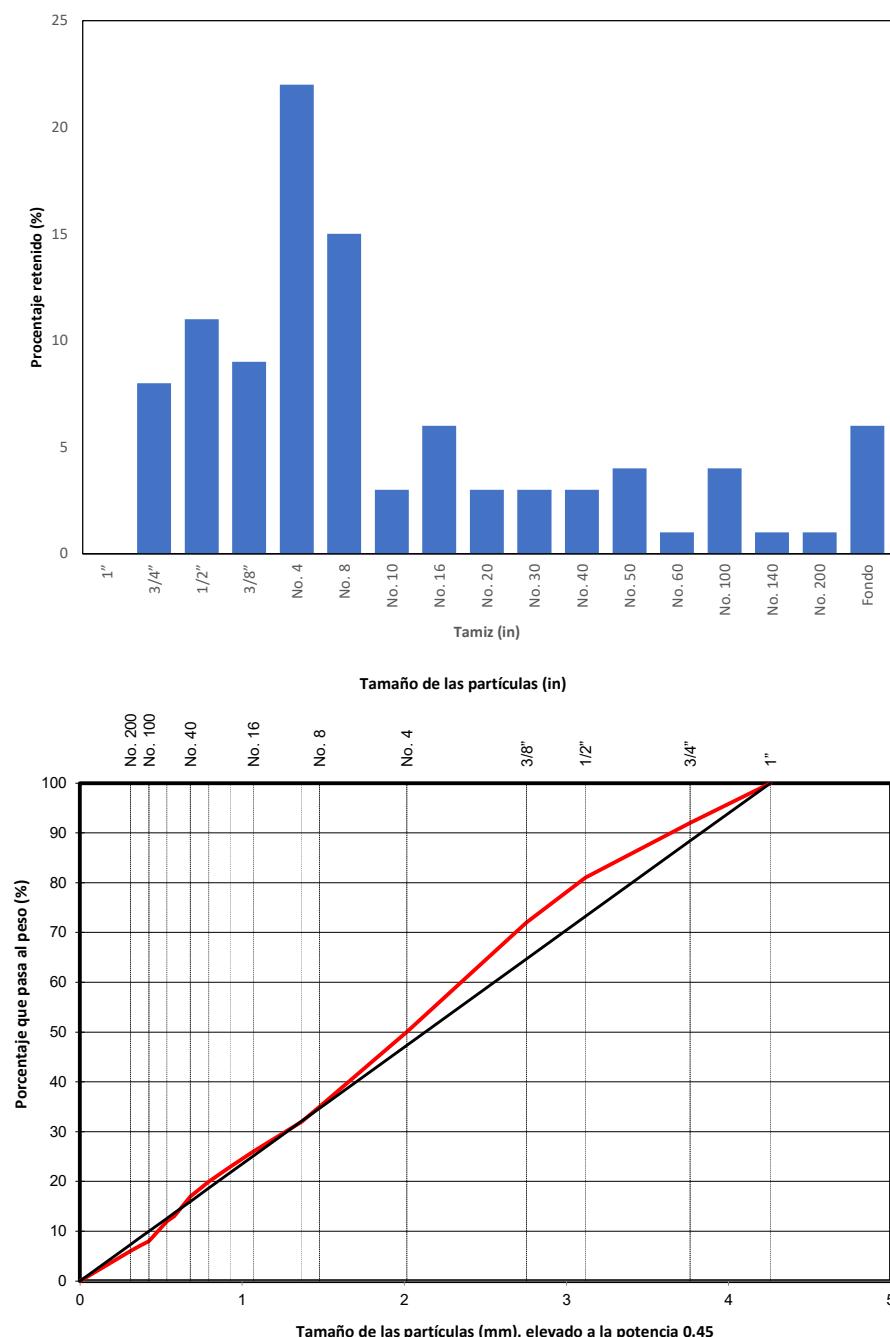
MATERIALES RECICLADOS MBR PARA USO EN BASES Y SUBBASES

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica

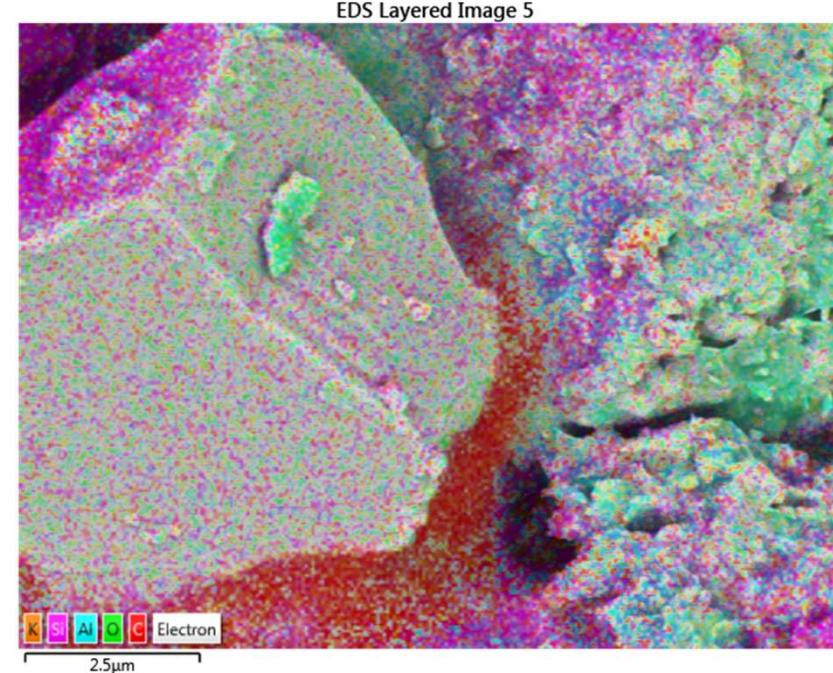
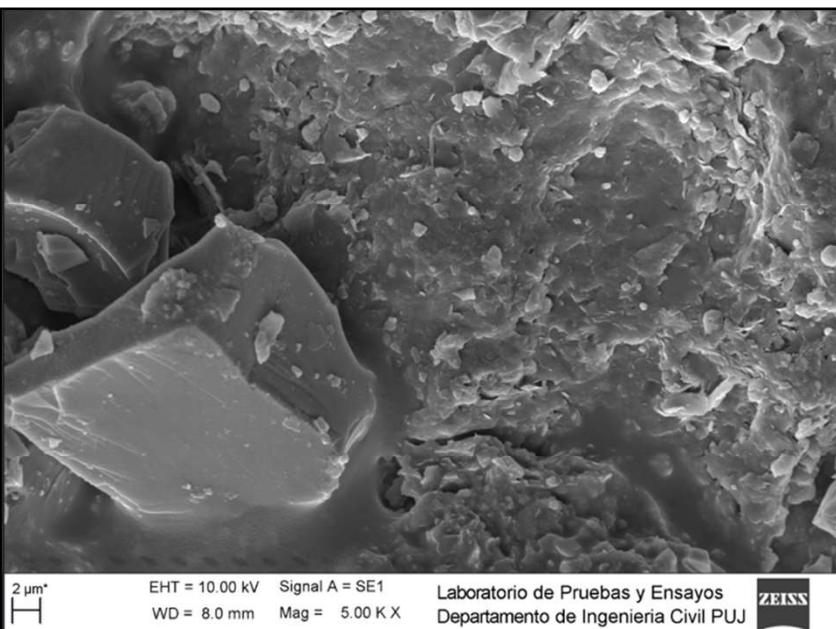
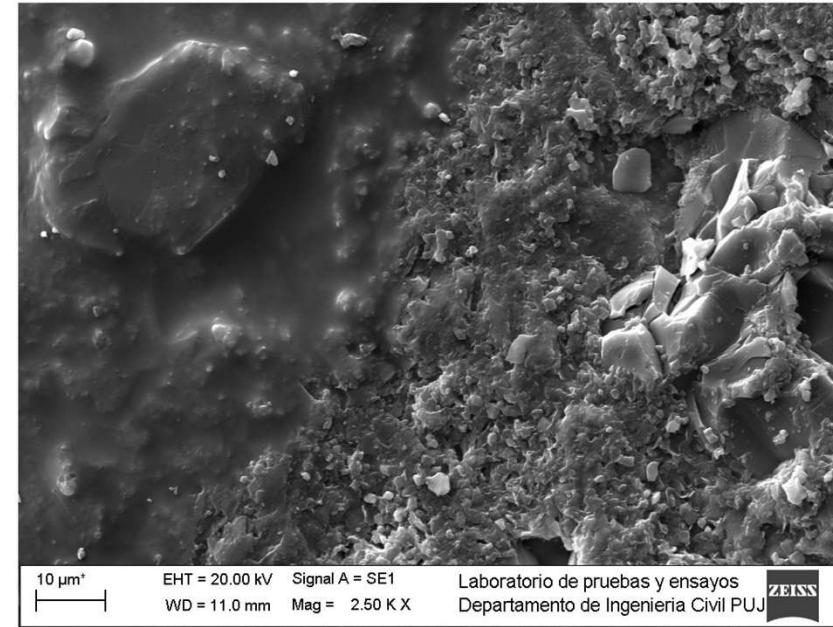
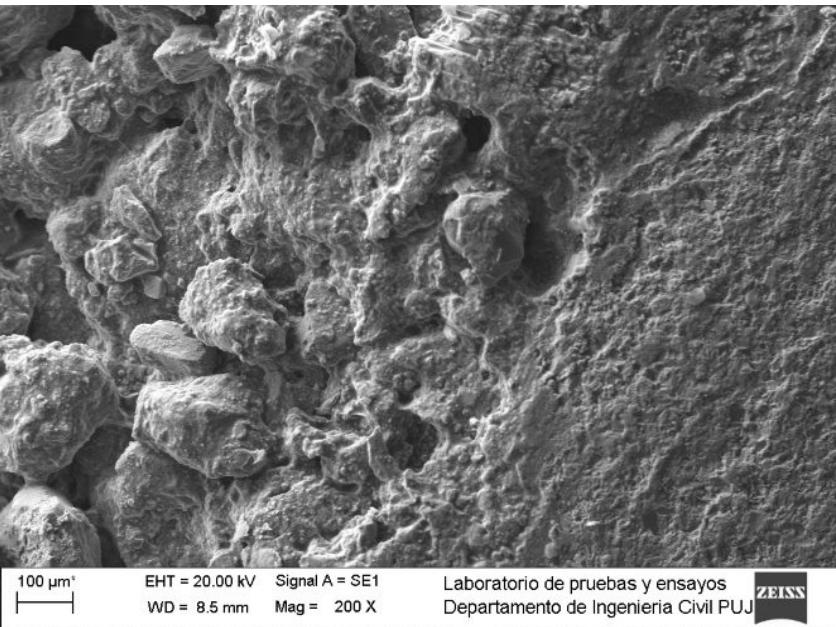


JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MBR – Tamaños de partículas

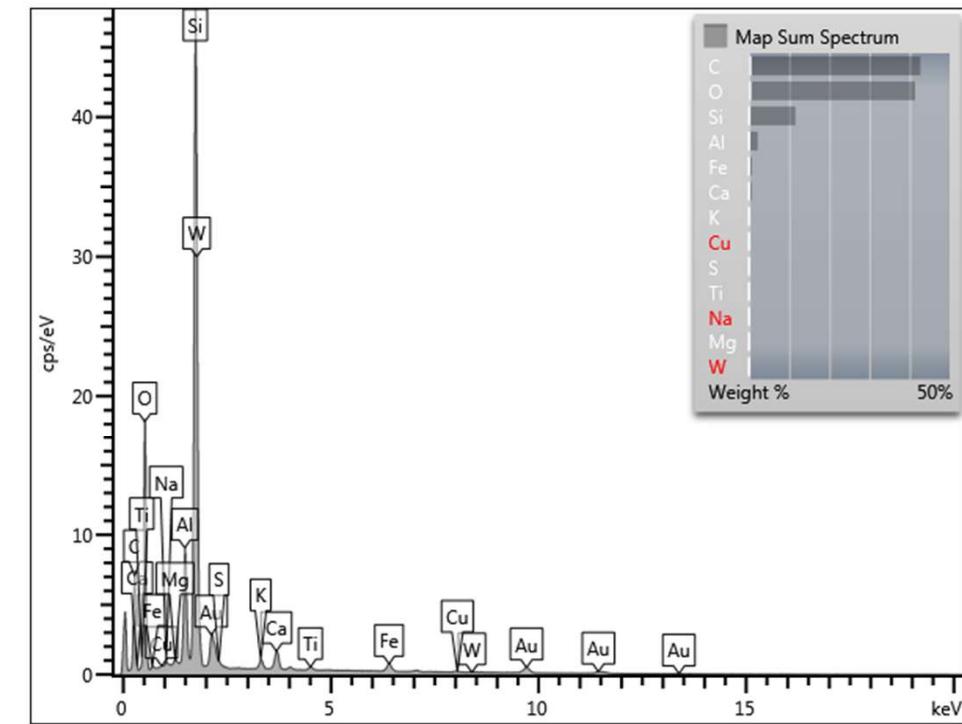
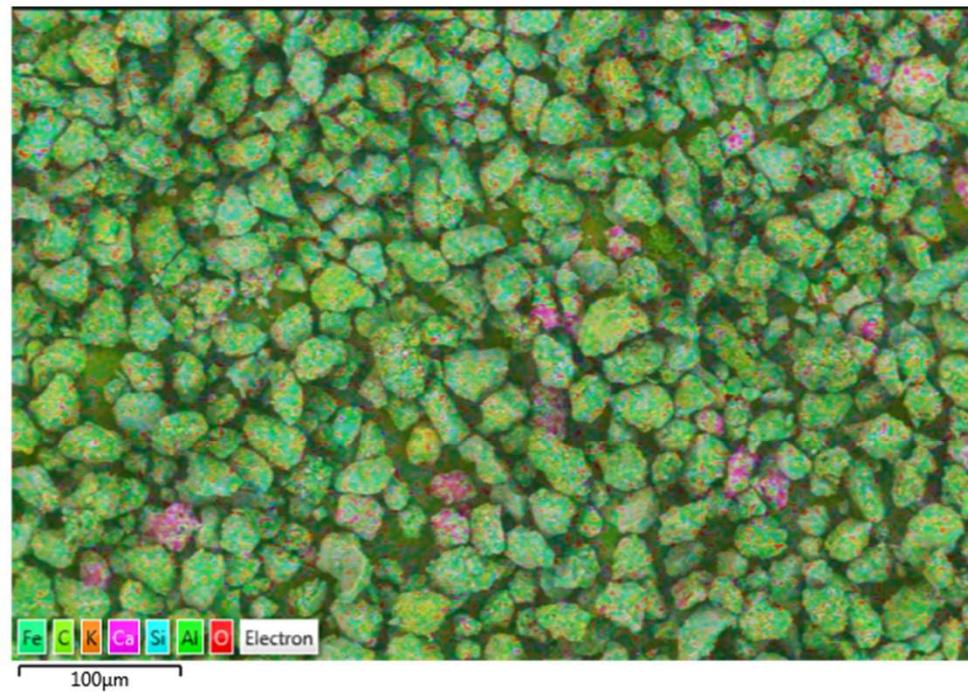


MBR - Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MBR - Análisis de composición elemental por Espectroscopía de Rayos X por Dispersión de Energía (EDS)



MBR - Clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados (NTC 6422:2021)

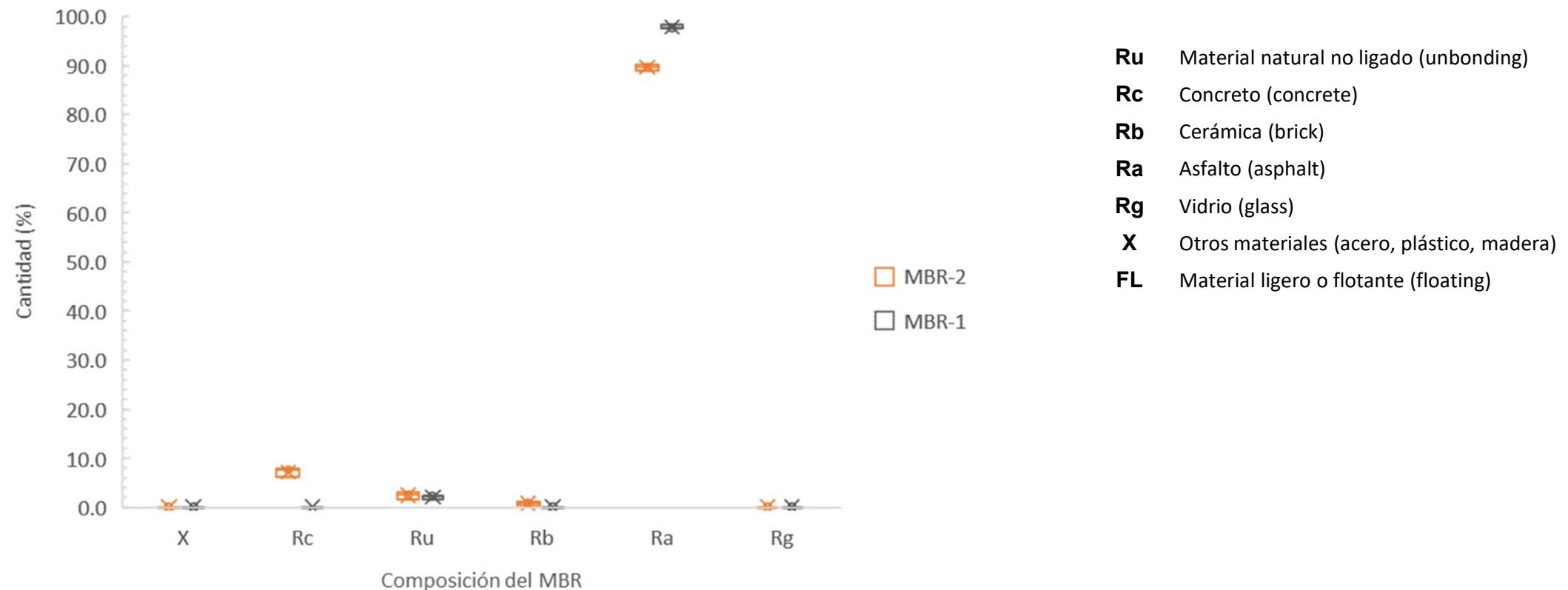


Tabla 511.2
Contenidos de los componentes de los agregados reciclados AR (fracción gruesa) para Base y Subbase Granular

Componente	Contenido (% en masa)	
	AR_BG	AR_SBG
Rc + Ru	> 65	> 50
Rb	< 35	< 50
Ra (Nota 1)	< 5	< 5
Rg	< 1	< 1
X (Nota 2)	< 1	< 1
FL (Nota 2)	1cm ³ /kg	2 cm ³ /kg

(1) El objetivo es que el agregado proveniente de pavimento asfáltico reciclado se utilice en mezclas de RAP.

(2) Cuando estos límites son superados, se considera que el material está contaminado.





MATERIALES RECICLADOS MEJORADOS CON CEMENTO PARA USO EN BASES Y SUBBASES

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MBR + Cemento - Resistencia a la Compresión Simple

Clase A →

(IDU 520-18)

Clase B →

(IDU 520-18)

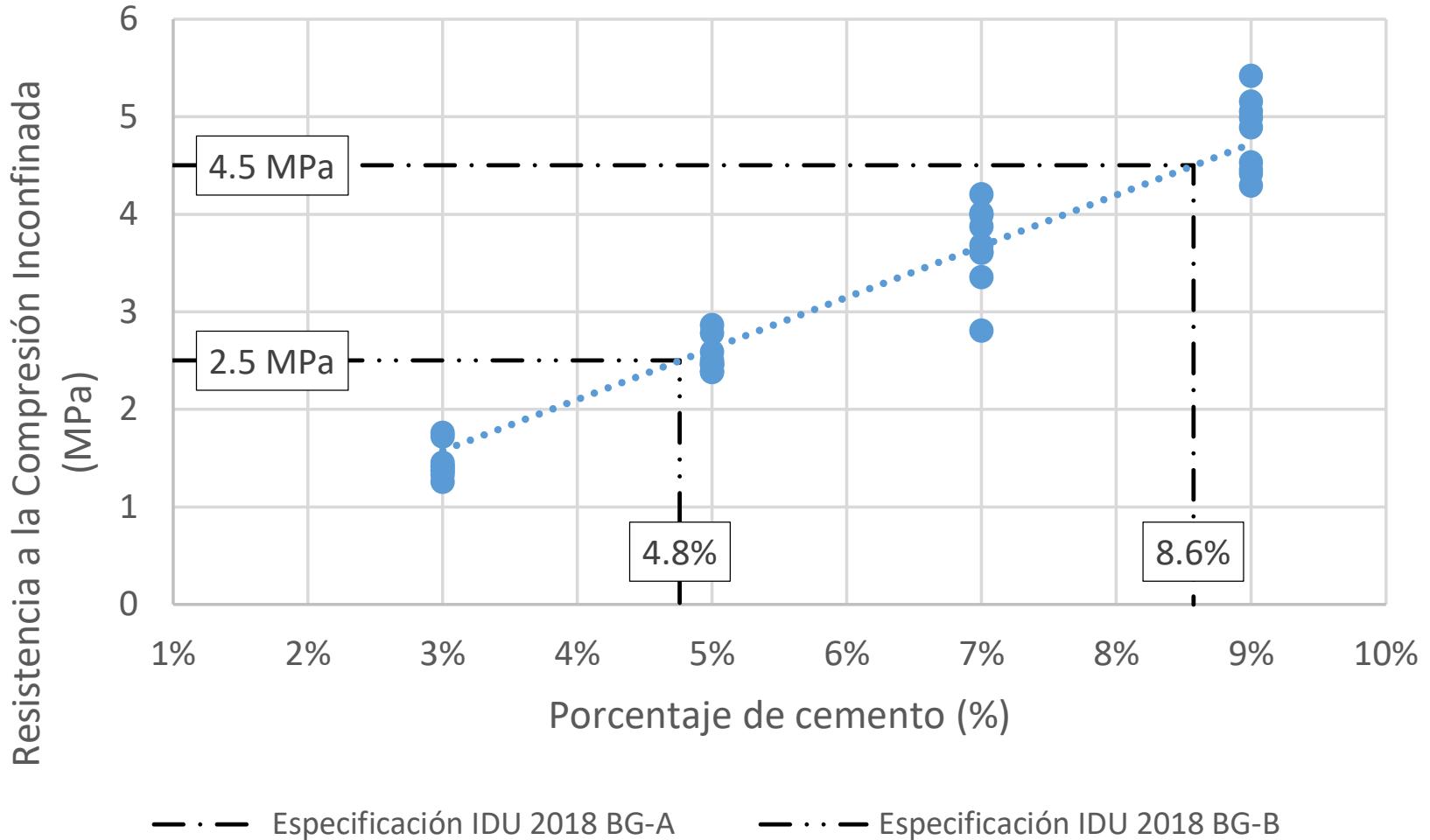


Tabla 520.5
Resistencias mínimas y máximas de mezclas de materiales granulares mejorados con cemento hidráulico

Característica	Norma de Ensayo	Clase de material granular a tratar con cemento hidráulico	
		BG_CH-B o SBG_CH-B	BG_CH-A o SBG_CH-A
Resistencia a la compresión a 7 días, mínimo MPa (Nota 1)	INV E-614-13	2.5	4.5

(1) Ensayo de resistencia a la compresión simple.



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MBR + Cemento – Módulo Resiliente

$Mr \geq 100 \text{ MPa} \longrightarrow$
(IDU 520-18)

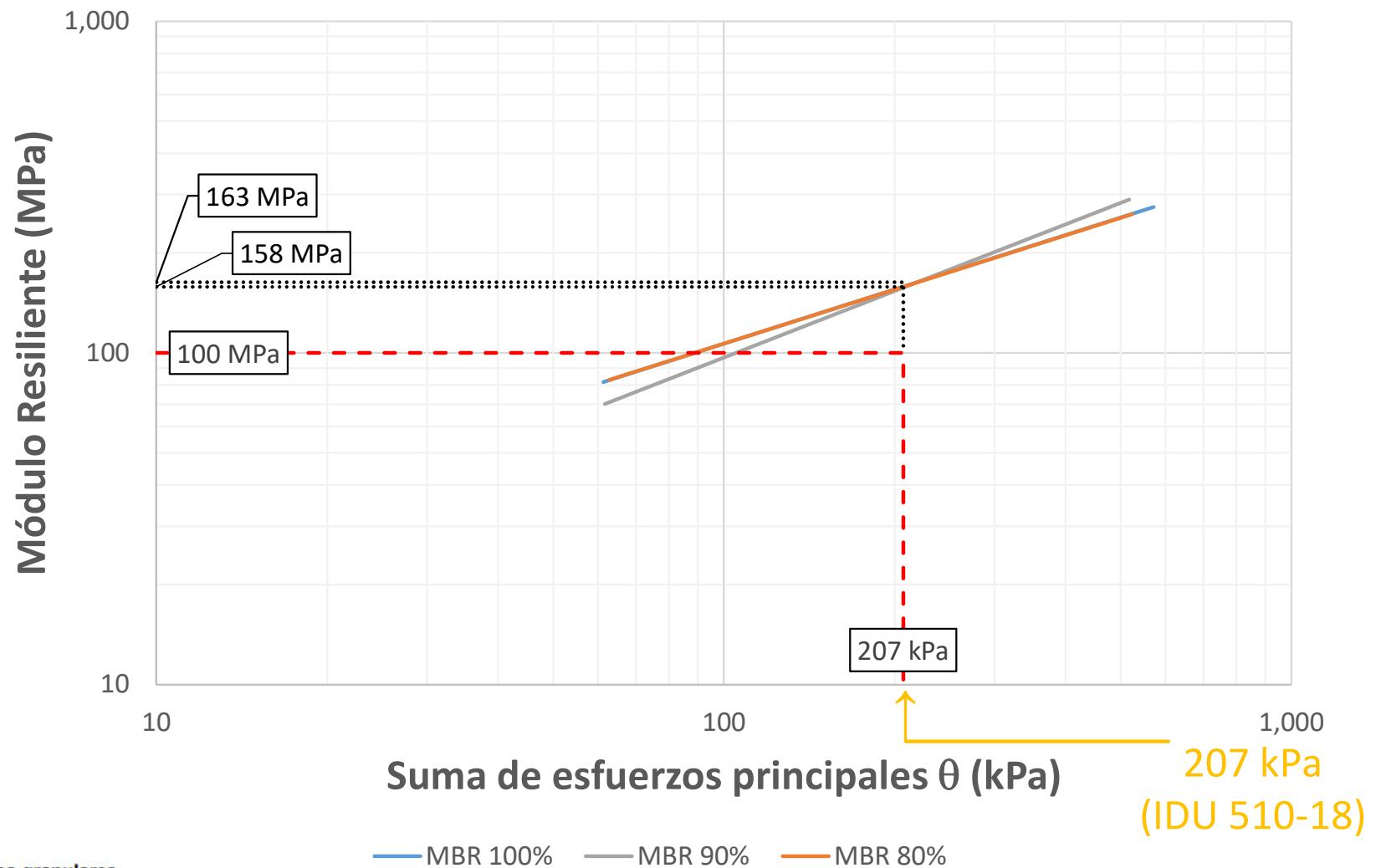


Tabla 510.2
Requisitos de los agregados para bases granulares

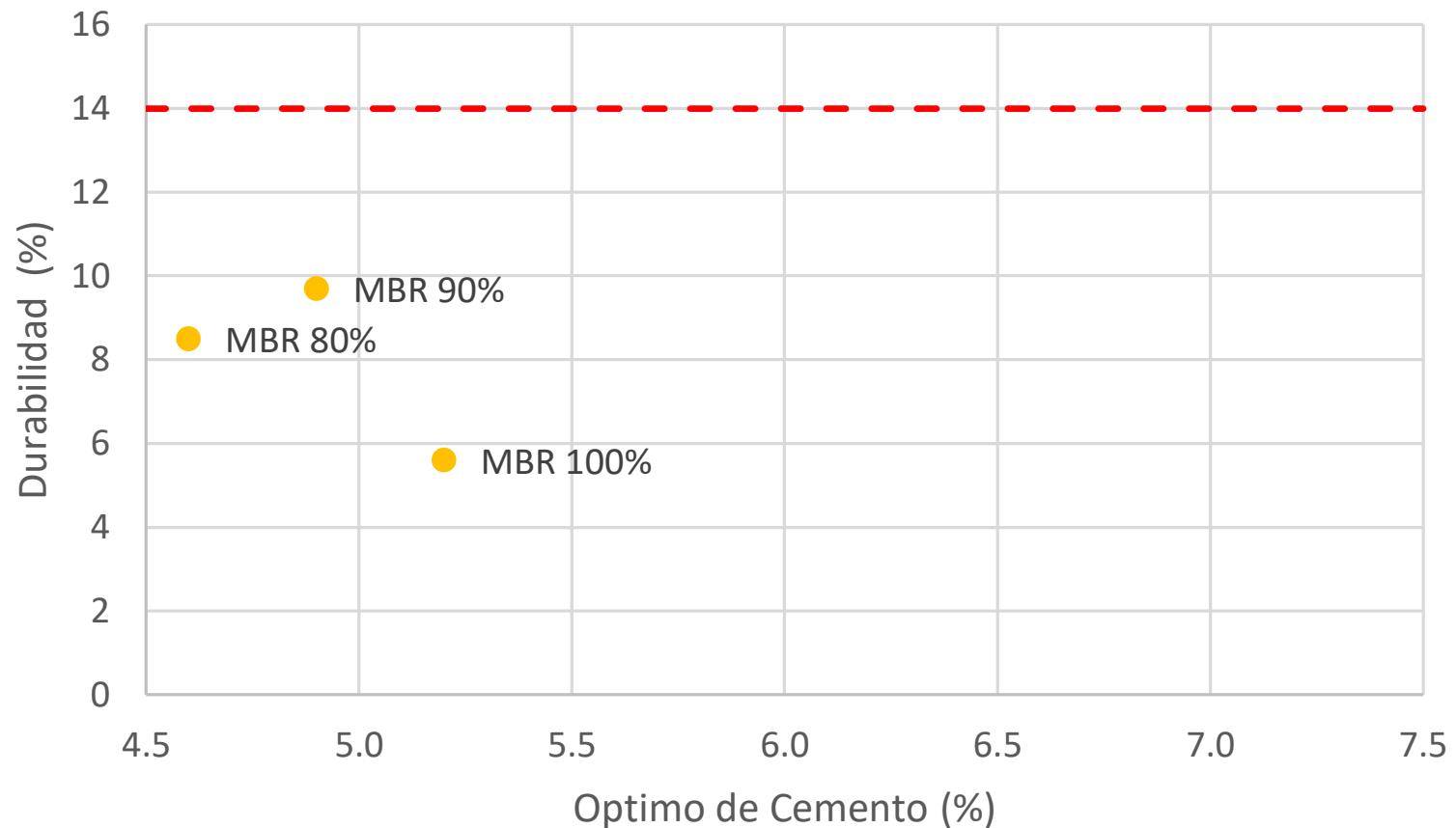
Ensayo	Norma de Ensayo	Clase	
		BG-B	BG-A
Capacidad de Soporte			
CBR, % mínimo			
- Referido al 100 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E 142-13 (AASHTO T 180), método C, después de 4 días de inmersión.	INV E 148-13	80	NA
Módulo Resiliente a $\theta=207 \text{ kPa}$, MPa mínimo (Notas 2 y 3)	INV E 156-13	NA	100
NA = No Aplica.			



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MBR + Cemento – Durabilidad

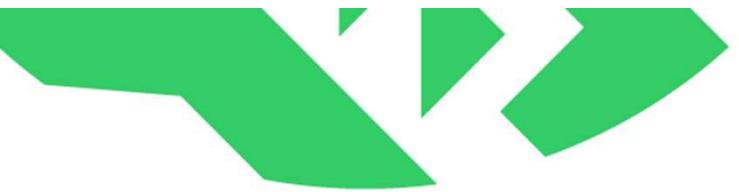
Pérdidas $\leq 14\%$
(IDU 520-18)



520.3.2 Contenido de cemento hidráulico

El contenido mínimo de cemento hidráulico en capas construidas de material granular mejorado con cemento hidráulico debe ser aquel que permita registrar pérdidas no superiores al 14% sobre probetas compactadas de la mezcla, sometidas a la prueba de durabilidad (humedecimiento y secado), según la norma de ensayo INV E-612-13. En cualquier caso, dicho contenido no debe ser inferior al tres por ciento (3%) en peso, respecto del total del material granular seco.





MATERIALES RECICLADOS MEJORADOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA USO EN BASES Y SUBBASES

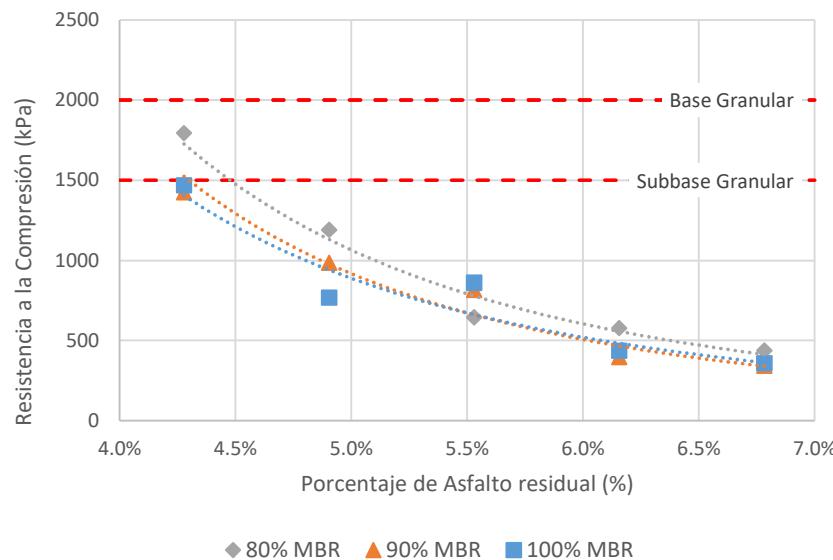
Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica



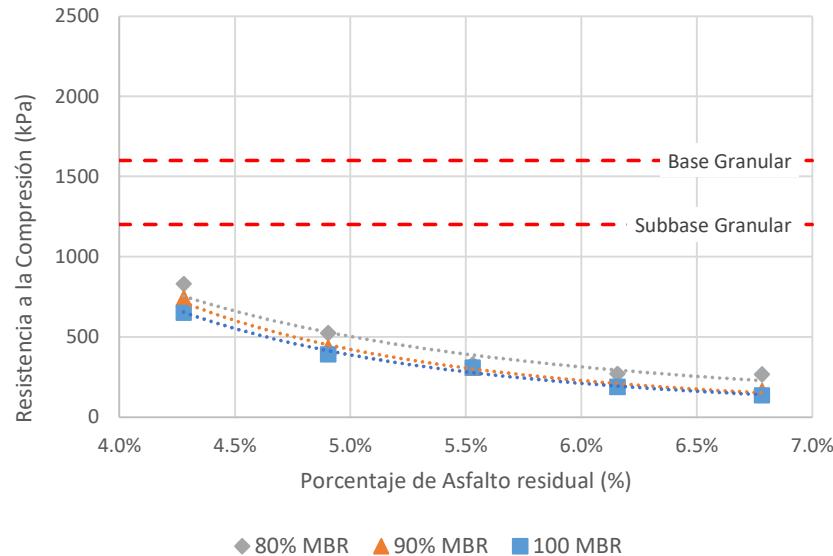
JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

MBR + Emulsión – Resistencia a la Compresión Simple

Resistencia en Seco



Resistencia en Húmedo



Resistencia Conservada

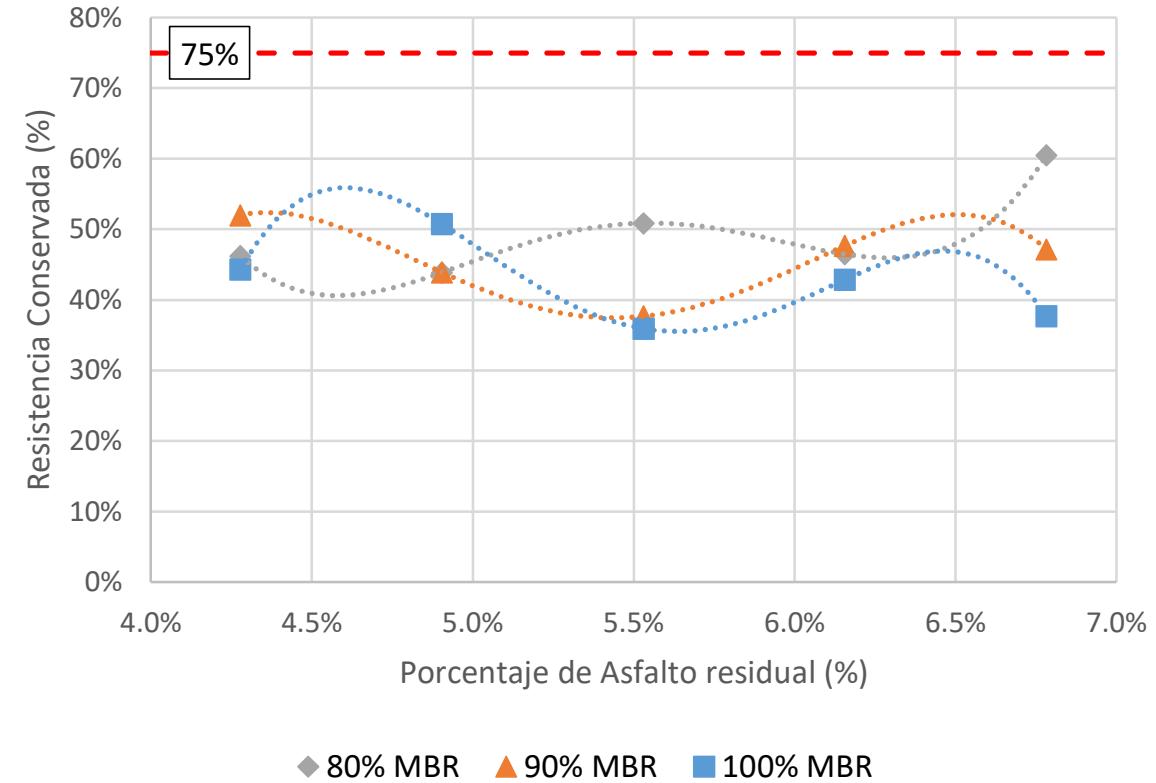


Tabla 521.2
Ensayos de resistencia para capas de reciclaje con emulsión asfáltica

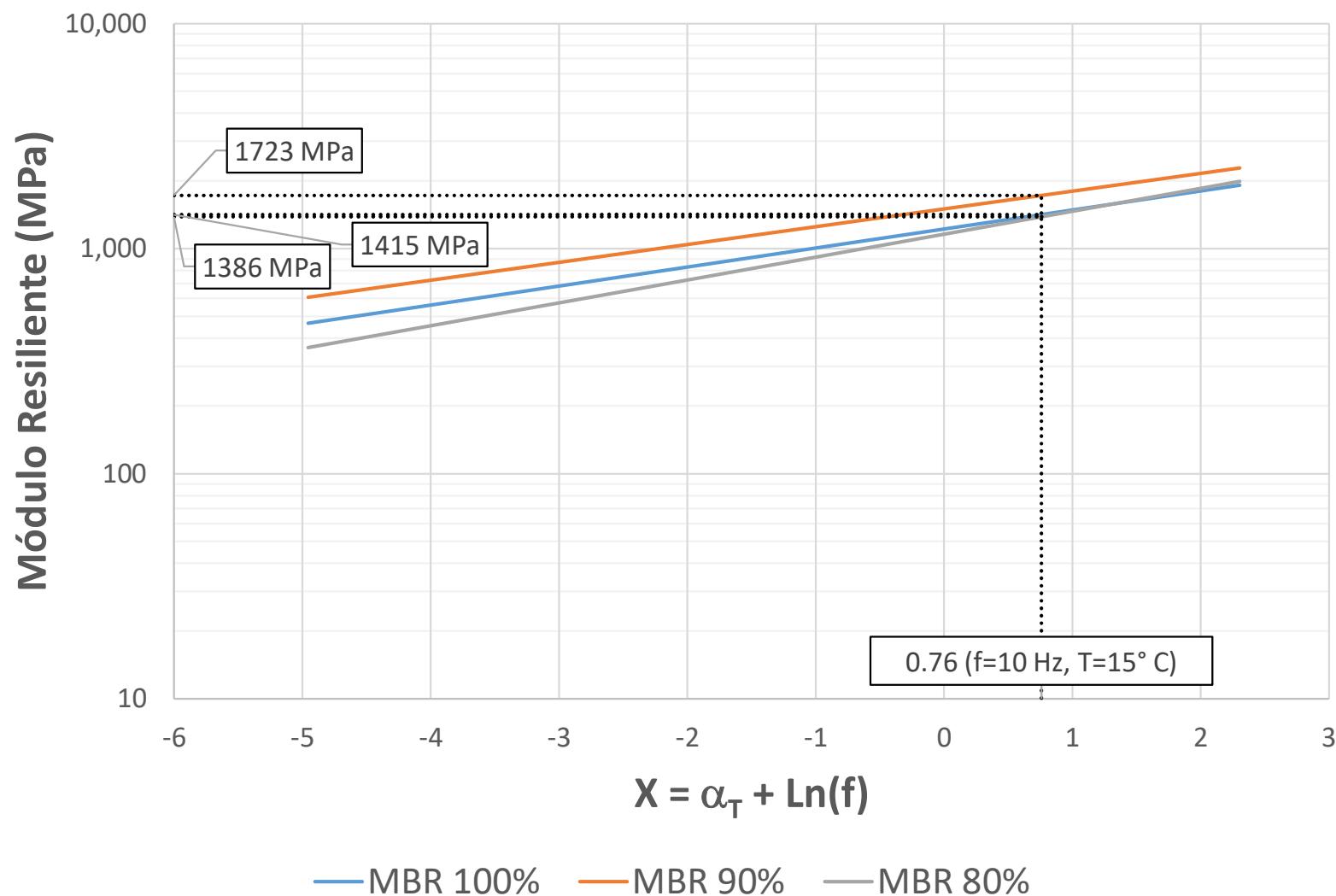
Propiedad	Norma de Ensayo	Valor
Resistencia de probetas curadas en seco, kPa mínimo (Nota 1) - Base Granular - Subbase Granular	INV E-622-13	2000 1500
Resistencia conservada tras curado húmedo, % mínimo (Nota 1) - Base Granular - Subbase Granular	INV E-622-13	75 75

(1) Resistencia de probetas curadas en seco en ensayo de compresión simple.

(2) Resistencia conservada en ensayo de compresión simple.



MBR + Emulsión – Módulo Resiliente





POLVO NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)

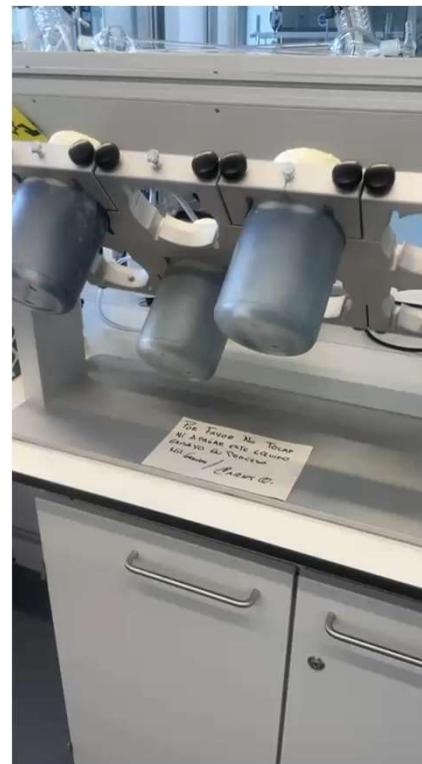
Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

NFU – Compuestos tóxicos

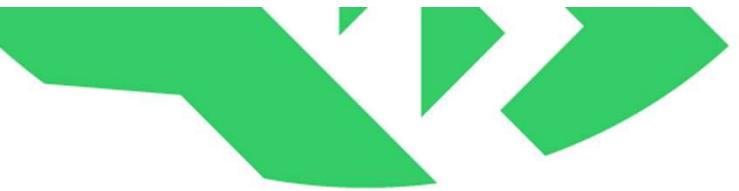
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs).
 - Metales pesados: Cadmio.
Plomo.
Níquel.
 - Ftalatos.
 - Plastificantes.
 - Compuestos orgánicos volátiles.



NFU – seguimiento y control post- implementación

- Ensayos laboratorio al polvo de NFU.
 - Ensayos periódicos en muestras de suelo y agua (lixiviación).
 - Uso de barreras geotécnicas y sistemas de drenaje.
 - Fortalecimiento normativo.





CONCLUSIONES

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

La utilización de Material Bituminoso Reciclado (MBR) contenido polvo de neumático fuera de uso (NFU) en nuevas capas granulares de pavimento ofrece **beneficios ambientales y técnicos**, como la reducción de materiales vírgenes, menor generación de residuos y mayor durabilidad y resistencia mecánica.

El empleo de MBR con polvo de NFU es viable con procesos rigurosos de caracterización, control de calidad y mejora del material mediante aditivos, asegurando los **módulos resilientes** y **durabilidad** exigidos en capas de pavimento.

Su aplicación conlleva riesgos sanitarios y ambientales por la posible liberación de compuestos peligrosos como PAH, metales pesados, ftalatos y **microplásticos**, que **afectan aire, agua y suelo**, generando un reto para la salud pública en zonas cercanas.



Para mitigar riesgos se deben implementar estrategias responsables, como monitoreo ambiental, pruebas de lixiviación y bioensayos, sistemas de drenaje y registro de materiales durante todo el ciclo de vida.

Es fundamental desarrollar en Colombia normativas sobre límites de contaminantes y capacitar técnicamente a operadores para un uso sostenible y seguro del MBR con polvo de NFU, fomentando la economía circular y protegiendo recursos naturales y salud pública en Latinoamérica.





Pontificia Universidad
JAVERIANA
Bogotá

Facultad de Ingeniería



JORNADAS RECICLAJE

BOGOTÁ 2025

Gracias / Thank you