



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

CORRELACIÓN DE DENSIFICACIÓN Y DESEMPEÑO EN PASTILLAS MARSHALL CON EL USO DE PRUEBAS DE ALTO DESEMPEÑO

Bruno López¹, Vinicio Serment², Juan Mares³, Miguel Barragan⁴, Emma Campos⁵

¹ Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, México, bruno.lopez@sct.gob.mx

² Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, México, vserment@sct.gob.mx

³ Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, México, jmaresr@sict.gob.mx

⁴ Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, México, vazqui.angel.11@gmail.com

⁵ Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, México, emmalau.campos@outlook.com

Resumen

El diseño de mezclas asfálticas es un proceso crucial en la construcción de carreteras y pavimentos flexibles. Dos métodos utilizados en el diseño de mezclas asfálticas en México son el Método Marshall y el Método por desempeño, parte importante en el desarrollo de estos, es el proceso de densificación de las mezclas asfálticas, es esencial reconocer la necesidad de una metodología de diseño que garantice una representación precisa de la compactación tanto en el laboratorio como en campo. El Método Marshall ha sido tradicionalmente utilizado para evaluar la estabilidad y la resistencia de las mezclas asfálticas bajo ciertas condiciones de compactación, sin embargo, se ha observado que la compactación lograda en campo mediante el uso de maquinaria comúnmente utilizada puede diferir significativamente de la compactación realizada en el laboratorio. Esta disparidad puede influir en los resultados obtenidos durante el proceso de diseño, lo que subraya la importancia de complementar el Método Marshall con una evaluación de desempeño que considere las condiciones reales de campo.

Por lo tanto, es crucial que la metodología de diseño de mezclas asfálticas considere estas variaciones durante el proceso de densificación y la correlación entre laboratorio y campo, así como las diferencias del desempeño de las mezclas asfálticas.

Para atender esta situación, la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) a través de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST), realizó una correlación de los dos métodos partiendo de la masa volumétrica lograda mediante compactación Marshall y replicada en el compactador giratorio. Así mismo se analizó la variación que existe en las propiedades de la mezcla asfáltica, en función de: vacíos en la mezcla asfáltica, Estabilidad, Flujo Marshall y Susceptibilidad de la Mezcla Asfáltica Compactada al Daño Inducido por Humedad con la finalidad de identificar la relación entre los resultados obtenidos, permitiendo así mejorar la evaluación del desempeño de la mezcla en condiciones reales.

Palabras Clave: Marshall, mezclas, densificación y desempeño.

1 Introducción

El proceso de diseño de mezclas asfálticas es importante durante la construcción de carreteras y pavimentos flexibles. En México, dos de los enfoques más utilizados son el método Marshall y el método de alto desempeño. El método Marshall, creado en la década de 1940, ha sido un estándar en el diseño de mezclas asfálticas durante muchas décadas. Es adecuado para proyectos de pavimentación en condiciones de tráfico y climas moderados. Su facilidad de uso lo hace ideal para aplicaciones donde las exigencias no son extremadamente altas. Durante su diseño, se utilizan procedimientos y equipos



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

relativamente simples, lo que lo hace accesible para la mayoría de los laboratorios y proyectos de pavimentación. Este método se basa en ensayos que miden la estabilidad y el flujo de la mezcla asfáltica, ofreciendo resultados rápidos y fáciles de interpretar. Sin embargo, aunque es eficaz en muchas aplicaciones, tiene limitaciones cuando se enfrenta a condiciones de clima y tráfico que sobre pasan las consideraciones del diseño, lo cual no siempre proporciona una evaluación completa del desempeño a largo plazo en entornos donde la durabilidad y la resistencia a la deformación son críticas.

Por otro lado, las mezclas de alto desempeño creadas a finales de la década de 1980 tienen como objetivo principal diseñar mezclas asfálticas que ofrezcan un alto rendimiento bajo condiciones climáticas y de tráfico específicas. Este método incorpora una metodología que utiliza pruebas y análisis que simulan mejor las condiciones reales a las que estarán expuestos los pavimentos. Se emplean equipos especializados, como el compactador giratorio para replicar con mayor precisión la compactación en el campo y prever el comportamiento de la mezcla bajo cargas repetidas.

Cabe señalar que el método Marshall, por accesibilidad, sigue siendo valioso y adecuado para muchas aplicaciones de pavimentación en condiciones de tráfico y climas moderados. Sin embargo, a medida que las demandas sobre los pavimentos aumentan y las condiciones climáticas cambian, es esencial adoptar enfoques más precisos.

Este artículo se enfoca en el proceso de compactación de probetas compactadas mediante el método Marshall, buscando correlacionar y comprender mejor el desempeño de las mezclas que se aplican en campo. Para ello, se utilizó el compactador giratorio, que simula las condiciones de compactación en obra de manera más precisa; se utilizó como parámetro la densidad relativa y se replicó mediante las dos formas de compactación: de forma dinámica utilizada en el método Marshall y por amasado simulada con el compactador giratorio y aplicada por maquinaria de compactación en campo.

El análisis comparativo entre ambas formas de compactación revela diferencias significativas en las características volumétricas y el desempeño de las mezclas, produciendo resultados notablemente distintos. Estas diferencias subrayan la importancia de emplear requisitos de calidad específicos en laboratorio y campo, para obtener un análisis en el diseño de mezcla asfáltica y así mejorar las prácticas de diseño y construcción de pavimentos, proporcionando información sobre el desempeño de la mezcla asfáltica, optimizando así la durabilidad y la resistencia de la infraestructura carretera.

2 Trabajos realizados

La compactación dinámica en el diseño Marshall tiene como característica principal el número de golpes por cara, donde la masa y la altura de caída están especificadas. Por otro lado, la compactación por amasado mediante el compactador giratorio tiene el número de giros, donde la carga vertical, el ángulo y velocidad de giros están especificados. Estas variables no son equivalentes ni equiparables, por lo tanto, se decide correlacionar ambos métodos con la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (dmc).

Para este artículo se fabricaron pastillas utilizando dos diferentes procesos de compactación, a las cuales se determinó las densidades relativas equivalentes, características volumétricas y posteriormente se sometieron a las pruebas de estabilidad y flujo Marshall y susceptibilidad de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad (TSR).

Para las pastillas compactadas dinámicamente con el martillo Marshall, se fabricaron 3 grupos a diferentes energías de compactación, considerando 3 tipos de tráfico como se presenta en la Tabla 1 [1].

Tabla 1. Número de ejes equivalentes de diseño

Nivel de Trafico	Nº de ejes equivalentes	Golpes por cara
Ligero	10 000	35
Medio	1 000 000	50
Pesado	10 000 000	70



Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

Posteriormente se determinó la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (dmc) y se compactaron por amasado 3 grupos de pastillas replicando la dmc, de los primeros 3 grupos (Véase Tabla 2).

Tabla 2. Grupo de pastillas y compactación

Grupo	Golpes por cara o No. de giros	Tipo de compactación	No. de pastillas	
			Ensayes Estabilidad y flujo	TSR
1	35	Dinámica	3	6
	44	Amasado	3	6
2	50	Dinámica	3	6
	64	Amasado	3	6
3	75	Dinámica	3	6
	84	Amasado	3	6

3 Estructura granulométrica de la mezcla asfáltica

El material pétreo utilizado para la mezcla asfáltica es de origen calizo y se determinó su composición granulométrica (véase Tabla 1) mediante el manual M·MMP·4·04·002, *Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas* [2], como se muestra en la Figura 1, la cual cumple con los requisitos de calidad de materiales pétreos para mezcla asfáltica de granulometría densa con un tamaño nominal de 19 mm (3/4 in).

Designación	Abertura, mm	Pasa la malla, %
1"	25	100.0
3/4"	19	97.5
1/2 "	12.5	87.0
3/8 "	9.5	80.0
1/4"	6.3	69.5
No. 4	4.75	62.0
No. 10	2	37.0
No. 20	0.855	19.8
No. 40	0.425	12.0
No. 60	0.25	8.0
No.100	0.15	5.5
No.200	0.075	2.5

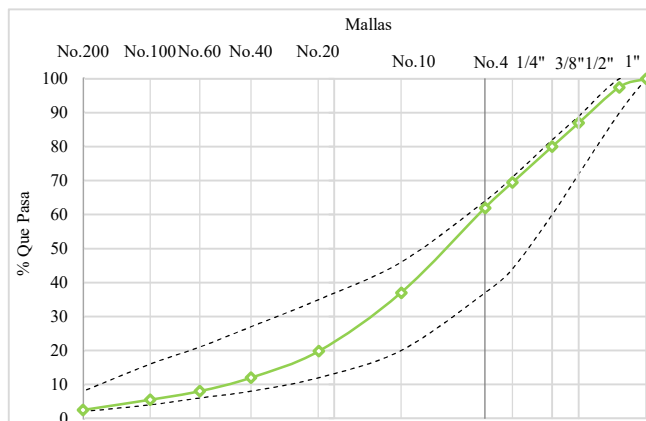


Figura 1. Granulometría del agregado pétreo

4 Métodos de densificación

La compactación de mezclas asfálticas en caliente es el proceso mediante el cual se disminuye el volumen de una mezcla asfáltica, reduciendo el aire atrapado y aumentando la densidad de la mezcla para mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad. En laboratorio, este proceso se realiza mediante el uso de equipos de compactación como: martillo Marshall y compactador giratorio, mientras que en campo se utilizan equipos como: rodillos estáticos, vibratorios y neumáticos.

Para este artículo se fabricaron 27 pastillas con la metodología Marshall, la cual se realizó con base en la norma ASTM D6926, *Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus* [3], así mismo, 27 pastillas con el compactador giratorio mediante el manual M·MMP·4·05·058, *Compactación de Mezclas Asfálticas en Caliente con el Compactador Giratorio* [4].



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

4.1 Determinación de la densidad relativa objetiva de la mezcla asfáltica compactada

Se determinó la Densidad Relativa Teórica Máxima (dmm) y se compactaron 3 grupos de pastillas, a diferentes energías de compactación, de las cuales se obtuvo la Densidad Relativa de la Mezcla Asfáltica Compactada (dmc) y Vacíos de aire en la Mezcla Asfáltica Compactada (VMC), con base en los manuales: M·MMP·4·05·062, *Densidad Relativa Teórica Máxima de Mezclas Asfálticas* [5], y M·MMP·4·05·051, *Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes* [6] (Véase Tabla 3).

Tabla 3. Volumetría de la mezcla

Característica	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
	Compactación dinámica (golpes por cara)		
	35	50	75
dmm	2.493	2.493	2.493
dmc	2.362	2.399	2.418
VMC, %	5.251	3.8	3.0

4.2 Equivalencia de densificación

Para determinar el número de giros al cual se iguala la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (dmc) obtenida mediante compactación dinámica, se compactaron 2 pastillas por amasado a 200 giros cada una, para obtener la curva de compactación de la mezcla asfáltica; en la Tabla 4 se presentan los valores de la dmc y en la Figura 2 se presenta la curva de compactación con los datos que da el compactador giratorio; determinando el número de giros al cual se replicaba densidad objetivo.

Tabla 4. Equivalencia de compactación

Grupo	No. Golpes por cara	No. Giros	dmc
1	35	44	2.362
2	50	64	2.399
3	75	84	2.418

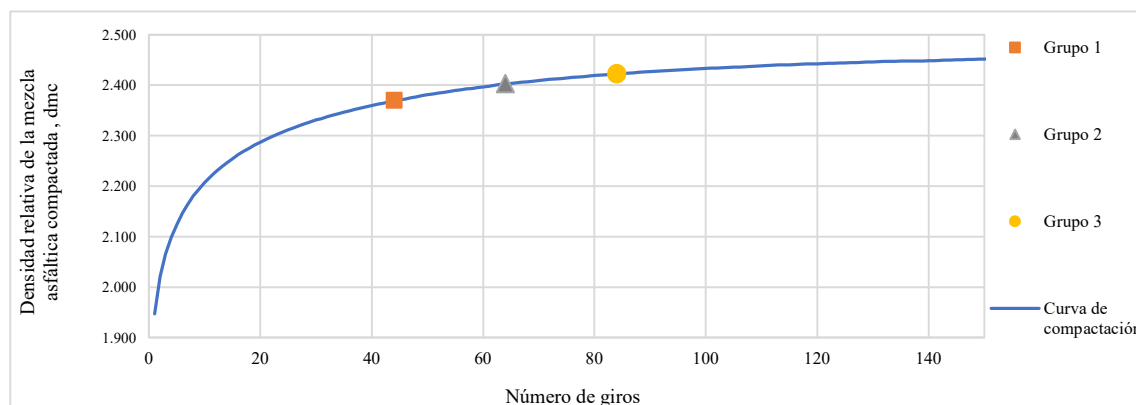


Figura 2. Curva de compactación

5 Fabricación de pastillas de prueba

Se fabricaron 3 grupos de pastillas con las diferentes energías de compactación para determinar estabilidad y flujo Marshall y susceptibilidad de la mezcla asfáltica compactadas al daño inducido por humedad (TSR). Cabe mencionar que la densidad relativa de la mezcla compactada y su equivalencia



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

obtenida mediante el número de giros de compactación es aplicable únicamente para la mezcla de referencia y bajo las condiciones de fabricación (véase Tabla 5).

Tabla 5. Pastillas fabricadas

Grupo	Tipo de compactación	Golpes por cara	No. de Giros	No. de pastillas	
				Estabilidad y Flujo	TSR
1	Dinámica	35	-	3	6
	Amasado	-	44	3	6
2	Dinámica	50	-	3	6
	Amasado	-	64	3	6
3	Dinámica	75	-	3	6
	Amasado	-	84	3	6

6 Características Volumétricas

La volumetría de una mezcla asfáltica compacta considera los volúmenes de los componentes principales de la mezcla, tales como el agregado pétreo, cemento asfáltico y aire; es fundamental medir para controlar estas características, mejorando las propiedades mecánicas y de desempeño. Para este artículo se determinaron las características volumétricas con los manuales: M·MMP·4·05·062, *Densidad Relativa Teórica Máxima de Mezclas Asfálticas* [5] y M·MMP·4·05·051, *Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes* [6].

En la Tabla 6 se detallan las características volumétricas de las pastillas correspondientes a cada grupo de las pastillas para Estabilidad y Flujo Marshall.

Tabla 6. Volumetría de las pastillas fabricadas para la prueba de estabilidad y flujo Marshall

Características	Grupo					
	1		2		3	
Tipo de compactación	Dinámica	Amasado	Dinámica	Amasado	Dinámica	Amasado
Golpes por cara	35	-	50	-	75	-
No. de giros	-	44	-	64	-	84
dmm	2.493	2.493	2.493	2.493	2.493	2.493
dmc	2.371	2.377	2.403	2.405	2.423	2.426
VMC, %	4.9	4.6	3.6	3.5	2.8	2.7

A continuación, en la Tabla 7, se presentan las características volumétricas de la mezcla para cada grupo para la prueba Susceptibilidad de la mezcla asfáltica compactadas al daño inducido por humedad (TSR).

Tabla 7. Volumetría de las pastillas fabricadas para la prueba TSR

Características	Grupo					
	1		2		3	
Tipo de compactación	Dinámica	Amasado	Dinámica	Amasado	Dinámica	Amasado
Golpes por cara	35	-	50	-	75	-
Giros de compactación	-	44	-	64	-	84
dmm	2.493	2.493	2.493	2.493	2.493	2.493
dmc	2.354	2.375	2.394	2.399	2.414	2.420
VMC, %	5.6	4.6	4.0	3.7	3.2	2.9



En todos los tres grupos se aprecia que, a mayor energía de compactación por giros o golpes, mayor es la densidad y menor es el porcentaje de vacíos (VMC).

7 Pruebas de desempeño

Para evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica, las pastillas fabricadas fueron sometidas a dos pruebas:

- Estabilidad y Flujo Marshall: mide la resistencia máxima que la mezcla asfáltica puede soportar antes de fallar y evalúa la deformación que experimenta la mezcla bajo carga.
- Susceptibilidad de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad (TSR): mide la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla asfáltica en condiciones secas y húmedas.

7.1 Estabilidad y Flujo Marshall

La prueba se realizó de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D6926, *Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus* [3], y con los requisitos de calidad establecidos en la norma N·CMT·4·05·003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras* [7], los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8 y Figura 3.

Tabla 8. Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall

Características	Grupo					
	1		2		3	
Tipo de compactación	Dinámica	Amasado	Dinámica	Amasado	Dinámica	Amasado
Golpes por cara	35	-	50	-	75	-
No. de Giros	-	44	-	64	-	84
Estabilidad, kN	19.4	20.4	22.2	21.4	23.5	22.3
Flujo, mm	2.9	5.7	3.7	5.2	3.4	5.1
Relación Marshall, kN/mm	6.7	3.6	6.0	4.1	6.8	4.4

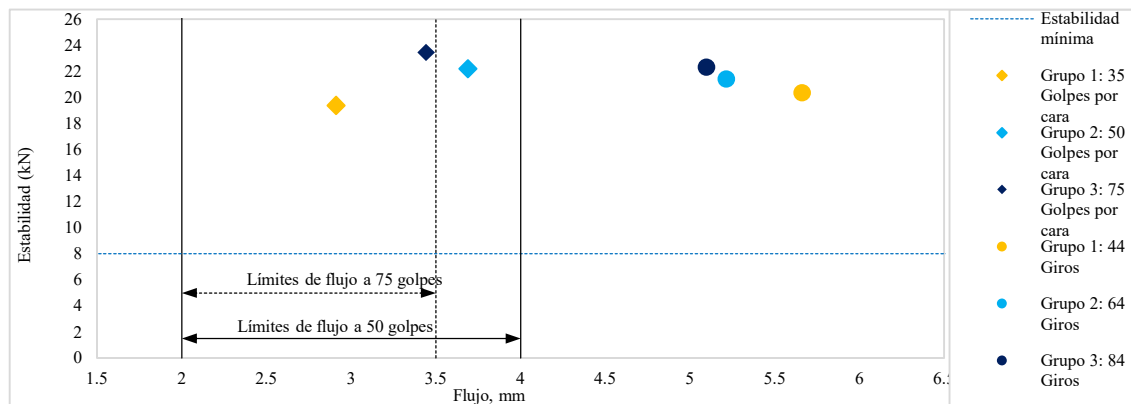


Figura 3. Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall

Los resultados en los tres grupos presentan que, a mayor densidad relativa mayor estabilidad en la mezcla asfáltica.

7.2 Susceptibilidad de la mezcla asfáltica compactadas al daño inducido por humedad (TSR)

La prueba se realizó con base en el manual M·MMP·4·05·052, *Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por Humedad* [8]. A continuación, en la Tabla 9, Figuras 4 y 5, se presentan los resultados obtenidos.



Tabla 9. Resultados de la Resistencia a la Tensión Indirecta

Características	Grupo					
	1		2		3	
Tipo de compactación	Dinámica	Amasado	Dinámica	Amasado	Dinámica	Amasado
Golpes por cara	35	-	50	-	75	-
Giros de compactación	-	44	-	64	-	84
Resistencia a la tensión (Ac), kPa	1144	1564	1473	1615	1667	1663
Resistencia a la tensión (No. Ac), kPa	1484	1683	1656	1753	1737	1810
TSR	77.1	93.0	88.9	92.1	96.0	91.9

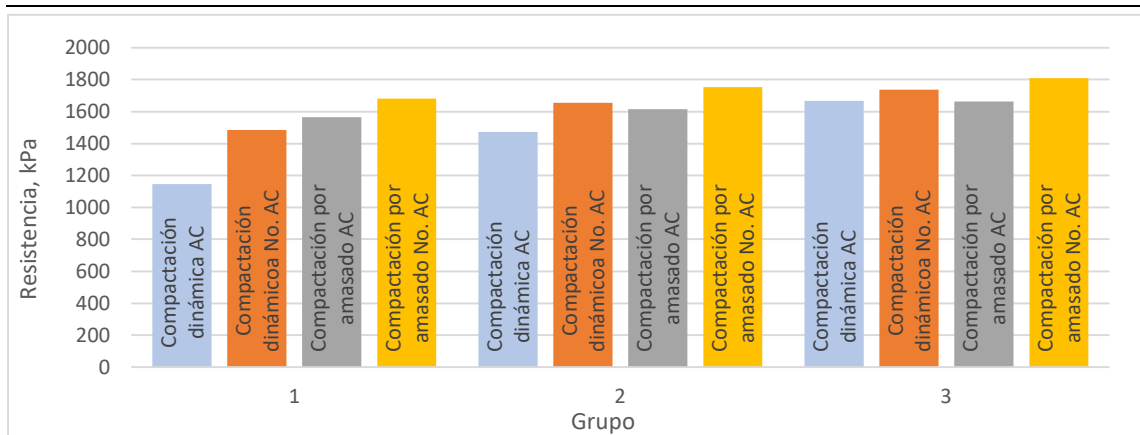


Figura 4. Resultados de la resistencia a la tensión

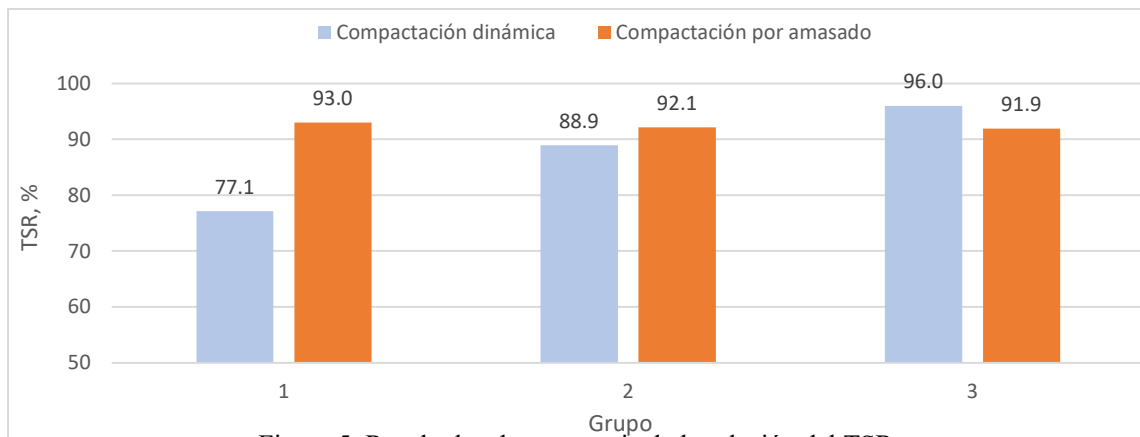


Figura 5. Resultados de porcentaje de la relación del TSR

Los resultados indican que las pastillas fabricadas en el compactador giratorio (simulando la compactación en sitio) generalmente mejora la resistencia a la tensión indirecta en relación con las pastillas fabricadas por compactación dinámica (pastillas realizadas durante el diseño Marshall en laboratorio) las cuales presentan una mayor resistencia.

8 Análisis de resultados

Se realizó un análisis de los resultados, incluyendo: volumetría de la mezcla asfáltica compactada, estabilidad y flujo Marshall, susceptibilidad de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad (TSR).



8.1 Análisis volumétrico

Las características volumétricas son fundamentales en la evaluación y uso de las mezclas asfálticas, ya que permiten medir el comportamiento de la mezcla asfáltica compactada, como resistencia y durabilidad.

A continuación, se muestra la variación porcentual entre la densidad relativa (dmc) y el porcentaje de vacíos (VMC) de la mezcla asfáltica compactada; se calculó el incremento y decremento con respecto a las pastillas compactadas dinámicamente en las pruebas de estabilidad y flujo Marshall y TSR (Tabla 10 y Figura 6).

Tabla 10. Variación porcentual volumétrica respecto a las pastillas compactadas dinámicamente

Prueba	Variación porcentual, %	Grupo		
		1	2	3
		35 golpes por cara 44 giros	50 golpes por cara 64 giros	75 golpes por cara 84 giros
Estabilidad y Flujo	dmc	0.27	0.08	0.12
	VMC	5.3 *	2.2 *	4.2 *
TSR	dmc	0.88	0.23	0.26
	VMC	16.5 *	5.5 *	8.4*

* Decremento

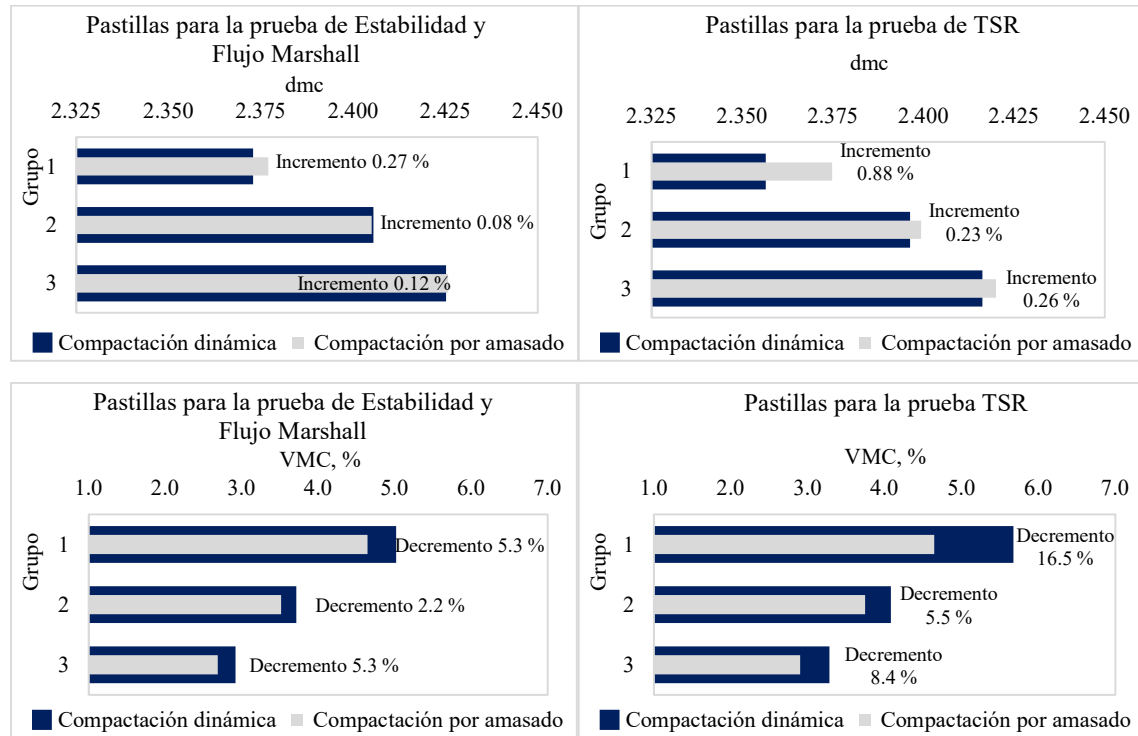


Figura 6. Variación porcentual de VMC respecto a las pastillas compactadas dinámicamente.

- La densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (dmc), tiene una variación del orden 0.08% a 0.88%.
- Los vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada (VMC), tienen una variación mínima del orden de 2.2 % a 16.5 %.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

- Se observa que las pastillas compactadas por amasado tienen una mayor densidad y por lo tanto un menor porcentaje de vacíos.
- Las variaciones bajas sugieren una compactación uniforme, esto no necesariamente indica un comportamiento similar en la mezcla ya que el acomodo probablemente tendrá un impacto en el comportamiento de la mezcla.

8.2 Análisis de Estabilidad y Flujo

Se compararon los resultados obtenidos en la prueba estabilidad y flujo Marshall, donde se obtuvo la variación porcentual de las pastillas fabricadas por compactación dinámica y por amasado de cada grupo, presentada en la Tabla 11 y Figura 7.

Tabla 11. Variación porcentual respecto a las pastillas Marshall

Variación porcentual, %	Grupo		
	1	2	3
Estabilidad	4.9	3.5 *	4.8 *
Flujo	94.4	41.3	48.1

*Decremento

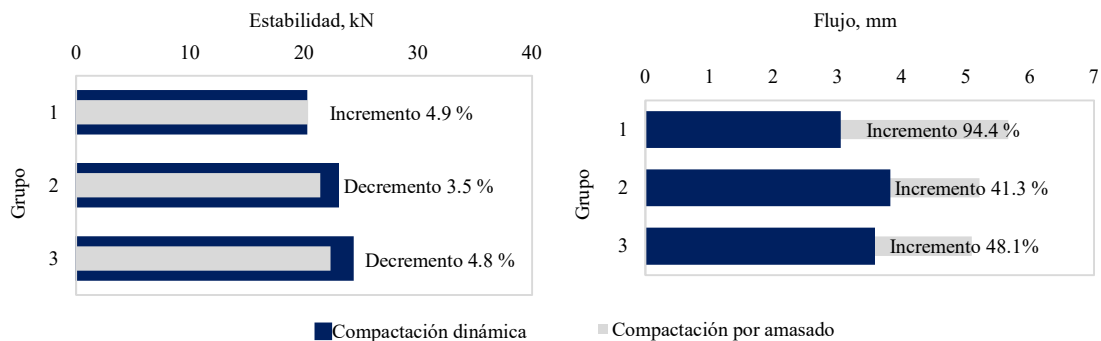
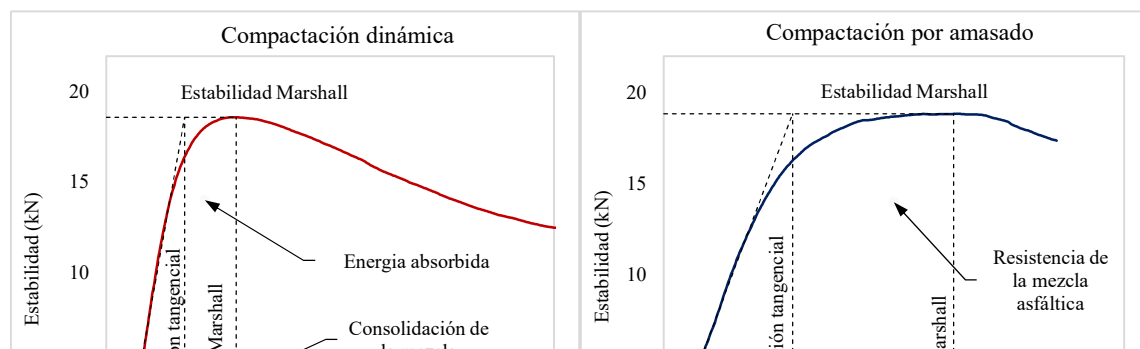


Figura 7. Variación porcentual de los métodos de compactación

- La variación porcentual mínima obtenida en la estabilidad Marshall es de 3.5% y la máxima es de 4.9%, mientras que en el flujo Marshall presentó una variación porcentual mínima de 41.3% y máxima de 94.4%.
- La estabilidad de la mezcla presenta un decremento mínimo al ser compactada por amasado, sin embargo, continúa cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma N·CMT·4·05·003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras* [7].
- El flujo de la mezcla presenta un incremento considerable al ser compactada por amasado, rebasando los límites de flujo establecidos en la norma de referencia.

Se muestra en la Figura 8 y 9 el comportamiento de las pastillas durante la determinación de la Estabilidad y Flujo Marshall, fabricadas con ambos procesos de compactación.





Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.



Figura 8. Comportamiento de la mezcla con diferentes métodos de compactación

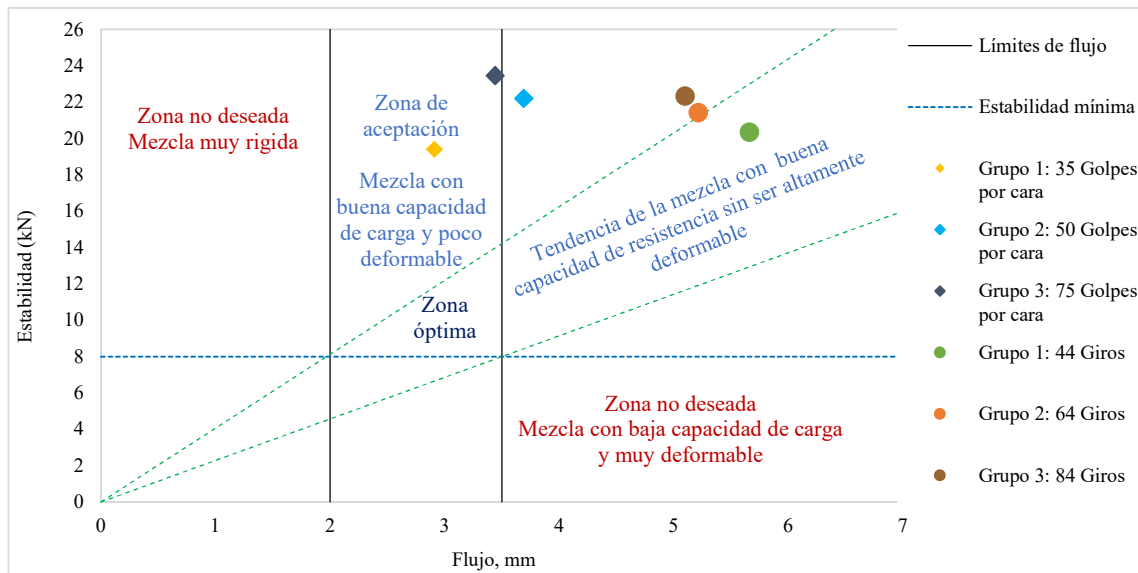


Figura 9. Comportamiento de la mezcla de acuerdo con el método de compactación

La estabilidad de la mezcla asfáltica es similar en los tres grupos; sin embargo, el flujo muestra una variación superior al 40%, así mismo la deformación que se obtuvo en las pastillas compactadas por amasado (Simula compactación in situ) con respecto al desempeño de las pastillas compactadas dinámicamente (Pastillas Marshall) no necesariamente es un indicador de un mal comportamiento, ya que las pastillas compactadas dinámicamente tienen una relación Marshall promedio de 6.5 kN/mm y deformaciones tangenciales con mayor grado de inclinación, esto nos indica que la mezcla tiene una alta rigidez. Esto puede ser beneficioso en términos de durabilidad y evita formación de roderas, por otro lado, también puede significar que la mezcla es menos flexible y más susceptible a las grietas, especialmente en climas fríos.

Las pastillas compactadas por amasado tienen una relación Marshall promedio de 4.0 kN/mm y deformaciones tangenciales con menor grado de inclinación, esto nos indica que la mezcla tiene una capacidad óptima de resistencia sin ser altamente deformable lo que mejora la capacidad de la mezcla



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

para absorber energía antes de la falla. La mezcla asfáltica cambia su comportamiento de flujo de acuerdo con el tipo de compactación que se use para densificar.

8.3 Análisis de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica compactadas al daño inducido por humedad.

Se compararon los resultados obtenidos de la prueba de susceptibilidad de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad (TSR), de los 3 grupos, se presenta en la Tabla. 12

Cabe mencionar que en el manual M·MMP·4·05·052, *Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por Humedad* [8], establece que para realizar la prueba las pastillas compactadas en laboratorio deberán de tener un VMC de $7,0 \pm 0,5\%$, por lo que se realizó una tendencia hasta alcanzar un 7.0 % de VMC. Figura 10 y 11.

Tabla. 12 Resistencias de la mezcla con diferentes métodos de compactación

Características	Compactación dinámica			Compactación por amasado		
	1	2	3	1	2	3
Grupo	1	2	3	1	2	3
Golpes por cara y giros de compactación	35	50	75	44	64	84
Resistencia a la tensión (Ac), kPa	1144	1473	1667	1564	1615	1663
Resistencia a la tensión (No. Ac), kPa	1484	1656	1737	1683	1753	1810
Incremento de resistencia sobre las pastillas acondicionadas, kPa	339	184	70	118	138	147
Variación porcentual respecto a las pastillas acondicionadas, %	23	11	4	7	8	8

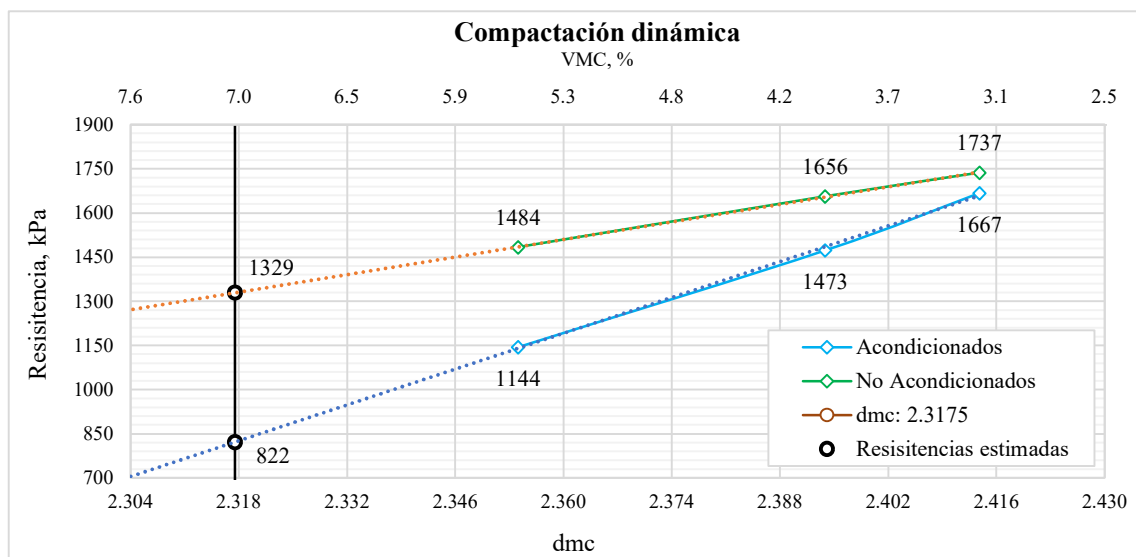
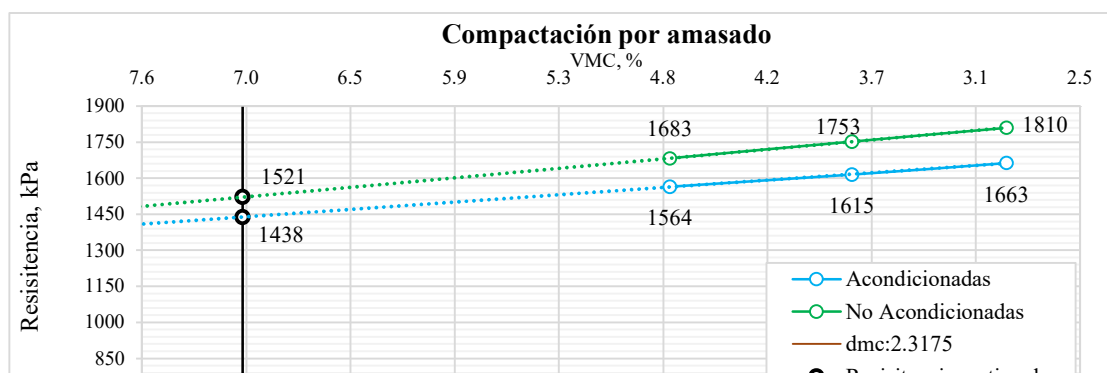


Figura 10. Resistencia, compactación dinámica

Conforme la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada dinámicamente disminuye, las resistencias a tensión indirecta del grupo acondicionado sobre el grupo no acondicionado, tiene un incremento porcentual del 4% al 23% con tendencia en aumento.





Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

Figura 11. Resistencia, compactación por amasado

Conforme la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada por amasado disminuye, las resistencias a tensión indirecta del grupo acondicionado sobre el grupo no acondicionado, tiene un decremento porcentual del 8% al 7% con tendencia a la baja.

La Tabla 13 y Figura 12 muestran las características estimadas para un dmc de 2.3175 en ambos métodos de compactación.

Tabla. 13. Características estimadas

Características	Compactación dinámica	Compactación por amasado
VMC, %	7.0	7.0
Resistencia a la tensión (Ac), kPa	822	1438
Resistencia a la tensión (No. Ac), kPa	1329	1521
TSR, %	61.9	94.5

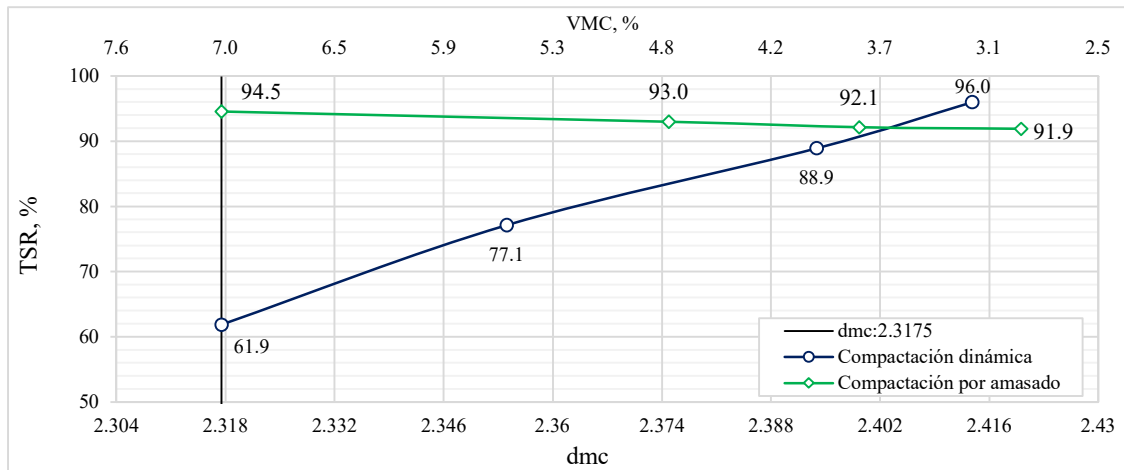


Figura 12. TSR, ambos métodos de compactación

Para pastillas con un dmc de 2.3175 y un VMC de 7.0 %. Se obtienen para pastillas compactadas dinámicamente, un TSR de 61.9 %, mientras que para pastillas compactadas por amasado se obtiene un TSR de 94.5 %.

Lo cual indica que pese a ser la misma mezcla, la resistencia a la tensión indirecta en las pastillas compactadas por amasado presenta un mejor comportamiento en ambos grupos, lo cual satisface los



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.**

requisitos de calidad del 80%; las pastillas compactadas dinámicamente muestran una alta susceptibilidad al daño inducido por humedad debido a la alta variación de resistencias que existe entre el grupo acondicionado sobre el grupo no acondicionado, esta variación aumenta conforme a la densidad relativa disminuye y el porcentaje de vacíos aumenta afectando negativamente la resistencia a la tensión.

Por otra parte, las pastillas compactadas por amasado, las cuales simulan condiciones de compactación en sitio, presentan un acomodo adecuado durante el proceso de compactación y una menor susceptibilidad al daño inducido por la humedad, lo que indica que las pastillas proporcionan una relación de resistencia que cumple el requisito indicado del 80%.

Para asegurar que las mezclas asfálticas utilizadas en campo presenten un correcto desempeño es necesario considerar la revisión y actualización de los procedimientos para esta prueba y reflejar las condiciones de compactación tanto para las pastillas elaboradas en laboratorio y utilizadas en el diseño, así como las extraídas en campo, asegurando una mayor consistencia entre las pruebas de laboratorio y las condiciones en sitio.

8.4 Correlación de resultados en la prueba de susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad.

Buscando tener una equivalencia en ambos métodos se determinaron factores de correlación aplicables a las resistencias de las pastillas acondicionadas y no acondicionadas basándose en la densidad relativa de la mezcla asfáltica compactada (véase Tabla 14).

Tabla 14. Factor de correlación

dmc	VMC, %	Compactación dinámica		Factor de correlación		Compactación por amasado			
		Acondicionadas kPa	No acondicionadas kPa	TSR, %	Acondicionadas	No acondicionadas	Acondicionadas kPa	No acondicionadas kPa	TSR, %
2.300	7.7	670	1254	53.4	2.091	1.172	1400	1470	95.3
2.303	7.6	696	1267	54.9	2.022	1.167	1407	1478	95.2
2.306	7.5	722	1280	56.4	1.958	1.162	1413	1487	95.1
2.309	7.4	748	1293	57.9	1.898	1.157	1420	1495	95.0
2.312	7.3	774	1305	59.3	1.843	1.152	1426	1503	94.9
2.315	7.1	800	1318	60.7	1.791	1.147	1433	1512	94.8
2.318	7.0	826	1331	62.1	1.742	1.142	1439	1520	94.7
2.321	6.9	852	1344	63.4	1.697	1.138	1446	1529	94.6
2.324	6.8	878	1356	64.7	1.654	1.133	1453	1537	94.5
2.327	6.7	904	1369	66.0	1.614	1.129	1459	1546	94.4
2.330	6.5	930	1382	67.3	1.575	1.125	1466	1554	94.3
2.333	6.4	956	1395	68.6	1.539	1.120	1472	1563	94.2
2.336	6.3	982	1407	69.8	1.505	1.116	1479	1571	94.1
2.339	6.2	1009	1420	71.0	1.473	1.112	1485	1580	94.0
2.342	6.1	1035	1433	72.2	1.442	1.108	1492	1588	93.9
2.345	5.9	1061	1446	73.4	1.413	1.104	1498	1597	93.8
2.348	5.8	1087	1459	74.5	1.385	1.100	1505	1605	93.8
2.351	5.7	1113	1471	75.6	1.358	1.097	1511	1613	93.7
2.354	5.6	1139	1484	76.7	1.333	1.093	1518	1622	93.6
2.357	5.5	1165	1497	77.8	1.309	1.089	1524	1630	93.5
2.360	5.3	1191	1510	78.9	1.286	1.086	1531	1639	93.4
2.363	5.2	1217	1522	79.9	1.263	1.082	1538	1647	93.3
2.366	5.1	1243	1535	81.0	1.242	1.079	1544	1656	93.3
2.369	5.0	1269	1548	82.0	1.222	1.075	1551	1664	93.2
2.372	4.9	1295	1561	83.0	1.202	1.072	1557	1673	93.1
2.375	4.7	1321	1573	84.0	1.183	1.068	1564	1681	93.0
2.378	4.6	1347	1586	84.9	1.165	1.065	1570	1690	92.9
2.381	4.5	1373	1599	85.9	1.148	1.062	1577	1698	92.9
2.384	4.4	1399	1612	86.8	1.131	1.059	1583	1706	92.8
2.387	4.3	1426	1625	87.8	1.115	1.056	1590	1715	92.7
2.390	4.1	1452	1637	88.7	1.100	1.053	1596	1723	92.6
2.393	4.0	1478	1650	89.6	1.085	1.050	1603	1732	92.6

La tabla muestra que a medida que la densidad relativa aumenta, las resistencias tanto acondicionadas como no acondicionadas también tienden a incrementarse, reflejando la influencia de la compactación en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica diseñada mediante el método Marshall. Los valores de TSR también muestran variaciones significativas dependiendo de la densidad relativa y el método de compactación utilizado.

Estos factores de correlación permiten relacionar las resistencias medidas bajo diferentes condiciones de compactación, especificando el 7.0 % de vacíos de aire en la mezcla asfáltica (VMC) y son



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

importantes para la evaluación precisa del comportamiento de las mezclas asfálticas bajo diferentes condiciones de diseño y compactación; establecer y utilizar estos factores permite optimizar el proceso de diseño de mezclas asfálticas del diseño Marshall, garantizando que cumplan con los estándares de resistencia necesarios.

9 Conclusiones

La compactación dinámica (Compactación Marshall) y compactación por amasado (Simula compactación in situ) muestran diferencias significativas en características como deformación, resistencia y susceptibilidad a la humedad; la compactación dinámica en mezclas asfálticas densas no garantiza una distribución óptima de la mezcla afectando la cohesión y la durabilidad; el amasado ofrece una estructura más homogénea y cohesiva, mejorando la resistencia a la tensión indirecta y la durabilidad.

En el análisis de estabilidad y flujo Marshall, las pastillas compactadas dinámicamente mostraron una mayor rigidez, lo que puede traducirse en una mayor durabilidad y menor formación de roderas. Sin embargo, rigideces altas en mezclas asfálticas implican una menor flexibilidad, haciéndolas más susceptibles al agrietamiento.

Por otro lado, las pastillas compactadas por amasado presentaron deformaciones tangenciales con menor inclinación, indicando una mezcla más flexible y capaz de absorber más energía antes de la falla. Aunque el flujo se incrementa considerablemente, superando los límites establecidos por la norma, esta variación en el comportamiento de la mezcla según el método de compactación puede ofrecer ventajas en términos de resistencia y capacidad de deformación, adaptándose mejor a condiciones in situ.

En los resultados de la prueba susceptibilidad de la mezcla asfáltica compactada al daño inducido por humedad (TSR) indican que las pastillas compactadas por amasado presentan una menor susceptibilidad al daño inducido por humedad y las compactadas dinámicamente tienen un comportamiento deficiente lo que repercute en una alta susceptibilidad al daño inducido por humedad, por lo que se requiere estandarizar manuales y requisitos de calidad; incluyendo especificaciones sobre la relación de resistencias a la tensión indirecta, así como considerar las variaciones entre los métodos de compactación para asegurar resultados consistentes, una evaluación completa y representativa del comportamiento de las mezclas.

Este artículo tiene el objetivo de marcar la necesidad de establecer requisitos de calidad específicos para las pastillas diseñadas con el método Marshall y evaluadas mediante pruebas de resistencia a la tensión indirecta, aplicadas a mezclas asfálticas de granulometría densa.

Es importante definir criterios precisos para estas pruebas y adaptarlos al tipo de compactación utilizada, garantizando así un análisis adecuado del comportamiento de las mezclas en condiciones reales para mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas tanto en laboratorio como en campo, optimizando el proceso de diseño y construcción.

La investigación continua bajo diferentes condiciones de tráfico y niveles de servicio es esencial para comparar los efectos de métodos de compactación dinámica y amasado, proporcionando datos fundamentales para la mejora continua de las especificaciones y estándares aplicados.

11 Referencias

- [1] Asphalt Institute, Asphalt Mix Design Methods, 7th Edition
- [2] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Normativa para la infraestructura del transporte (2002). M-MMP-4-04-002, *Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.
- [3] American Society for Testing and Materials (2022), ASTM D6927, *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*.



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

[4] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Normativa para la infraestructura del transporte (2023). M·MMP·4·05·058, *Compactación de Mezclas Asfálticas en Caliente con el Compactador Giratorio.*

[5] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Normativa para la infraestructura del transporte (2022). M·MMP·4·05·062, *Densidad Relativa Teórica Máxima de Mezclas Asfálticas.*

[6] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Normativa para la infraestructura del transporte (2022). M·MMP·4·05·051, *Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Mezclas Asfálticas Compactadas No Absorbentes.*

[7] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Normativa para la infraestructura del transporte (2016). N·CMT·4·05·003, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras.*

[8] Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. Normativa para la infraestructura del transporte (2022). M·MMP·4·05·052, *Mezclas Asfálticas Compactadas al Daño Inducido por Humedad*