



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

IV Jornadas Latinoamericanas de Reciclaje de Neumáticos



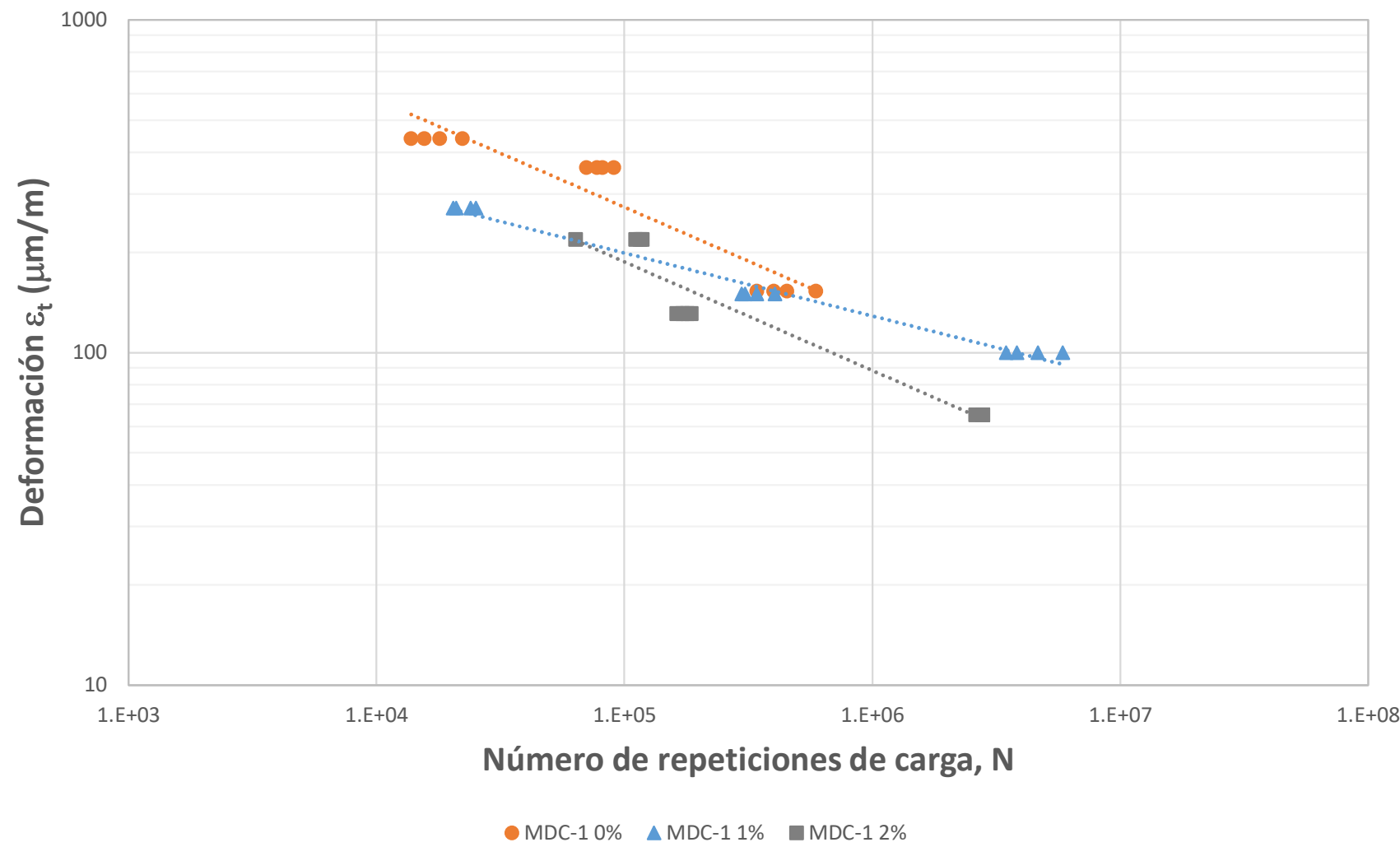
MEZCLAS ASFÁLTICAS **MEJORADOS CON GRANO DE** **CAUCHO RECICLADO**

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



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

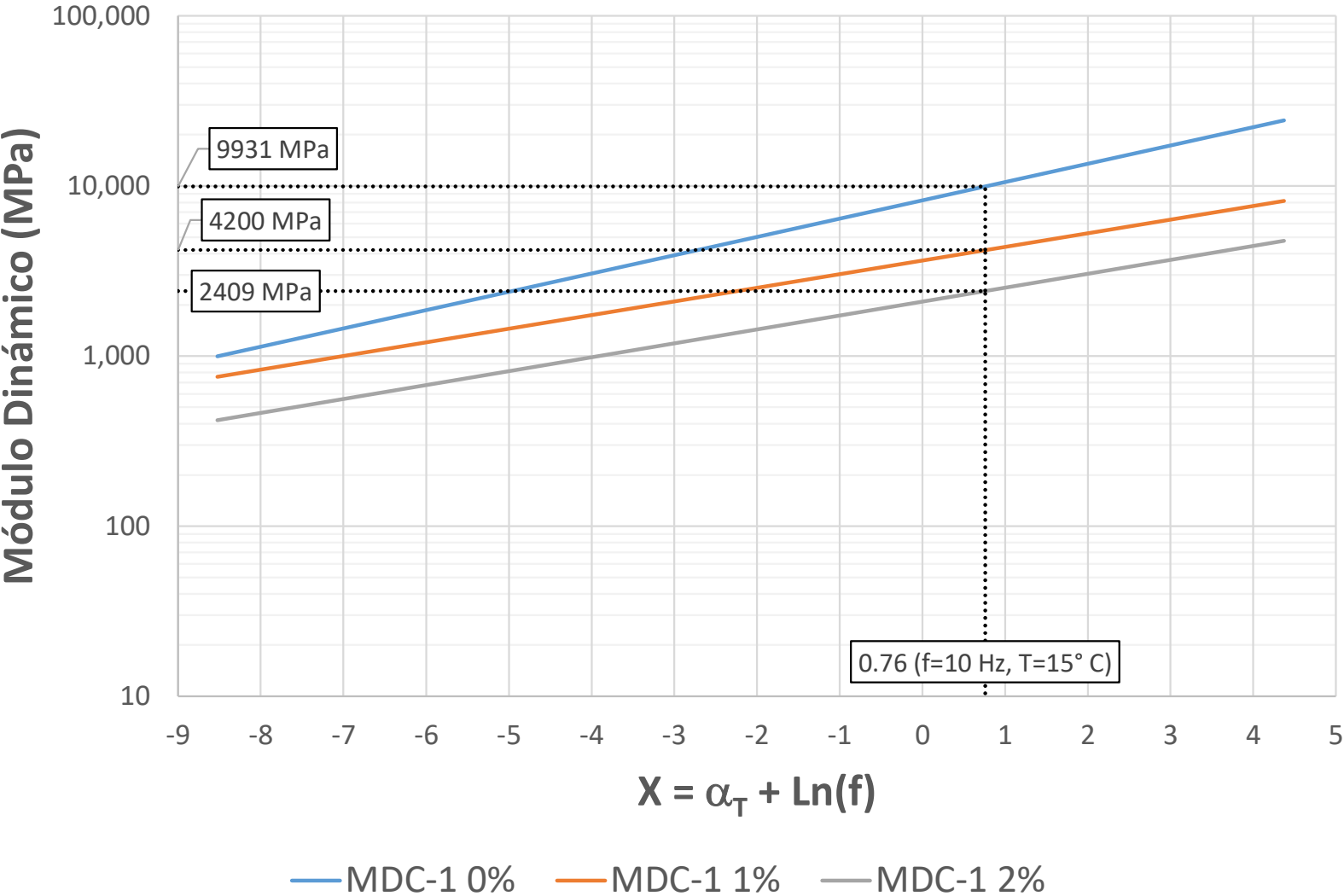
MDC-1 + GCR – Fatiga (NFP-98-260)



Mezcla	α	ε ₆
MDC-1 0%	3.08	130 μm
MDC-1 1%	5.28	129 μm
MDC-1 2%	3.06	88 μm

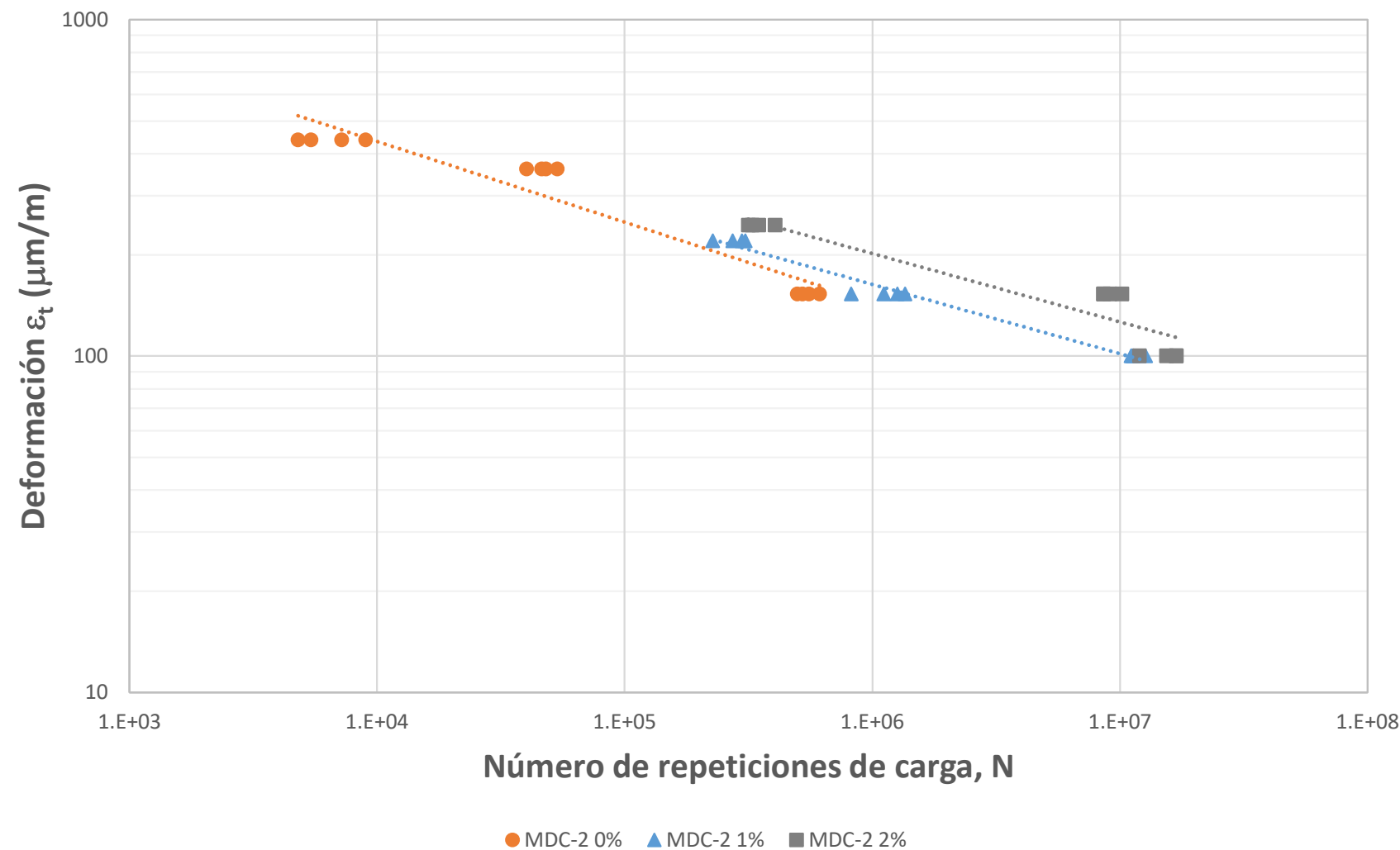
Contrato IDU 366-01

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



Contrato IDU 366-01

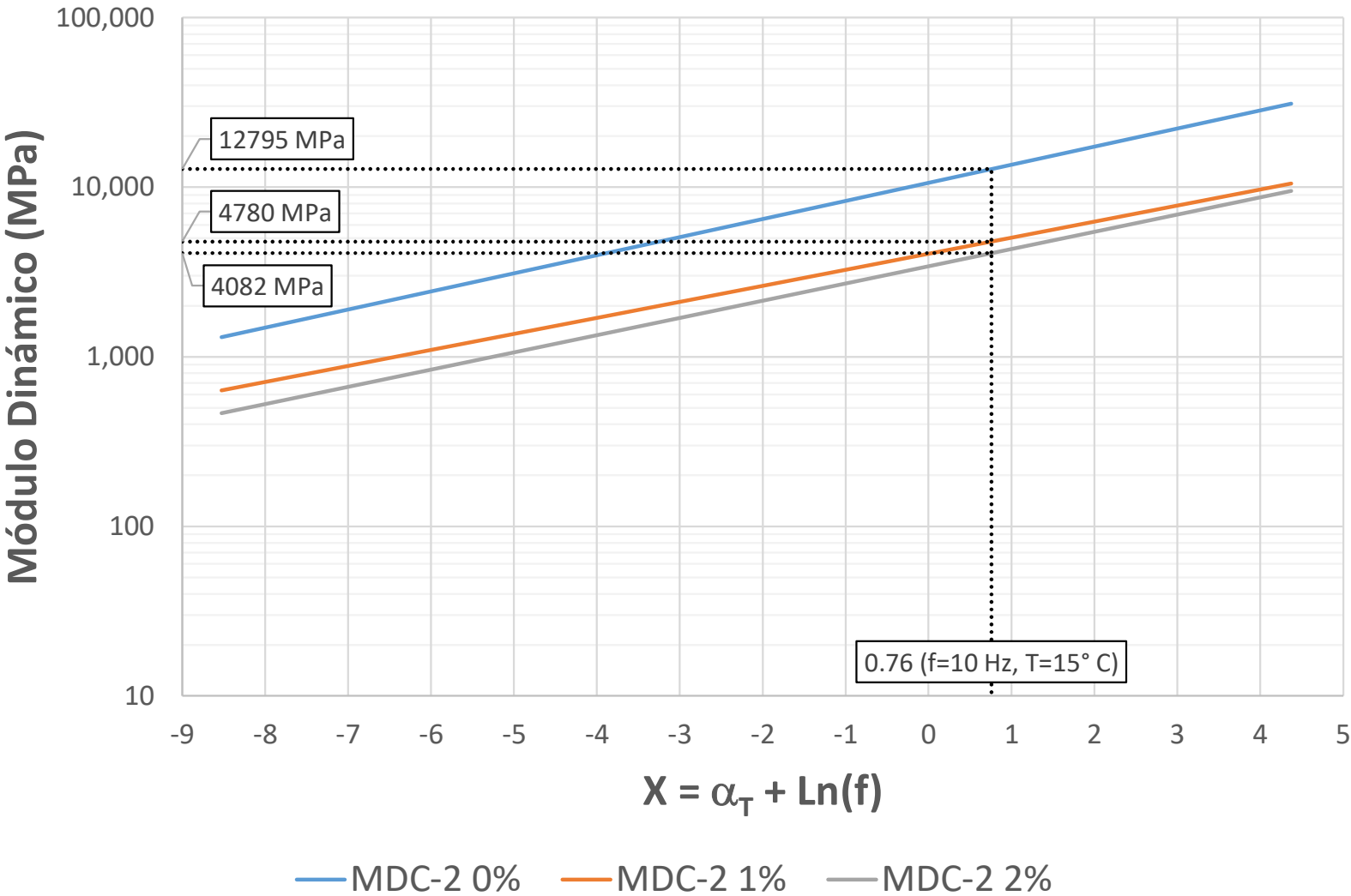
MDC-2 + GCR – Fatiga (NFP-98-260)



Mezcla	α	ε ₆
MDC-1 0%	4.16	144 μm
MDC-1 1%	4.85	163 μm
MDC-1 2%	4.92	202 μm

Contrato IDU 366-01

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



Contrato IDU 366-01

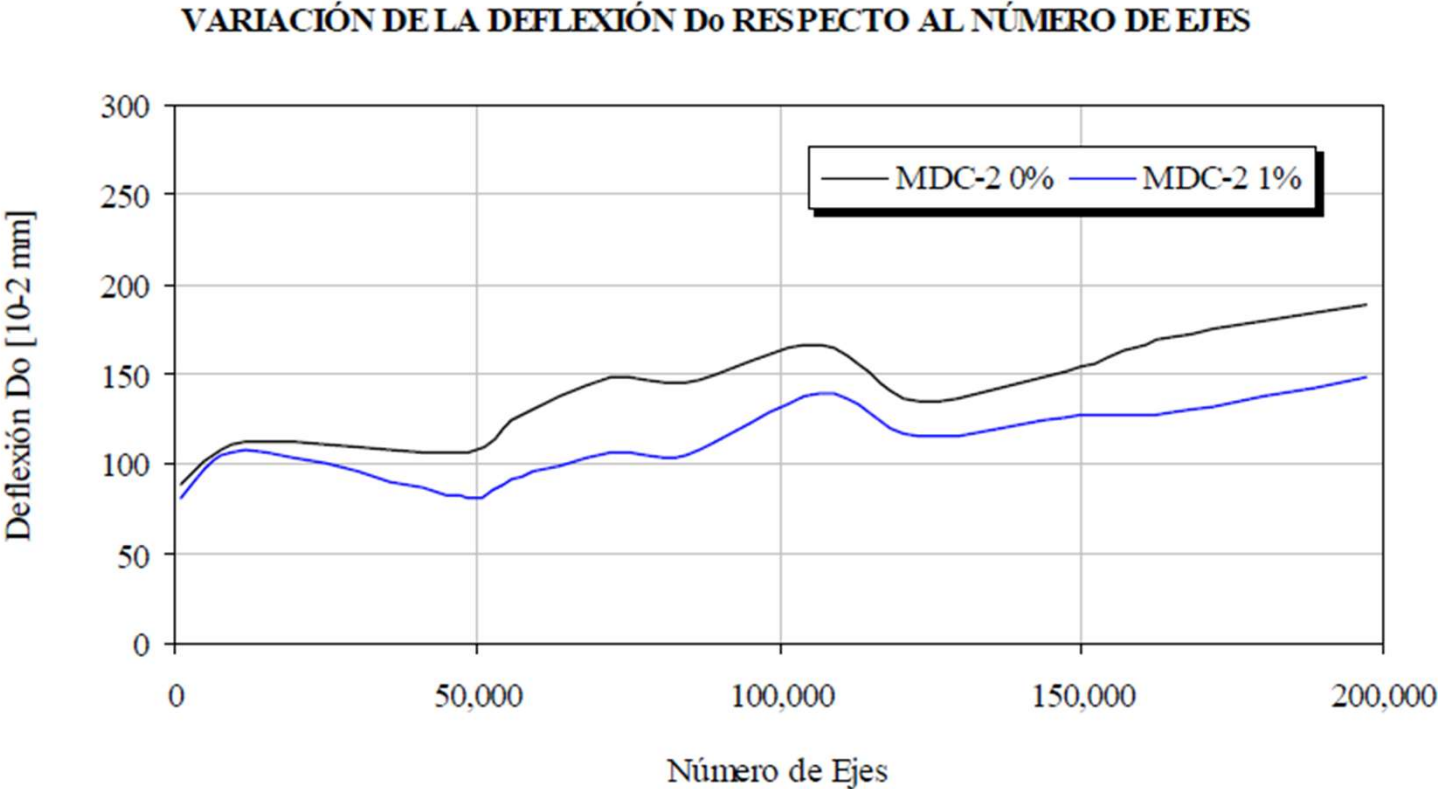
**MATERIALES RECICLADOS MBR
PARA USO EN CAPAS ASFÁLTICAS**

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

Deflexiones



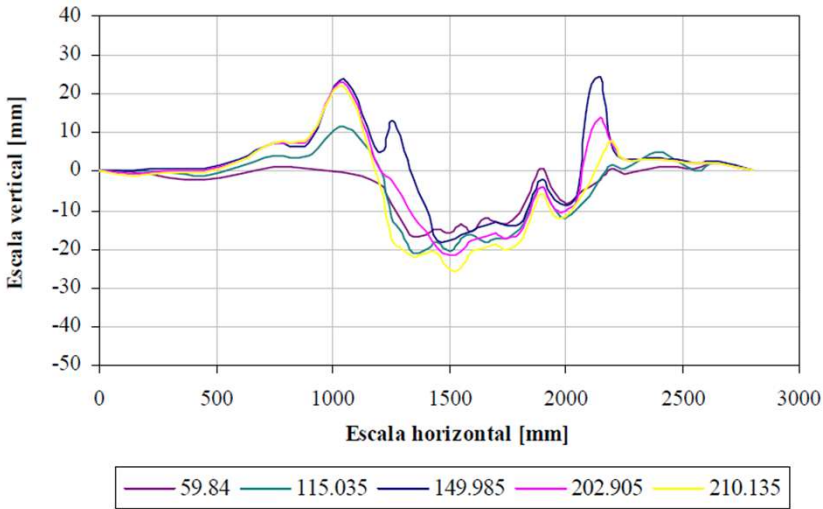
Antiguo equipo de pista Universidad de Los Andes



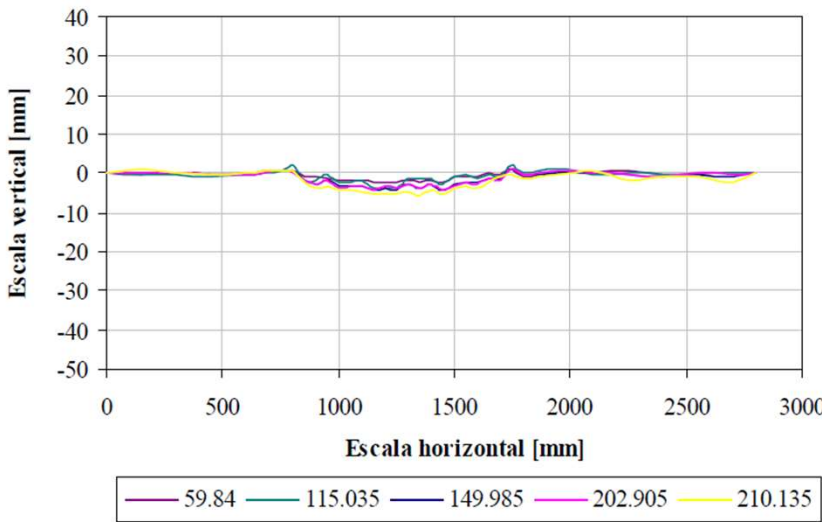
Contrato IDU 366-01

Ahuellamiento

Antiguo equipo de pista Universidad de Los Andes



MDC-2 + 0% NFU



MDC-2 + 2% NFU

Contrato IDU 366-01

Densidad de Fisuración

Antiguo equipo de pista Universidad de Los Andes



MDC-2 + 0% NFU



MDC-2 + 2% NFU

Contrato IDU 366-01



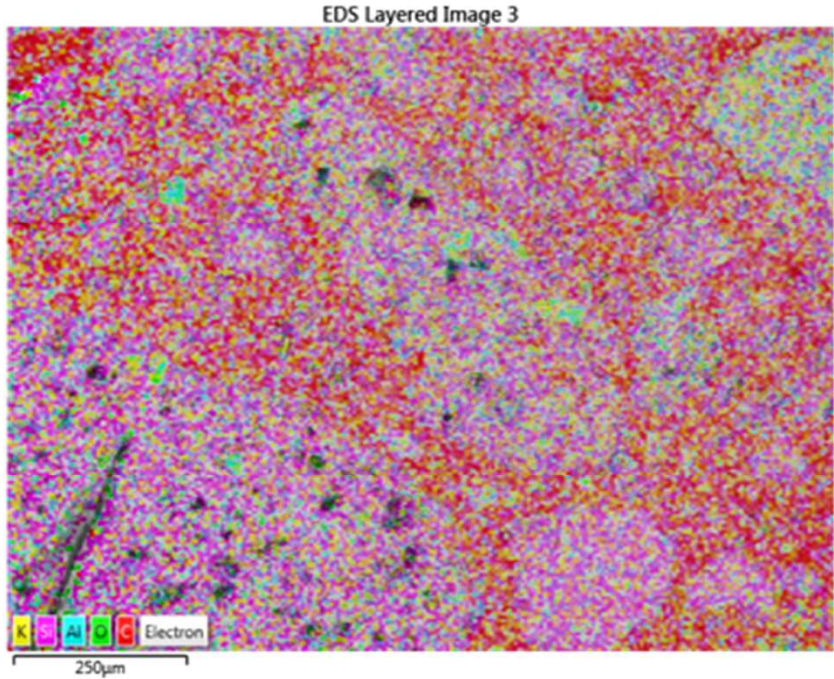
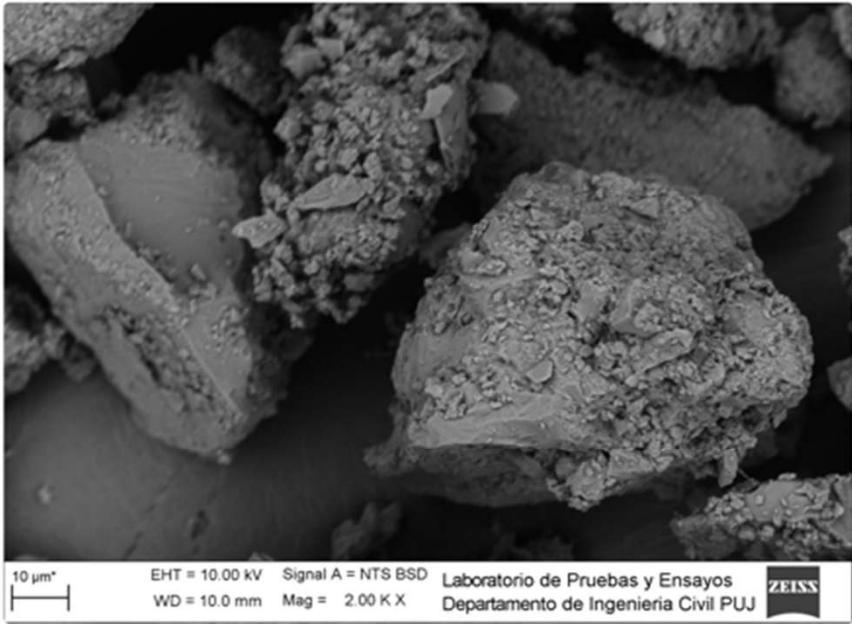
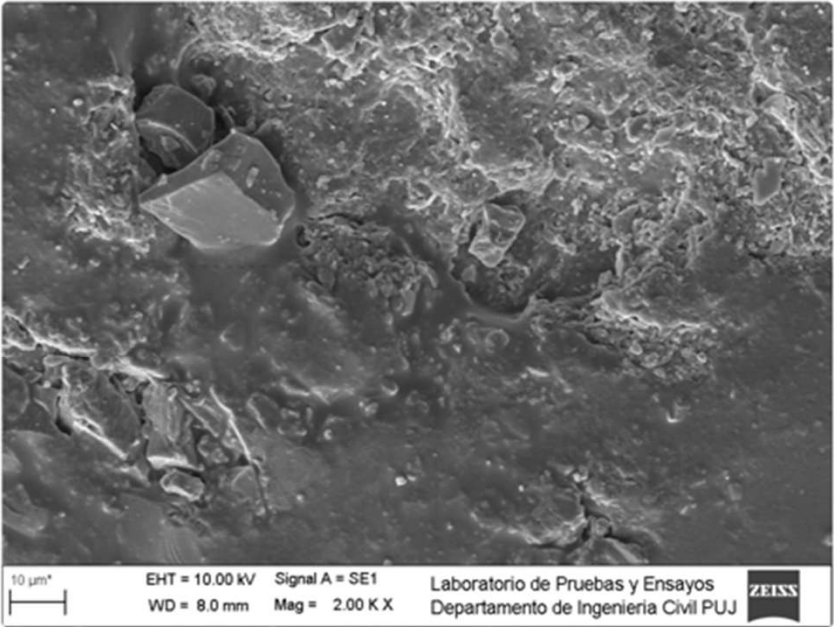
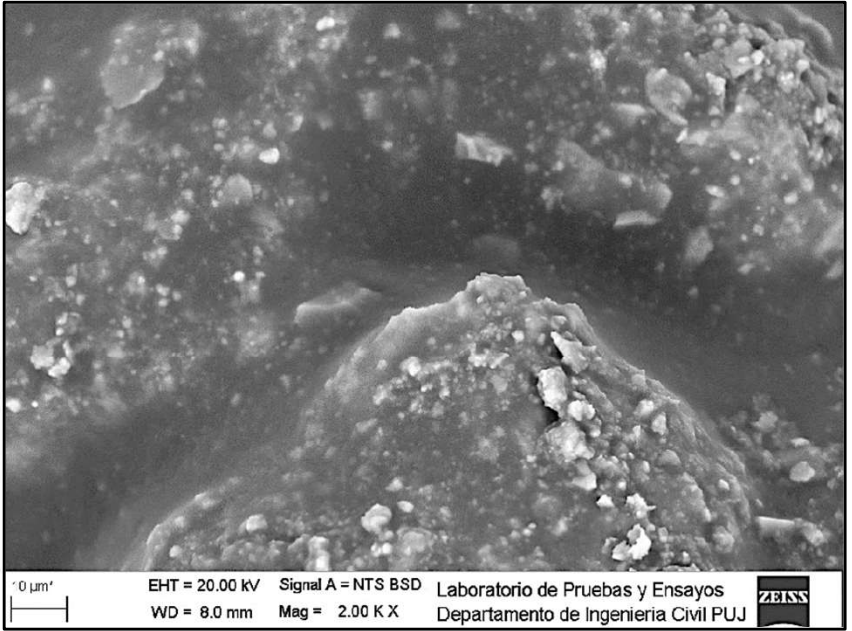
Material Bituminoso Reciclado

MBR

- Ligante
- Agregado con ligante
- Agregado sin ligante



MBR - Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

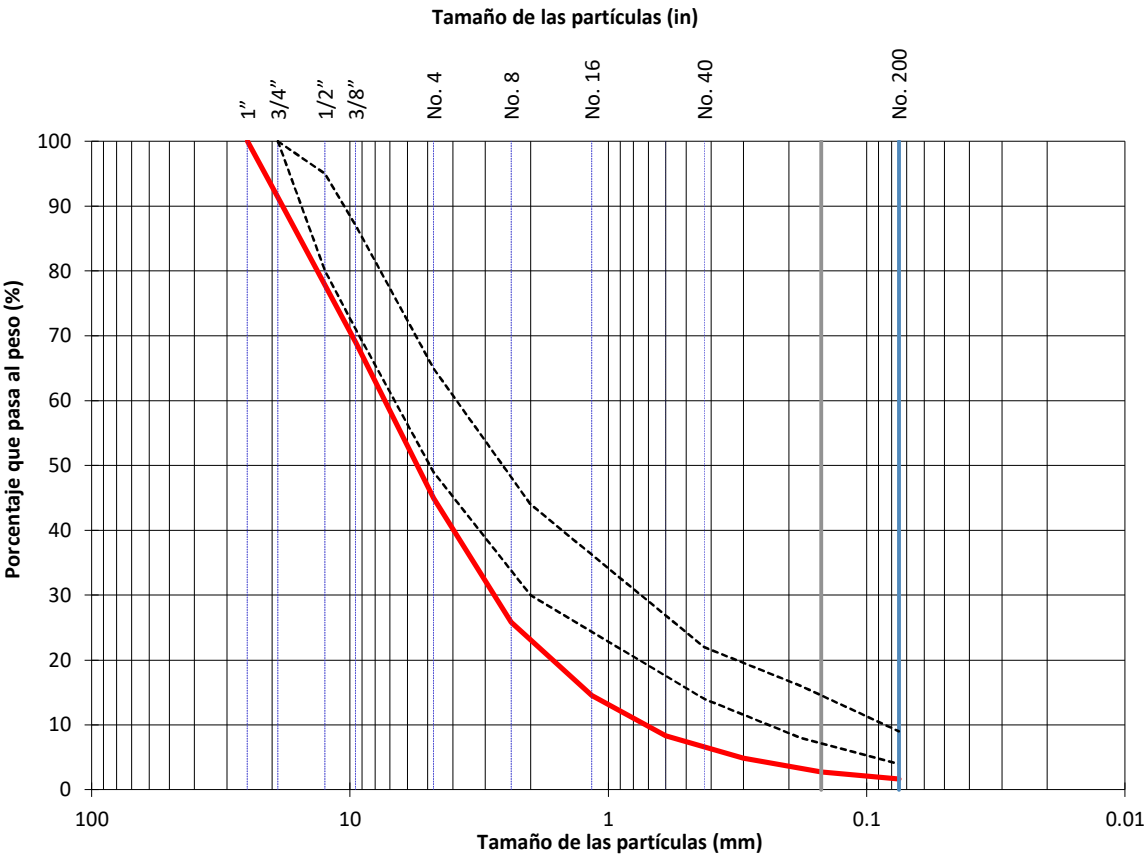
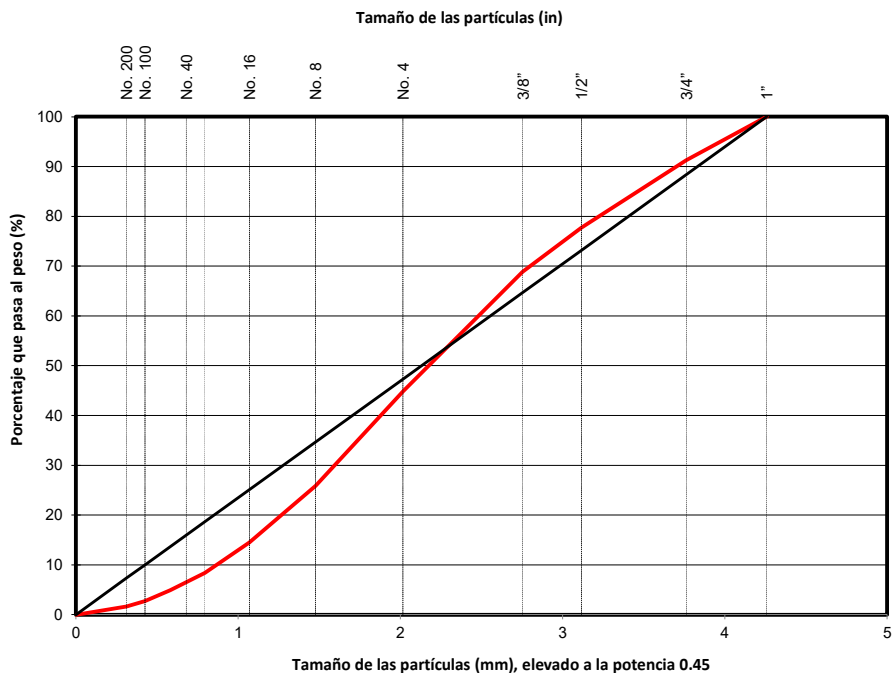
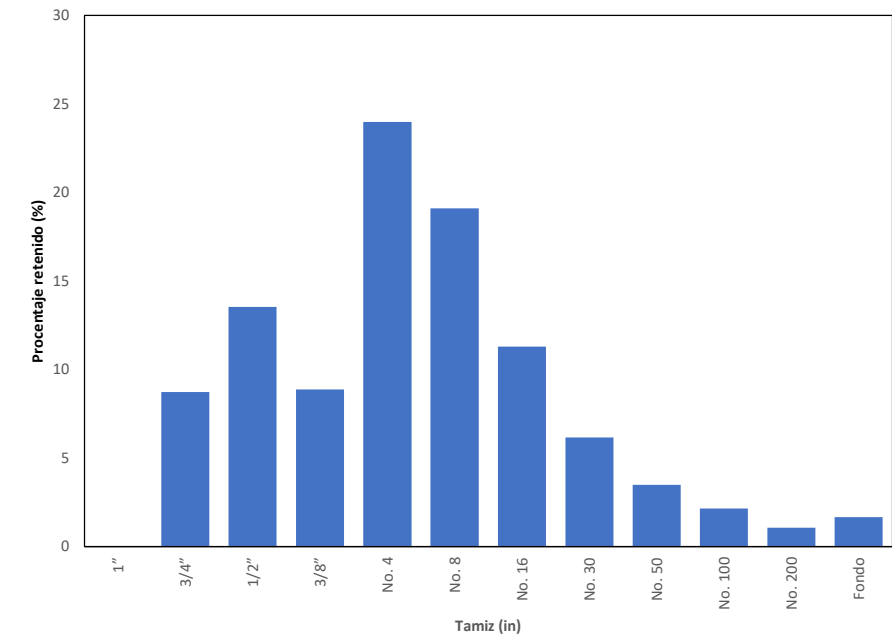




MATERIALES RECICLADOS MBR PARA USO EN CAPAS ASFÁLTICAS

Mezclas en Caliente

MD19 + MBR – Tamaños de partículas



MD19
(IDU 620-18)

Tabla 620.4
Granulometría de agregados combinados para mezclas asfálticas en caliente

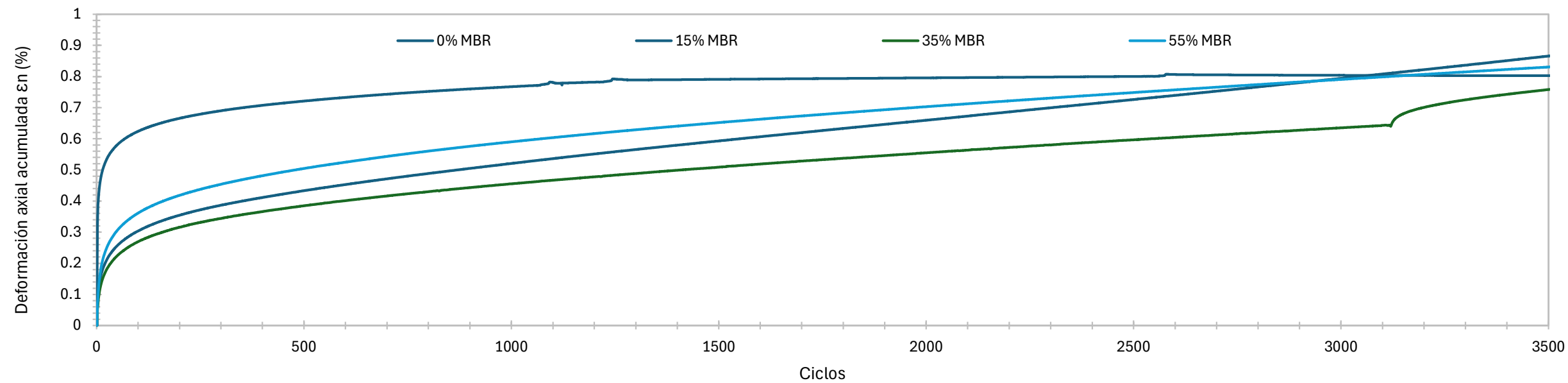
Tipo de mezcla		Tamiz (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
		% Pasa									
Densa	MD13				100	80-95	59-76	36-51	15-25	9-18	5-10
	MD19			100	80-95	71-87	49-65	30-44	14-22	8-16	4-9
	MD25		100	80-95	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
BOGOTÁ 2025

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

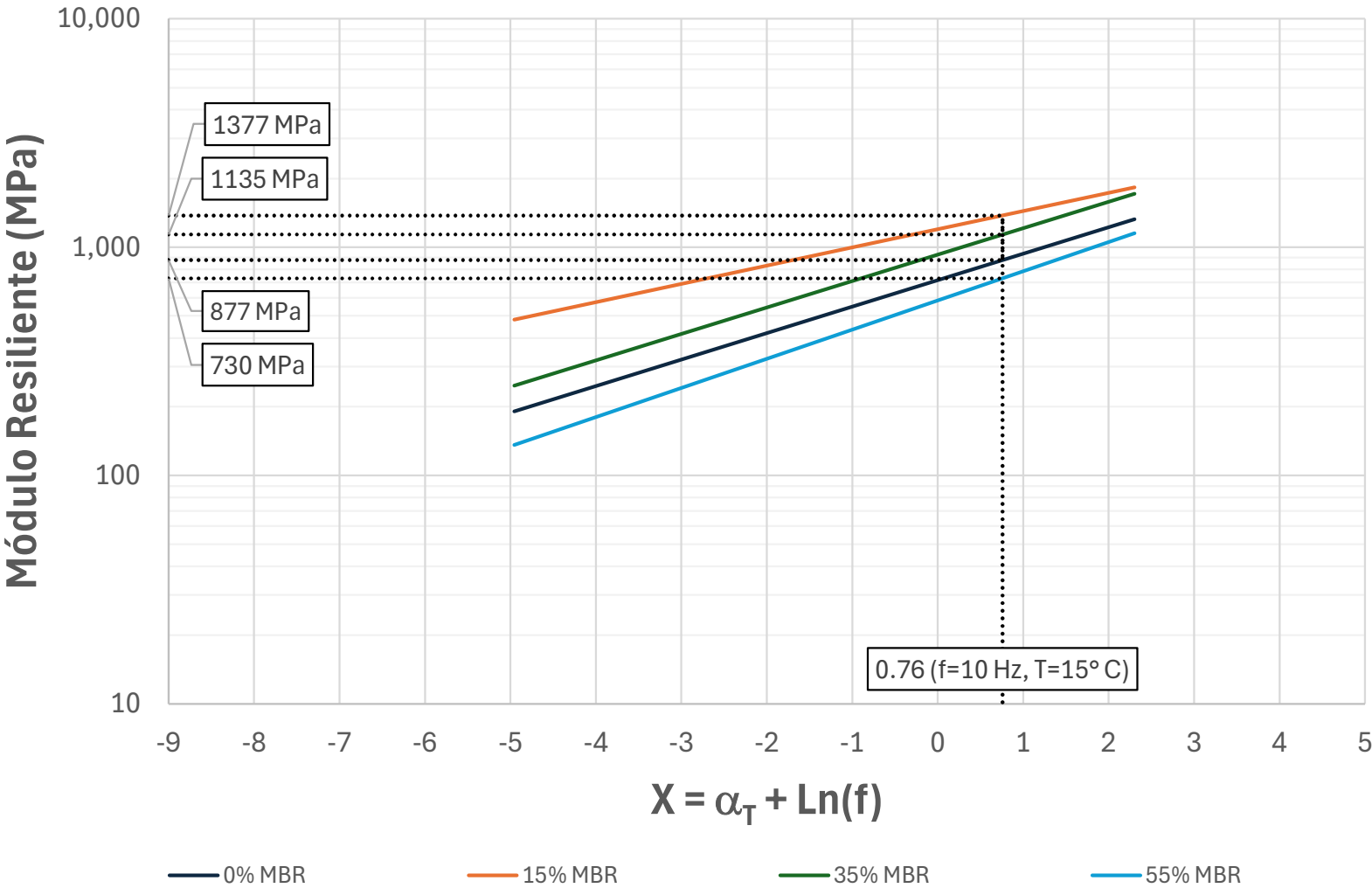


Mezcla	ε_n (%)	f_c (με/ciclo)
0% MBR	0.88	1.38
15% MBR	0.82	0.22
35% MBR	0.77	0.99
55% MBR	0.84	1.12

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

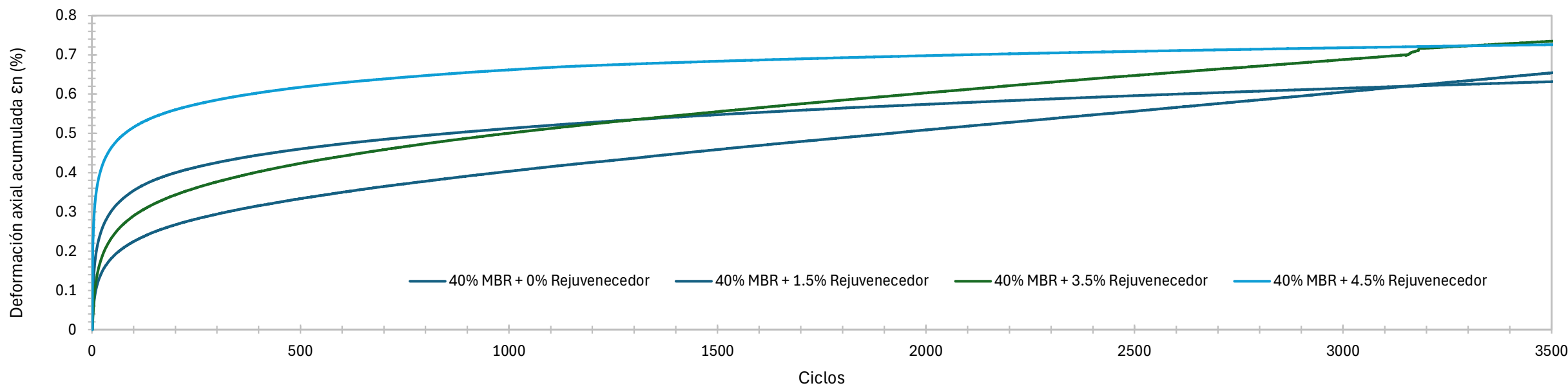
f_c : Velocidad de fluencia (με/ciclo). Para mezclas densas, se sugiere menor a 1 με/ciclo.

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



Contrato IDU 1677-22

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

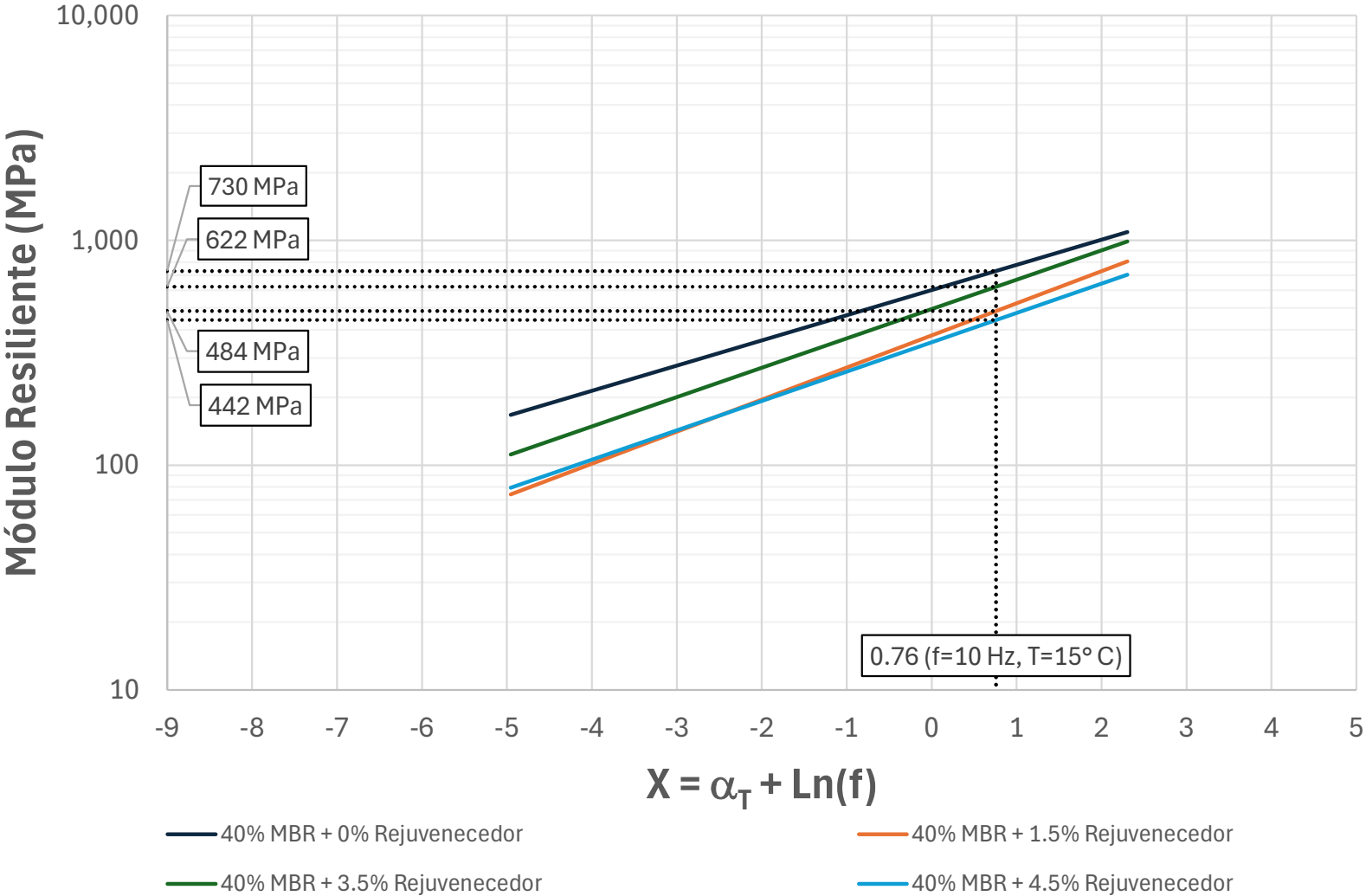


Mezcla	ε_n (%)	f_c ($\mu\varepsilon$ /ciclo)
40% MBR + 0% Rejuv.	0.66	1.05
40% MBR + 1.5% Rejuv.	0.64	0.61
40% MBR + 3.5% Rejuv.	0.75	1.02
40% MBR + 4.5% Rejuv.	0.73	0.34

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

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

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



Contrato IDU 1677-22



MATERIALES RECICLADOS MBR PARA USO EN CAPAS ASFÁLTICAS

Mezclas en Frío

MDF19 + MBR – Tamaños de partículas

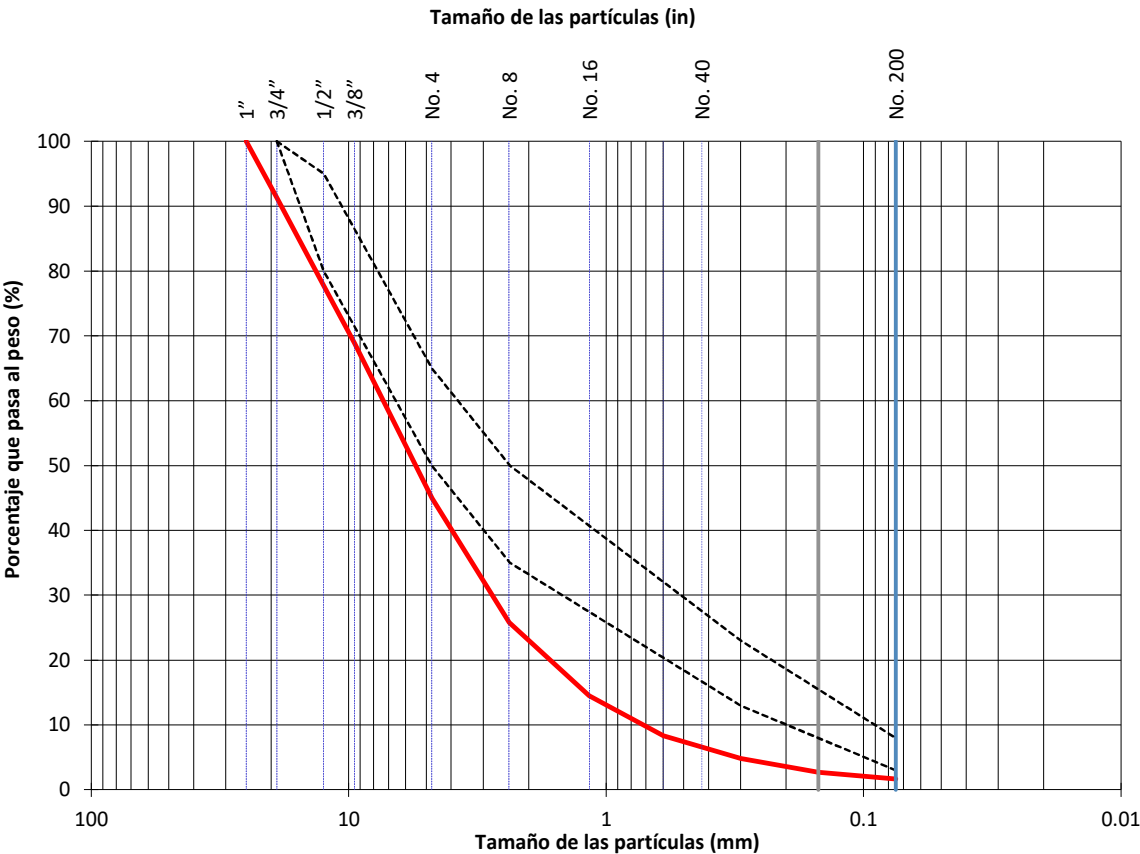
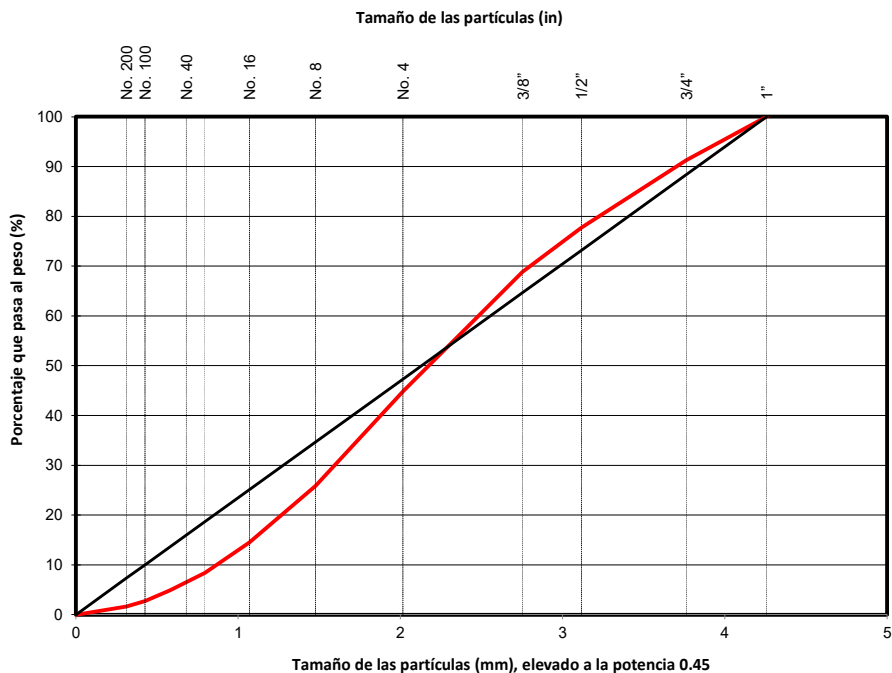
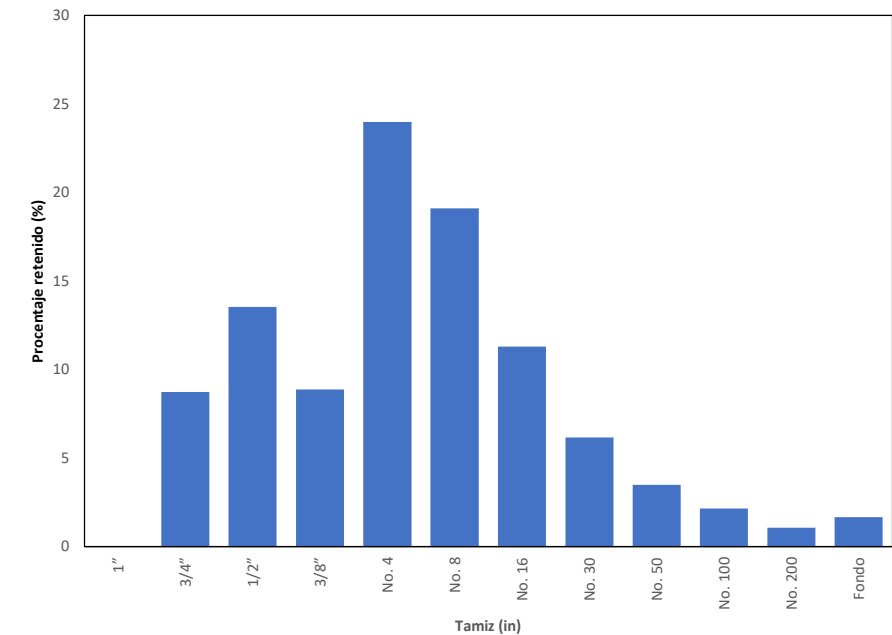


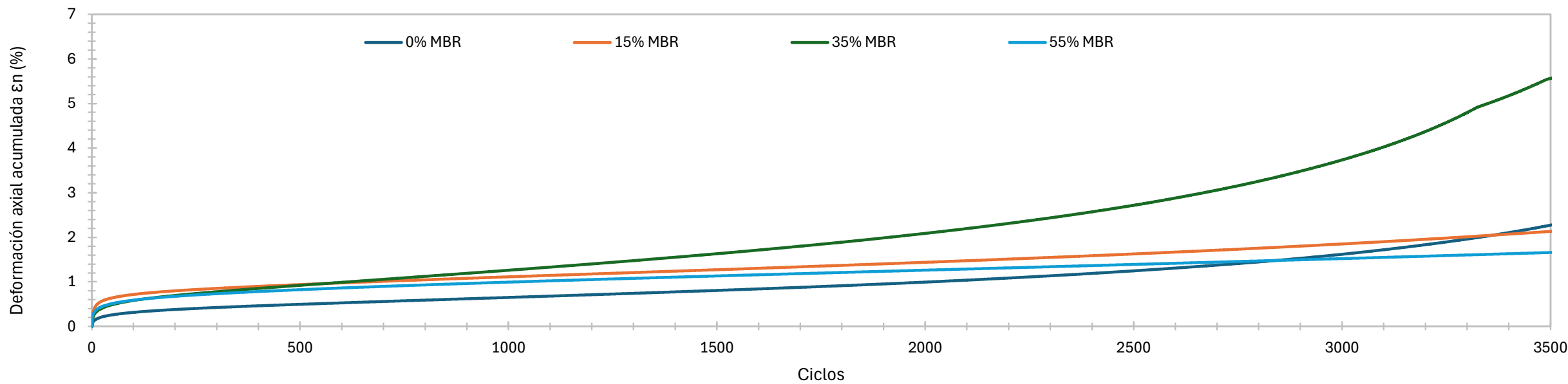
Tabla 628.4
Granulometría de agregados combinados para mezclas asfálticas en frío

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)

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

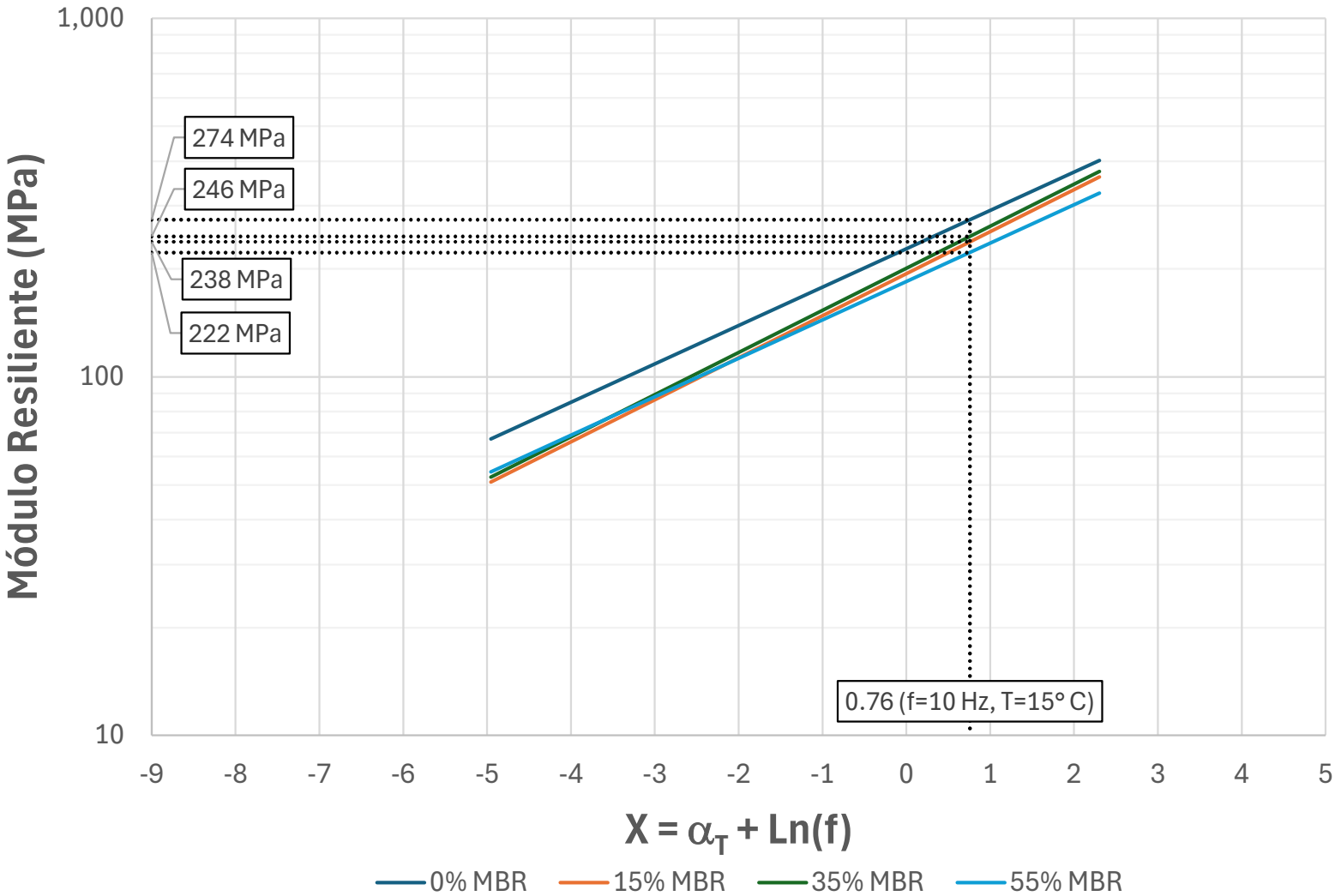


Mezcla	ϵ_n (%)	f_c ($\mu\epsilon$ /ciclo)
0% MBR	2.47	4.85
15% MBR	2.20	3.24
35% MBR	6.37	8.17
55% MBR	1.69	2.67

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)



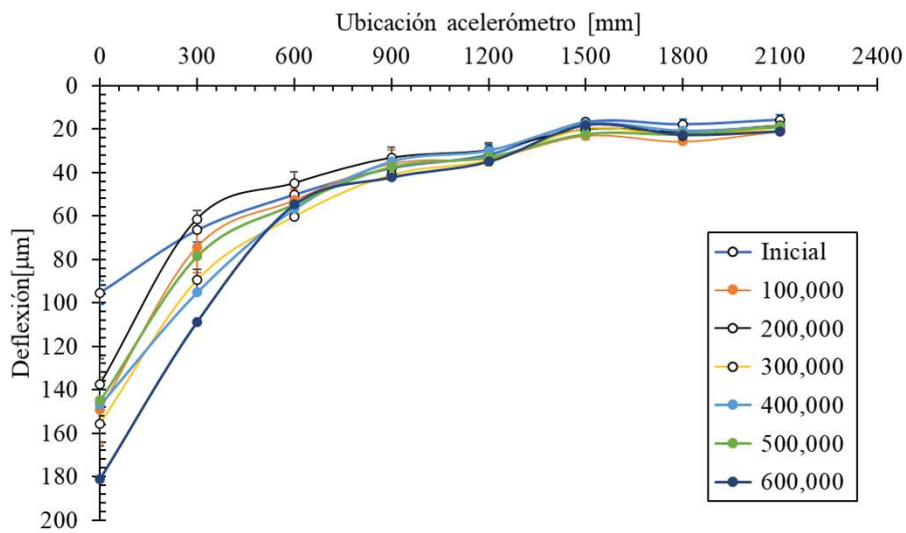
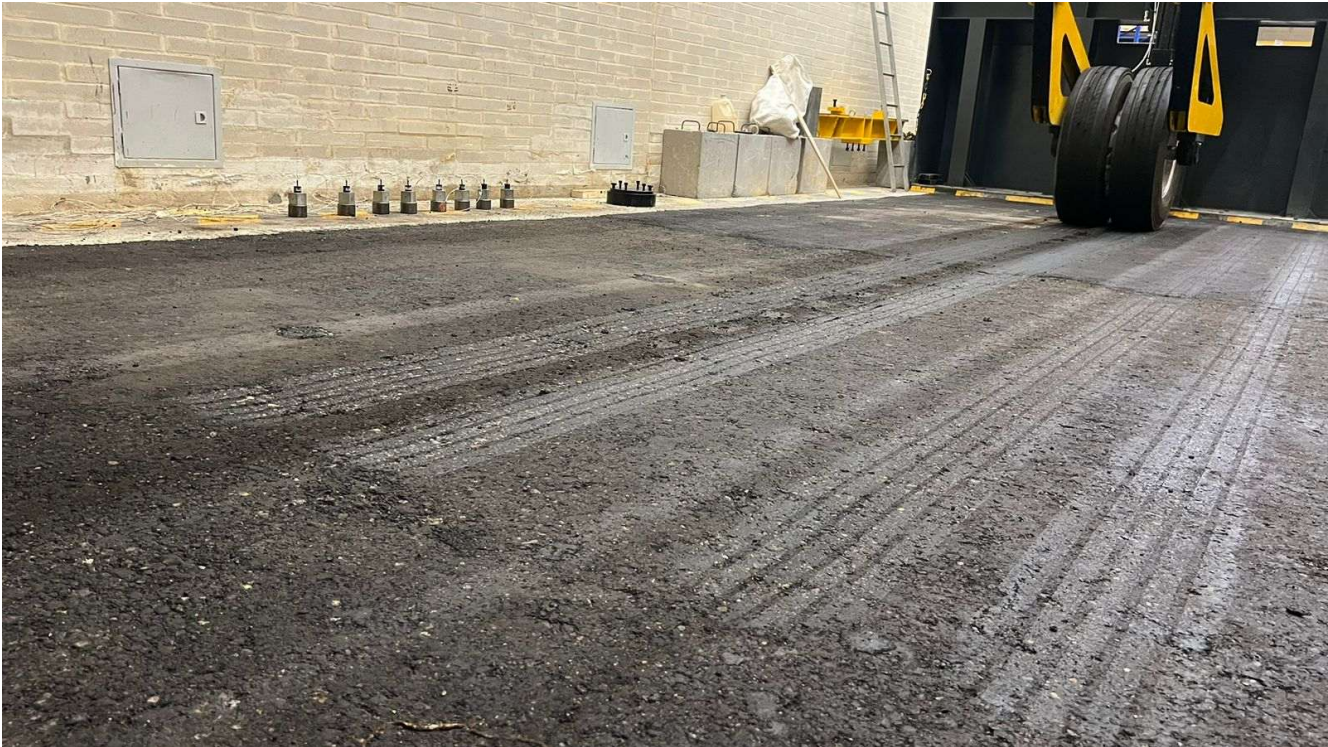
Contrato IDU 1677-22

**MATERIALES RECICLADOS MBR
PARA USO EN CAPAS ASFÁLTICAS**

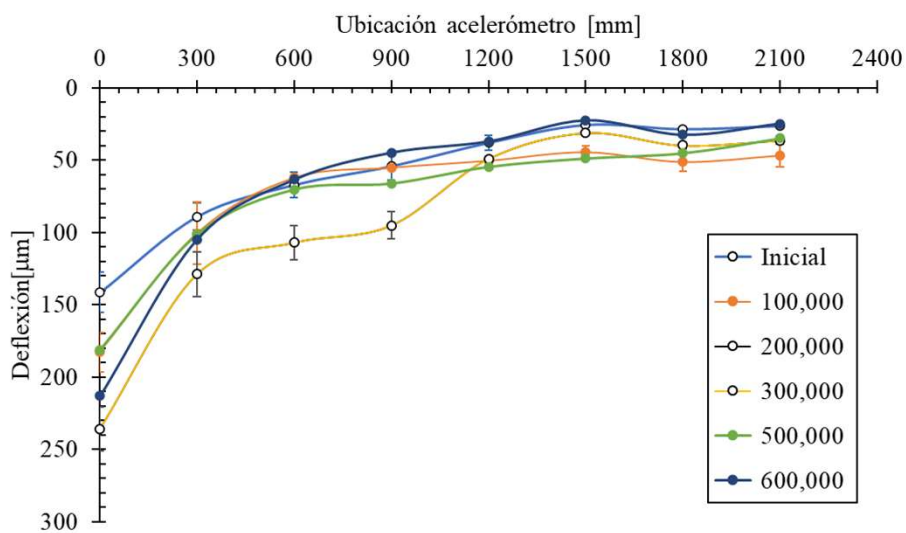
**PISTA PARA PRUEBA ACELERADA DE
PAVIMENTO (APT)**

Deflexiones

Equipo de pista Pontificia Universidad Javeriana



MD19 + 40%



MDF19 + 40%

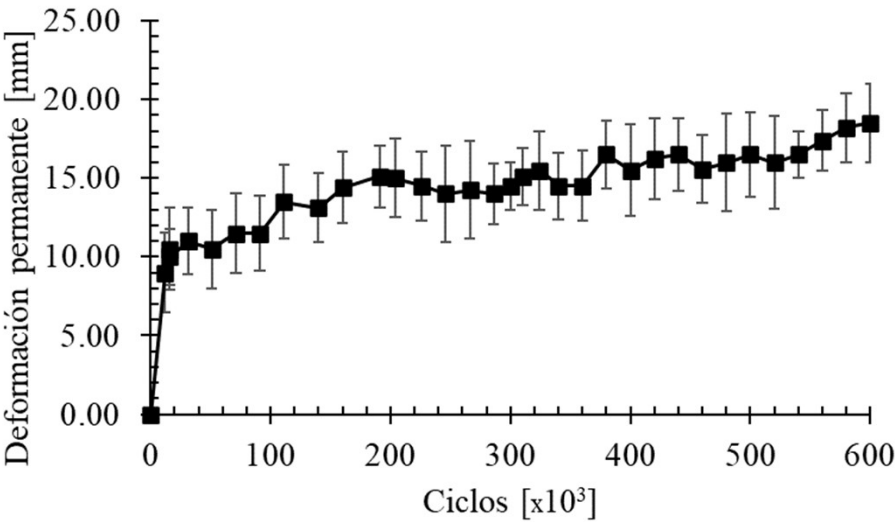
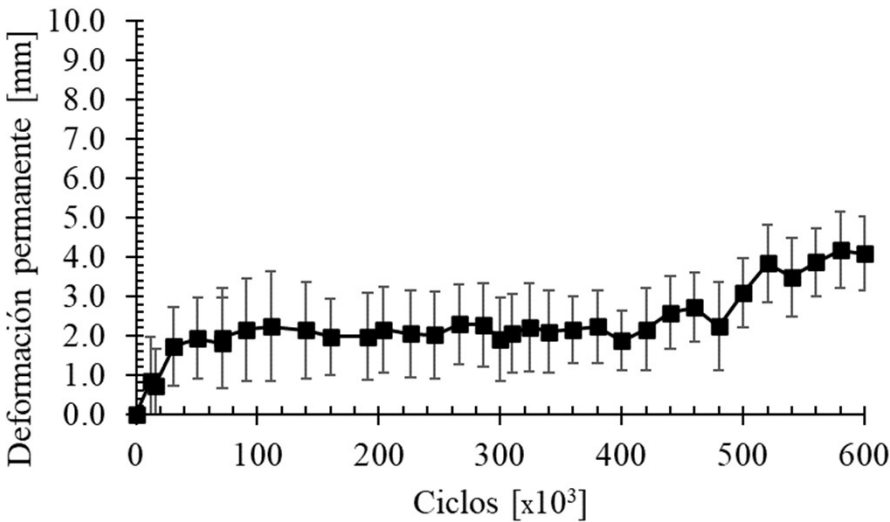
Contrato IDU 1677-22

Ahuellamiento

Equipo de pista Pontificia Universidad Javeriana



Contrato IDU 1677-22

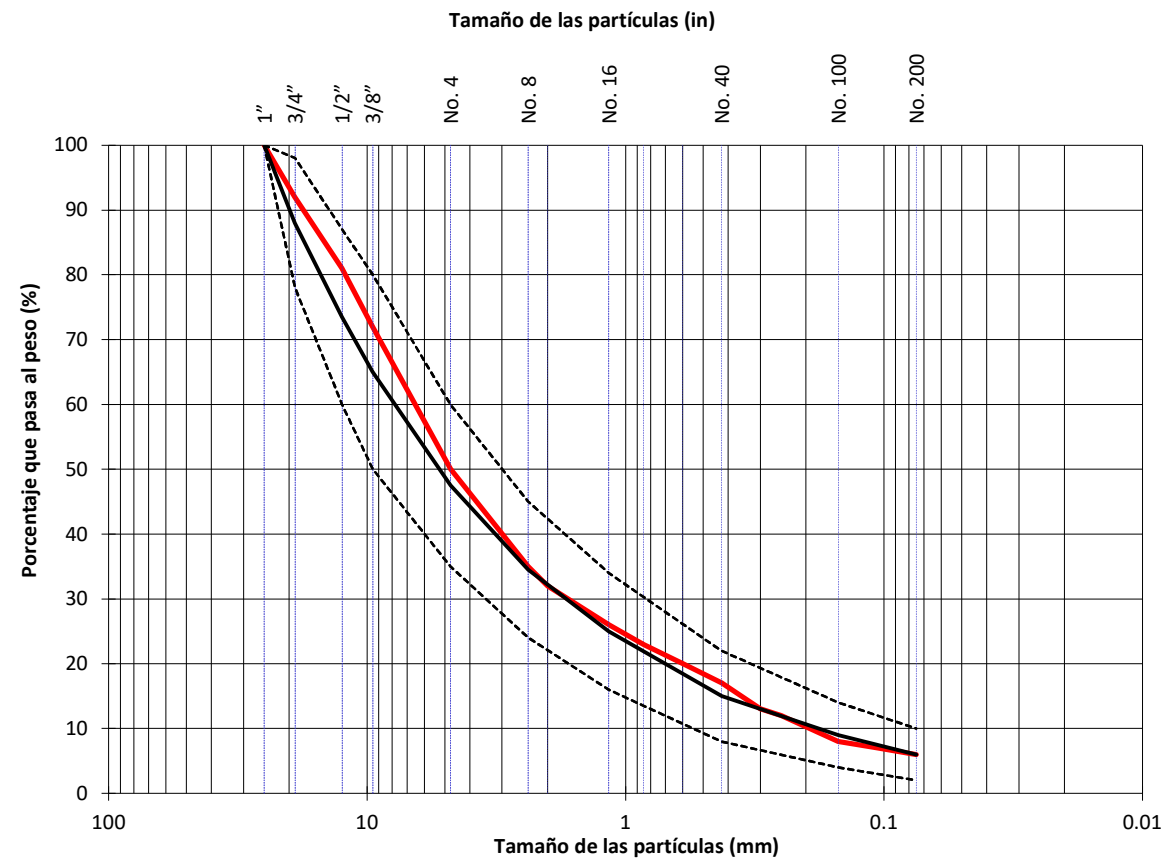
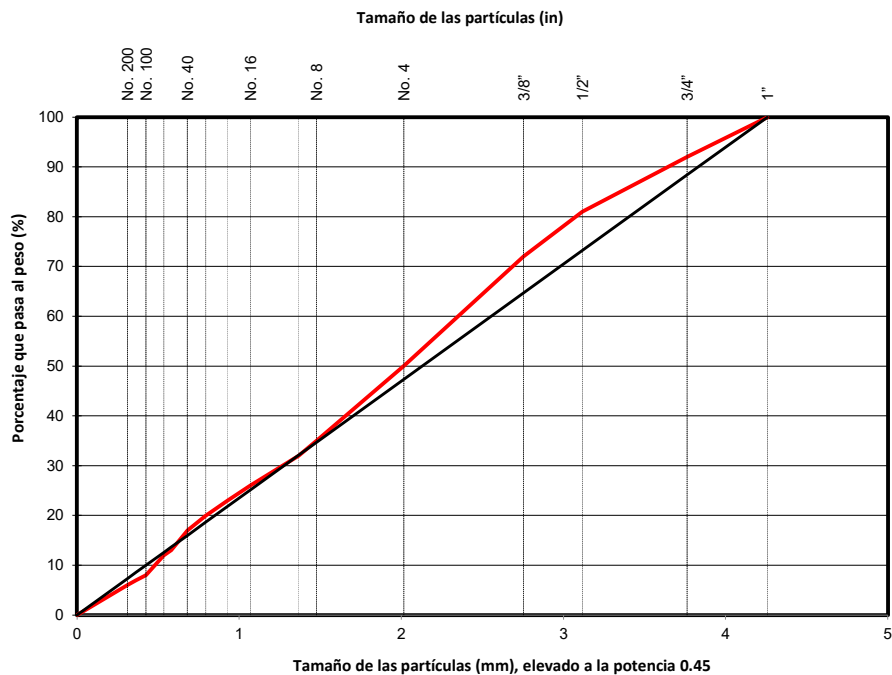
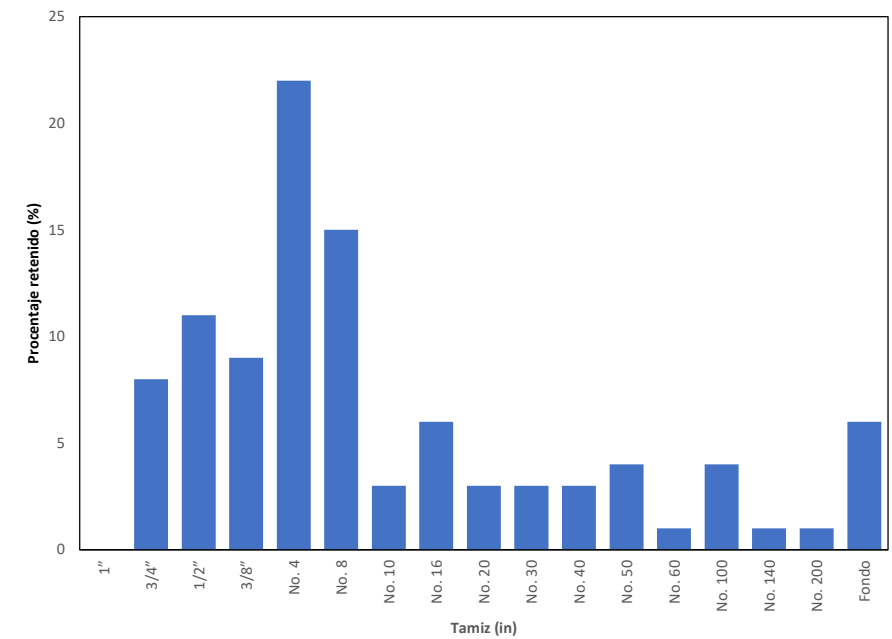




MATERIALES RECICLADOS MBR PARA USO EN BASES Y SUBBASES

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

MBR – Tamaños de partículas



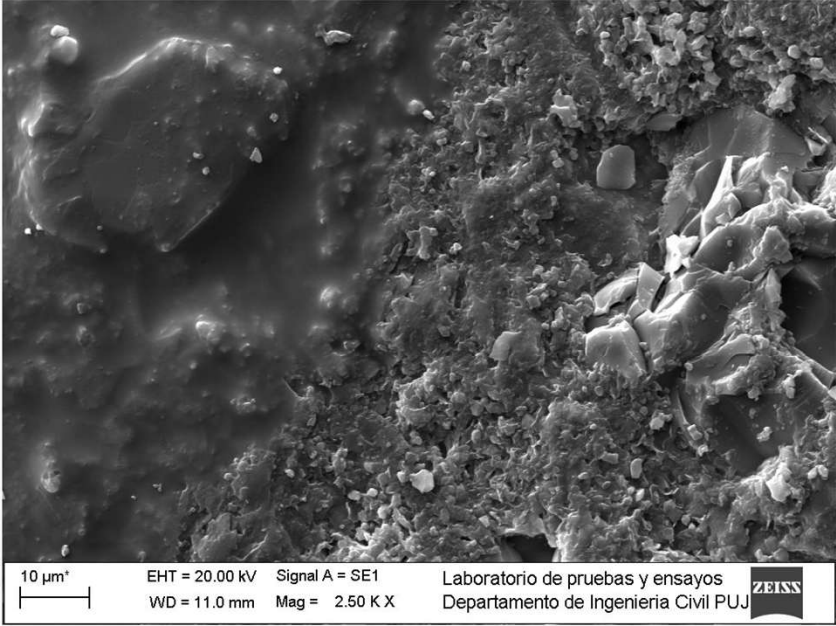
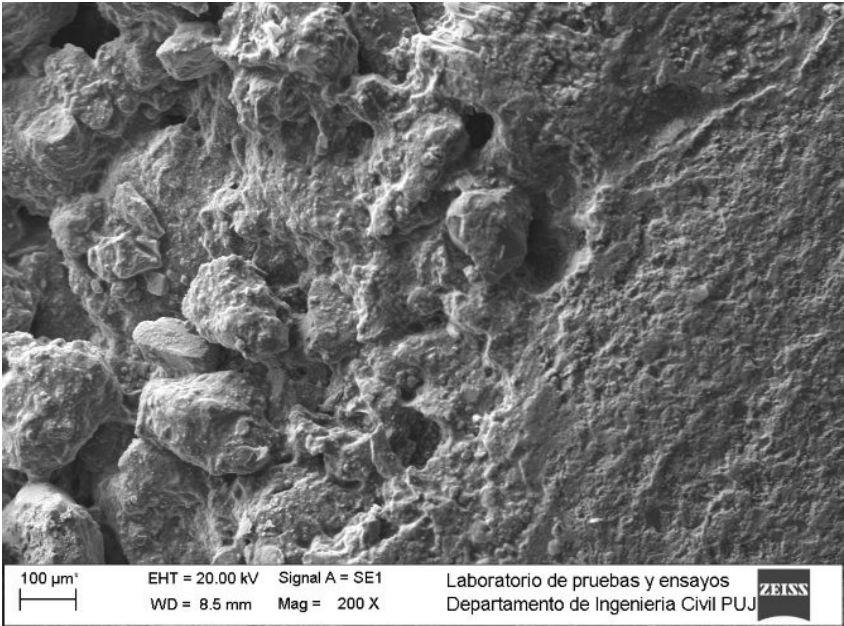
BG25
(IDU 510-18)

Tabla 510. 4
Granulometías admisibles para la construcción de bases y subbases granulares

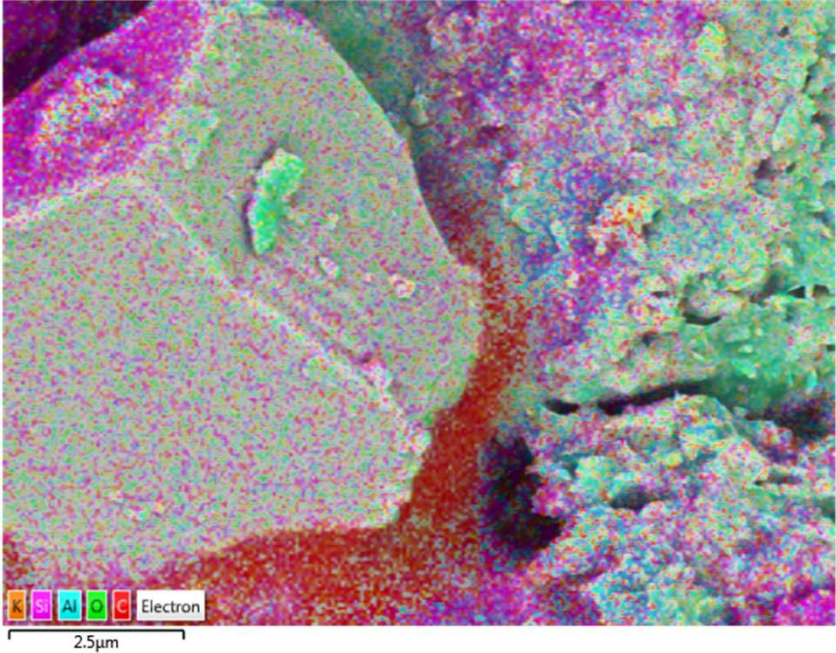
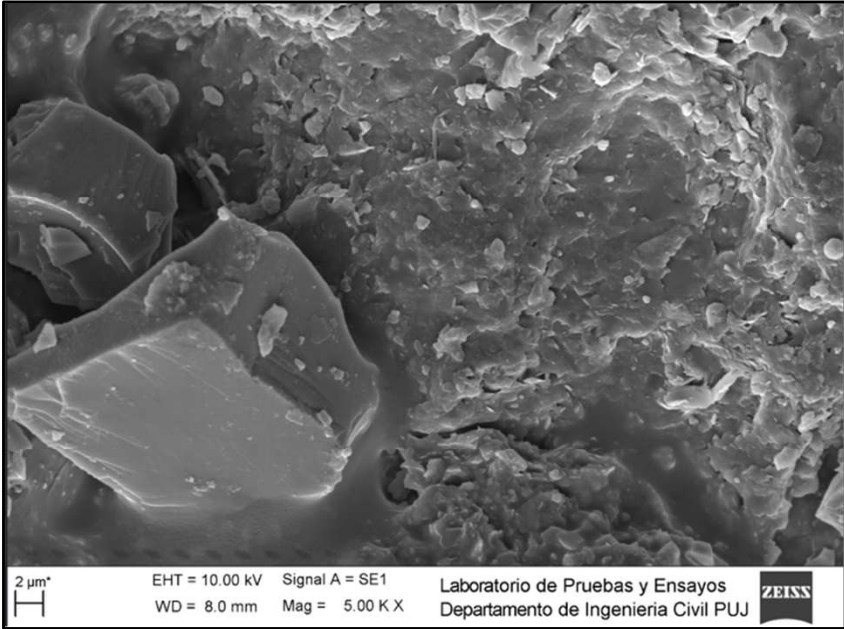
Tipo de capa		Tamiz (mm / U.S. Standard)											
		50.0	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.38	1.16	0.425	0.150	0.075
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 40	No. 100	No. 200
		% pasa											
Base	BG38	-	100	72/94	60/88	47/77	40/70	28/50	18/38	12/30	6/20	3/14	2/10
	BG25	-	-	100	78/98	60/87	50/80	35/60	24/45	16/34	8/22	4/14	2/10
Subbase	SB50	100	80/95	60/90	50/84	38/72	32/64	22/48	16/37	11/29	6/20	2/14	0/10
Tolerancias		± 7 %						± 6 %					± 3 %



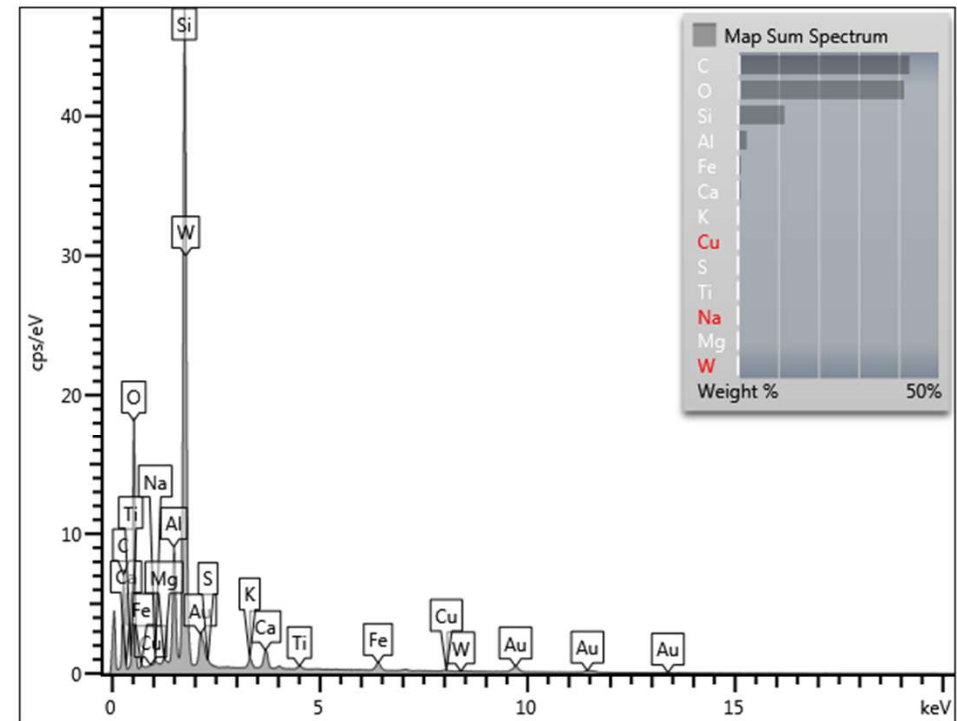
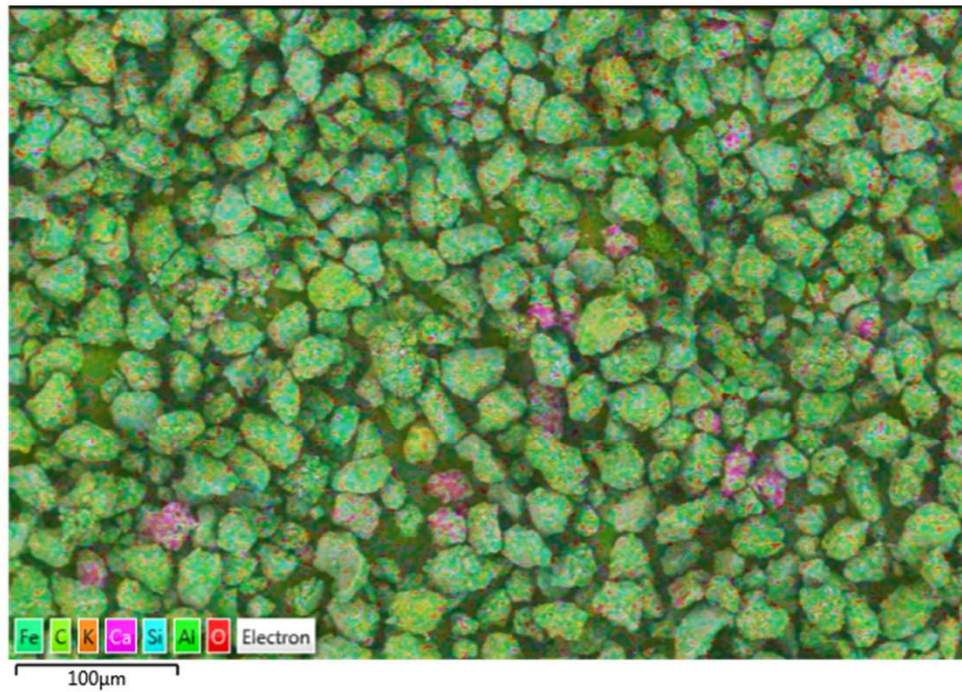
MBR - Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)



EDS Layered Image 5



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



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025

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

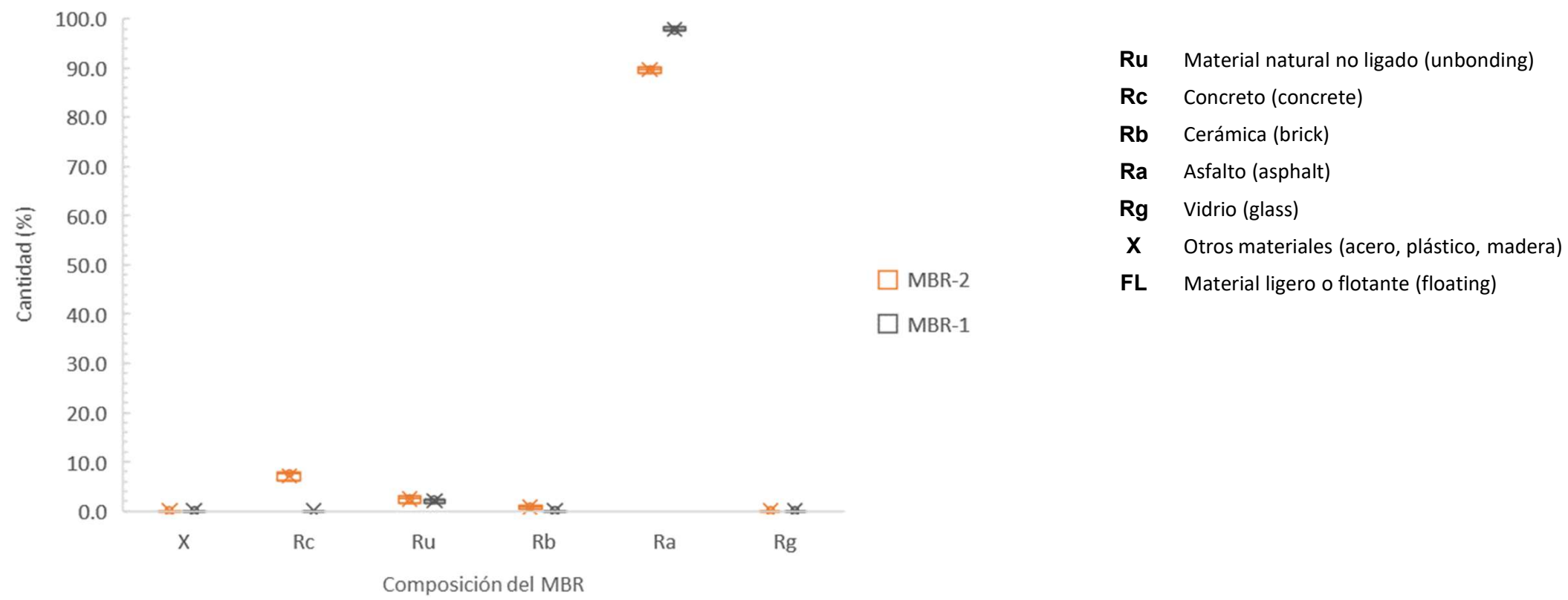


Tabla 511.2
Contenidos de los componentes de los agregados reciclados AR (fracción gruesa) para Base y Subbase Granular

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)	1cm³/kg	2 cm³/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.



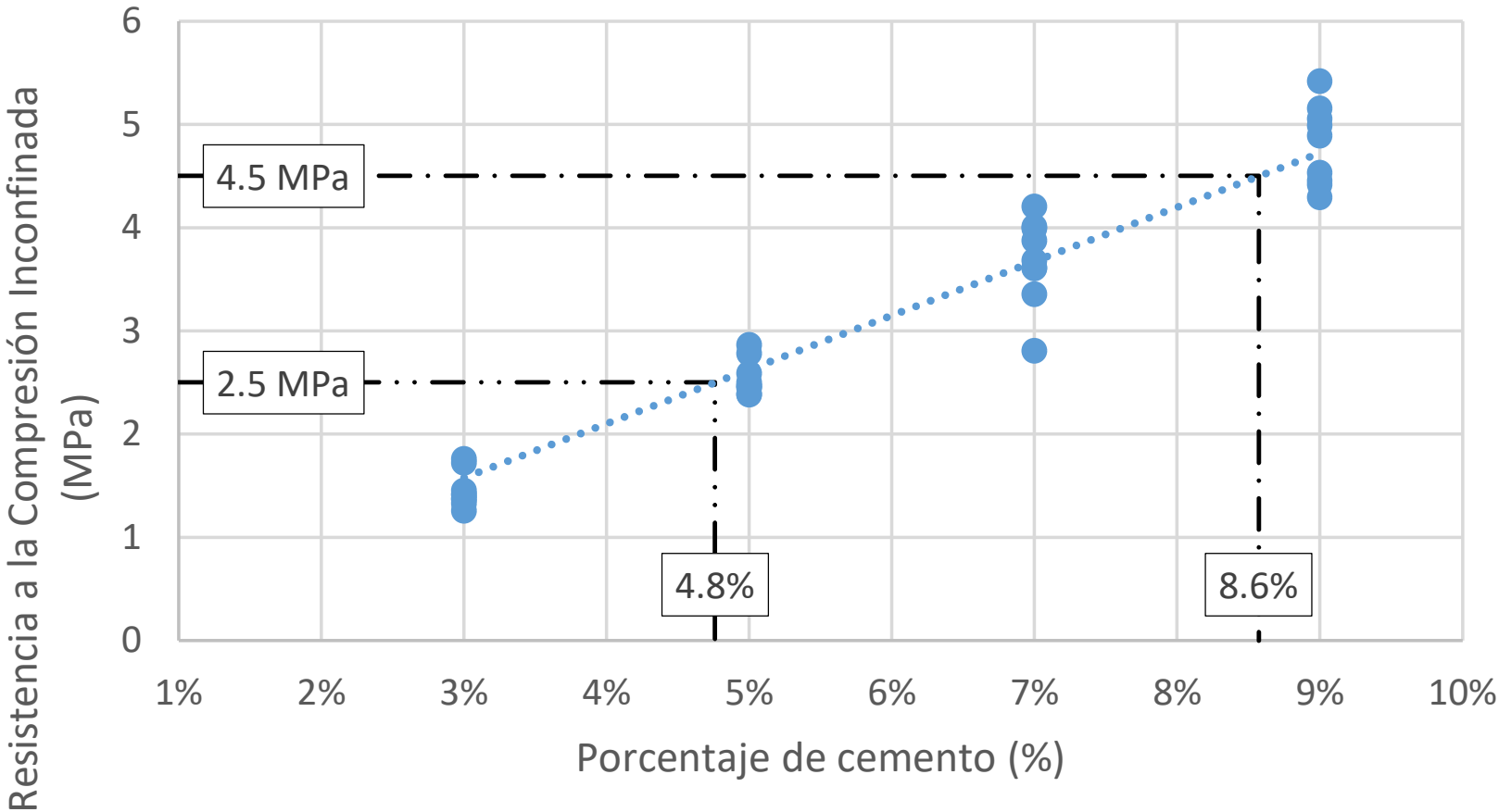
MATERIALES RECICLADOS MEJORADOS CON CEMENTO PARA USO EN BASES Y SUBBASES

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

MBR + Cemento - Resistencia a la Compresión Simple

Clase A →
(IDU 520-18)

Clase B →
(IDU 520-18)



— · — Especificación IDU 2018 BG-A

— · · — Especificación IDU 2018 BG-B

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

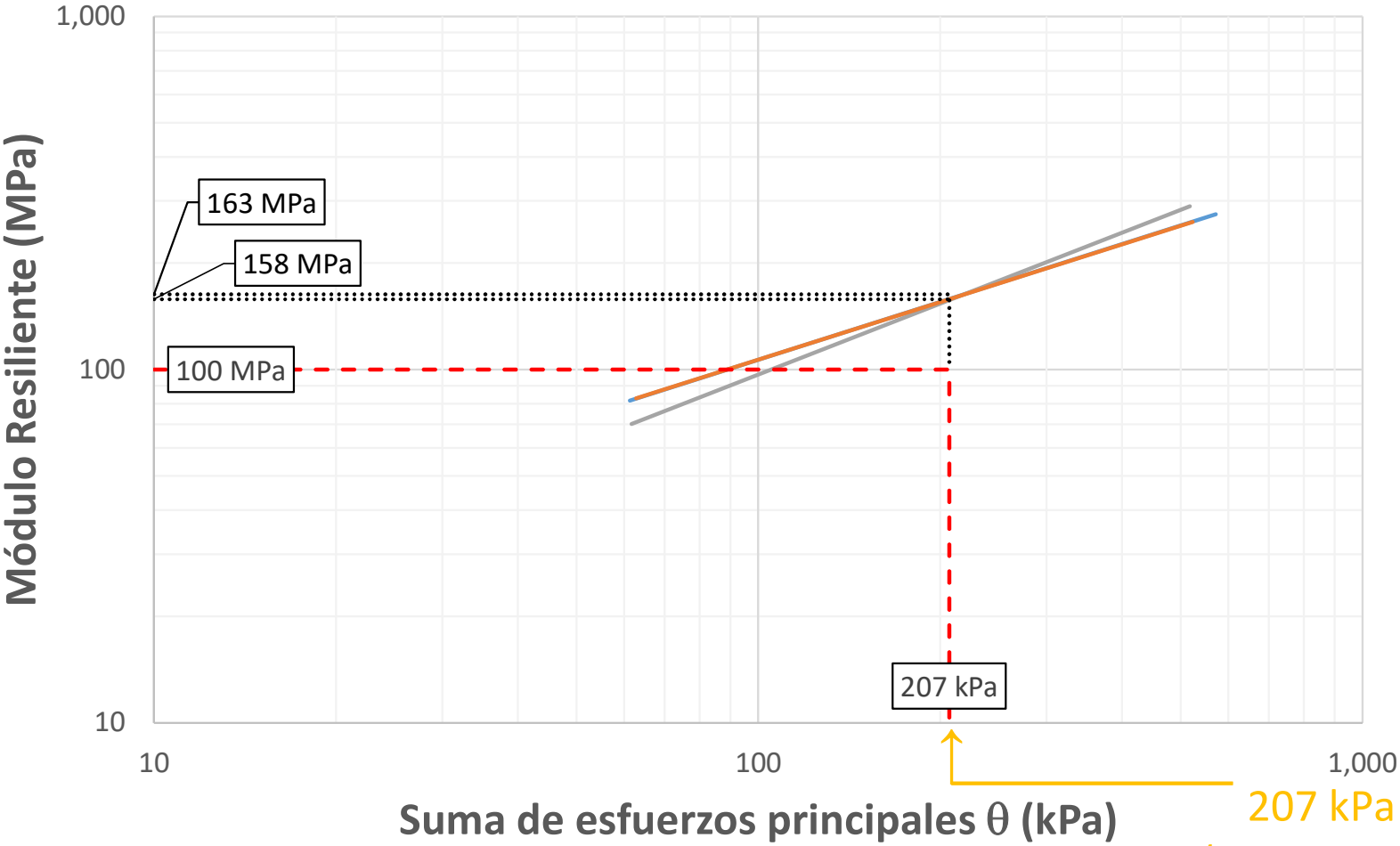
Característica	Norma de Ensayo	Clase de material granular a tratar con cemento hidráulico	
		BG_CH-B o SBG_CH-B	BG_CH-A o SBG_CH-A
Resistencia a la compresión a 7 días, mínimo MPa (Nota 1)	INV E-614-13	2.5	4.5

(1) Ensayo de resistencia a la compresión simple.



MBR + Cemento – Módulo Resiliente

$M_r \geq 100 \text{ MPa}$ →
(IDU 520-18)



— MBR 100% — MBR 90% — MBR 80%

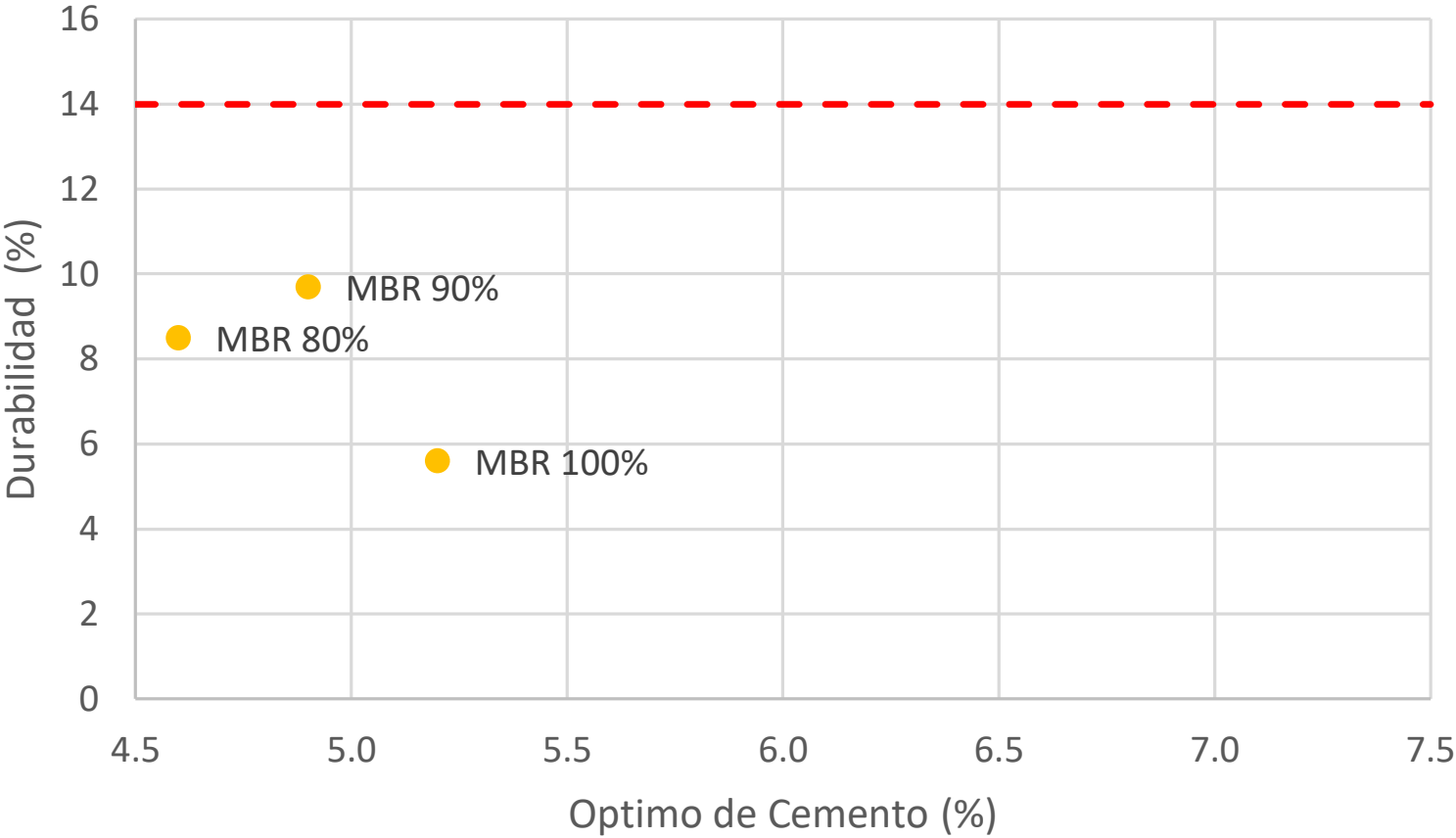
Tabla 510. 2
Requisitos de los agregados para bases granulares

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 $\theta=207$ kPa, MPa mínimo (Notas 2 y 3)	INV E 156-13	NA	100

NA = No Aplica.

MBR + Cemento – Durabilidad

Pérdidas ≤ 14%
(IDU 520-18) →



520.3.2 Contenido de cemento hidráulico

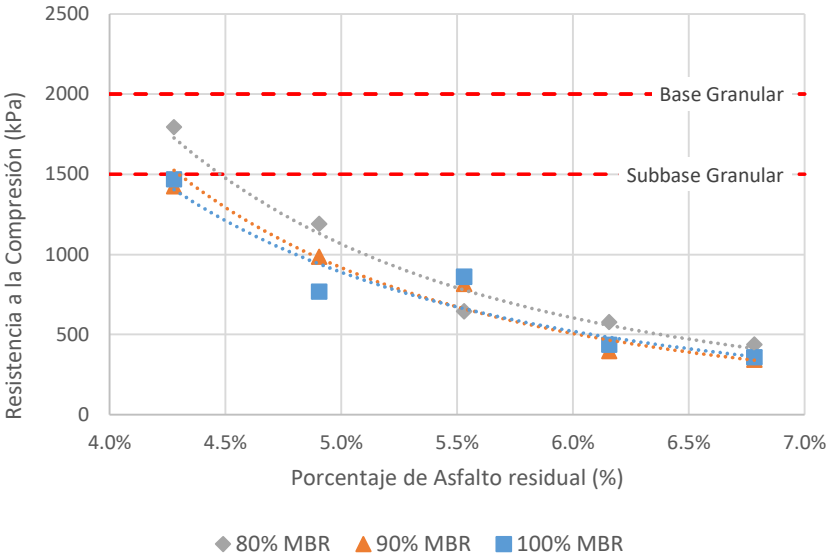
El contenido mínimo de cemento hidráulico en capas construidas de material granular mejorado con cemento hidráulico debe ser aquel que permita registrar pérdidas no superiores al 14% sobre probetas compactadas de la mezcla, sometidas a la prueba de durabilidad (humedecimiento y secado), según la norma 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.



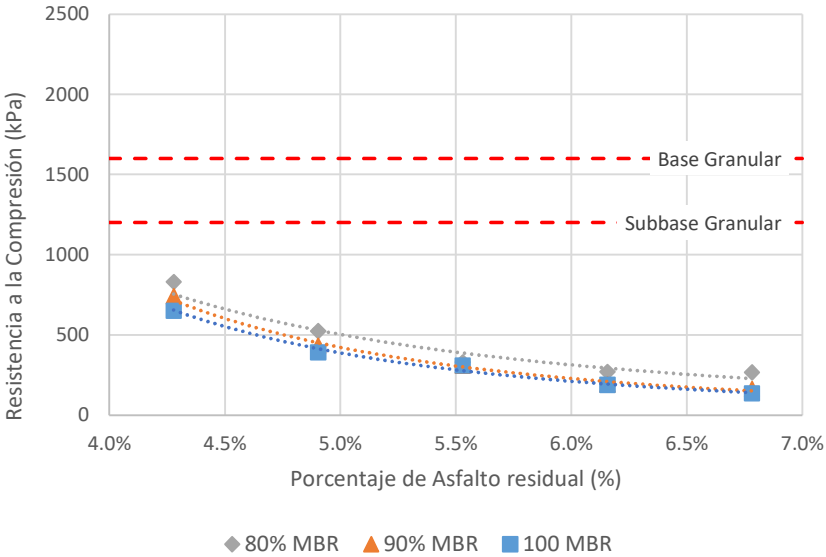
MATERIALES RECICLADOS **MEJORADOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA** **PARA USO EN BASES Y SUBBASES**

MBR + Emulsión – Resistencia a la Compresión Simple

Resistencia en Seco



Resistencia en Húmedo



Resistencia Conservada

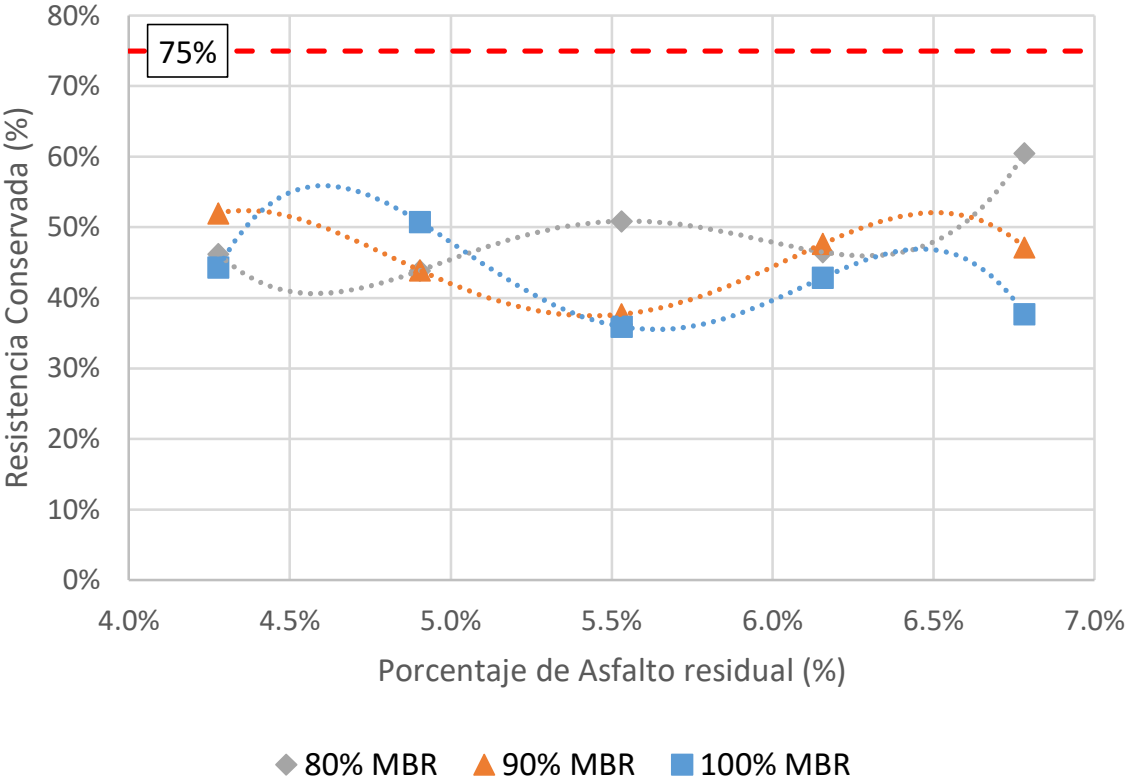


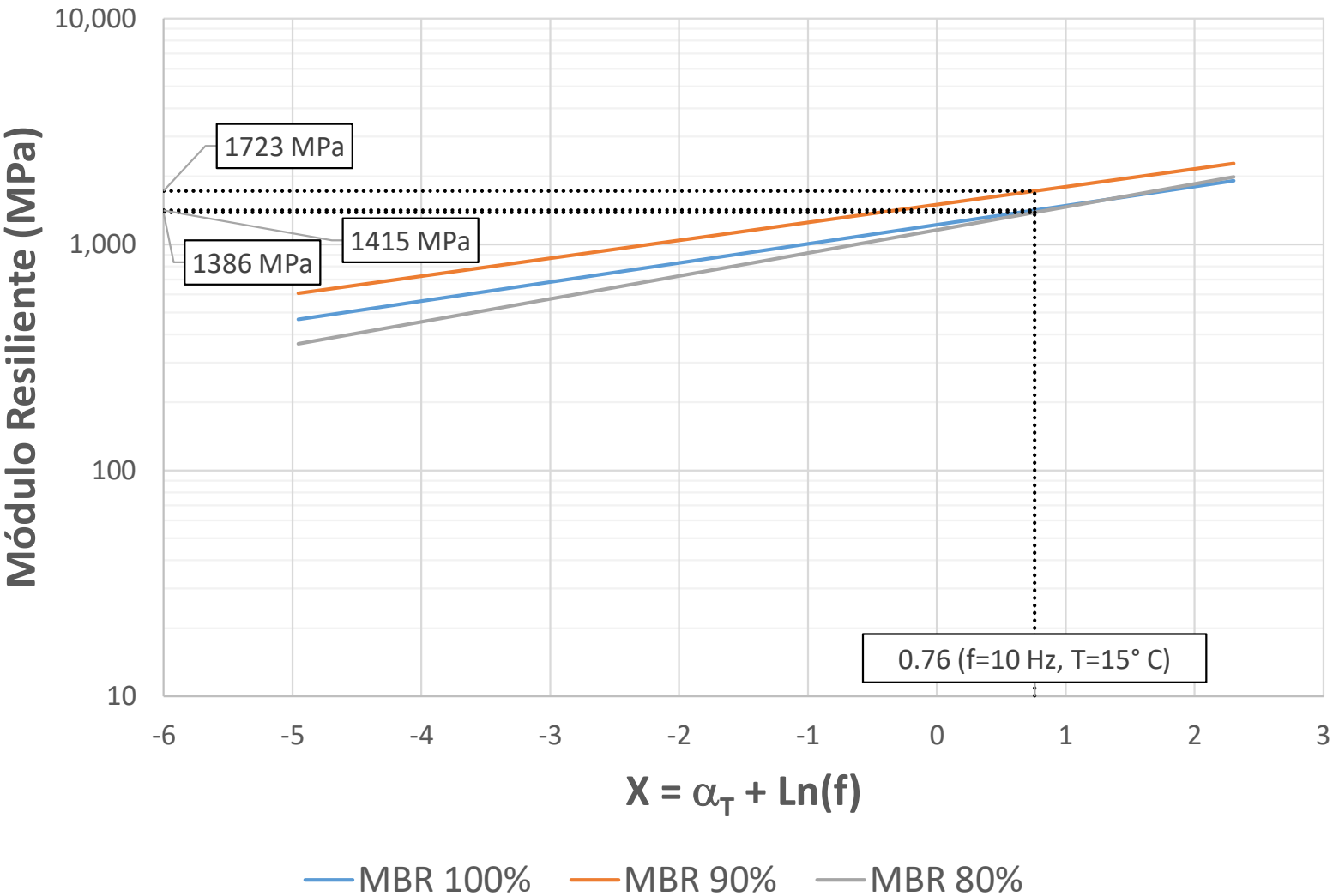
Tabla 521.2
Ensayos de resistencia para capas de reciclaje con emulsión asfáltica

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



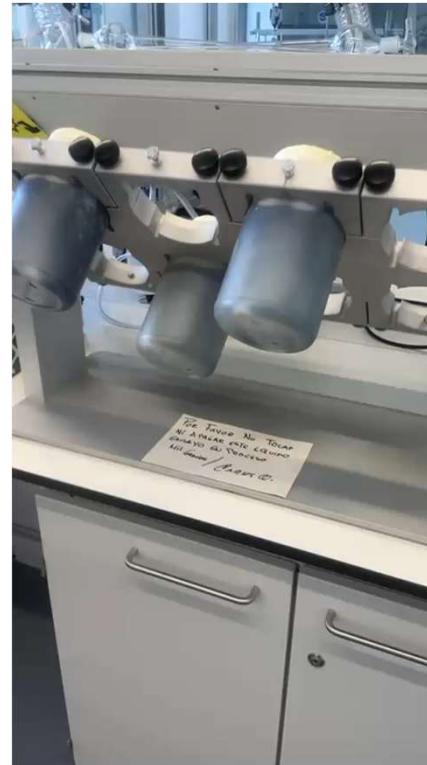


POLVO **NEUMÁTICOS FUERA DE USO** **(NFU)**

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

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.



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025



CONCLUSIONES


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

La utilización de Material Bituminoso Reciclado (MBR) conteniendo 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.



JORNADAS RECICLAJE
BOGOTÁ 2025



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Bogotá

Facultad de Ingeniería



JORNADAS RECICLAJE

B O G O T Á 2 0 2 5

Gracias / Thank you