



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



ingenio Magno

8
No. 1



ISSN (versión impresa)

2145-9282

ISSN (en línea)

2422-2399

Enero-junio de 2017, vol. 8, no. 1

Universidad Santo Tomás

Tunja, Boyacá

Publicación semestral

Hecho el depósito que establece la ley

© Derechos reservados

Universidad Santo Tomás

Suscripción y canje

Unidad de Investigación

Cll. 19 No. 11-64

Universidad Santo Tomás, Tunja-Colombia

PBX: 744 0494

Línea gratuita: 018000 932340

desde cualquier lugar del país

<http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno>

Los conceptos expresados en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen a la Institución o a la publicación.

División de Arquitectura e Ingenierías

INGENIO MAGNO	Tunja Colombia	Vol. 8 No. 1	pp. 1-172	Enero- junio	2017
---------------	-------------------	-----------------	-----------	-----------------	------



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



Directivos

P. Jorge Ferdinando RODRÍGUEZ RUIZ, O.P.
Rector

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.
Vicerrector Administrativo-Financiero

P. Javier Antonio CASTELLANOS, O.P.
Vicerrector Académico

P. Samuel Elías FORERO BUITRAGO, O.P.
Decano de División de Ingeniería y Arquitectura

Jimena BOHÓRQUEZ HERRERA, Ph.D.
Directora Unidad de Investigaciones

Édgar Andrés GUTIÉRREZ CÁCERES, Esp.
Director Centro de Investigaciones en Ingeniería
San Alberto Magno - (CIAM)

Editor

Fredy Andrés Aponte Novoa, M.Sc.
Centro de Investigación en Ingeniería Alberto Magno
(CIAM)
ingeniomagno@ustatunja.edu.co

Equipo Editorial

Edwin Blasnilo Rúa Ramírez, M.Sc.
Coeditor Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
edwin.rua@usantoto.edu.co

José Ricardo Casallas Gutiérrez, M.Sc.
Coeditor Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
jose.casallas@usantoto.edu.co

John Fredy Guzmán Vargas
Profesional en Filosofía y Letras
Corrector de estilo, redactor
fredyguzmanvargas@gmail.com

Albany Milena Lozano Násner, M.Sc.
Traducción español-portugués
mlnasner@gmail.com

Departamento de Idiomas
Traducción español-inglés
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
coordinacion.idiomas@ustatunja.edu.co

David Enrique González Camargo
Administrador OJS
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
ing.investigacion@ustatunja.edu.co

Comité Científico

Antonio Moreira Teixeira, Ph.D.
Universidad de Aberta (Lisboa, Portugal)
antonio.teixeira@uab.pt

Electo Eduardo Silva Lora, Ph.D.
Univerdidad Federal de Itajubá (Itajubá M.G., Brasil)
electo@unifei.edu.br

María Julia Mazzarino, Ph.D.
Universidad de Buenos Aires (Buenos Aires, Argentina)
mmazzari@crub.uncoma.edu.ar

Antonio Rico Sulayes, Ph.D.
Universidad de las Américas Puebla (Puebla, México)
antonio.rico@udlap.mx

Carlos Enrique Montenegro Marín, Ph.D.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá
D.C., Colombia)
cemontenegrom@udistrital.edu.co

César Darío Guerrero Santander, Ph.D.
Universidad Autónoma de Bucaramanga (Bucaramanga
- Santander, Colombia)
cguerrer@unab.edu.co

Comité Editorial de la Revista

Antonio José Bula Silvera, Ph.D.
Universidad Católica del Norte (Barranquilla - Atlántico,
Colombia)
abula@uinorte.edu.co

Wilson Javier Pérez Holguín, Ph.D.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
(Tunja - Boyacá, Colombia)
wilson.perez@uptc.edu.co

José Carlos Escobar Palacios, Ph.D.
Investigador Universidad Federal de Itajubá (Itajubá
M.G., Brasil)
jocesobar@unifei.edu.br

Camilo Andrés Lesmes Fabian, Ph.D.
Universidad Santo Tomás (Tunja - Boyacá, Colombia)
camilo.lesmes@usantoto.edu.co

Impresión

Editorial Jotamar Ltda.
Calle 57 No. 3-39
Tel.: (8) 745 7120
editorialjotamar@yahoo.com
Tunja - Boyacá - Colombia

**Análisis comparativo
de una mezcla densa
en caliente MDC-19
y una mezcla densa
en frío MDF-19**

**Comparative analysis
of a MDC-19 hot dense
mixture and a MDF-19
cold dense mixture**

**Análise comparativa
de uma mistura densa
a quente MDC-19 e
uma mistura densa
a frio MDF-19**

Para citar este artículo / To reference this article / Para
citar este artigo: Bulla García, Y. A., Rodríguez Álvarez,
A. T. e Higuera Sandoval, C. H. (2017). Análisis compa-
rativo de una mezcla densa en caliente MDC-19 y una
mezcla densa en frío MDF-19. *Ingenio Magno*, 8(1),
20-42.

Yuly Alexandra Bulla-García

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Escuela Ingeniera de Transporte y Vías
yuly.bulla@uptc.edu.co

Angie Tatiana Rodríguez-Álvarez

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Escuela Ingeniera de Transporte y Vías
angietatiana.rodriguez@uptc.edu.co

Carlos Hernando Higuera-Sandoval

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Escuela Ingeniera de Transporte y Vías
carlos.higuera@uptc.edu.co

Resumen

Este artículo realiza un análisis técnico, económico y ambiental de una MDC-19 (preparada con AC 60-70) y una MDF-19 (fabricada con emulsión asfáltica CRL-1), elaboradas con el mismo agregado pétreos y empleando las metodologías Marshall modificado y Marshall Illinois, respectivamente. A partir del óptimo de asfalto arrojado por cada metodología, se realizaron ensayos de estabilidad-flujo, adherencia, deformación plástica, módulos dinámicos y leyes de fatiga, con el fin de conocer el comportamiento físico y mecánico de cada mezcla. Los resultados de la investigación mostraron dos hechos relevantes: a) una MDC-19 cuenta con mejores características técnicas (módulo dinámico y ley de fatiga); b) en cuanto al aspecto económico y ambiental, el uso de una MDF-19 representa menores costos monetarios de fabricación y emite menores cantidades de CO₂, lo que la convierte en una técnica adecuada a corto plazo en vías con bajos niveles de tránsito o técnicas de mantenimiento como bacheo.

Palabras clave: asfalto convencional 60-70, análisis económico, análisis ambiental, Marshall modificado, Marshall Illinois, emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta.

Abstract

This paper makes a technical, economic and environmental analysis of an MDC-19 (prepared with AC 60-70) and an MDF-19 (made with asphalt emulsion CRL-1), produced with the same aggregate stone and using modified Marshall and Marshall Illinois methodologies, respectively. Beginning with the optimum of asphalt thrown by each methodology, tests of stability-flow, adhesion, plastic deformation, dynamic modules and laws of fatigue were conducted, in order to know the physical and mechanical behavior of each mixture. The results of the investigation showed two relevant facts: a) an MDC-19 has better technical characteristics (dynamic module and fatigue law); b) in terms of economic and environmental aspects, the use of an MDF-19 represents lower manufacturing costs and emits lower amounts of CO₂, which makes it an appropriate short-term technique in low traffic or technical tracks of maintenance, as a patching.

Key words: conventional asphalt 60-70, economic analysis, environmental analysis, modified Marshall, Marshall Illinois, cationic asphalt slow break emulsion.

Resumo

Neste artigo uma análise técnica, econômica e ambiental de um MDC-19 (feito com AC 60-70) e um MDF-19 (feito com emulsão de asfalto CRL-1) foi realizada, os duas amostras foram preparadas com o mesmo agregado de pedra e usando as metodologias Marshall modificado e Marshall Illinois, nesta ordem. A partir do óptimo de asfalto emitido por cada metodologia, foram realizados os testes de estabilidade-fluxo, adesão, deformação plástica, módulos dinâmicos e as leis de fadiga, a fim de conhecer o comportamento físico e mecânico de cada mistura. Os resultados da pesquisa apresentaram dois pontos relevantes: a.) A amostra MDC-19 possui melhores características técnicas (módulo dinâmico e lei de fadiga); b.) Em termos de fatores econômicos e ambientais, o uso de MDF-19 se traduz em menores custos de fabricação e emite quantidades

menores de CO₂, o que a torna dita técnica adequada no curto prazo para a aplicação em rodovias com baixos níveis de trânsito ou em atividades de manutenção como a recuperação de rodovias.

Palavras-chave: asfalto convencional 60-70, análise econômica, análise ambiental, Marshall modificado, Marshall Illinois, emulsão de asfalto catiónico lento.

I. Introdução

A lo largo del tiempo, en Colombia se han realizado procesos de construcción y mejoramiento de la red vial que hacen uso de mezclas densas en caliente, es decir, aquellas que se constituyen con asfalto y agregados pétreos mezclados y compactados a temperaturas cercanas a los 150 °C; sin embargo, es importante considerar otro tipo de tecnologías como las mezclas densas en frío, cuyo proceso de fabricación se efectúa a temperaturas que no superan los 25 °C; por ello, debe tenerse en cuenta los beneficios que proporcionan estas mezclas en aspectos ambientales y económicos, además de su adecuado comportamiento mecánico y dinámico.

En el proyecto de nuevas carreteras o rehabilitación de vías existentes, es importante definir el tipo de mezcla que aporte la mayor calidad posible con menores costos y que disminuya los efectos ambientales negativos que se generan como consecuencia de la construcción de carreteras. Por ello, el presente artículo describe brevemente el procedimiento y los resultados de diseño de una mezcla densa en caliente tipo 19 y una mezcla densa en frío 19, al ser fabricadas con los mismos agregados pétreos y su correspondiente ligante bituminoso (asfalto y emulsión asfáltica, respectivamente). Se puede definir, entonces, cuál de las dos aporta mejores características de calidad.

Por otro lado, se realiza un análisis económico y ambiental, de manera que, a partir de los criterios mencionados, se pueda definir cuál es la mejor. Cabe mencionar que este proyecto forma parte de las investigaciones que adelanta el Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial (Grinfravial), de la Escuela de Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Finalmente, el contenido del presente artículo aporta a los profesionales del área de transporte y vías, carreras afines u otros interesados la información suficiente para definir la calidad y los beneficios en la fabricación de mezclas en caliente y en frío, al tiempo que busca consolidarse como un punto de partida para el desarrollo de nuevas investigaciones relacionadas principalmente con los efectos ambientales en la producción de mezclas asfálticas.

II. Metodología

Se diseñaron dos mezclas: una asfáltica densa en caliente (MFC-19) y otra asfáltica densa en frío (MDF-19); para ello, se llevaron a cabo dos metodologías similares con el fin de comparar los mismos parámetros y características. Dichas metodologías fueron el método Marshall para la mezcla en caliente y el método Marshall Illinois para mezclas en frío. En la figura 1 se muestra la metodología que se llevó a cabo durante toda la investigación.



Figura 1. Diseño metodológico para MDC-19 y MDF-19

A. Mezclas asfálticas en caliente

Pasos para diseñar una mezcla por método Marshall (Zúñiga, 2015):

1. Selección de las muestras de material (asfalto AC 60-70 y agregado) y preparación del material (figura 2).

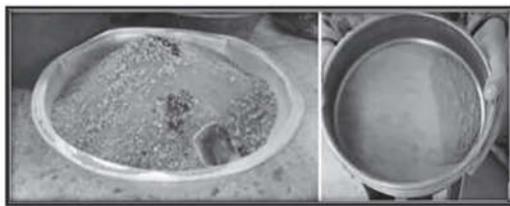


Figura 2. Agregado pétreo

2. La preparación de muestras se realiza, en primer lugar, calentando el asfalto y el agregado (hasta recubrir totalmente el agregado); posteriormente se compacta con un martillo Marshall a 75 golpes para un NT2, según lo indica el artículo 450 de las especificaciones

generales para construcción de carreteras, del Instituto Nacional de Vías (Invías). Se fabrican quince briquetas, tres por cada porcentaje de asfalto (figuras 3 y 4).



Figura 3. Mezclado de material MDC-19



Figura 4. Compactación briquetas MDC-19

3. En el ensayo Marshall se determina la gravedad específica (G_{mb}), y se realiza la prueba de estabilidad y flujo aplicando una deformación de 51 mm por minuto hasta la falla (Invías, 2013a). Lo anterior se ilustra en las figuras 5 y 6.



Figura 5. Densidad Bulk (G_{mb}) MDC-19



Figura 6. Estabilidad y flujo MDC-19

4. En el análisis de densidad y vacíos, según Garnica, Delgado y Sandoval (2005), se determinan V_a (vacíos con aire), VMA (vacíos en el agregado general) y VFA (vacíos llenos de asfalto).
5. Determinación porcentaje óptimo de asfalto.
6. Realización de ensayos complementarios.
 - *Adherencia*. De acuerdo con la norma INV E-725 (Invías, 2013b), se elaboran mínimo seis briquetas, tres para ser probadas en estado seco y tres en estado húmedo, teniendo en cuenta que, al ser comparadas entre sí, estas deben resistir mínimo el 80% de las briquetas en estado seco. La resistencia a la tensión se calcula con la ecuación [1] (figura 7).

$$RT = \frac{2000 * P}{\pi * t * D} \quad [1]$$

Donde:

RT : resistencia a la tensión (KPa).

P : carga máxima (N).

t : altura del espécimen antes de la prueba (mm).

D : diámetro del espécimen (mm).



Figura 7. Ensayo de adherencia MDC-19

- *Resistencia a la deformación plástica*. Norma INV-E 756-13 (Invías, 2013c), con la ecuación [2] (figura 8).

$$\frac{Vt2}{Vt1} = \frac{dt2 - dt1}{t2 - t1} \quad [2]$$

Donde:

$Vt2/Vt1$: velocidad media de deformación, correspondiente al intervalo de tiempo entre $t1$ y $t2$ ($\mu\text{m}/\text{min}$).

$dt2 - dt1$: deformaciones correspondientes a $t1$ y $t2$ (μm).

$t2 - t1$: tiempos que dependen del lapso establecido en las especificaciones.



Figura 8. Ensayo de ahuellamiento

- *Módulos resilientes*. Norma INV E-749-13. Realizados en el equipo NAT (Notttingham Asphalt Tester), que aplica cargas

de compresión y mide las deformaciones horizontales y verticales recuperables mediante la relación del módulo resiliente; se deben tomar lecturas a 5 °C, 20 °C y 40 °C sobre un total de seis briquetas (Invías, 2013d). El módulo resiliente de elasticidad se calcula con la ecuación [3] y se debe corregir con un ajuste de carga de 0,60, como lo indica la ecuación [4] (figura 9).

$$Sm = \frac{F(\pi + 0.2734)}{z * h} \quad [3]$$

Donde:

Sm : módulo resiliente total (MPa).

F : máxima carga repetida aplicada (N).

z : deformación total recuperable horizonte (mm).

μ : espesor de la briketa (0,35).

H : relación de briketa (mm).

$$s'm = sm * (1 - 0,322 * (\log(Sm) - 1,82) * (0,60 - k)) \quad [4]$$

Donde:

$S'm$: modulo dinámico corregido (Mpa).

K : factor de superficie de carga medida.

Sm : modulo elástico medido.



Figura 9. Ensayo de módulos dinámicos

- *Ensayo de fatiga*. Norma UNE EN-12697-24, 2006. Según la norma española, se deben introducir ocho briquetas en una cámara termostática del equipo NAT a 20 °C; posteriormente, se colocan los transductores de deformación y se aplica una carga de 250 KPa. El esfuerzo de tracción y la deformación por tracción se calculan con las ecuaciones [5] y [6] (figura 10).

$$\sigma_0 = \frac{2P}{\pi * t * \varphi} \quad [5]$$

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{2\Delta H}{\varphi} \right) * \left[\frac{1 + 3\nu}{4 + \pi * \nu - \pi} \right] \quad [6]$$

Donde:

σ_0 : esfuerzo de tracción en el centro de la probeta (MPa).

P : carga máxima (N).

T : espesor de la probeta (mm).

φ : diámetro de la probeta (mm).

ε_0 : deformación por tracción, en $\mu\varepsilon$: en el centro de la probeta.

ΔH : deformación horizontal (mm).

V : porcentaje de vacíos en la briketa determinado por el método geométrico.



Figura 10. Ensayo de leyes de fatiga

B. Mezclas asfálticas en frío

Esta metodología se desarrolló por el método Marshall Illinois, a partir de los siguientes pasos (Castañeda, Escobar y López, 2011; Guevara, Méndez y Pimentel, 2010):

1. Caracterización de los materiales que componen la mezcla. Artículo 440-13 del Invías.
 2. Tipo y cantidad aproximada de emulsión. Se debe realizar el ensayo de recubrimiento para determinar la conveniencia, el tipo de emulsión, la cantidad de emulsión y el agua requerida en la premezcla.
- Cálculo de porcentaje de emulsión, el cual se determina con la ecuación [7].

$$E = 0,05A + 0,1B + 0,5C \quad [7]$$

Donde:

E : porcentaje en peso de la emulsión asfáltica.

A : 100 – pasante de la malla n.º 8 (2,36 mm); en porcentaje.

B : (material pasante de Malla n.º 8 (2,36 mm)) – (material pasante de la malla n.º 200).

C : material pasante de la malla n.º 200.

- Contenido óptimo de recubrimiento de la mezcla, determinando el contenido de humedad de los agregados y el Filler a partir de la ecuación [8] (figura 11).

$$W = \frac{W - D}{D} * 100 \quad [8]$$

Donde:

Wp : humedad evaporable de la muestra (%).

W : masa original de la muestra (gr).

D : masa seca de la muestra (gr).



Figura 11. Humedad natural del agregado

- Ensayo de recubrimiento. Se calcula el porcentaje de agua adicional, el peso del agua a agregar, el peso de la emulsión y el peso de los agregados combinados mediante las ecuaciones [9], [10], [11] y [12] (figura 12).

$$\%Wa = \%W - \left(\%Wp \dots + \left(\%E * \left(1 - \frac{\%Ae}{100\%} \right) \right) \right) \quad [9]$$

Donde:

$\%Wa$: contenido de agua a adicionar (%).

$\%W$: contenido de agua del ensayo (%).

$\%Wp$: humedad evaporable de la muestra (%).

$\%E$: porcentaje en peso de emulsión.

$\%Ae$: contenido de asfalto en la emulsión.

$$Paa = \left(\frac{\%Wa}{100\%} \right) * Pt \quad [10]$$

Donde:

Paa : peso del agua a agregar (gr).

$\%Wa$: contenido de agua a adicionar (%).

Pt : peso total de la muestra a ensayar (gr).

$$Pe = (Pt - Paa) * (\%E / 100\%) \quad [11]$$

Donde

Pe : peso de la emulsión (gr).

P_t : peso total de la muestra a ensayar (gr).

P_{aa} : peso del agua a agregar (gr).

$%E$: porcentaje en peso de emulsión

$$P_{ac} = (P_t - P_{aa}) * (1 - (%E/100\%))$$

[12]

Donde:

P_{ac} : peso de los agregados combinados (gr).

P_t : peso total de la muestra a ensayar (gr).

P_{aa} : peso del agua a agregar (gr).

$%E$: porcentaje en peso de emulsión.



Figura 12. Ensayo de recubrimiento

3. Humedad de compactación

Se elaboran tres briquetas por cada porcentaje de humedad y se determina su densidad Bulk; la humedad de compactación se refiere a las briquetas que obtienen mayor Gmb (figura 13).



Figura 13. Humedad óptima de compactación

4. Variación de contenido de asfalto residual

Se preparan aproximadamente cinco mezclas, variando el contenido de asfalto residual, con una temperatura de mezclado y compactación

de 25°C, con las ecuaciones [13], [14] y [15] (figura 14).

$$%W_a = %W_{op} - (%W_p + (%E * (1 - (%A_e/100\%))))$$

[13]

$%W_a$: contenido de agua a adicionar (%).

$%W_{op}$: contenido óptimo de humedad de mezcla (%).

$%W_p$: humedad evaporable de los agregados (%).

$%E$: porcentaje en peso de emulsión.

$%A_e$: contenido de asfalto en la emulsión.

$$%A_{ae} = %E * (1 - (%A_e/100\%))$$

[14]

Donde:

$%A_{ae}$: porcentaje de agua en la emulsión (%).

$%E$: porcentaje en peso de emulsión (%).

$%A_e$: contenido de asfalto de la emulsión.

$$%A_r = %E - %A_{ae}$$

[15]

Donde:

$%A_r$: porcentaje de asfalto residual.

$%E$: porcentaje en peso de emulsión

$%A_{ae}$: porcentaje de agua en la emulsión.



Figura 14. Diseño MDC-19

5. Determinación de estabilidad y flujo

Se compactan veinte briquetas a 50 golpes cada una para NT2, pues la metodología de Marshall Illinois especifica que para niveles de tránsito NT2, este es el número de golpes adecuado para evitar sobrecompactación de especímenes (Asphalt Institute, 2005; Verdezoto, 2010); se fallan diez briquetas en estado seco y diez en estado húmedo para hallar la pérdida de estabilidad, mediante la ecuación [16].

$$\%perd.estabilidad = 1 - \left(\frac{estab.húmeda}{estab.seca} \right) * 100$$

[16]

6. Análisis de densidad/vacíos y ensayos complementarios.

Se repite el procedimiento del método Marshall modificado.

III. Resultados

Una vez aplicadas las metodologías Marshall y Marshall Illinois, se obtuvieron los resultados presentados a continuación.

A. Resultados de la caracterización del agregado pétreo

En la tabla 1 se presentan los valores aproximados obtenidos de los ensayos requeridos en las especificaciones generales para la construcción de carreteras (artículos 440-13 y 450-13 Invías).

Tabla 1. Resultados de caracterización de agregados pétreos

Ensayo	Norma	Resultado	Especificación norma INVIAS (caliente-frío)	Observación
Desgaste en máquina de los ángeles (%)	INV E-218-13	24,09	máx. 25	Cumple
Degradación en equipo Micro-Deval (%)	INV E-238-13	24,41	máx. 25	Cumple
Resistencia mecánica 10% de finos (kN)	INV E-224-13	127,14	-	-
Pérdida en ensayo de solidez (%)	INV E-220-13	Fino: 4,4	máx. 18	Cumple
		Grueso: 0,4		
Impurezas en agregado grueso (%)	INV E-237-13	0,35	máx. 0,5	Cumple
Equivalente de arena (%)	INV E-133-13	56,3	min. 50	Cumple
Valor azul de metileno	INV E-235-13	6,00	máx. 10	Cumple
Partículas planas (%)	INV E-240-13			
Partículas alargadas (%)				
Caras fracturadas (%)	INV E-227-13	98,8	mín. 75	Cumple
Gravedad específica y absorción en agregados finos	INV E-222-13	Gsb: 2,614	-	-
		Gsb sss: 2,637		
		Gsa: 2,675		
		Abs. (%): 0,87		
Gravedad específica y absorción en agregados gruesos	INV E-223-13	Gsb: 2,646	-	-
		Gsb sss: 2,653		
		Gsa: 2,667		
		Abs. (%): 0,30		
Índice plástico (%)	INV E-125-126-13	N.P.	N.P.	Cumple
Angularidad fracción fina, método A (%)	INV E-239-13	49,46	mín. 45	Cumple

Fuente: autores

En las figuras 16 y 17 se presenta la gradación seleccionada para la MDC-19 y MDF-19.

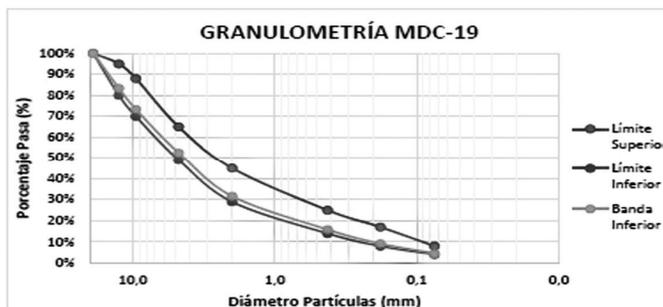


Figura 16. Gradación MDC-19

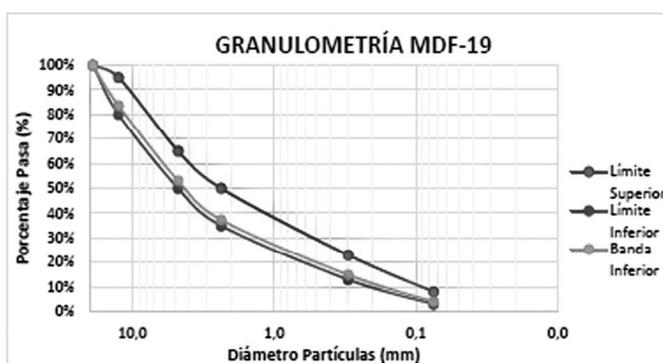


Figura 17. Gradación MDF-19

B. Resultados de la caracterización de asfalto convencional ac 60-70

En la tabla 2 se presentan los valores aproximados obtenidos a partir de los ensayos del asfalto (artículo 410-13 Invías), y en la figura 18 se relaciona la curva de viscosidad en función de la temperatura del asfalto.

Tabla 2. Resultados de la caracterización de asfalto 60-70

Ensayo	Norma	Resultado	Especificación norma Invías	Observación
Penetración (0,1 mm)	INV E-706-13	62	mín. 60	Cumple
			máx. 70	
Punto de ablandamiento (°C)	INV E-712-13	49	mín. 48	Cumple
			máx. 54	
Índice de penetración	INV E-724-13	-0,95	mín. -1,2	Cumple
			máx. +0,6	
Viscosidad absoluta (P)	INV E-717-13	169,83	mín. 150	Cumple

Ensayo	Norma	Resultado	Especificación norma Invías	Observación
Ductilidad (cm)	INV E-702-13	>100	min. 100	Cumple
Punto de inflamación (°C)	INV E-709-13	260	min. 230	Cumple
Gravedad de asfalto	-	1,015	-	-
Asfalto residual, luego de prueba de película delgada rotatoria INV E-720-13				
Pérdida de masa (%)	INV E-720-13	0,53	máx. 0,8	Cumple
Penetración residual en % de la penetración original	INV E-706-13	56,3	min. 50	Cumple
Incremento en punto de ablandamiento (°C)	INV E-712-13	9	máx. 9	Cumple
Índice de envejecimiento: relación entre viscosidades de asfalto residual y original	INV E-717-13	0,93	máx. 4	Cumple

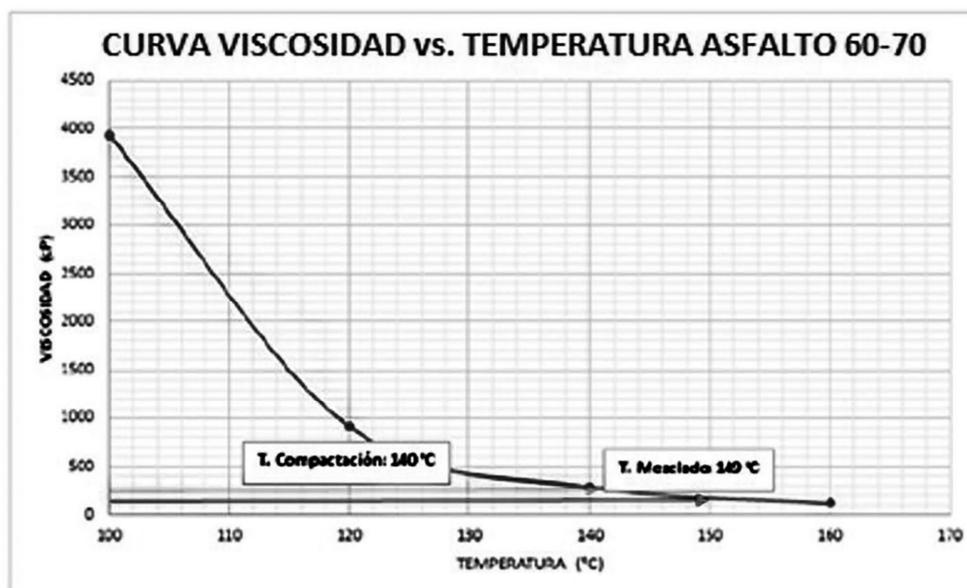


Figura 18. Curva de viscosidad en función de la temperatura del asfalto 60-70

C. Resultados de la caracterización de la emulsión asfáltica CRL-1

En la tabla 3 se observan los valores aproximados obtenidos de los ensayos requeridos para caracterizar la emulsión (artículo 411-13 Invías).

Tabla 3. Caracterización de la emulsión asfáltica CRL-1

Ensayo	Norma	Resultado	Especificación norma Inviás	Observación
Viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas (s)	INV E-763-13	22,12	mín. 20	Cumple
			máx. 200	
Contenido de agua en una emulsión asfáltica (%)	INV E-761-13	39,35	máx. 43	Cumple
Sedimentación de emulsiones asfálticas durante el almacenamiento (%)	INV E-764-13	1 día: 0,53	1 día máx. 1	Cumple
		5 días: 1,89	5 días máx. 5	
Destilación de emulsiones asfálticas (%)	INV E-762-13	61,04	mín. 57	Cumple
Tamizado de las emulsiones asfálticas (%)	INV E-765-13	0,0066	máx. 0.10	Cumple
Ph de las emulsiones asfálticas	INV E-768-13	2,61	máx. 6	Cumple
Ensayos sobre asfalto residual en proceso de destilación				
Penetración de los materiales bituminosos (0,1 mm)	INV E-706-13	69	máx. 100	Cumple
Ductilidad de los materiales asfálticos (cm)	INV E-702-13	> 100	mín. 40	Cumple
Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno (%)	INV E-713-13	99,31	mín. 97,5	Cumple

D. Resultados generales del diseño MDC-19 y MDF-19

En la tabla 4 se presentan de manera general los resultados aproximados obtenidos en el diseño preliminar de las mezclas.

Tabla 4. Resultados de diseño especificaciones INVIAS para MDC-19 y MDF-19

Parámetro	Norma Inviás	Resultado MDC-19	Resultado MDF-19	Especificación norma Inviás	Observación
Compactación (golpes/cara)	INV E-748-13	75	50	-	-
Estabilidad (N)		7631,36	11140,39	mín. 7500	Cumple
Flujo (mm)		2,49	2,10	2,0-4,0	Cumple
Relación estabilidad / flujo (kN/mm)		3,06	5,00	3,0-5,0	Cumple
Vacíos con aire (%)	INV E-736-13	4,42	4,07	3,0-5,0	Cumple
Vacíos en los agregados minerales (%)	INV E-799-13	15,3	13,5	mín. 15	-
Vacíos llenos de asfalto (%)	INV E-799-13	71,32	69,94	65 a 78	Cumple
Relación llenante/ligante	INV E-799-13	1,06	1,26	0,8 a 1,2	Cumple

Como se evidencia en la tabla 4, las dos mezclas cumplen con los requisitos establecidos en las especificaciones del Inviás de manera general; sin embargo, hay que prestar cierta atención a los vacíos en agregados minerales de la MDF-19, ya que se encuentra un poco debajo del límite mínimo, por lo que el espacio

intergranular que se encuentra entre las partículas de agregado es reducido, tal vez porque el contenido de asfalto residual óptimo fue menor en comparación con el óptimo de la MDC-19. En la tabla 5 se encuentra la fórmula de trabajo para cada una de las mezclas.

Tabla 5. Resumen de fórmula de trabajo MDC-19 y MDF-19

Mezcla	Material bituminoso	Granulometría	Temperaturas (°C)		Porcentaje óptimo (%)
			Mezcla	Compactación	
MDC-19	Asfalto 60-70	Límite inferior	149	140	5,0
MDF-19	Emulsión CRL-1	Límite inferior	25	25	4,3

En la tabla 5 se observa que el óptimo de asfalto de la MDF-19 es menor que el de la MDC-19; esto se debe a que la emulsión asfáltica contiene agentes mejoradores de adherencia y, por ende, se presentan mejores características de adhesión entre el asfalto y el agregado; por lo tanto, con menores cantidades de asfalto se logra una mezcla homogénea de buena calidad que cumpla con las especificaciones y presente un comportamiento mecánico adecuado.

E. Resultados del diseño preliminar de MDC-19 y MDF-19

En la tabla 6 se presentan de manera general los resultados aproximados obtenidos de los ensayos que consolidan el diseño preliminar de cada una de las mezclas.

Tabla 6. Resultados del diseño preliminar MDC-19 y MDF-19

Parámetro	Unidad	MDC-19	MDF-19
Estabilidad	N	7631,36	11140,39
Flujo	Mm	2,49	2,10
Resistencia retenida	%	81,4	80,1
Velocidad de deformación intervalo de 105 a 120 minutos	$\mu\text{m}/\text{min}$	18,07	2,09
Módulo resiliente	Mpa	3800	3600
Deformación por fatiga	$\mu\epsilon$	N1*: 96,6	N1*: 1287,7
		N2**: 70,6	N2**: 1267,7

*N1: nivel de tránsito 1, equivalente a 750.000 ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, durante el periodo en que este se desarrolló. **N2: nivel de tránsito 2, equivalente a 2.500.000 ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, durante el periodo de en que este se desarrolló.

Para el caso del ensayo de módulo resiliente, es importante mencionar que el valor relacionado en la tabla 6 corresponde al módulo para cada una de las mezclas en la ciudad de Tunja, considerando una temperatura de 13 °C, que se consolida como la temperatura media anual;

sin embargo, dado que el ensayo se realizó a diferentes temperaturas, la tabla 7 presenta los valores obtenidos para cada temperatura, evidenciando los resultados para cada una de las mezclas.

Tabla 7. Resultados del módulo resiliente por temperatura MDC-19 y MDF-19

Mezcla	Temperatura (°C)	Módulo resiliente (MPa)
MDC-19	5	7242
	20	1469
	40	411
MDF-19	5	5739
	20	2521
	40	1732

Ahora bien, para el caso del ensayo de leyes de fatiga, es importante considerar sus resultados y la pendiente de la ley de fatiga. Para el caso de la mezcla en caliente, se tiene una mayor uniformidad en los resultados, lo que se ve reflejado en la ley de fatiga que describe su comportamiento (figura 19). Por su parte, para el caso de la mezcla en frío, se tiene una mayor variación en las deformaciones por fatiga, lo que genera una mayor dispersión de los resultados y, por lo tanto, una ley de fatiga poco favorable para una mezcla asfáltica que será utilizada en vías con alto nivel de tránsito, como lo evidencia la tabla 6 (figura 20).

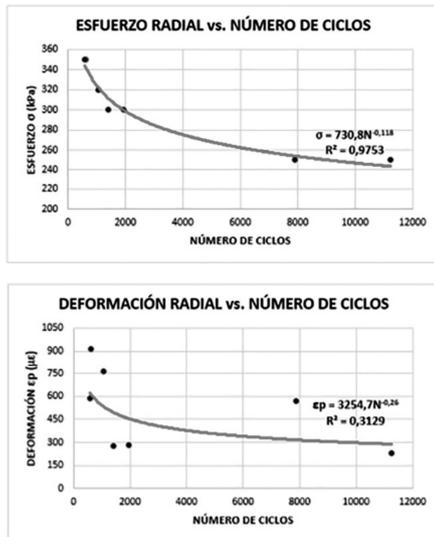


Figura 19. Ensayo de fatiga MDC-19

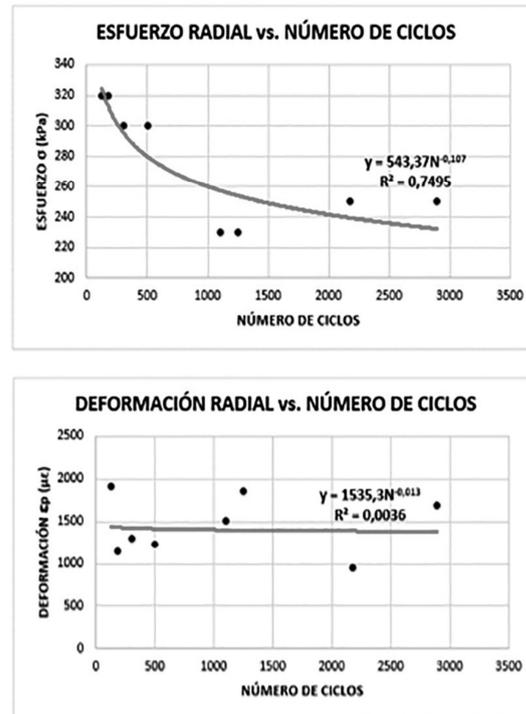


Figura 20. Ensayo de fatiga MDF-19

F. Resultados de análisis económico y ambiental MDC-19 y MDF-19

En las tablas 8 y 9 se presentan los costos de la producción de 1 m³ de mezcla en caliente y en frío (Invías, 2016); además, el costo monetario aproximado de las emisiones de CO₂ al producir una tonelada de MDC-19 y MDF-19 (Castillo, Acevedo y Orduz, 2000).

Tabla 8. Análisis de precios unitarios MDC-19 y MDF-19 (costos de 1 m³ de mezcla)

Parámetro	MDC-19	MDF-19
Costo directo (incluye equipo, materiales, transporte y mano de obra)	\$389.361,00	\$307.785,37
Costo indirecto (incluye AIU)	\$116.808,55	\$92.335,61
Total	\$506.170,00	\$400.120,99

Tabla 9. Emisiones atmosféricas y costos monetarios de MDC-19 y MDF-19

	ETU (MJ/t)	CEFU (MJ/t)	CO ₂ (Kg/t)
Mezcla en caliente	234,34	335,36	22,00
Mezcla en frío	94,00	135,00	1,06

Costo de emisiones a la atmósfera de MDC y MDF			
	ETU* (\$/t)	CEFU** (\$/t)	CO ₂ *** (\$/t)
Mezcla en caliente	9750	13.950	968,00
Mezcla en frío	3900	5700	46,64
Ahorro	5850	8250	921,36

*ETU: energía térmica unitaria. **CEFU: consumo de energía fósil unitario. ***CO₂: dióxido de carbono.

Fuente: autores a partir de Castillo, Acevedo y Orduz (2000).

A partir de la cantidad de emisiones, se calculó su costo monetario haciendo uso de algunos datos sencillos; p. e., un MJ equivale a 0,28 kwh, el costo de 1 kwh es aproximadamente \$150, y una tonelada de CO₂ cuesta aproximadamente quince euros (Álvarez, 2010). Cabe resaltar que estos datos pueden cambiar en la medida en que se actualice la información recopilada para dichos cálculos, ya que para esta investigación no se encontró suficiente bibliografía sobre emisiones atmosféricas.

G. Discusión

Es importante recalcar que en la ejecución de los distintos ensayos y pruebas existe una incertidumbre por factores como calibración de equipos, errores de paralelaje o de tipo visual, entre otros. Por lo anterior, se trabajó con una confianza del 95%, es decir, con un P-value de 0,05%.

1. Análisis estadístico

En la tabla 10 se observa la variabilidad estadística de cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 10. Análisis estadístico de resultados

Parámetro	Unidad	MDC-19	MDF-19	Desviación estándar	Media	CV
Estabilidad	N	7631,36	11140,39	2481,259	9385,875	0,264
Flujo	Mm	2,49	2,1	0,276	2,295	0,120
Resistencia retenida	%	81,4	80,1	0,919	80,750	0,011
Velocidad de deformación intervalo de 105 a 120 minutos	$\mu\text{m}/\text{min}$	18,07	2,09	11,300	10,080	1,121
Módulo resiliente	MPa	3800	3600	141,421	3700,000	0,038
Deformación por fatiga	$\mu\epsilon$	96,6	1287,7	842,235	692,150	1,217
		70,6	1267,7	846,478	669,150	1,265

De la tabla 10 se puede decir que los resultados de los ensayos tienen poca dispersión entre sí con respecto a la media calculada anteriormente. En otras palabras, se corrobora que las dos mezclas presentan características mecánicas similares; sin embargo, también puede observarse que en algunos ensayos la variabilidad es mayor (ahuellamiento y fatiga). Este resultado se explicará en el análisis siguiente. Además, los resultados del CV muestran que hay homogeneidad entre los ensayos, al no haber diferencias significativas entre estos.

2. Comparación de estabilidad y flujo

El ensayo de estabilidad permite determinar la resistencia a la deformación plástica en muestras de mezcla asfáltica, al ser sometida a las cargas impuestas por el tránsito.

Cuando se tienen pavimentos estables, se da una importante resistencia a ahuellamientos,

ondulaciones o cualquier otro tipo de deformaciones producidas por el paso de los vehículos. Aunque la mezcla en frío presenta un alto valor de estabilidad, se deben realizar observaciones más detalladas, teniendo en cuenta que, así como valores bajos de estabilidad son perjudiciales, obtener una estabilidad demasiado alta producirá efectos negativos relacionados con una capa de rodadura muy rígida, lo que generará problemas en cuanto a duración de la mezcla.

El incremento en la estabilidad de la mezcla en frío pudo verse influenciado directamente por la cohesión producida por el asfalto residual y el proceso de curado, debido a que, después de ser compactadas, se sometieron a un proceso de dos días en los que las muestras perdieron el agua presente; por ello, se presume una mayor adhesión entre las partículas y el ligante que generó un alto valor de estabilidad.

Finalmente, otra razón por la que la MDF-19 es mayor es porque los incrementos de asfalto residual fueron menores; es decir, cuando la cantidad de asfalto utilizada para el diseño de la mezcla es mayor, la estabilidad incrementa hasta cierto punto y empieza a decrecer considerablemente, como se presenta en la MDC-19, donde el óptimo de asfalto es mayor 0,7% respecto al óptimo de asfalto residual de la MDF-19. Esto hace que las partículas del agregado tengan menor contacto entre ellas y se disminuya su fricción, produciendo así una mezcla más propensa a valores de estabilidad menores.

3. Comparación de la velocidad de deformación

Cuando se habla de fallas en los pavimentos asfálticos generadas por las cargas impuestas por los vehículos, inicialmente se pone en consideración el agrietamiento y las deformaciones en la capa de rodadura, que pueden ser transmitidas a las capas inferiores.

Con el paso del tiempo, esto se ve reflejado en un defecto permanente llamado *ahuellamiento*, que afecta tanto la seguridad como la comodidad de los usuarios. Justamente este es el propósito de la práctica: evaluar la resistencia de una mezcla ante deformaciones permanentes, mediante el ensayo de pista que simula el comportamiento de la capa de rodadura ante el paso de los vehículos de manera repetitiva.

Como resultado de esta práctica, se pueden conocer varios parámetros de una mezcla, como el adecuado proceso constructivo, la calidad de los materiales y del diseño, así como dar algunas estimaciones sobre el comportamiento futuro después de puesta en servicio.

Cuando se realiza esta práctica, también se está evaluando la capacidad de recuperación de las mezclas al ser sometidas a un proceso

de descarga, pues cuando los vehículos pasan, la capa es deformada; mientras se presenta el retiro de la rueda sobre la superficie, esta debe poseer la flexibilidad suficiente para retornar lo más que pueda a la condición previa a la imposición de la carga.

Con base en los resultados obtenidos de los dos ensayos para cada mezcla, se evidencia una velocidad de deformación mucho mayor para la mezcla en caliente, llegando casi al límite de $20 \mu\text{m}/\text{min}$; por consiguiente, se presenta una mayor deformación con respecto a la mezcla en frío, la cual, con tan solo $2,1 \mu\text{m}/\text{min}$ en su periodo final, posee una deformación mínima, desarrollando así una buena resistencia a las deformaciones permanentes. Además, la deformación fue menor posiblemente porque la mezcla presentó %Va menor, así como su cantidad de asfalto, lo cual hace una mezcla más densa. Otra razón es la utilización de cemento como parte del *Filler*, lo que incrementó la adhesión entre agregado y emulsión.

4. Comparación del módulo resiliente

Básicamente, el módulo resiliente permite medir la rigidez de una mezcla asfáltica. Este ensayo se basa en la aplicación de cargas cíclicas, tratando de reproducir las condiciones reales *in situ* en las que trabajará la capa; de igual manera, este valor se consolida como uno de los parámetros de entrada para realizar el diseño de la estructura completa de pavimento.

Como se observa en la tabla 6, la mezcla en caliente presenta un módulo resiliente mayor, aunque su valor es muy cercano a la mezcla en frío. El módulo de la MDC-19 fue mayor, lo que representa un comportamiento satisfactorio; se evita así que, por su mayor rigidez inicial a corto plazo, se generen daños en la capa de

rodadura. Sin embargo, la MDF-19 no presenta condiciones desfavorables; por el contrario, presenta un módulo muy cercano al de la mezcla en caliente, es decir, posee alta rigidez, posiblemente por la adición de cemento Portland como llenante mineral.

5. Comparación de leyes de fatiga

Cuando la mezcla es sometida a esfuerzos cortantes y de tracción, añadiendo la deformación que se pueda generar en las capas subyacentes, es de esperarse la aparición de pequeñas grietas que se reconocen como fatiga. Es importante considerar que el ensayo de fatiga se desarrolló bajo condiciones de esfuerzo controlado, teniendo en cuenta que se programó el equipo en el proceso de carga con el esfuerzo deseado, a fin de permitir una ruptura de las muestras ensayadas.

Los factores que producen un rompimiento por fatiga son muy diversos; entre ellos se pueden considerar cargas pesadas repetitivas, altas deflexiones, mal drenaje, deficiencias constructivas, malos diseños, entre otros.

En el momento en que la superficie de rodadura presenta rompimientos por fatiga, se supone entonces que el pavimento ha sobrepasado el número de repeticiones de carga para el que fue diseñado y requiere un tratamiento de rehabilitación; por esto, se deben controlar los niveles de tránsito desde que se diseña la mezcla y la estructura completa de pavimento.

Para el caso de la mezcla en caliente objeto de este proyecto, se encuentra que la deformación por fatiga es pequeña si se compara con la que desarrolla la mezcla en frío. Como se mencionó, la capacidad de una mezcla de soportar una carga fija es muy diferente a la manera en que soporta repeticiones de carga frecuentes; por ello, la mezcla en frío reporta un deficiente comportamiento a las deformaciones por fa-

tiga, como lo evidencian los resultados consignados en la tabla 6. Adicionalmente, hacer variaciones en el nivel de tránsito no producirá mayores variaciones en la deformación por fatiga, por lo que, bajo este criterio, la mezcla en caliente desarrolla una mejor condición.

6. Análisis económico

A partir de la tabla 8 se hace el siguiente ejemplo para evidenciar los ahorros monetarios de una MDF-19 respecto a una MDC-19. Se tiene un tramo de vía de 5 km, con un ancho de calzada de 7,30 m y un espesor de 0,10 m, como se observa en la figura 19.

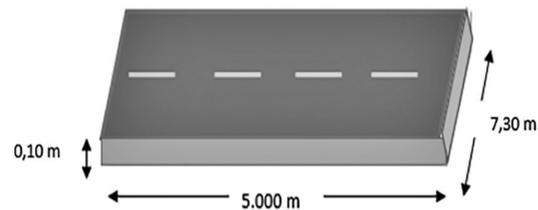


Figura 19. Ejemplo de análisis de costos

$$vol = 0,10 \text{ m} * 7,30 \text{ m} * 5000 \text{ m} = 3650 \text{ m}^3$$

Se tiene un volumen de 3650 m³; los costos de las dos mezclas estudiadas para este ejemplo, según las tablas anteriores, son:

$$\begin{aligned} \text{MDC} - 19 &= 506.170, \frac{00\$}{\text{m}^3} * 3650 \text{ m}^3 \\ &= 1847'500 \$ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MDF} - 19 &= 400.120,99 \$/\text{m}^3 * 3650 \text{ m}^3 \\ &= 1460'44,614 \$ \end{aligned}$$

Al realizar la diferencia entre estos dos costos, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Ahorro} &= 1847'520,500 \$ - 1460'441,614 \$ \\ &= 27'078,600 \$ \end{aligned}$$

En el ejemplo anterior se evidencia el ahorro que genera la utilización de una MDF-19

respecto a una MDC-19; por lo tanto, para optimizar la inversión de recursos en vías que permitan la implementación de mezclas en frío o en bacheos, se recomienda la MDF ya sea 19 o de otro tipo. Se tiene en cuenta un ahorro aproximado de \$5.000.000 por kilómetro de vía construido.

7. Análisis ambiental

Los datos obtenidos arrojan un ahorro aproximado de \$950 en la fabricación de una tonelada de mezclas en frío, en comparación con la mezcla en caliente; es decir, el 95,0%. En la figura 20 se presenta un ejemplo para cuantificar los costos monetarios aproximados de las emisiones de CO₂, al fabricar una mezcla en caliente y en frío.

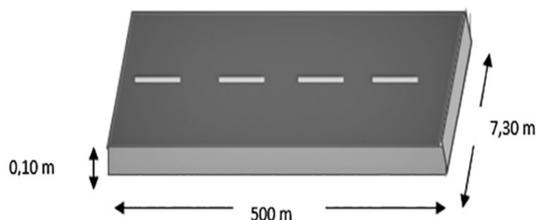


Figura 20. Ejemplo análisis de costos CO₂

$$Vol = 0,10 \text{ m} * 7,30 \text{ m} * 500 \text{ m} = 365 \text{ m}^3$$

Si se supone que la densidad de la mezcla es 2,3 gr/cm³ o 2300 kg/m³, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{masa} &= \text{vol} * \text{densidad} \\ \text{masa} &= 365 \text{ m}^3 * 2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 839,500 \text{ kg} \\ &= 839.5 \text{ t} \end{aligned}$$

- Costo de emisión CO₂ para MDC-19. Estas 839,5 Ton emiten 18,46 Ton de CO₂, que tienen un costo de \$839,090.
- Costo emisión CO₂ para MDF-19. 839.5 Ton emiten 0,889 Ton de CO₂, que tienen un costo de \$44,498.

En el ejemplo anterior queda demostrado que los costos de la emisión de CO₂ en relación con una mezcla asfáltica en frío disminuyen notablemente respecto a la mezcla en caliente; por lo tanto, su impacto ambiental es menor.

IV. Conclusiones

En la mezcla en caliente MDC-19 se obtuvo un óptimo de asfalto de 5,0%, una estabilidad de 7631.360 N y un flujo 2.493 mm, mientras que en la MDF-19 se encontró un óptimo de asfalto residual de 4,3%, una estabilidad y flujo de (11.140,39 N y 2.103 mm) en estado seco y (9.088,22 N y 3.528 mm) en estado húmedo, respectivamente. La mezcla tuvo pérdida de estabilidad de 18,42% de las briquetas en estado húmedo respecto a las briquetas en estado seco.

Algunos ensayos mecánicos de la MDF-19 arrojaron resultados similares a la MDC-19, lo cual se debe a la adición de cemento Portland como parte de llenante mineral de la mezcla.

En cuanto al ensayo de fatiga, se obtuvo que, para el nivel de tránsito NT2, una MDC-19 presenta una deformación promedio de 70,6 με, mientras que una MDF-19 genera una deformación de 1267,7 με; por lo tanto, se concluye que la segunda mezcla presenta una resistencia a la fatiga muy baja y que tendrá fallas como deformaciones, grietas —principalmente en la huella de los vehículos— y piel de cocodrilo, que en el futuro permitirán la entrada de agua a la estructura de pavimento y generarán daños irreversibles.

Un m³ de MDC-19 cuesta aproximadamente \$506.000, mientras que un m³ de MDF-19 cuesta alrededor de \$400.000. De ahí que sea más rentable seleccionar una mezcla en frío, ya que se tendría un ahorro de \$106.000 por m³ de mezcla puesta en el sitio de servicio.

En cuanto al aspecto ambiental, se encontró que el principal contaminante que se emite al elaborar cualquier tipo de mezcla asfáltica es el CO₂. Una MDC emite alrededor de 22 kg/Ton de mezcla, que equivale a aproximadamente \$1000; mientras que una MDF emite tan solo 1,06 kg/Ton de producto, equivalente a \$50. Esto representa un ahorro monetario del 95%; por lo tanto, en cuanto al aspecto ambiental, es menos nociva para el medio ambiente la MDF-19.

Finalmente, se concluye que una MDC-19 presenta mejores condiciones mecánicas y dinámicas, y obtiene un mayor módulo dinámico, lo que genera mayor rigidez en la carpeta asfáltica y mejor comportamiento a largo plazo. Por otro lado, presenta mejores características de fatiga, lo que indica una mezcla con mayor resistencia al paso de cargas repetitivas, evitando así deterioros prematuros en el pavimento. De esta manera, aunque existan tecnologías como las mezclas en frío, que presentan características mecánicas que cumplen con las especificaciones de calidad, su comportamiento mecánico no es el más adecuado, por cuanto tienden a fallar y presentar deterioros a corto plazo; por ello, se pueden recomendar en vías con menores niveles de tránsito y en técnicas de mantenimiento como bacheo.

Aunque la MDF-19 genera ahorros económico-ambientales, una MDC-19 tiene mayor vida útil y evitaría inversiones a corto plazo en técnicas de mantenimiento y rehabilitación; por lo tanto, la mezcla densa en caliente es la mejor alternativa en vías con altos niveles de tránsito. Por su parte, se aconseja emplear mezclas densas en frío en vías con menores cargas y en técnicas de mantenimiento.

V. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela de Transporte y Vías, Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por el apoyo brindado en la realización de la presente investigación.

Referencias

Álvarez, C. (2010). *Una tonelada de CO₂*. Blog: el país semanal, España.

Asphalt Institute (2005). *Asphalt cold mix manual MS-14*. Kentucky: Autor.

Castañeda, C., Escobar, G. y López, L. (2011). *Aplicación del método Marshall y granulometría Superpave en el diseño de mezcla asfáltica templada con emulsión* (tesis de pregrado). San Salvador: Universidad de El Salvador

Castillo, E., Acevedo, L. y Orduz, J. (2000). Perfil tecnológico ambiental de la industria de mezclas asfálticas en Colombia. *Revista ION*, 16(1).

Garnica, P., Delgado, H. y Sandoval, C. (2005). Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. *Revista de Ingeniería CEDEC*, 2(271).

Guevara, M., Méndez, H. y Pimentel, J. (2010). *Diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en el método Marshall modificado de la Universidad de Illinois* (tesis de pregrado). San Salvador: Universidad de El Salvador.

Instituto nacional de vías (Invías) (2013). *Especificaciones generales para Construcción de Carreteras: artículo 410, 411, 440 y 450*. Bogotá: Autor.

Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013b). *Normas de ensayo de materiales para*

construcción de carreteras: evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico. Bogotá: Autor.

Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013c). *Normas de ensayo de materiales para Construcción de Carreteras: resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas.* Bogotá: Autor.

Instituto Nacional de Vías (Invías) (2013d). *Normas de ensayo de materiales para Construcción de Carreteras: ensayo de tensión indirecta para calcular el módulo resiliente de mezclas asfálticas.* Bogotá: Autor.

Instituto Nacional de Vías (Invías) (2016). *Análisis de precios unitarios (APU).* Bogotá: Autor.

Instituto Nacional de Vías (Invías). (2013a). *Normas de ensayo de materiales para construcción de carreteras: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.* Bogotá: Autor.

Jiménez, M., Sibaja, D. y Molina, D. (2008). *Evaluación de la factibilidad de la aplicación de mezclas en frío para superficies de rodamiento en Costa Rica.* San Pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.

Norma Española (2006). *Mezclas bituminosas – métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente.* Parte 24: Fatiga. UNE EN – 12697 – 24.

Ramos, B. y Muñoz, C. (2013). *Propuesta de diseño de mezcla asfáltica en frío de gradación densa como alternativa para el mantenimiento de pavimentos flexibles* (tesis de pregrado). Managua: Universidad Centroamericana.

Reyes, O., Álvarez, A. y Valdés G. (2014). *Evaluación mecánica de mezclas asfálticas frías fabricadas con reemplazo de llenante mineral.* *Información Tecnológica*, 25(2).

Verdezoto, M. (2010). *Análisis comparativo de módulos resiliente entre mezclas frías y mezclas calientes* (tesis de pregrado). Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Zúñiga, R. (2015). *Mezcla asfáltica en caliente.* Santiago de Chile: Autor.