

Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla de concreto hidráulico para pavimento rígido con la inclusión de hormigón asfáltico recuperado tipo “rap”

Evaluation of mechanical properties and dynamics of a mixture of concrete pavement hydraulic hard for inclusion with asphalt concrete type recovered “rap”

David Alberto Santos Montero
Maestría en Ingeniería Civil. Escuela de Ingenierías
y Administración, Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Pontificia Bolivariana.
Correo electrónico: david.santos.d@gmail.com

Norma Cristina Solarte Vanegas
Directora de la investigación. Universidad Pontificia
Bolivariana seccional Bucaramanga.
Correo electrónico: norma.solarte@upb.edu.co

Información del artículo: recibido: julio de 2016, aceptado: octubre de 2016
<https://doi.org/10.17081/invinno.5.1.2615>

Resumen

La construcción de pavimentos rígidos y flexibles genera desarrollo social e impacto económico/ ambiental en su concepción, desarrollo y operación posterior. Su construcción requiere de materiales a bajo costo, alta disponibilidad y total aprovechamiento, así como de propiedades que garanticen el cumplimiento mínimo de durabilidad y costos racionales de mantenimiento. Conviene obtener y usar materiales de considerada abundancia y que para su procesamiento requieran de una tecnología limpia y tradicional, a fin de que el impacto ambiental sea el más bajo posible. Los agregados reciclables corresponden a estos materiales, y dentro de ellos está el RAP, del inglés Reclaimed Asphalt Pavement (Pavimento Asfáltico Recuperado) [1], cuyo término es dado a los materiales extraídos o procesados que contienen una presencia contraída de betún asfáltico y que, ahondado en la fatiga estructural de un pavimento flexible, por efectos de envejecimiento, se obtiene por medio de una de las técnicas más conocidas de recuperación: El fresado. Gran parte de los países del mundo ha utilizado el RAP en la re-manufactura de mezclas asfálticas. Con ello se disminuye su retiro a sitios de disposición final y se minimiza el consumo de agregados pétreos vírgenes, lo que produce beneficios ambientales a corto plazo, así como otros que sobresalen por el aprovechamiento de su calidad de mezclado y condición estructural residual. Todo ello ha generado una nueva alternativa de estudio en la manufactura de mezclas hidráulicas para la construcción de pavimentos rígidos.

Palabras clave:

RAP, Módulo Elástico, Resistencia a la Resistencia a la Flexión, Módulo de Ruptura y Resistencia a la Compresión

Abstract

Keywords:

*RAP, Elastic Modulus,
Flexural Strength Resistance,
Modulus of Rupture and
Compressive Strength.*

The social and economic-environmental growth since its inception, development and subsequent operation is generated by a rigid and flexible pavement construction. Pavement construction requires a low cost material with high availability and use as well as all those properties that ensure compliance with minimum durability referred to rational maintenance costs. It is ideal, to take advantage of materials which are considered to be abundant; and for these materials use, a clean and traditional technology with a consequent low environmental impact is required. Among these materials there is RAP or Reclaimed Asphalt Pavement corresponding to recycled, extracted or processed materials which has asphaltic bitumen, obtained through one of the most popular techniques of recovery called "milling", taken from the evident deepening in the structure of a flexible pavement. In most of the countries worldwide, have used RAP in the remanufacturing of asphalt mixtures. With this process, its retirement to final disposal sites is diminished, then the consumption of Virgin stone is minimized and aggregates a short term environmental benefits, as well as others within the protruding achievement in their quality of mixing and residual structural condition, generating a new alternative to study in the manufacture of hydraulic mixtures for rigid pavements construction.

INTRODUCCIÓN

La recuperación de agregados se ha convertido en un tema muy importante en la industria de la construcción. El agotamiento progresivo de los recursos naturales, el aumento en los obstáculos para desarrollar nuevas canteras y la creciente conciencia ciudadana respecto a la gestión sostenible de los residuos, hacen cada vez más relevante el uso de agregados reciclados en el sector de la construcción. A pesar de que este proceso tiene características particulares en cada país, en términos de coyuntura y escala, se espera que los materiales procedentes de diferentes tipos de residuos se conviertan en parte sustancial del mercado de la construcción. En nuestro país se usa de manera cotidiana el RAP, como se aprecia en la Figura 1.



Figura 1. Obtención del RAP por fresado
Fuente: Elaboración propia.

Cuando este material se recupera al mismo tiempo que los afirmados existentes en una estructura de pavimento flexible, y casi de manera inmediata se le incorporan ligantes hidráulicos, cementicios o asfálticos, se le conoce como “Reciclado” (Figura 2). La información considerada para su utilización en la manufactura de mezclas hidráulicas para pavimentos rígidos es escasa, debido a las pocas investigaciones desarrolladas en el ámbito local. En el presente trabajo se utilizó como guía

las directrices técnicas establecidas por las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS-2013 [2] - Artículo 500 (Excepto la medida de la resistencia a la tracción indirecta), las Normas Técnicas Colombianas NTC-121, 174, 550, 673, 890, 2871, 3459 y 4025, así como las metodologías de diseño en pavimentos rígidos AASHTO-1993, PCA-1984 y el Manual Nacional INVÍAS-ICPC-2008.



Figura 2. Obtención de RAP por reciclado
Fuente: Elaboración propia.

OBJETIVOS

General

Obtener las proporciones óptimas de diseño para diferentes mezclas de concreto hidráulico tipo MR con inclusión de RAP, de manera tal que permita la evaluación de las propiedades mecánicas para su implementación en la concepción y construcción de un pavimento rígido.

Específicos

- Estudiar las propiedades mecánicas y de caracterización del RAP como un agregado pétreo reciclable de calidad competente, en forma tal que pueda garantizar la optimización de recursos en la manufactura del concreto hidráulico como reemplazo parcial de la fracción que así se justifique normativamente.
- Generar la mezcla de concreto hidráulico tipo MR con la proporción ideal

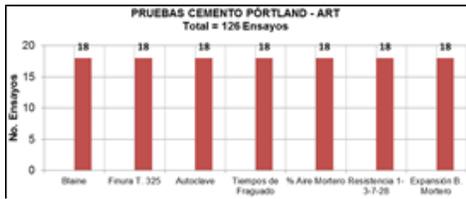


Figura 5. Pruebas Cemento Pórtland
Fuente: Elaboración propia.

Características del RAP

a. Nula plasticidad (NP).



Figura 6. Pruebas Agua de Mezclado
Fuente: Elaboración propia.

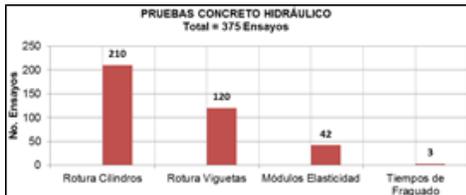


Figura 7. Pruebas en Concreto Hidráulico
Fuente: Elaboración propia.

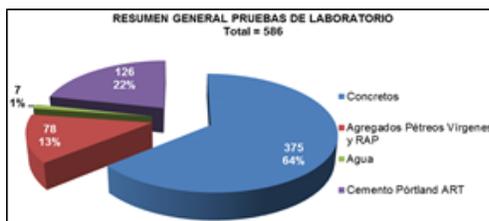


Figura 8. Resumen General Pruebas
Fuente: Elaboración propia.

- b. Compensación granulométrica.
- c. Buen peso unitario y específico bulk debido a la proporción presente de asfalto residual y porcentaje de absorción.
- d. Excelente limpieza.
- e. Nula participación de filler.
- f. Competente fracturación por una

y dos aristas, y buena geometría en formas.

g. Aprovechable medida en su dureza y adecuada angularidad.

h. En su absorción y manejabilidad, se detectaron algunas ventajas y desventajas: Aprovechamiento en su gravedad específica, textura y cierta restricción por fenómenos de “flotado” debido a la presencia residual de betún. Igualmente, se evidenció descompensación y pérdida del color estético (ver Figuras 9 a 10).



Figura 9. Tendencia al flotado RAP
Fuente: Elaboración propia.



Figura 10. Aspecto Estético Color Mezcla
Fuente: Elaboración propia.

El RAP no posee un cumplimiento normativo intrínseco a la luz de las mismas especificaciones INVÍAS-2013, por lo que su valoración depende más del uso granulométrico que se le quiera dar, así como de las propiedades mecánicas y complementarias que proporcione junto a otro agregado o por sí solo, para su conversión posterior en un producto. Entre los otros agregados están: las mezclas asfálticas, afirmados granulares y agregado estabili-

zudo. Montejo [8] recomienda algunos usos granulométricos para su utilización, que servirán como directriz para la evaluación del insumo, así como su incorporación en el reemplazo parcial de la fracción gruesa sobre el agregado pétreo virgen (Grava) (ver Figuras 11 a 13). Se analizó la muestra de RAP identificada con la sigla AMP-389 proveniente de una carpeta asfáltica tipo MDC-19/25 (TM 25/19 mm) intervenida en el proyecto vial “Ruta del Sol Sector 2” con respecto a los usos granulométricos densos establecidos en la Tabla 450-6 del Artículo 450 INVÍAS-2013 (Figura 14). Este insumo puede aprovecharse en la manufactura de mezclas asfálticas reciclables con gradación densa tipo D.

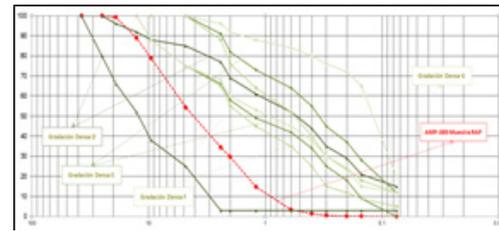


Figura 13. Muestra RAP Analizado en Gradaciones Densas
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados finales obtenidos para la elaboración de las mezclas hidráulicas tipo MR, se muestran en las Figuras 15 a 16.

Agregados pétreos vírgenes

Con procedencia del río “Chicamocha”, ubicado a (43 Kms) del Área Metropolitana de Bucaramanga (Sector Pescadero) – Santander.

Tamiz		Porcentaje que pasa						
		Gradación abierta			Gradación densa			
mm	Pig	A	B	C	D	E	F	G
28.3	1 1/2	100			100			
25	1	95-100	100		90-100			
19	3/4		90-100					
12.5	1/2	25-60		100		100	100	100
9.5	3/8		20-55	85-100				
4.5	Nº 4	0-10	0-10		25-85	75-100	75-100	75-100
2.36	Nº 8	0-5	0-5					
1.18	Nº 16			0-5			15-30	
0.3	Nº 50							15-45
0.15	Nº 100							12-20
0.075	Nº 200	0-2	0-2	0-2	3-15	0-12		

Figura 11. Gradaciones Sugeridas Reciclaje
Fuente: Montejo (2002).

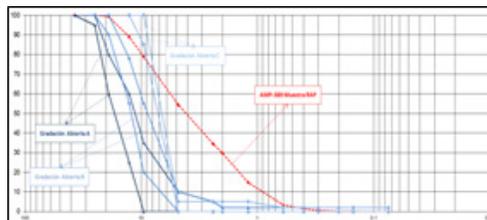


Figura 12. Muestra RAP Analizado en Gradaciones Abiertas
Fuente: Elaboración propia.

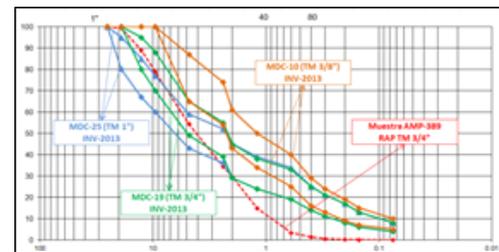


Figura 14. Muestra RAP Analizado en Gradaciones Densas Tabla 450-6 INVÍAS
Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Granulometría														(% Participación)		
	No.	1.18"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 60	No. 100	No. 200	Gravas	Armas	Filler	
Promedio	100.0	100.0	99.3	89.9	79.9	54.4	34.4	20.0	10.0	3.3	1.4	0.5	0.1	0.1	0.0	14.4	0.0

Figura 15. Granulometría RAP Analizado
Fuente: Elaboración propia – Parte a).

Orden	Material	Procedimiento	Resultado	Observaciones	Fecha	Estado	Observaciones	Fecha	Estado	Observaciones	Fecha	Estado
1	LP	1"	100.0									
2	LP	3/8"	100.0									
3	LP	2"	100.0									
4	LP	1/2"	100.0									
5	LP	3/4"	100.0									
6	LP	1"	100.0									
7	LP	1 1/2"	100.0									
8	LP	2"	100.0									
9	LP	3"	100.0									
10	LP	4"	100.0									
11	LP	6"	100.0									
12	LP	8"	100.0									
13	LP	12"	100.0									
14	LP	18"	100.0									
15	LP	24"	100.0									
16	LP	36"	100.0									
17	LP	48"	100.0									

Figura 16. Test Restantes RAP Analizado
Fuente: Elaboración propia
Continuación Parte a).

La fuente está constituida por unidades litológicas de tipo sedimentario en la que se hace necesario considerar la inclusión de adiciones cementicias para mitigar efectos adversos al fenómeno "Agregado-álcali" (NTC-174 e INVÍAS) (ver Figura 17).

No.	Terreno	Rocas fuente de agregados
1	Garzón	Intrusivos graníticos, charcoqueles, migmatitas, granulitas, neises félsicos, calizas, areniscas.
2	Pisavirá	Intrusivos graníticos, rollitas, traquitas, andesitas, migmatitas, granulitas, neises félsicos, calizas, areniscas.
3	Cajamarca	Intrusivos graníticos, neises, cuarcitas, mármoles.
4	Cauca Rumeral	Plutones calcosialtinos, andesitas, basaltos toleíticos, neises, esquistos, lótilas o cherts.
5	Dagua	Plutones calcosialtinos, basaltos toleíticos, calizas, lótilas o cherts.
6	Cañas Gordas	Plutones calcosialtinos, basaltos toleíticos, calizas, lótilas o cherts.
7	Reaño	Basaltos pobres en K, lótilas, calizas.
8	Sina	Lótilas y calizas.
9	Buriticá	Plutones calcosialtinos, andesitas, basaltos, lótilas, lótilas.
10	San Jacinto	Calizas, lótilas, areniscas calcáreas.
11	San Lucas	Granulitos, lavas rollitas y riodacitas, lótilas, neises cuarzo fedespáticos.
12	Santander	Granulitos, rollitas, andesitas, neises félsicos, mármoles, calizas.
13	Perijá	Granulitos, rollitas, lótilas mollicias, calizas.
14	Siema Nevada	Granulitos, rollitas, andesitas, neises félsicos, calizas.
15	Baja Guapi	Rollitas, espaldas de bajo Al, esquistos félsicos, mármoles, calizas.
16	Cosnare	Granulitos, Rujos riodacíticos, neises félsicos, mármoles, calizas.

Tomado de INGEOMINAS, U.S.G.S., 1983, mapa de terrenos geológicos de Colombia, publicaciones geológicas especiales de Ingeominas, Bogotá, HOYOS P.F. Y Mejía V.M. VIII Simposio sobre patología de construcciones, reactivo al análisis de los agregados pétricos en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Seccional Medellín.

Figura 17. Minerales Susceptibles a Reacción Alkali en Colombia
Fuente: NTC-174 (2000).

Desafortunadamente en Colombia no existe una normativa y la otra existen divergencias muy marcadas a favor y en contra. Las normas técnicas NTC están concebidas para el diseño y manufactura de concretos convencionales, que no generan alcance específico en concretos para pavimentos. Las normas INVÍAS marcan algunas diferencias especiales entre las que debe mencionarse que las especificaciones INVÍAS para este tema en particular, muestra en sus apartes, consideraciones muy someras a la luz de lo que tácitamente y con mayor profundidad citan las normas NTC. La grava y la arena se controlan técnicamente con esta última normativa en el centro de producción de la empresa auspiciadora en el presente trabajo, cuyos resultados esta-

dísticos obtenidos sobre la caracterización de 6 muestras (AMP-11-50-106 <Arenas> y AMP-13-54-104 <Grava>), se muestran en las Figuras 18 a 24.

Muestra	Granulometría											Participación	
	1.18"	2.0"	2.5"	3.0"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No. 200	Gravas	Arenas
AMP-11	100.0	100.0	100.0	100.0	97.4	97.4	94.9	89.9	81.9	65.3	3.3	2.6	94.1
AMP-03	100.0	100.0	100.0	99.0	95.0	78.2	65.5	48.3	25.1	12.0	3.2	15.0	81.8
AMP-130	100.0	100.0	100.0	100.0	89.0	77.1	62.8	43.7	26.5	10.0	3.3	10.4	86.3
Promedio	100.0	100.0	100.0	99.7	90.7	83.6	71.9	52.0	27.8	12.4	3.3	8.3	87.4
Tabla 500-1.1 Normativa INVÍAS(2013)					100-100 (%)	95-100 (%)	80-85 (%)	50-60 (%)	25-30 (%)	10-10 (%)	0-0 (%)		
AMP-03	100.0	100.0	90.9	34.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	90.4	0.0
AMP-04	100.0	100.0	74.7	0.0	0.0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	99.0	0.0
AMP-124	100.0	100.0	80.9	24.2	0.0	0.0	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	99.2	0.0
Promedio	100.0	100.0	82.2	21.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.4	0.0
Tabla 500-2.2 Normativa INVÍAS(2013)					100-100 (%)	90-100 (%)	20-60 (%)	0-10 (%)	0.0 (%)				

Figura 18. Granulometrías Grava y Arena Parte a)
Fuente: Elaboración propia.

Limite	LL	LP	IP	MF	Sólidos (%)	Sólidos (kg)	Volumen	Ultravinos	Equivalencia	Gravidad	%	Masa Límite (kg/m³)	
0 (%)	0 (%)	0 (%)	0 (%)	0 (%)	Pg	Pf	Pg	Pf	de Arena	de Agregado	de Agregado	Compuesta	
0.00	0.00	0.00	3.2	5.0	95.5	7.9	0.9	1.80	0.30	72.0	2.04	0.33	1271
0.00	0.00	0.00	3.9	6.8	10.7	6.9	0.7	1.10	0.40	75.0	2.06	1.10	1501
0.00	0.00	0.00	3.0	7.3	10.2	6.2	10.4	1.80	0.50	77.0	2.02	0.82	1100
0.0	0.0	0.0	2.8	6.5	10.1	6.3	0.7	1.00	0.40	74.7	2.07	0.8	1435
0 (%)	0 (%)	NP	2.3 a 3.1	<=10%	<=10%	<=2%	<=0.5%	<=0.0%			<=4%		
					4.0	0.0	8.5	0.0	0.20	0.40	2.68	0.83	1535
					9.0	0.0	7.3	0.0	0.14	0.40	2.631	0.81	1481
					6.6	0.0	7.1	0.0	0.21	0.40	2.637	0.79	1537
					6.5	0.0	7.4	0.0	0.18	0.40	2.649	0.81	1518
					<=10%	<=10%	<=0.20%	<=0.5%			<=4%		

Figura 19. Caracterización Grava y Arena Continuación Parte a)
Fuente: Elaboración propia.

Para diseñar una mezcla hidráulica se concibe la selección del TMN; el insumo encaja en gradaciones (6-NTC-174) y (AG-2, fracción 2-INVÍAS-2013), siendo la primera la ideal para combinarse con RAP.

Gradación Tabla 500-1 - Artículo 500			Gradación Normativa		
TAMIZ		FINAL	Arenas	MIN.	MAX.
3/8"	9.50	99.7	100.0	100.0	100.0
No. 4	4.8	90.7	90.7	95.0	100.0
No. 8	2.40	83.6	83.6	80.0	100.0
No. 16	1.200	71.1	71.1	50.0	85.0
No. 30	0.600	52.0	52.0	25.0	60.0
No. 50	0.300	27.8	27.8	10.0	30.0
No. 100	0.150	12.6	12.6	2.0	10.0
No. 200	0.075	3.3	3.3	0.0	3.0

Figura 20. Caracterización Grava y Arena Continuación Parte a)
Fuente: Elaboración propia.

Gradación Tabla 500-1 - Artículo 500			Gradación		Normativa	
			Arena			
TAMIZ		FINAL	% Pasa	MIN.	MAX.	
3/8"	9.50	99.7	100.0	100.0	100.0	
No. 4	4.8	90.7	90.7	95.0	100.0	
No. 8	2.40	83.6	83.6	80.0	100.0	
No. 16	1.200	71.1	71.1	50.0	85.0	
No. 30	0.600	52.0	52.0	25.0	60.0	
No. 50	0.300	27.8	27.8	10.0	30.0	
No. 100	0.150	12.6	12.6	2.0	10.0	
No. 200	0.075	3.3	3.3	0.0	3.0	

Figura 21. Granulometría Arena 9.5 mm
Fuente: Elaboración propia/INVÍAS/NTC.

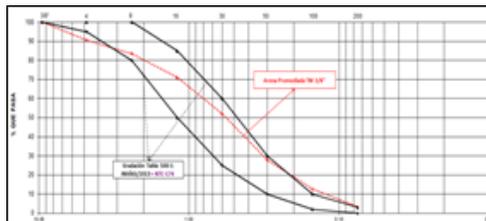


Figura 22 – Granulometría Arena 9.5 mm
Fuente: Elaboración Propia/INVÍAS/NTC

Gradación Tabla 500-3 - Artículo 500			Gradación	
			Grava	
TAMIZ		FINAL	% Pasa	
2-1/2"	63.00	100.0	100.0	
2"	50.00	100.0	100.0	
1-1/2"	37.50	100.0	100.0	
1"	25.00	100.0	100.0	
3/4"	19.00	82.2	82.2	
1/2"	12.50	21.4	21.4	
3/8"	9.50	6.5	6.5	
No. 4	4.75	0.6	0.6	
No. 8	2.36	0.6	0.6	

Figura 23. Granulometría Grava 25 mm
Fuente: Elaboración propia/INVÍAS/NTC.

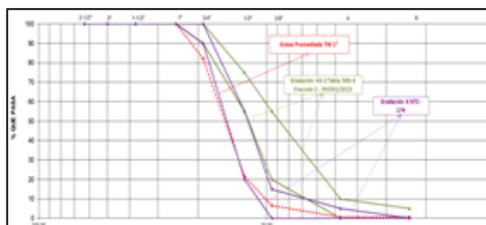


Figura 24. Granulometría Grava 25 mm
Fuente: Elaboración propia/INVÍAS/NTC.

A partir de ello, y reconociendo que la grava y el RAP poseen igual TM (=25 mm), se concluye un “Principio de compatibilidad” para considerar el reemplazo del agregado grueso vírgen por el insumo reciclado RAP. El porcentaje de participación es avalado por los métodos de diseño, las combinaciones teóricas y los análisis literarios acabados de mencionar. Por ello es adverso pensar que el RAP, en su fracción fina, pretenda reemplazarse parcialmente en la arena, aunque puede dar inicio a una investigación venidera. El nuevo término participativo para la fracción gruesa se denominará “Grava combinada”.

Cemento Pórtland

Es un aparte importante en la selección de los insumos para el logro y obtención final de las resistencias a la flexotracción y compresión, así como el módulo elástico. La valoración está bien concebida por la reciente actualización NTC-121 (2014, 2ª rev), que difiere en un alto contenido de los requerimientos normativos INVÍAS-2013. La actualización homologó un nuevo y mejor nombramiento técnico a los cementos de acuerdo con sus usos específicos, sin dejar a un lado su tipificación (I a V): UG (Uso general), ART (Alta resistencia temprana), MRS (Moderada resistencia a los sulfatos), ARS (Alta resistencia a los sulfatos), A (Incorporadores de aire), BCH (Bajo calor de hidratación), BRA (Baja reactividad agregado/álcali) y MCH (Moderado calor de hidratación). Se manejó cemento ART-clasificación III en un porcentaje del 85%, así como una adición activa del 15% de “Ceniza Termotasajero” (15%)– (ver Figura 25).

RESUMEN CLASIFICATIVO CEMENTO PORTLAND PARA DISEÑO DE MEZCLAS HIDRÁULICAS TIPO III. NORMALIDAD NTC

Fecha Muestra	Superficie Específica Fm (m²/kg)	Puzos Tamiz No. 75	Cantidad Autoclave	Tiempo de Fraguado		Cantidad de Aire Mortero	Resistencia a la Compresión			Expansión Barros Mortero	
				Inicial	Final		1 d	3 d	7 d		28 d
29/12/2016	343	5.1	0.11	129	237	4.5	15.0	28.1	33.8	41.7	0.918
04/01/2016	350	5.2	0.11	129	230	4.2	15.0	28.0	33.4	41.2	0.912
25/01/2016	367	4.5	0.10	130	240	5.0	15.0	28.3	34.3	42.2	0.908
29/01/2016	367	4.6	0.11	129	230	4.6	15.5	28.2	34.3	40.9	0.911
01/02/2016	347	5.1	0.12	122	224	4.9	15.0	28.7	33.5	40.4	0.919
04/02/2016	365	5.1	0.16	122	222	4.9	15.9	28.9	34.0	40.1	0.916
15/02/2016	362	4.9	0.18	128	225	5.1	15.8	28.6	33.8	41.7	0.918
22/02/2016	354	4.5	0.11	130	232	5.1	14.4	27.6	33.0	40.9	0.915
29/02/2016	337	4.8	0.07	137	240	5.3	15.2	28.5	34.1	41.2	0.917
09/03/2016	333	5.3	0.15	131	231	5.0	15.0	28.0	33.9	41.3	0.919
11/03/2016	388	3.8	0.05	92	134	4.9	17.9	28.8	36.3	41.6	0.906
15/03/2016	377	3.8	0.10	85	147	6.5	14.6	26.0	32.8	39.0	0.905
15/03/2016	377	3.9	0.06	87	109	5.9	15.5	25.9	31.1	39.8	0.906
15/03/2016	350	4.8	0.06	123	226	5.3	15.3	28.6	34.5	41.4	0.914
18/03/2016	351	5.0	0.18	124	224	5.2	14.7	27.9	33.6	40.3	0.915
25/03/2016	351	4.8	0.13	131	229	5.0	14.6	27.8	33.5	41.9	0.912
02/04/2016	352	5.0	0.11	130	227	5.8	15.1	28.1	33.7	41.6	0.906
22/04/2016	371	4.4	0.11	147	242	4.6	16.0	28.9	34.0	41.9	0.915
Prueba	357	4.7	0.11	123	217	5.1	15.8	28.3	33.8	41.2	0.913
Desviación	16	0.5	0.04	17	33	0.5	0.8	1.1	1.8	1.1	0.089
Coeff. Variación	4.5%	10.6%	34.8%	14.6%	15.2%	10.8%	5.5%	3.8%	3.8%	2.7%	37.8%
Umbral	-	-	<=0.0%	>45 min	>420 min	>12%	>11 Siga	>22 Siga	-	-	<=0.02%
	NTC-33	NTC-204	NTC-607	NTC-118	NTC-224	NTC-234	NTC-234	NTC-234	NTC-234	NTC-234	NTC-4937

Figura 25. Resultado Estadístico Cemento Agua de Mezclado
Fuente: Elaboración propia.

Agua de Mezclado

Se tomó de la quebrada “Aguablanca”, ubicada en inmediaciones de la planta de producción de concretos de la organización auspiciadora (Km 2 Vía Girón-Floridablanca, Santander). Al igual que el cemento pórtland, el enfoque normativo INVÍAS-2013-Tabla 630-5, es muy corto con respecto a las consideraciones citadas por la norma técnica NTC-3459. Fueron valoradas, en consecuencia, pruebas complementarias cuyos resultados se muestran en la Figura 26.

Diseño de Mezclas Hidráulicas

Cumpliendo con las exigencias de la Figura 3, se procedió a realizar tres diseños de mezclas hidráulicas. Todos los resultados obtenidos a nivel de laboratorio en muestras caracterizadas como test sobre producto final, obedecieron a la guía estadística de la ACI-318 (<4%) (Figura 27).

Codificación de la Muestra: 10-173-01 Tipo de muestra: Puntual
 Identificación de la muestra: RIO FRIO
 Matriz de la muestra: Agua Cruda
 Muestreo realizado por: El Cliente
 Lugar y punto de muestreo: Rio Frio - Anillo Vial
 Fecha del muestreo: Mayo 20 de 2016

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	6,98	Potenciométrico / SM 4500-H ⁺ B
Azúcar (mg/L)	3,01	Espectrofotométrico
Cloruro (mg Cl/L)	36,32	Argentométrico / SM 4500-Cl ⁻ B
Sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /L)	0,01	Espectrofotométrico / SM 4500 E
Sodio (mg Na/L)	38,53	Absorción Atómica / SM 3111B
Potasio (mg K/L)	8,46	Absorción Atómica / SM 3111B
Sólidos Totales (mg/L)	180	Gravimétrico SM 2540 B

Figura 26. Resultados Muestra Agua
Fuente: Laboratorio Químico de Consultas Industriales UIS.

Clase de Operación	DISPERSION TOTAL				
	Desviación Estándar para diferentes grados de control (Kg/cm ²)				
	Excelente	Muy bueno	Buena	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 28.1	28.1 a 35.2	35.2 a 42.2	42.2 a 49.2	> 49.2
Concreto en Laboratorio	< a 14.1	14.1 a 17.6	17.6 a 21.1	21.1 a 24.6	> 24.6
Clase de Operación	DISPERSION ENTRE TESTIGOS				
	Coeficiente de variación V para diferentes grados de control (%)				
	Excelente	Muy bueno	Buena	Suficiente	Deficiente
Concreto en Obra	< a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	> 6.0
Concreto en Laboratorio	< a 2.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	> 5.0

Figura 27. Reglamento ACI-318
Fuente: American Concrete Institute.

El conocimiento de las propiedades del concreto, tanto en estado endurecido (Producto final) como en estado fluido, tiene como finalidad primordial determinar el diseño de la mezcla en función de una granulometría componente y su relación agua/cemento (A/C), establecida por el principio de asentamiento de Abrams [9]. En este aparte, se hace necesario considerar algunas postulaciones como la de Sánchez et al, quienes consideran asentamientos de diseño especiales que sin estar incluidos en las especificaciones INVÍAS y NTC son totalmente válidos a la luz y responsabilidad de cualquier diseñador de mezclas, así como de algunos criterios y condiciones estipulados para la construcción de pavimentos rígidos (ver Figura 28).

Secuencia:

I. Selección del asentamiento (slump)
 —Se escoge de acuerdo con las características de la obra por construir

Tipo de construcción	Máximo Slump (mm)	Mínimo Slump (mm)
Fundaciones reforzadas	75	25
Fundaciones de concreto simple, caissons	75	25
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Construcciones voluminosas	75	25

Figura 28. Selección de Asentamientos

Fuente: Sánchez (2002).

- Selección del asentamiento de diseño
- Selección (TM) del agregado grueso
- Estimación del contenido de aire
- Contenido de agua de mezclado
- Resistencia de diseño
- Relación A/C
- Contenido de cemento
- Volumen de los agregados
- Estimación agregado grueso
- Ajuste por humedad de los agregados

Como respuesta a los tanteos calculados, la opción que mejor se ajustó fue la proporción (80% grava + 20% RAP), que validó finalmente dichos diseños (Figura 29).

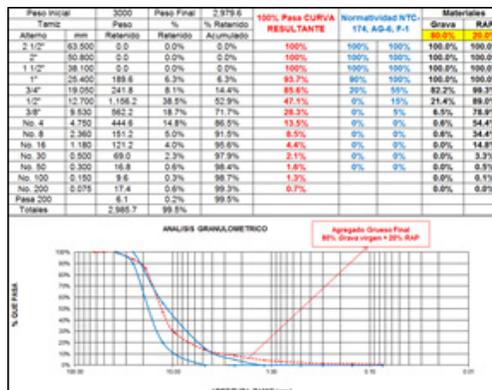


Figura 29. Dosificación Grava Combinada
 Fuente: Elaboración propia.

La elección final será aquella que soporte en primera instancia su validación técnica y normativa y, por otro, la que permita estipular su aprovechamiento económico dentro de la manufactura del concreto. Como resultado, las participaciones finales entre los nuevos agregados definidos son los porcentajes teóricos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Proporciones Finales Mezclas

Mezcla A	gregado Combinado	Agregado Fino
MR-3.8 MPa	60%	40%
MR-4.0 MPa	57%	43%
MR-4.2 MPa	57%	43%

Fuente: Elaboración Propia

Verificación de Teorías Granulométricas

Los autores basan sus criterios y principios en la capacidad de acomodamiento y compacidad de las partículas dentro de un volumen dado, tal que se logre la máxima densidad y su mejor resistencia.

- Fuller-Thompson, Bolomey, Sánchez De Guzmán y Weymouth

(ver requisitos en las Figuras 30 a 34).

Tabla 4.12 Gradaciones Ideales Fuller-Thompson de agregados para concreto en porcentaje que pasa

TAMIZ	TAMAÑO MÁXIMO mm (pulg.)						
	76.1 (3")	90.8 (3.6")	38.1 (1.5")	25.4 (1")	19.0 (0.75")	12.7 (0.5")	9.51 (0.375")
76.1 - 3"	100.0						
50.8 - 2"	81.6	100.0					
38.1 - 1.5"	70.7	86.6	100.0				
25.4 - 1"	57.8	70.7	81.6	100.0			
19.0 - 0.75"	50.0	61.2	70.7	86.6	100.0		
12.7 - 0.5"	40.9	50.0	57.8	70.7	81.6	100.0	
9.51 - 0.375"	35.4	43.3	50.0	61.2	70.7	87.2	100.0
4.76 - No. 4	25.0	30.6	35.0	43.3	50.0	61.2	70.8
2.38 - No. 8	17.7	21.6	25.4	30.6	35.4	43.3	50.0
1.19 - No. 16	12.5	15.3	17.7	21.6	25.0	30.6	35.4
0.595 - No. 30	8.8	10.8	12.5	15.3	17.7	21.6	25.0
0.297 - No. 60	6.2	7.7	8.8	10.8	12.5	15.3	17.8
0.149 - No. 100	4.4	5.4	6.2	7.7	8.8	10.8	12.6

Figura 30. Gradaciones Fuller-Thompson
 Fuente: Sánchez et al (1996).

Tabla 4.14 Gradaciones Ideales de Weymouth para agregados en porcentaje que pasa

Tamiz		Tamaño máximo mm (pulg.)				
mm	pulg.	76,1 (3)	50,8 (2)	38,1 (1½)	25,4 (1)	19,1 (¾)
76,1	- 3"	100,0	-	-	-	-
50,8	- 2"	-	100,0	-	-	-
38,1	- 1½"	83,0	92,6	100,0	-	-
25,4	- 1"	-	-	-	100,0	-
19,1	- ¾"	66,7	75,2	81,6	85,6	100,0
9,51	- ¾"	53,0	60,1	65,6	74,1	81,0
4,76	- No. 4	42,9	48,5	53,0	60,0	65,5
2,38	- No. 8	34,8	39,4	42,9	48,5	53,0
1,19	- No. 16	28,1	31,1	34,8	39,3	42,9
0,595	- No. 30	22,8	25,8	28,1	31,8	34,8
0,297	- No. 50	18,4	20,8	22,8	25,8	28,1
0,149	- No. 100	14,9	16,9	18,4	20,8	22,8

Figura 31. Gradaciones Weymouth
Fuente: Sánchez et al (1996).

Tabla 4.15 Gradaciones Ideales para agregados, en porcentaje que pasa, según el autor

Tamiz		Tamaño máximo mm (pulg.)						
mm	pulg.	76,1 (3")	50,8 (2")	38,1 (1 ½")	25,4 (1")	19,0 (¾")	12,7 (½")	9,51 (¾")
76,1	3"	100,0	-	-	-	-	-	-
50,8	2"	81,3	100,0	-	-	-	-	-
38,1	1 ½"	71,2	87,9	100,0	-	-	-	-
25,4	1"	61,8	73,2	83,3	100,0	-	-	-
19,0	¾"	51,6	64,3	73,2	87,9	100,0	-	-
12,7	½"	44,7	53,6	61,0	73,2	83,3	100,0	-
9,51	¾"	39,3	47,1	53,6	64,3	73,2	87,9	100,0
4,76	No. 4	28,7	34,5	39,2	47,1	53,6	64,3	73,2
2,38	No. 8	21,0	25,2	28,7	34,5	39,3	47,1	53,6
1,19	No. 16	15,4	18,5	21,0	25,2	28,7	34,5	39,3
0,595	No. 30	11,3	13,5	15,4	18,5	21,0	25,2	28,7
0,297	No. 50	8,2	9,9	11,3	13,5	15,4	18,5	21,0
0,149	No. 100	6,0	7,3	8,3	9,9	11,3	13,5	15,4

Figura 32 – Gradaciones Sánchez D.Guzmán
Fuente: Sánchez D. G., D. (1996) (et al.)

Tabla 4.16 Gradaciones Ideales para agregados, en porcentaje que pasa, según el autor

Tamiz		Tamaño Máximo mm (pulg.)						
mm	pulg.	76,1 (3)	50,8 (2)	38,1 (1½)	25,4 (1)	19,0 (¾)	12,7 (½)	9,51 (¾)
76,1	- 3"	100,0	-	-	-	-	-	-
50,8	- 2"	83,3	100,0	-	-	-	-	-
38,1	- 1½"	73,2	87,9	100,0	-	-	-	-
25,4	- 1"	61,0	73,2	83,3	100,0	-	-	-
19,0	- ¾"	53,6	64,3	73,2	87,9	100,0	-	-
12,7	- ½"	44,7	53,6	61,0	73,2	83,3	100,0	-
9,51	- ¾"	39,2	47,1	53,6	64,3	73,2	87,9	100,0
4,76	- No. 4	28,7	34,5	39,2	47,1	53,6	64,3	73,2
2,38	- No. 8	21,0	25,2	28,7	34,5	39,3	47,1	53,6
1,19	- No. 16	15,4	18,5	21,0	25,2	28,7	34,5	39,3
0,595	- No. 30	11,3	13,5	15,4	18,5	21,0	25,2	28,7
0,297	- No. 50	8,2	9,9	11,3	13,5	15,4	18,5	21,0
0,149	- No. 100	6,0	7,3	8,3	9,9	11,3	13,5	15,4

Figura 33. Gradaciones Bolomey
Fuente: Sánchez et al (1996).

La curva granulométrica obtenida al mezclar los agregados grueso y fino en el diseño y construcción del concreto, deberá ser continua y asemejarse a las teóricas obtenidas al aplicar las fórmulas de Fuller o Bolomey.

Figura 34. Numeral 500.2.1.4.
Fuente: Normatividad INVÍAS-2013.

Todos los resultados, así como el resumen general de los diseños se muestran en las Figuras 35 a 37. Las mezclas fueron diseñadas para una condición de asentamiento máximo ($\square=3''$). Lo anterior, bajo autonomía a los criterios definidos por la Tabla 500-9 de las normas INVÍAS-2013 (ver Figuras 38 a 39). Esto se soporta en

el hecho generado por la presencia de asfalto residual sobre el RAP, lo que ha conllevado a una trabajabilidad con mayor holgura.

Como resumen, en las Figuras 40 a 41, se muestra un comparativo estadístico y de variación porcentual con respecto a las mezclas MR convencionales que sustenta la empresa auspiciadora de esta investigación.

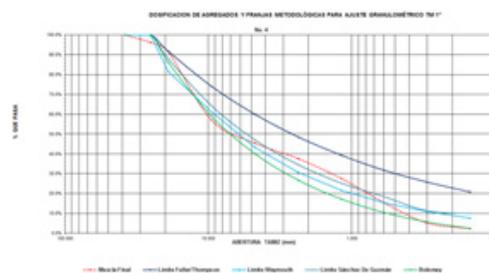


Figura 35. Chequeo en MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia.

DISEÑO MEZCLA HIERALCAICA TIPO MR-3.8 CON ADICIÓN DE RAP
REPORTE METODOLÓGICO DE DISEÑO FINAL EN AGREGADOS

PROYECTO:	Investigación Maestría: Ing. DAVID A. SANCHEZ D.
MATERIAL:	Agregado Virgen Grueso Tam 1" (80%) + RAP (20%) GRASA COMERCIAL ANILDA
FUENTE:	No. Inocentini, Pineda
FECHA:	02/08/2017
REVISIÓN:	02/08/2017
ELABORADO:	DAVID A. SANCHEZ D.
REVISADO:	DAVID A. SANCHEZ D.

Tamiz	No. de Partículas	Ag. Fino	GRASA	TAMIZ	Mezcla Final	TEORÍA GRANULOMÉTRICA CONTINUA Y DEALES PARA DISEÑO (Tam 1")
76,1	100,0	100,0	0,0	76,1	100,0	100,0
50,8	81,3	81,3	0,0	50,8	81,3	81,3
38,1	71,2	71,2	0,0	38,1	71,2	71,2
25,4	61,8	61,8	0,0	25,4	61,8	61,8
19,0	51,6	51,6	0,0	19,0	51,6	51,6
12,7	44,7	44,7	0,0	12,7	44,7	44,7
9,51	39,3	39,3	0,0	9,51	39,3	39,3
4,76	28,7	28,7	0,0	4,76	28,7	28,7
2,38	21,0	21,0	0,0	2,38	21,0	21,0
1,19	15,4	15,4	0,0	1,19	15,4	15,4
0,595	11,3	11,3	0,0	0,595	11,3	11,3
0,297	8,2	8,2	0,0	0,297	8,2	8,2
0,149	6,0	6,0	0,0	0,149	6,0	6,0

Figura 36. Chequeo en MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

(MR, $f'c$, Módulos Elásticos y Tiempos de Fraguado)

Algunos estudios realizados, dan cuenta de la correlación entre la resistencia a la compresión ($f'c$) y flexión (MR). Estos han concluido que el ensayo a la compresión sería uno de los métodos más indicados para calificar la calidad del concreto por

ser este un método más confiable y de menor incertidumbre, lo cual no es totalmente prescindible en la determinación del ensayo de módulo de rotura (MR), no solo porque así lo exigen las metodologías de diseño en pavimentos rígidos, sino también porque la mayoría de los autores basan sus sistemáticas en la condición a la fatiga del hormigón.

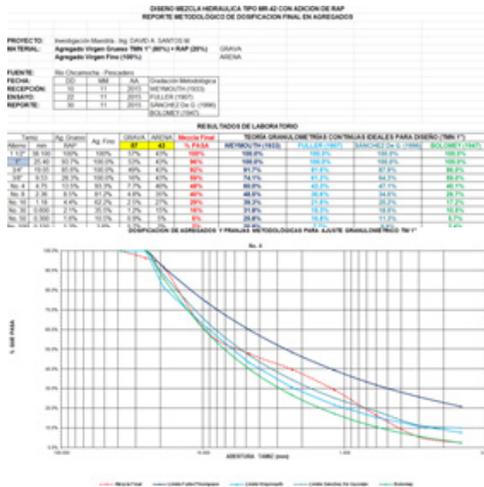


Figura 37. – Chequeo en MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 500 - 9. Tolerancias en el asentamiento y en el contenido de aire respecto de los definidos en la fórmula de trabajo

CARACTERÍSTICA	CONSTRUCCIÓN	TOLERANCIA
Asentamiento	Formaletas fijas	25 a 50
	Formaletas deslizantes	13 a 38
Contenido de aire, cuando esté especificado	Formaletas fijas	+ 1.8 %
	Formaletas deslizantes	+ 1.8 %

Figura 38. Asentamiento de Diseño
Fuente: Normatividad INVÍAS-2013.

1. Selección del asentamiento (slump)
—Se escoge de acuerdo con las características de la obra por construir

Tipo de construcción	Máximo Slump (mm)	Mínimo Slump (mm)
Fundaciones reforzadas	75	25
Fundaciones de concreto simple, caissons	75	25
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Construcciones voluminosas	75	25

Figura 39. Asentamiento de Diseño
Fuente: Sánchez (2002).

Mezclas RAP	Cemento	Agregado Grueso*	Agregado Fino	Variación		
				C	AG	AF
MR-3.8 MPa	350	970	878	+3%	-25%	+38%
MR-4.0 MPa	370	1025	798	-5%	-26%	+45%
MR-4.2 MPa	390	1011	794	-6%	-19%	+27%

Mezclas CONV.	Cemento	Agregado Grueso	Agregado Fino	Variación		
				C	AG	AF
MR-3.8 MPa	340	1216	635			
MR-4.0 MPa	390	1293	551			
MR-4.2 MPa	415	1200	625			

Figura 40. –Comparativo Cantidades
Fuente: Elaboración Propia –Asfaltart S.A.

Resumen Diseños Convencionales MR	Resumen Diseños MR + RAP						
	Cantidades/M ³	MR-3.8 MPa	MR-4.0 MPa	MR-4.2 MPa			
Agregado grueso (Kg)	1216	1293	1200	Agregado grueso (Kg)	970	1025	1011
Agregado fino (Kg)	635	551	625	Agregado fino (Kg)	878	798	794
Agua (Kg)	150	162	170	Agua (Kg)	165	193	193
Cemento (Kg)	340	390	415	Cemento (Kg)	350	370	390
Asentamiento (")				Asentamiento (")			
Relación (A/C)	0.44	0.42	0.41	Relación (A/C)	0.47	0.48	0.49
Cemento pórtland	ART – Tipo III			Cemento pórtland	ART – Tipo III		
Densidad (Kg/m ³)	2.341	2.396	2.410	Densidad (Kg/m ³)	2.333	2.386	2.388
Contenido aire	1%			Contenido aire	1%		

Figura 41. Resumen Diseños Hidráulicos
Fuente: Elaboración propia – Asfaltart S.A.

Es claro que la relación (A/C) es el parámetro que en mayor grado determina la resistencia del hormigón. También, el coeficiente de correlación (K) varía con el contenido y categoría real del cemento, granulometría, fracturación, naturaleza superficial (TM), concentración volumétrica del árido, humedad de curado en los especímenes, así como la oclusión voluntaria del aire y compacidad incompleta. Para ello y como se estipuló en esta investigación, la Figura 42 muestra una de las correlaciones literarias más utilizadas en nuestro ámbito local para la modelación de pavimentos rígidos. Con su ayuda, se determinaron los coeficientes (K) por mezcla hidráulica estudiada (ver Figuras 43 a 45).

Frente a la obtención de módulos de elasticidad, estos fueron verificados con

base en los requisitos del “Manual de Diseño de Pavimento Rígidos ICPC-IN-VÍAS-2008”, el CCDSP-2014, la norma sismo resistente colombiana NSR-2010 y algunas directrices internacionales, como el código COLLINS, el reglamento ACI-318 y la AASHTO LRFD – (ver Figuras 46 a 49). A pesar de que la medida es susceptible a la aplicación de carga y control en la deformación aplicada, los resultados fueron necesarios para modelar cada una de las alternativas de pavimento rígido.

Se puede concluir que las cifras obtenidas fueron competentes (ver Figura 50), comparada con un resultado obtenido para una muestra de concreto estructural de ($f'c=28$ MPa / MR-4.0 MPa) (Figura 49), manufacturado por la empresa auspiciadora (Figura 51).

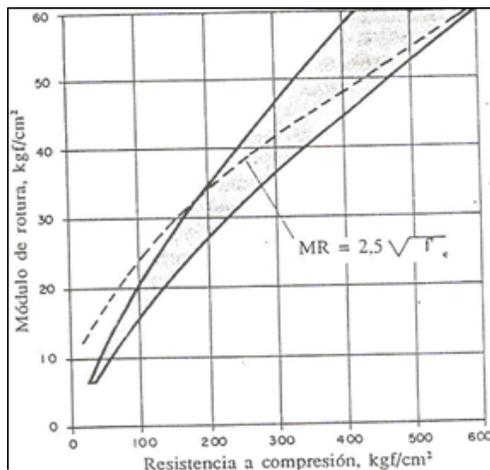


Figura 42. Correlación (F'c) y (MR)
Fuente: ICPC (1999). Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Notas técnicas. Publicación 903. Número 10. Serie 4. Bogotá D.C. Colombia.

Los resultados promedio correspondientes a la medida de compresión y flexotracción, se muestran en las Figuras 52 a 53, su porcentualidad es referida en Figura 54 y la validación a los tiempos de fraguado en la Figura 55 respectivamente.

Correlación MR - F'c				
MR-38	MR	F'c	Raiz	K
	41.0	321.4	17.9	2.3
0	0%	0	Promedio a Flexión	
7	88%	33		
28	108%	41		
0	0%	0	Promedio a Compresión	
7	84%	163		
14	100%	230		
28	118%	332		
Desv:		0.878		
Coef:		2.1%		
FLEXOTRACCIÓN				
Desv:		12.28		
Coef:		3.8%		
COMPRESIÓN				

Figura 43. Cociente (K) MR-3.8 MPa
Fuente: Elaboración propia.

Correlación MR - F'c				
MR-40	MR	F'c	Raiz	K
	43.2	395.6	19.9	2.2
0	0%	0	Promedio a Flexión	
7	91%	36		
28	108%	43		
0	0%	0	Promedio a Compresión	
7	92%	219		
14	119%	362		
28	124%	396		
Desv:		0.738		
Coef:		1.7%		
FLEXOTRACCIÓN				
Desv:		9.022		
Coef:		2.3%		
COMPRESIÓN				

Figura 44. Cociente (K) MR-4.0 MPa
Fuente: Elaboración propia.

Modelación Alternativas de Pavimento en Concreto Hidráulico

Consideraciones especiales (ver Tabla 2 y Figuras 56 a 61, respectivamente):

- a. Tránsito W18 ($5E+05 < NEE < 5E+06$).
- b. Sub rasantes CBR (2%, 3% y 7%).

MR-42	Correlación MR - F'c			
	MR	F'c	Raiz	K
	45.6	400.7	20.0	2.3
0	0%	0	Promedio a Flexión	
7	92%	38		
28	110%	46		
0	0%	0	Promedio a Compresión	
7	91%	236		
14	117%	384		
28	121%	416		
Desv:		0.762		
Coef:		1.7%		
FLEXOTRACCIÓN				
Desv:		15.84		
Coef:		4.0%		
COMPRESIÓN				

Figura 45. Cociente (K) MR-4.2 MPa
Fuente: Elaboración propia.

Tipo de agregado y origen	Módulo de elasticidad Ec (Mpa)	Módulo de elasticidad Ec (kg/cm ²)
Grueso-ígneo	$E_c = 5500 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 17000 \times (f_c)^{1/2}$
Grueso-metamórfico	$E_c = 4700 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 15000 \times (f_c)^{1/2}$
Grueso-sedimentario	$E_c = 3600 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 11500 \times (f_c)^{1/2}$
Sin información	$E_c = 3900 \times (f_c)^{1/2}$	$E_c = 12500 \times (f_c)^{1/2}$

Figura 46. Módulos de Elasticidad según Proce-
dencia Geológica del Agregado
Fuente: Guía AASHTO-1993.

Normatividad	Formulación
COLLINS	$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6900$ (Kg/cm ²)
AASHTO LRFD / ACI-318	$E_c = (W_c)^{1.5} \times 0.043 \sqrt{f_c}$ (Kg/cm ²)
NSR-2010	$E_c = (W_c)^{1.5} \times 0.10 \sqrt{f_c}$ (Kg/cm ²)
CCDSP-2014	$E_c = (W_c)^{1.5} \times 0.11 \sqrt{f_c}$ (Kg/cm ²)
MANUAL PAVICRETOS INVÍAS-ICPC-2008	$E_c = 11500 \sqrt{f_c}$ (Kg/cm ²)

Figura 47. Módulos de Elasticidad por Regla-
mentación Nacional e Internacional
Fuente: Manual Pavimentos ICPC-INVÍAS-2008,
CCDSP-2014, NSR-2010 y ACI-318.

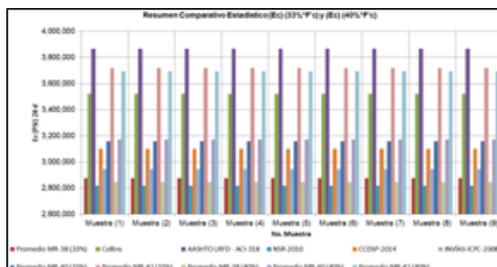


Figura 48. Módulos de Elasticidad
Fuente: Elaboración propia.

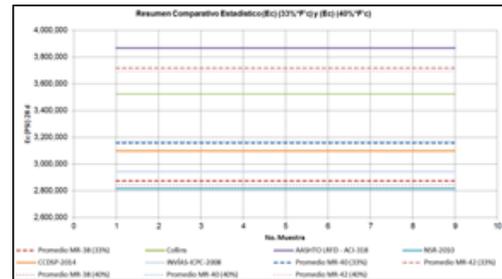


Figura 49. Módulos de Elasticidad
Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	E (Kg/cm ²) _{28d}
MR-3.8 MPa	199.055
MR-4.0 MPa	221.926 (-17%)
MR-4.2 MPa	258.512

Figura 50. Módulos Elasticidad Obtenidos
Comparación con Muestra de Figura 58
Fuente: Elaboración propia.

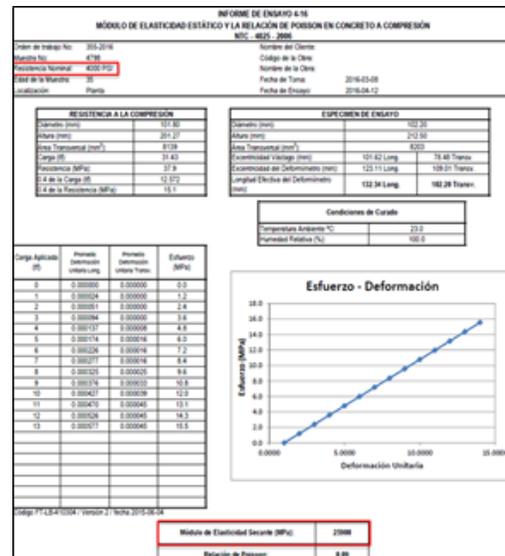


Figura 51. Módulo Elasticidad Muestra 4798
(f'c=28 MPa / MR=4.0 MPa)
Fuente: Asfaltart S. A.

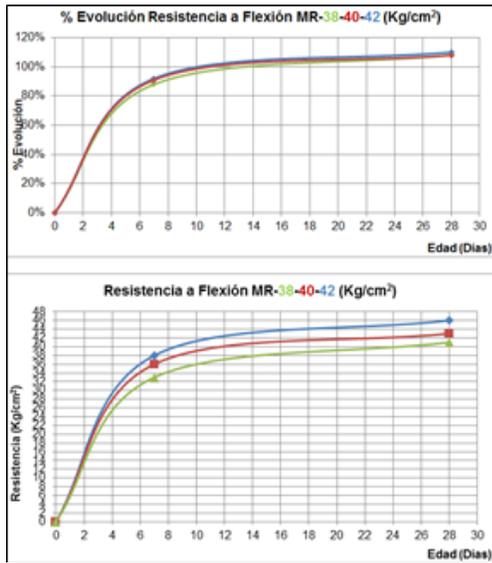


Figura 52. % Evolución y Resistencia Promedio Flexión Mezclas con RAP
Fuente: Elaboración propia.

Las cifras permiten conocer el intervalo de vibración límite, así como el comienzo de las operaciones de aserrado y terminación.

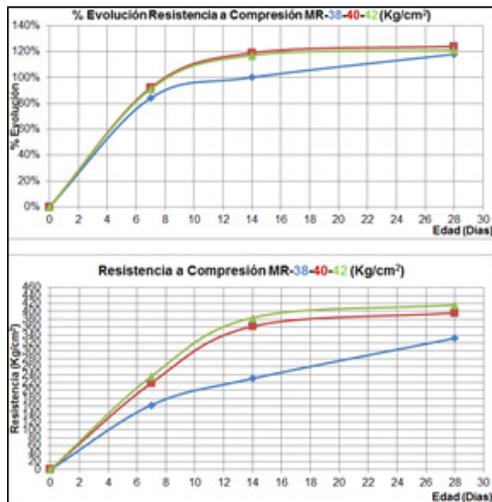


Figura 53. % Evolución y Resistencia Promedio Compresión Mezclas con RAP
Fuente: Elaboración propia

Correlación $F'c/ME$ (Kg/cm ²)	MR-3.8	MR-4.0	MR-4.2
	321,4	395,6	400,7
	Valores a 28 días	199.055	221.926
Valor porcentual	0,16%	0,18%	0,16%
Correlación $MR/F'c$ (Kg/cm ²)	MR-3.8	MR-4.0	MR-4.2
	41	43,2	45,6
	Valores a 28 días	321,4	395,6
Valor porcentual	12,8%	10,92%	11,38%

Figura 54. Medida de Porcentualidades
Fuente: Elaboración propia.

Mezcla	Ti(h:m)	Tf(h:m)
MR-3.8 MPa	06:06	06:47
MR-4.0 MPa	06:27	07:30
MR-4.2 MPa	05:13	05:48

Figura 55. Resumen Tiempos Fraguado
Fuente: Elaboración propia.

- c. Metodologías utilizadas (AASH-TO-1993, PCA-1984 y Manual de Diseño de Pavimentos Rígidos para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito - INVÍAS-ICPC-2008).
- d. Espesor y categoría de material granular de transición (15 cms de base granular tipo INVÍAS-2013 densada al 100%PM - CBR>=95%).
- e. Efecto de no berma, módulo reacción combinado, corrección por pérdida de soporte y % de fatiga/erosión.

El resultado final por modelación AASH-TO-1993 basado en la adecuada selección de sus variables (K' , \square PSI, R, S_o , a_i , c_d , S_c , E_c , J y W18), se muestra en la Figura 68. Al mismo tiempo, para la modelación PCA-1984, basados en los máximos criterios de fatiga y erosión (<100%), factor de

seguridad de carga (FS), módulo de reacción combinado (K' - Figura 60), tránsito (W18), condición de no berma (Literal e.), espesor del granular de apoyo (Literal d.) y MR del concreto, la Figura 62 muestra los resultados finales.

Art. 100 Instituto Nacional de Vías Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras			
Tabla 100-1. Niveles de Tránsito			
NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{DES} , MILLONES		
NT1	$N_{DES} \leq 0.5$		
NT2	$0.5 < N_{DES} \leq 5.0$		
NT3	$N_{DES} > 5.0$		

Categoría	Tipo de Vía	TPDs	Ejes acumulados de 8.2 t
T.0	(N) - (S)	0 a 200	< 1,000,000
T.1	(N) - (M) ó (A) - (C)	201 a 500	1,000,000 a 1,500,000
T.2	(N) - (A) - (AP) - (MC) - (C)	501 a 1,000	1,500,000 a 3,000,000
T.3	(N) - (A) - (AP) - (MC) - (C)	1,001 a 2,500	3,000,000 a 9,000,000
T.4	(N) - (A) - (AP) - (MC) - (C)	2,501 a 5,000	9,000,000 a 17,000,000
T.5	(N) - (A) - (AP) - (MC) - (C)	5,001 a 10,000	17,000,000 a 25,000,000
T.6	(N) - (A) - (AP) - (MC) - (C)	Más de 10,001	25,000,000 a 100,000,000

Figura 56. Tabla 100-1. Niveles de Tránsito / Tabla 3-1. Categorías de Tránsito
Fuente: Normatividad INVÍAS-2013 / Manual ICPC-INVÍAS-2008.

Tabla 2. Repeticiones Esperadas

NEE (500.000) Ejes 8.2 Ton	Eje Carga (Ton)	Factor Daño Camión C_2G	Repeticiones Esperadas Asumidas
			Simple (80 kN)
	Tándem (220 kN)	2.90	173.000
	Tridem (240 kN)		-

NEE (5E+06) Ejes 8.2 Ton	Eje Carga (Ton)	Factor Daño Camión C_2G	Repeticiones Esperadas Asumidas
			Simple (80 kN)
	Tándem (220 kN)	2.90	1'.724.000
	Tridem (240 kN)		-

Fuente: Elaboración Propia

Clase o Tipo	CBR (%)	Módulo resistente (kg/cm^2)
S1	< 2	2%
S2	2 - 5	Prom: 3%
S3	5 - 10	Prom: 7%
S4	10 - 20	1,000 - 2,000
S5	> 20	> 2,000

Figura 57. Tabla 3-2. Tipos de Subrasante
Fuente: Manual ICPC-INVÍAS-2008.

Variables y su representación				
Variable	Tránsito	Transversales y Construcción	Subrasante	Concreto
S1 CBR<2	T0 (EALS < 1x10 ⁷)	D y B (Dovelas y Bermas)	S5 (Subrasante)	MR<20 MPa
S2 2<CBR<5	T1 (1.5x10 ⁷ EALS < 1.5x10 ⁷)	D y No B (No Dovelas y No Bermas)	S6 (15 cm BSC)	MR<40 MPa
S3 5<CBR<10	T2 (1.5x10 ⁷ EALS < 3x10 ⁷)	No D y B (No Dovelas y Bermas)	S6C (15 cm BSC)	MR<40 MPa
S4 10<CBR<20	T3 (3x10 ⁷ EALS < 3x10 ⁷)	No D y No B (No Dovelas y No Bermas)		MR<45 MPa
S5 CBR>20	T4 (3x10 ⁷ EALS < 1.7x10 ⁷)			
	T5 (1.7x10 ⁷ EALS < 2.5x10 ⁷)			
	T6 (2.5x10 ⁷ EALS < 100x10 ⁷)			

Tabla 3-6. Variables consideradas en los análisis de diseño del pavimento

Figura 58. Tabla 3-6. Variables Modelación
Fuente: Manual ICPC-INVÍAS-2008.

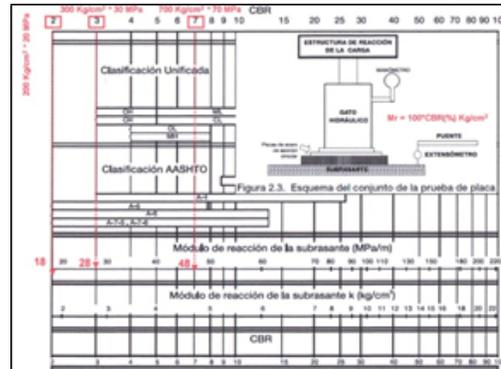


Tabla 2-12. Relación entre la clasificación del suelo y los valores de CBR y K

Figura 59. Módulo de Reacción Combinado Metodología AASHTO-1993
Fuente: Manual ICPC-INVÍAS-2008.

Valor de k para subrasante		Valor de k para la base							
MPa/m	Lb/ft ²	100 mm		150 mm		225 mm		300 mm	
		MPa/m	Lb/ft ²	MPa/m	Lb/ft ²	MPa/m	Lb/ft ²	MPa/m	Lb/ft ²
20	73	23	86	26	96	32	117	38	140
30	109	35	126	40	144	47	169	55	198
40	147	45	165	53	192	61	219	66	245
50	185	55	200	64	233	74	266	80	300
60	220	64	233	76	274	86	307	93	350
80	295	87	320	100	360	110	396	117	430

Tabla 2-15. Influencia del espesor de la base granular en el valor de k

Figura 60. Módulo de Reacción Combinado Metodología PCA-1984
Fuente: Manual ICPC-INVÍAS-2008.

Otra forma de chequeo, muy conservadora y de ágil tanteo, es la utilizada con ayuda del "Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito INVÍAS-ICPC-2008". En el diseño del pavimento es necesario tener en cuenta el módulo de reacción combinado (K), el tránsito de diseño (W18), las condiciones climáticas y los materiales constituyentes (MR) (ver en Figura 63 variables de diseño; y en Figura 64. resultados finales

obtenidos).

Relación Beneficio –Costo (B/C)

MR-38	Descripción	S1	S2	S3
	CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
	Módulo Reacción (K ^{''} Corregido) MPa/m (PCI)	(58)*	(81)*	(158)*
	NEE	500.000 ejes 8.2 Ton		
	Espesor losa (mm)	180	175	150
	NEE	5'000.000 ejes 8.2 Ton		
	Espesor losa (mm)	260	250	245
MR-40	Descripción	S1	S2	S3
	CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
	Módulo Reacción (K ^{''} Corregido) MPa/m (PCI)	(58)*	(81)*	(158)*
	NEE	500.000 ejes 8.2 Ton		
	Espesor losa (mm)	175	170	160
	NEE	5'000.000 ejes 8.2 Ton		
	Espesor losa (mm)	250	250	240
MR-42	Descripción	S1	S2	S3
	CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
	Módulo Reacción (K ^{''} Corregido) MPa/m (PCI)	(58)*	(81)*	(158)*
	NEE	500.000 ejes 8.2 Ton		
	Espesor losa (mm)	170	170	160
	NEE	5'000.000 ejes 8.2 Ton		
	Espesor losa (mm)	245	245	235

Figura 61. Espesores AASHTO-1993

Fuente: Elaboración propia.

MR-38	Descripción	S1	S2	S3
	CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
	Módulo Reacción (K ^{''} Normalizado) MPa/m (PCI)	(85)	(146)	(203)
	NEE	173.000 repeticiones c/u		
	Espesor losa (mm)	225	205	185
	[%Fatiga] [%Erosión]	[85] (11)	[74] (16)	[90] (27)
	NEE	1'724.000 repeticiones c/u		
MR-40	Descripción	S1	S2	S3
	CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
	Módulo Reacción (K ^{''} Normalizado) MPa/m (PCI)	(85)	(146)	(203)
	NEE	173.000 repeticiones c/u		
	Espesor losa (mm)	215	195	180
	[%Fatiga] [%Erosión]	[90] (16)	[89] (24)	[70] (34)
	NEE	1'724.000 repeticiones c/u		
MR-42	Descripción	S1	S2	S3
	CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
	Módulo Reacción (K ^{''} Normalizado) MPa/m (PCI)	(85)	(146)	(203)
	NEE	173.000 repeticiones c/u		
	Espesor losa (mm)	210	190	175
	[%Fatiga] [%Erosión]	[64] (18)	[68] (29)	[57] (42)
	NEE	1'724.000 repeticiones c/u		

Figura 62. Espesores PCA-1984

Fuente: Elaboración Propia

Para comparar el estudio de las mezclas

obtenidas con adición de RAP y las establecidas convencionalmente, se realizó un análisis comparativo entre los APU objeto de los procesos de manufactura por cada tipo de diseño. Se calcula para ello la relación (B/C), en donde se halla la suma de los beneficios descontados traídos al presente, dividiéndolos sobre la suma de los costos descontados.

- Si $(B/C > 1)$, beneficios superan los costos. Negocio a considerar.
- Si $(B/C = 1)$, no hay ganancias; beneficios son iguales a los costos. No considerar negocio.
- Si $(B/C < 1)$, costos superan los beneficios. No considerar negocio.
- Se consideró en APU's, un costo mínimo de transporte/m³ (\$865).
- La actividad es como si se fabricara el concreto hidráulico en obra.
- El costo del RAP es considerado nulo porque se estima su donación por parte del interesado. En caso contrario, es necesario considerar un costo básico de fresado (\$45.000) y el transporte al sitio de manufactura.

Las relaciones (B/C) son las mostradas en la Figura 65, indicando que para el (MR-3.8 MPa) los costos de producción con la adición de RAP son similares a los costos de producción sin la adición del mismo. Para las mezclas (MR-4.0 y 4.2 MPa) sí es rentable el negocio habida cuenta del margen de utilidad por metro cúbico en mezcla hidráulica producida. El ahorro promedio está alrededor de los (\$30.900.00=/m³), es decir, un porcentaje de aprovechamiento del (9%) sobre el valor de los costos directos.

CONCLUSIONES

El RAP:

1. Ofrece significativos ahorros de energía, materiales no renovables y contribuye a la sostenibilidad de los proyectos viales y a la disminución de impactos ambientales.

Además:

2. Su densidad bulk en fracción gruesa es aproximadamente un 12% menor que la de un agregado pétreo virgen.

Clase o Tipo	CBR (%)	Módulo resiliente (kg/cm ²)
S1	Min 2%	< 2
S2	From 3%	2 + 5
S3	From 7%	5 + 10
S4		20 + 10
S5		> 20

Tabla 3-2. Clasificación de la subrasante de acuerdo con su resistencia.

Denominación	Descripción
SN	Subrasante Natural
ESG	Espesor mínimo 15 cms
ESC	Base Estabilizada con Cemento

Tabla 3-3. Clasificación de los materiales de soporte para el pavimento de concreto.

Descripción	Resistencia a la flexión (kg/cm ²)
MR1	38
MR2	40
MR3	42
MR4	45

Tabla 3-4. Valores de resistencia a la flexión del concreto (Módulo de ruptura).

Categoría	Tipo de Vía	TPDs	Ejes acumulados de 8.2 t
T-0	(N) - (S)	0 a 200	500,000
T-1	(N) - (M) - (A) - (C)	201 a 500	1,000,000 a 1,500,000
T-2	(N) - (A) - (P/M/C/C)	501 a 1,000	SE+06 1,500,000 a 5,000,000
T-3	(N) - (A) - (P/M/C/C)	1,001 a 2,500	5,000,000 a 9,000,000
T-4	(N) - (A) - (P/M/C/C)	2,501 a 5,000	9,000,000 a 17,000,000
T-5	(N) - (A) - (P/M/C/C)	5,001 a 10,000	17,000,000 a 25,000,000
T-6	(N) - (A) - (P/M/C/C)	Más de 10,001	25,000,000 a 100,000,000

Tabla 3-1. Categorías de tránsito para la selección de espesores

En la Tabla 3-1 las siglas tienen el siguiente significado:

M: Multi
V: Vía sencilla
A: Anchas
V2: Vía secundaria
CC: Carreteras de 2 direcciones
Vp: Vía principal
MC: Carreteras multicarriles
E: Estrechas
AP: Autopistas

Denominación	Descripción
D	Dovelas
B	Bermas
No D	No Dovelas
No B	No Bermas

Tabla 3-5. Denominación del sistema de transferencia de cargas y confinamiento lateral

Variables y su representación			
Suelos	Tránsito	Transferencia y confinamiento	Concreto
S1 (CBR<3)	T0 (EALS <1x10 ⁷)	D y B (Dovelas y Bermas)	SN (Subrasante) MR1-38 MPa
S2 (3<CBR<7)	T1 (1x10 ⁷ EALS <1x10 ⁷)	No D y No B (No Dovelas y No Bermas)	ESG (15 cm ESG) MR2-40 MPa
S3 (7<CBR<13)	T2 (1x10 ⁷ EALS <1x10 ⁷)	No D y No B (No Dovelas y No Bermas)	ESC (15 cm ESC) MR3-42 MPa
S4 (13<CBR<23)	T3 (2x10 ⁷ EALS <1x10 ⁷)	No D y No B (No Dovelas y No Bermas)	MR4-45 MPa
S5 (CBR>23)	T4 (2x10 ⁷ EALS <1x10 ⁷)		
	T5 (1x10 ⁷ EALS <25x10 ⁷)		
	T6 (25x10 ⁷ EALS <10x10 ⁷)		

Tabla 3-6. Variables consideradas en los análisis de diseño del pavimento

En divisas	
S: "Clase de suelo con variando desde 1 hasta 5"	ESG: "Base granular"
T: "Clase de tránsito con variando desde 0 hasta 6"	ESC: "Base estabilizada con cemento"
D: "Dovelas"	CBR: "Relación de soporte de California"
B: "Bermas"	EALS: "Esp equivalente definido con el procedimiento "Equivalent Area Load System"
SN: "Suelo natural o subrasante"	

Figura 63. Variables de Diseño Fuente: Manual ICPC-INVÍAS-2008 Fuente: Elaboración propia.

MR-38	Descripción	S1	S2	S3
	CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
	NEE	T0=500.000 ejes		
	Espesor losa (mm)	-	240	150
	NEE	T2=5'.000.000 ejes		
Espesor losa (mm)	270	260	240	

MR-40	Descripción	S1	S2	S3
	CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
	NEE	500.000 ejes		
	Espesor losa (mm)	-	240	220
	NEE	5'.000.000 ejes		
Espesor losa (mm)	270	260	240	

MR-42	Descripción	S1	S2	S3
	CBR (Mínimo al 95%PM)	2%	3%	7%
	NEE	500.000 ejes		
	Espesor losa (mm)	-	230	210
	NEE	5'.000.000 ejes		
Espesor losa (mm)	260	250	230	

Figura 64. Espesores ICPC-INVÍAS-2008 Fuente: Elaboración propia.

$$(B/C) \text{ MR-3.8 MPa} = (\$340.234 + \$13.860) / (\$341.972) = 1.00$$

$$(B/C) \text{ MR-4.0 MPa} = (\$370.942 + \$14.900) / (\$355.653) = 1.08$$

$$(B/C) \text{ MR-4.2 MPa} = (\$385.127 + \$12.316) / (\$366.151) = 1.08$$

Figura 65. Valores Relación (B/C) Mezclas Fuente: Elaboración propia.

1. Su reutilización promueve una menor disposición de escombros. Disminuye la necesidad de explotar nuevas fuentes de materiales vírgenes, menor consumo de energía y contaminación por transporte.

2. Sus propiedades mecánicas ofrecen buena parte de garantía para el diseño y manufactura de una mezcla hidráulica, habida cuenta de su excelente participación en la re-fabricación de concretos asfálticos.

3. Su mayor obstáculo dentro de una óptima selección es la determinación adecuada del uso granulométrico. Por esto, debe analizarse la escogencia de su TM y % participativo para incluirse dentro de las fórmulas de trabajo en frío (Heterogranularidad en sus tamaños, así

como su % de asfalto residual). Se postula para futura investigación, realizar validación con más de una fracción.

5. Se encontraron valores competentes y dentro de umbrales de control en lo referido a su dureza, formas, sanidad, plasticidad, limpieza, fracturación, angularidad y peso específico.

6. La absorción de agua que experimenta es poca, debido a la presencia del asfalto residual. El resultado condicionó el valor sustancial en el asentamiento de las mezclas, tendencia al flotado y matiz al color convencional del concreto.

8. Su adición es indiscutiblemente un beneficio económico en la valoración de costos financieros para la producción de cualquier tipo de mezcla o combinación con otros agregados pétreos compatibles.

9. La incorporación del insumo generó disminución en la densidad de las mezclas analizadas (MR-3.8 MPa 0.34% / MR-4.0 MPa 0.42% y MR-4.2 MPa 0.92%).

10. Se pudo reemplazar solo un 20% de la masa correspondiente al agregado grueso virgen. Lo anterior, habida cuenta del cumplimiento de combinaciones establecidas para el no propiciamiento de desfases de mayor intervalo respecto a los usos granulométricos establecidos por la normativa y metodologías de diseño.

11. Es totalmente recomendable el resguardo, manipulación y cuidados complementarios al insumo después de su obtención en los procesos referenciados.

12. Se deben emitir recomendaciones para futuros trabajos de investigación, utilizando dicho insumo para el diseño y manufactura de otros concretos hidráulicos.

En cuanto a los agregados pétreos vírge-

nes:

13. La fuente "Río Chicamocha - sector Pescadero" ofrece buenos agregados pétreos (crudo y arenas naturales) para la manufactura de las mezclas.

14. Debe considerarse la adición de insumos cementicios especiales para contrarrestar efecto "Agregado-álcali" en las mezclas hidráulicas.

15. Existe desfavorabilidad para la manufactura de mezclas hidráulicas con la incorporación de RAP en lo referido al contenido de agregado fino (Arena), cuyos valores aumentaron en un promedio cercano al 36%. En lo referido al agregado grueso, los resultados fueron favorables desde el punto de vista incluyente, ya que se obtuvieron disminuciones sobre su combinación total. cercanas al (23%).

En lo correspondiente al cemento pórtland

16. La utilización de los cementos tipo ART III ayuda enormemente en la adquisición de resistencias a tempranas edades.

17. Las interpretaciones estadísticas valoradas al insumo evidencian discontinuidad coyuntural en el resultado de ensayo en "Expansión sobre barras de mortero", que estando dentro del cumplimiento normativo, dan cuenta del condicionamiento comercial y técnico con el que se aprovecha el producto cementicio a nivel nacional.

18. Es premeditorio la incorporación de elemento refrigerantes para la manufactura de las mezclas hidráulicas tipo MR-40 y 42. Lo anterior soportado en la elevada incorporación sobre la cantidad de cemento y calor de hidratación.

19. Se evidenció por las metodologías utilizadas para el diseño de las mezclas,

que los contenidos de cemento variaron en relación con los que una mezcla convencional puede requerir: (MR-3.8 MPa +3% / MR-4.0 MPa -5% y MR-4.2 MPa -6%).

En cuanto al agua:

20. El insumo analizado proveniente de la fuente “Aguablanca” cumple requerimientos básicos normativos NTC e INVÍAS/2013.

21. Sus ensayos complementarios (contenido de azúcares, sulfatos, cloruros, sodio, potasio y sólidos totales) avalan el cumplimiento a la luz de los requerimientos exigidos por la normatividad internacional – ACI.

22. Los contenidos de agua en los diseños de las mezclas aumentaron en un 15%; esto sobre la base de la trabajabilidad inducida por la presencia de asfalto residual en el RAP, así como por el comportamiento mecánico de un agregado reciclado.

De los resultados del producto final se destaca:

23. Reducción de la densidad en las mezclas del orden (0.6%).

24. Todas las curvas de resistencia a la flexión y compresión, así con las correspondientes a los módulos de elasticidad demostraron normal comportamiento estadístico para cada uno de los resultados esperados. El 100% de las resistencias, tanto en flexotracción como en compresión cumplen requisitos normativos antes de los 11 días de edad (MR-4.0 y 4.2 MPa), y sobre 14 días (MR-3.8 MPa). Esto se debe no solo a la buena calidad del tipo de cemento pórtland utilizado, sino al aporte brindado por la adición cementicia en el control del efecto

“Agregado-álcali”. Para el MR-38, llamó la atención que con valores algo bajos de resistencia a la compresión para su uso típico en estructuras de pavimento rígido, se obtuvieron resistencias moderadas de MR.

25. La medida en tiempos de fraguado se encuentran dentro de los intervalos de mezclas convencionales para temperaturas y condiciones ambientales cálidas.

26. Los valores de correlación (K) encontrados para las pruebas de flexión y compresión se encuentran entre los intervalos recomendados por la normatividad internacional ACI ($2.1 \leq K \leq 2.7$).

27. Las fallas de los especímenes a compresión, se encontraron de manera normal dentro de las tipologías consideradas por la ACI.

28. Los resultados experimentales se avalaron estadísticamente con las medidas base del promedio aritmético obtenido, desviación estándar y validación en proceso por medio de la obtención del coeficiente de variación, que para todos los casos consideró procesos de excelente a buena operación para muestreos ejecutados en laboratorio ($V < 4\%$).

29. El valor de módulo de elasticidad para la mezcla hidráulica tipo MR-4.0 MPa comparada con una convencional, se encuentra un (17%) por debajo de su cifra obtenida (ver Figura 57). Lo anterior indica que para llegar a esta misma calidad, la única mezcla con incorporación de RAP que puede alcanzarla es la correspondiente a un MR-4.2 MPa.

30. Se recomienda evaluar todas las propiedades mecánicas investigadas, en pruebas sobre un tramo de prueba real, con el objetivo de testificar con ayuda de equipos de medición y auscultación especial en el área de ingeniería de pavimentos, así como un buen control técnico

en laboratorio (pruebas destructivas) los datos aquí obtenidos.

31. Debe contemplarse la medición de tracción indirecta en núcleos extraídos, así como algunos ensayos de tipo dinámico excluidos en la presente investigación.

32. Solo se pudo reemplazar un 20% de la masa correspondiente al agregado grueso virgen por el RAP. Lo anterior, habida cuenta del cumplimiento a las combinaciones establecidas para no propiciar desfases de mayor intervalo con respecto a los usos establecidos por las franjas granulométricas y metodológicas de diseño.

33. La porcentualidad entre resultados ($f'c/ME$) y $(MR/f'c) - Kg/cm^2$ fueron en promedio del 0.17% y 11.7%, respectivamente.

34. Las temperaturas de fraguado correspondiente a los MR-3.8, MPa y 4.2 MPa superaron el umbral recomendado por la literatura especializada (34oC). Se recomienda la incorporación de agentes refrigerantes en el hormigón.

Especificaciones técnicas:

35. Persisten fallas de digitación, presentación y ausencia complementaria de criterios técnicos entre la reciente formulación INVÍAS/2013 y su recíproca NTC.

36. En la obtención y comparación de módulos elásticos bajo enfoque normativo nacional como internacional, se evidencian diferenciamientos sustanciales en sus umbrales y requisitos de aceptación.

37. Existen divergencias en el uso interpretativo y aplicación particular correspondiente al uso normativo que establecen las normas INVÍAS/2013 y NTC, respectivamente. Una cosa es el control para la manufactura y diseño de concretos hidráulicos que no son de uso en

la construcción de proyectos de infraestructura vial, y otra la que se pretende promover en la construcción de estructuras generales que no son los pavimentos.

Modelamientos estructurales:

38. Las mezclas evaluadas pueden ser utilizadas sin restricción alguna como concretos para la construcción de pavimentos rígidos en vías de bajos y medios volúmenes de tránsito NT-1 / NT-2 (Hasta $5E+06$ ejes 8.2 Ton).

39. Se cumplieron de las expectativas de validación referidas a la determinación de aceptables módulos de elasticidad.

40. Existe divergencia en la obtención de agrimensuras definidas por las metodologías (AASHTO-1993 y PCA-1984), versus la contemplada por el manual nacional vigente INVÍAS/ICPC-2008, en donde son algo sobredimensionados los espesores allí calculados.

41. Se ratifica una divergencia en más de un 20% de los resultados que asume el manual ICPC/INVÍAS-2008 versus metodologías AASHTO-1993 y PCA-1984 respectivamente.

42. La validación se enfocó a subrasantes de fundación con calidad regular a pobre. Esto puede dar cuenta de una mejor y adaptable solución técnico-económica a las necesidades de vías hasta de un orden secundario.

43. Se sugiere considerar el uso estructural en obras convencionales, habida cuenta de los resultados obtenidos a nivel de resistencias a la compresión y módulos de elasticidad.

AGRADECIMIENTOS

- a. UPB – Seccional Bucaramanga (S).
- b. Asfaltart S.A.
- c. SAD Ingeniería S.A.S.
- d. Ing. Luis Fernando Cano Gómez
- e. Ing. Pedro Javier Vargas Bayona

REFERENCIAS

- [1] D. Newcomb. (NAPA, 2004 Association. Informe especial SR-191. La industria de la mezcla de asfalto caliente es un líder nacional en el reciclaje de su producto y otros. EUA., 2004.
- [2] Ministerio del Transporte. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS-2013. Resolución 0001376 del 26/V/2014. Bogotá: 2013.
- [3] A. Sandino. Diseño de mezclas de concreto. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1965.
- [4] S.F. Sánchez. Curso básico de diseño de mezclas de concreto hidráulico para pavimentos. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2002.
- [5] Fuller y Thompson. The laws of proportioning concrete, 1907.
C. Weymouth. Effect of particle interference mortars and concrete. University of Pensilvania. EUA, 1933.
- [6] D. Sánchez de Guzmán. Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Universidad Pontificia Javeriana (3ª Ed), 1996.
- [7] A. Neville. Tecnología del concreto. México D.F.: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México, 1979.
- [8] A. Montejo. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia (2ª Ed), 2002.
- [9] NTC-396. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. Versión (1992-01-15) (1ª actualización). Colombia, 1992.