

371-1-337

CONSISTENCIA DE LOS DISEÑOS DE MEZCLA SEGÚN LA METODOLOGÍA MARSHALL

Ing. Wendy Sequeira Rojas, MSc.
Lanamme, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
wendy.sequeira@ucr.ac.cr

Ing. Víctor Cervantes Calvo
Lanamme, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
victor.cervantes@ucr.ac.cr

Resumen

La metodología de diseño Marshall tiene como finalidad fundamental encontrar la combinación adecuada de agregados minerales y cemento asfáltico, que permita brindarle a la mezcla asfáltica resultante una serie de características físicas y de resistencia que se establecen tanto en los requisitos contractuales de calidad, como en el diseño de la mezcla asfáltica. Las Disposiciones Viales de Costa Rica definen los requisitos que cuantifican la calidad de la mezcla asfáltica a través de la definición de valores límites de algunos parámetros específicos para la mezcla asfáltica, tanto de la metodología Marshall como de características volumétricas, a saber: contenido de vacíos de la mezcla, estabilidad, flujo, vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos de asfalto (VFA), correspondientes de la metodología Marshall y el parámetro volumétrico de la relación polvo/asfalto. Por otra parte, estas mismas disposiciones indican que la Administración deberá aprobar el Diseño de Mezcla presentado por el Contratista, previo al inicio de la producción de mezcla asfáltica bajo este diseño; sin embargo, esta aprobación no contempla un análisis específico de los parámetros del diseño que permita establecer alguna posible particularidad del mismo, tal como la restricción del rango de contenido de asfalto indicado, que se define en la metodología Marshall como el óptimo $\pm 0,5\%$. Este trabajo tiene como objetivo explicar la metodología utilizada por la Auditoría Técnica del LanammeUCR para evaluar la consistencia de los diseños de mezcla que se emplean para elaborar las mezclas asfálticas de diversas obras viales en Costa Rica y evidenciar los resultados más relevantes de dichas evaluaciones.

Resumo

A metodologia de desenho Marshall tem como finalidade fundamental encontrar a combinação certa de agregados minerais e cimento asfáltico que permite fornecer à mistura asfáltica resultante uma série de características físicas e de resistência estabelecidos tanto nos requisitos de qualidade contratuais, como no desenho da mistura asfáltica.

As Disposições Rodoviárias de Costa Rica definem os requisitos que quantificam a qualidade da mistura asfáltica, através da definição de valores-limite de alguns parâmetros específicos para

mistura asfáltica, tanto da metodologia Marshall como de características volumétricas, ou seja, conteúdo de vazios da mistura, estabilidade, fluxo, vazios no agregado mineral (VMA), vazios cheios de asfalto (VFA), correspondentes da metodologia Marshall e o parâmetro volumétrico da relação pó / asfalto.

Por outro lado, essas mesmas disposições indicam que a Administração deve aprovar o desenho de mistura apresentado pela empresa contratada, antes do início da produção de mistura asfáltica sob este desenho, mas essa aprovação não contempla uma análise específica dos parâmetros do desenho que permita estabelecer alguma possível particularidade do mesmo, tal como a restrição do intervalo de teor ótimo de asfalto indicado, que é definido pelo método Marshall como de $\pm 0,5\%$.

Este trabalho tem como objetivo explicar a metodologia utilizada pela Auditoria Técnica do LanammeUCR para avaliar a consistência dos desenhos de mistura utilizados para produzir as misturas asfálticas de diferentes obras viárias em Costa Rica e evidenciar os resultados mais relevantes dessas avaliações.

METODOLOGÍA MARSHALL

La metodología de diseño de mezcla asfáltica que durante más tiempo se ha aplicado en Costa Rica es la metodología Marshall. Al igual que todas las metodologías de diseño existentes, la metodología mencionada tiene como finalidad fundamental encontrar la combinación adecuada de agregados minerales y cemento asfáltico, que permita brindarle a la mezcla asfáltica resultante una serie de características físicas y de resistencia que se establecen tanto en los requisitos contractuales de calidad, como en el diseño de la mezcla asfáltica.

Dicha proporción busca establecer el adecuado acomodo de las partículas de agregado y el asfalto, una vez que se conforme la mezcla asfáltica, de manera que garantice que ésta pueda soportar los cambios volumétricos resultantes de la compactación por efecto del tráfico. Además, busca encontrar la combinación óptima para soportar los efectos climáticos y el paso de las cargas de tránsito que circularán sobre la carpeta asfáltica.

La metodología de diseño Marshall pretende determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregado. El método también provee información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento (Asphalt Institute, 2007).

El diseño de la mezcla asfáltica seleccionado debe ser aquel que cumpla de la manera más económica con todos los parámetros de diseño establecidos en la metodología Marshall, cumpliendo con los siguientes aspectos:

- Asfalto suficiente para formar una película que cubra el agregado y lo mantenga unido y provea una capa a prueba de agua con el propósito de garantizar su durabilidad.
- Suficiente resistencia de la mezcla a la deformación permanente por la carga de tránsito a la que es sometida durante la operación de la carretera.

- Porcentaje de vacíos suficiente para permitir la compactación adicional como producto de las cargas de tránsito sin presentar deterioro, ni exudación de asfalto, ni comprometer la permeabilidad de la mezcla asfáltica.
- Trabajabilidad suficiente para permitir la colocación y compactación eficiente sin presentar segregación.

Parámetros de Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente

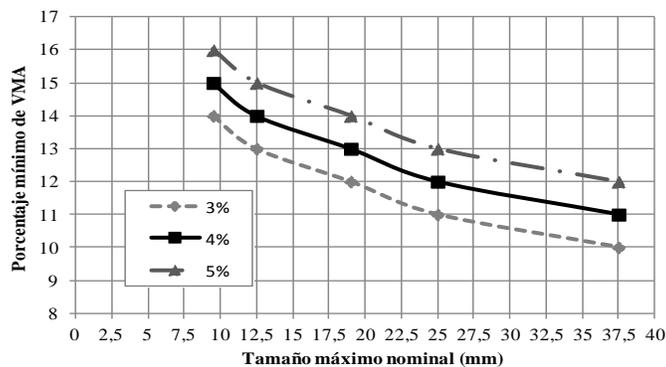
Algunos parámetros de diseño típicos que se consideran dentro de la metodología Marshall se definen en función del tráfico estimado durante la fase de operación de la carretera, tal como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros típicos de diseño en la Metodología Marshall definidos en función del tráfico

Parámetro de diseño	Tráfico Liviano (ESAL<10 ⁴)	Tráfico Medio (10 ⁴ <ESAL<10 ⁶)	Tráfico Pesado (ESAL>10 ⁶)
Compactación (número de golpes por cada lado del espécimen)	35	50	75
Estabilidad, N (kgf)	3.336 (450)	5.338 (550)	8.006 (800)
Flujo, 1/100 pulg (1/100 cm)	8 a 18 (20 a 45)	8 a 16 (20 a 40)	8 a 16 (20 a 35)
Vacíos al aire, %	3 a 5	3 a 5	3 a 5
Vacíos en el agregado mineral (VMA),%	Ver Figura 1		
Vacíos llenos con asfalto (VFA),%	70 a 80	65 a 78	65 a 75

Fuente: “Asphalt Handbook (MS-4)” Asphalt Institute, 2007.

Internacionalmente, los parámetros Marshall se adecuan a las solicitaciones de tránsito que experimentará la carretera; sin embargo, en las especificaciones costarricenses vigentes, los parámetros no varían de acuerdo con el tráfico esperado, sino con el uso que se le vaya a dar a la mezcla, diferenciando entre bacheo en rutas con tratamiento superficial, o con capas y sobrecapas asfálticas (Ver Tabla 2).



Fuente: Asphalt Institute, 2007 y Cartel de Licitación Pública N° 2009LN-000003-CV

Figura 1: Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral de acuerdo con el contenido de vacíos de diseño en la mezcla asfáltica

Tabla 2: Parámetros de diseño en la Metodología Marshall según especificaciones de Costa Rica

Parámetro de diseño	Mezcla asfáltica para bacheo en rutas con tratamiento superficial	Mezcla asfáltica para capas o sobrecapas y bacheo en superficies de ruedo en concreto asfáltico
	Tipo 401 (1)	Tipo 401 (2)
Compactación (número de golpes por cada lado del espécimen)	50	75
Estabilidad método Marshall, kgf	550	800
Estabilidad método Marshall modificado, kgf	1.240	1.800
Flujo método Marshall, 1/100 cm	20 a 45	20 a 35
Flujo método Marshall modificado, 1/100 cm	30 a 67,5	30 a 52,5
Vacíos al aire, %	3 a 5	3 a 5
Vacíos en el agregado mineral (VMA),%	Ver Figura 1	
Vacíos llenos con asfalto (VFA),%	65 a 78	Ver Tabla 3
Relación polvo/asfalto efectivo	No se especifica	0,6 a 1,3

Fuente: Cartel de Licitación Pública N° 2009LN-000003-CV para la conservación vial de Costa Rica

Dentro de esta normativa, se consideran rangos diferentes de ESAL (ejes equivalentes de 8,2 ton) para el caso del parámetro VFA; definiendo valores menores a $0,3 \times 10^6$ para tráfico liviano, valores entre $0,3 \times 10^6$ y 3×10^6 para tráfico medio y valores mayores a 3×10^6 para tráfico pesado, según se detalla en la Tabla 3. Dichos valores fueron los aplicados durante este estudio.

Tabla 3: Porcentaje de VFA para su aplicación en sobrecapas

Tráfico en millones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas (*)	Porcentaje de VFA (%)
Inferior a 0,3	70-80
Inferior a 3	65-78
Superior o igual a 3	65-75

Nota: Los ejes equivalentes de 8,2 toneladas serán estimados para un periodo de carga de 20 años.

(*) Para bacheos en sobrecapas se aplica el rango de 65% a 75%

Fuente: Cartel de Licitación Pública N° 2009LN-000003-CV

Metodología para el análisis de la consistencia de los diseños de mezcla

La normativa costarricense establece los requisitos que debe cumplir la mezcla asfáltica en caliente, los cuales se tipifican en su mayoría para la metodología de diseño de mezcla Marshall, por lo que el cumplimiento integral de los requisitos establecidos en este procedimiento, no sólo constituye una obligación contractual sino que define las pautas de producción que se deben seguir para producir mezcla asfáltica con la calidad contractualmente pactada.

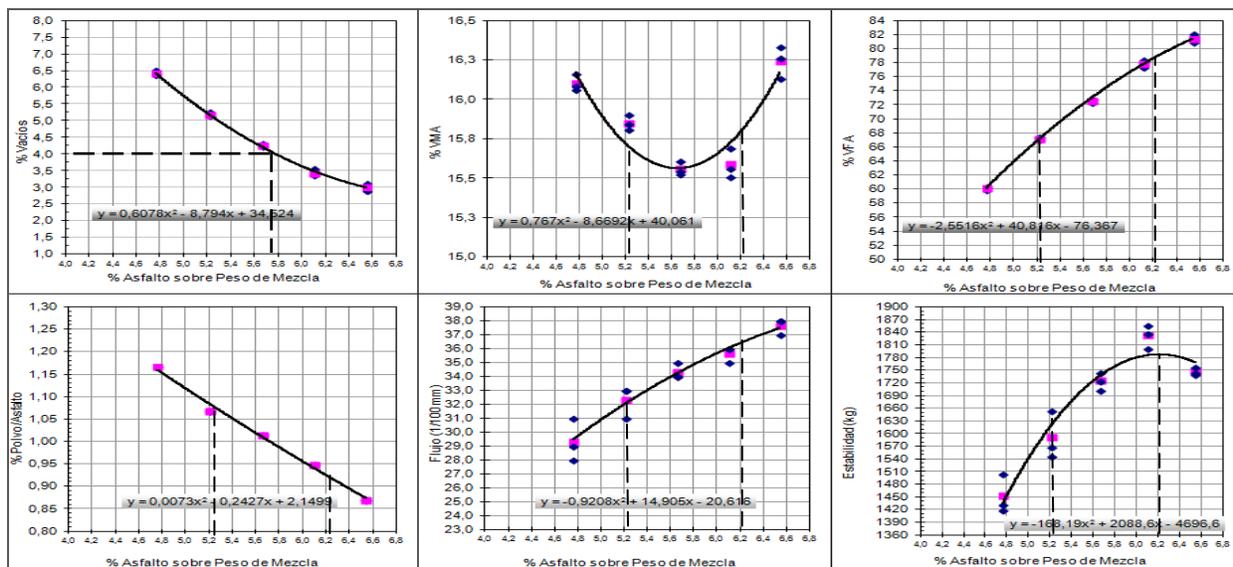
El cumplimiento integral se refiere a que todos los parámetros Marshall (contenido de vacíos, densidad, VFA, VMA, relación polvo/asfalto, estabilidad y flujo) deben cumplirse dentro de la totalidad del rango óptimo de contenido de asfalto establecido en el diseño de mezcla asfáltica. Por ejemplo, si el contenido óptimo de asfalto estimado en el diseño es de 5,0%; la metodología Marshall indica que dentro del rango óptimo $\pm 0,5$ (de 4,5% a 5,5%) todos los criterios de diseño

deben cumplir con las especificaciones. En caso contrario, se debe determinar el rango esperado en el cual se logre alcanzar dicha condición.

Por medio de la metodología utilizada por la Auditoría Técnica del Lanamme, se analiza el comportamiento individual de cada parámetro dentro del rango óptimo de contenido de asfalto con el fin de evaluar si existe el *riesgo potencial* de incurrir en un incumplimiento durante la producción de la mezcla asfáltica en planta.

En estos análisis realizados por el equipo de auditoría se ha considerado como riesgo potencial la probabilidad que evidencia el diseño de mezcla de incumplir alguno de los parámetros analizados anteriormente durante el proceso de producción de mezcla asfáltica. Sin embargo, se considera que dicho riesgo se materializa durante el proceso de producción, cuando variaciones en las características de la materia prima (granulometría de los agregados, consistencia del asfalto, entre otras) que son permitidas en cierta magnitud y se contemplan en la fórmula de trabajo; podrían producir mayores o menores incumplimientos. El riesgo potencial podría no verse reflejado en aquellos casos en donde el diseño de mezcla muestra una reducción pequeña del rango de asfalto y existe un excelente control del proceso productivo; en caso contrario, toma mayor relevancia en aquellos diseños de mezcla en donde la restricción del rango de asfalto es alta y el proceso productivo es muy variable, en estos casos el riesgo es muy alto ya que la materialización de los incumplimientos señalados es inminente.

El primer paso consiste en reproducir los gráficos de la metodología Marshall, a partir de la información reportada en los informes de diseño de mezcla realizados por el laboratorio contratado para tal fin. En estos gráficos se comparan las propiedades de la mezcla asfáltica versus el contenido de asfalto y se calculan las ecuaciones de la línea de tendencia para cada parámetro según se muestra en la Figura 2.



Fuente: Auditoría Técnica, LanammeUCR

Figura 2: Ejemplo de resultados de ensayo Marshall. Propiedades de la mezcla asfáltica según el contenido de asfalto

Estos gráficos permiten determinar el rango de contenido de asfalto dentro del cual los parámetros de diseño Marshall cumplen con las especificaciones (en adelante rango óptimo). Típicamente, la metodología Marshall establece que el contenido óptimo de asfalto es aquel valor en donde se obtiene el 4% de vacíos, y a partir de este valor encontrado, se evalúan los otros parámetros en $\pm 0,5\%$ de variación. Para el caso mostrado en la Figura 2, el contenido de asfalto óptimo resultante es de $5,75\% \pm 0,5\%$ (rango óptimo: 5,25% a 6,25%).

Una vez analizados los rangos del contenido de asfalto en que los parámetros de diseño cumplen las especificaciones, se elabora una tabla resumen similar a la Tabla 4. Esta tabla muestra el resultado del análisis, en donde se establecen los valores máximos y mínimos de cada uno de los parámetros dentro el rango óptimo. Se puede observar que para el caso del ejemplo expuesto, existen incumplimientos en los parámetros de contenido de vacíos y VFA, lo cual limitaría al rango óptimo para poder cumplir con los requisitos contractuales.

Tabla 4. Ejemplo de análisis del rango efectivo de contenido de asfalto

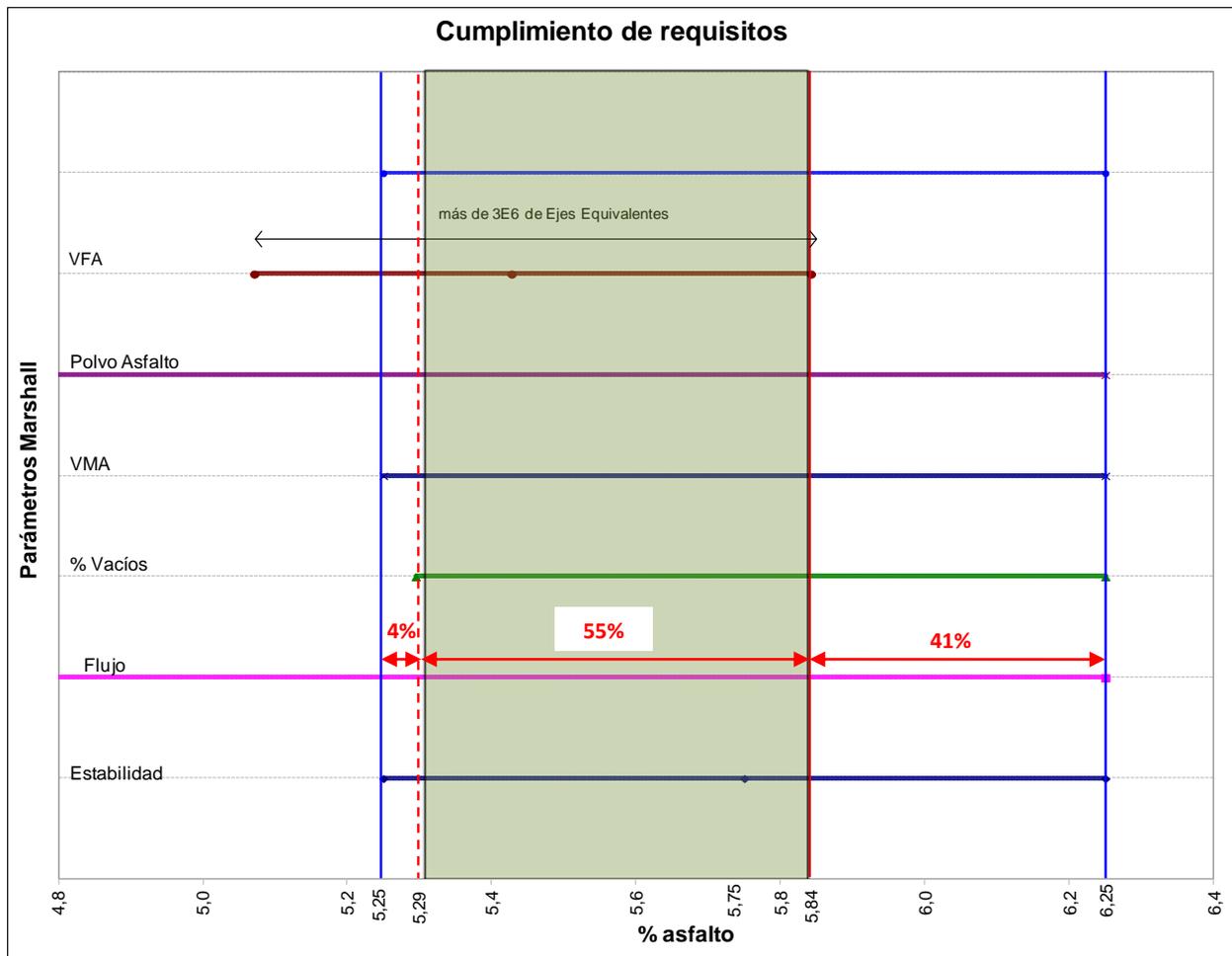
Parámetro	Límites de especificación		Contenido de asfalto			Cumplimiento
			Óptimo - 0,5% 5,25%	Óptimo 5,75%	Óptimo + 0,5% 6,25%	
Estabilidad, kg	Mayor a 800		1.633	1.752	1.787	SI
Flujo, 1/100 cm	20	40	32	35	37	SI
Contenido de vacíos, %	5	3	5,1 ^(a)	4,1	3,3	NO
Relación Polvo/asfalto	1,3	0,6	1,1	1,0	0,9	SI
VMA	Mayor a 14		15,7	15,6	15,8	SI
VFA tránsito liviano	70	80	68 ^(b)	74	79	NO
VFA tránsito medio	65	78	68	74	79 ^(c)	NO
VFA tránsito pesado	65	75	68	74	79 ^(d)	NO

Fuente: Auditoría Técnica, LanammeUCR

Nota: El cumplimiento se obtiene cuando el porcentaje de asfalto es (a) 5,29% (b) 5,43% (c) 6,13% y (d) 5,84%

Para una mejor comprensión del análisis, se elabora una gráfica que muestra el rango de contenido de asfalto en el cual la mezcla cumple con los valores establecidos en las especificaciones contractuales para los parámetros de estabilidad, flujo, vacíos en la mezcla, VMA, VFA y relación polvo/asfalto (Ver Figura 3). Se puede observar que para lograr cumplir las condiciones indicadas el rango se restringe en un 45%, ya que habría que reducir la tolerancia permitida de $\pm 0,5$ por encima del óptimo de asfalto hasta solo $+0,09$ (41% de reducción de la tolerancia total) y por debajo, quedaría en $-0,46$ (4% de reducción de la tolerancia total), aproximadamente.

Como resultado de este análisis se puede evidenciar que el producir mezcla asfáltica bajo las condiciones de granulometría, contenido de asfalto y distribución volumétrica similares al diseño, en la totalidad del rango óptimo de contenido de asfalto, implica un riesgo potencial de incumplimiento; debido a que en los extremos del rango existe una alta posibilidad de sobrepasar el valor de los requisitos establecidos en las especificaciones contractuales. En el caso de este ejemplo, los parámetros de contenido de vacíos de la mezcla y vacíos llenos de asfalto (VFA) están restringiendo el rango óptimo, lo cual no asegura la calidad solicitada en el contrato de la mezcla asfáltica producida.



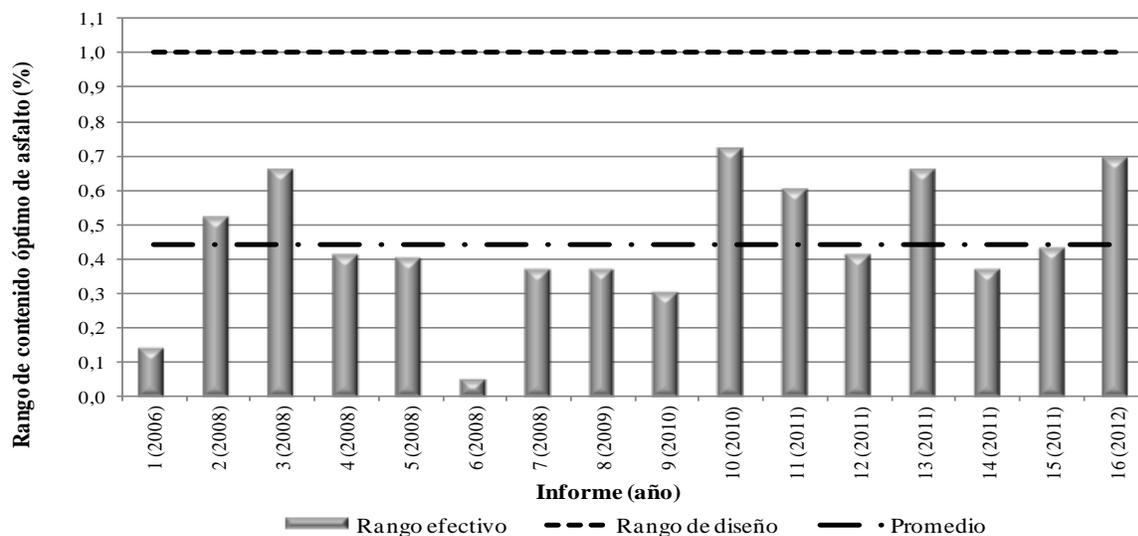
Fuente: Auditoría Técnica, LanammeUCR

Figura 3. Ejemplo de análisis gráfico del rango efectivo de contenido de asfalto

Casos de Estudio

Desde el año 2006, la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR ha implementado esta metodología para la revisión de diseños de mezcla asfáltica en caliente que se producen para la construcción y mantenimiento de proyectos viales en Costa Rica. A través de este periodo de tiempo se ha evidenciado que el contenido óptimo de asfalto determinado por medio de la elaboración del diseño de mezcla, para el cual todos los parámetros volumétricos y de desempeño cumplen, se ve reducido significativamente, por lo que no solo no se logra cumplir con lo estipulado en la metodología Marshall, es decir, $\pm 0,5\%$, sino que se omite indicar en el propio diseño que habría que restringir el rango de contenido de asfalto para el cual se cumple con todas las especificaciones.

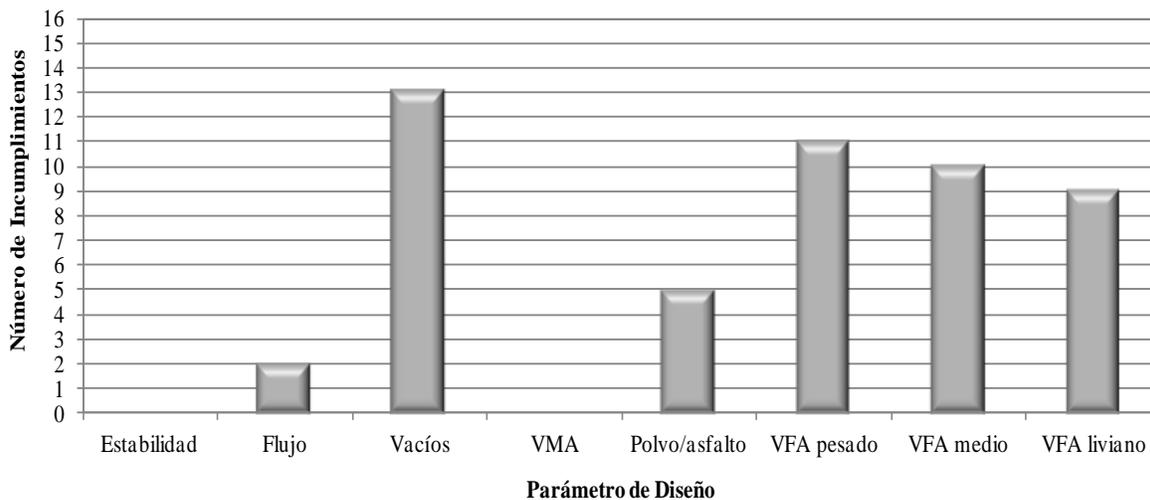
La Figura 4 muestra que en todos los diseños de mezcla analizados por la auditoría entre el periodo 2006 a 2012, el rango óptimo de asfalto se redujo para lograr el cumplimiento de las especificaciones. En promedio, el rango óptimo estimado fue de 0,44% y el caso más crítico se presentó en el informe 6 (año 2008), en el cual se calculó una reducción del 95% en el rango óptimo de asfalto, lo cual hace que el riesgo potencial de incumplimiento sea muy probable.



Fuente: Auditoría Técnica, LanammeUCR

Figura 4: Rangos del contenido óptimo de asfalto según los diseños de mezcla analizados por la Auditoría Técnica del Lanamme

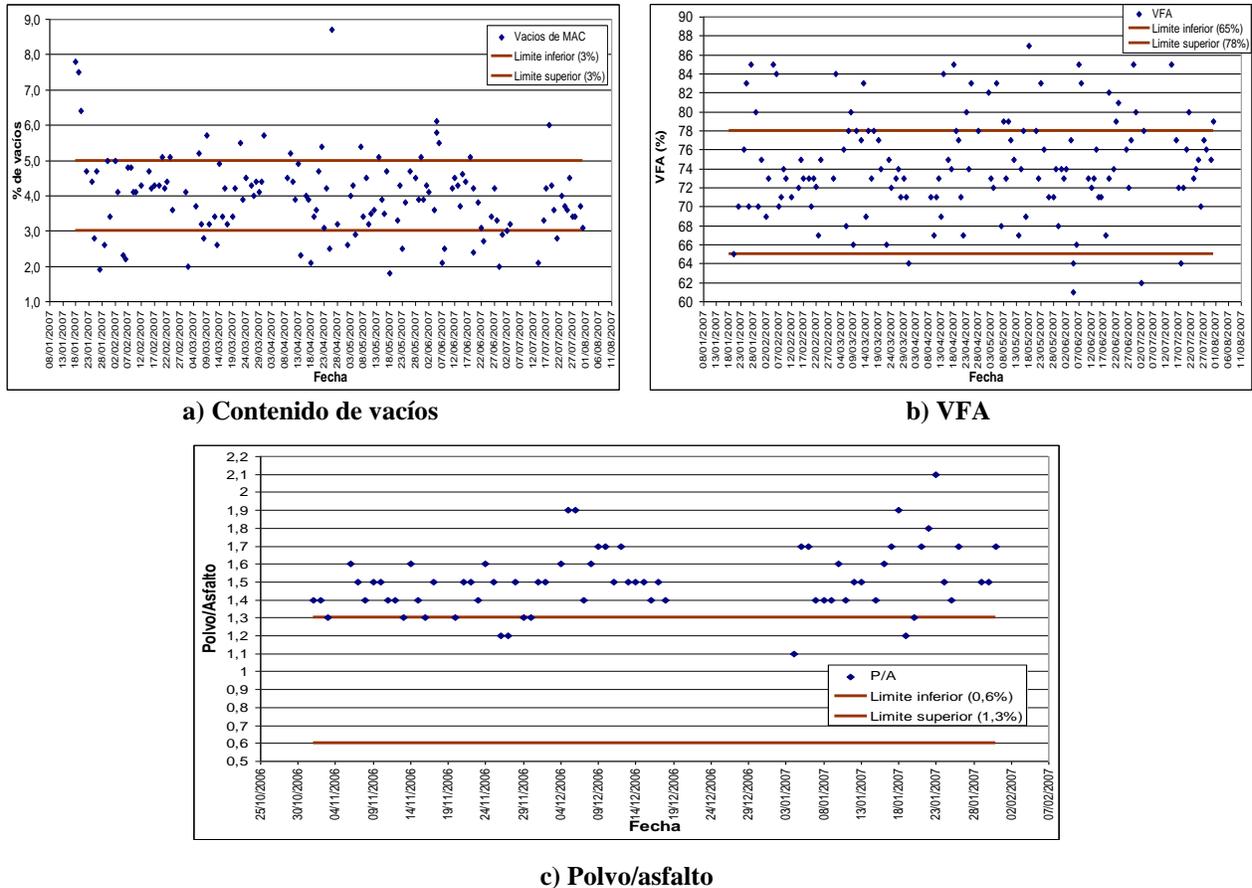
Al analizar históricamente los diseños de mezcla, se observa que parámetros como el contenido de vacíos y los vacíos llenos con asfalto (VFA) presentan incumplimiento en el 81% y 69% de los casos, respectivamente (Ver Figura 5). En el caso del VFA, se detectó que la mayoría de los incumplimientos se presentaron porque el diseño se formulaba para un tránsito menor al que realmente circulaba por la vía, por lo que el análisis debía realizarse con un rango de VFA más restrictivo (65% a 75%). Por otro lado, existen otros parámetros como la estabilidad y el flujo Marshall, así como los vacíos en el agregado mineral (VMA) que en la mayoría de los 16 diseños analizados no se determinaron incumplimientos de acuerdo con las especificaciones establecidas en la normativa costarricense.



Fuente: Auditoría Técnica, LanammeUCR

Figura 5: Número de incumplimientos en los parámetros de diseño Marshall.

Con el fin de analizar si los incumplimientos detectados en los diseños se ven reflejados en la producción de la mezcla asfáltica, la Auditoría Técnica del LanammeUCR se ha dado a la tarea de examinar resultados de ensayo de la mezcla asfáltica realizados por los laboratorios de control de calidad de los contratistas que ejecutan proyectos viales. Para ello, periódicamente se elaboran gráficos de control similares a los mostrados en la Figura 6. En dichos gráficos se indican los límites de la especificación para detectar incumplimientos y visualizar tendencias del proceso productivo con el fin de correlacionar el análisis realizado al diseño de mezcla con las gráficas y determinar con certeza si el potencial riesgo observado en el diseño, se materializa durante el proceso productivo.



Fuente: Auditoría Técnica, LanammeUCR

Figura 6: Ejemplo de gráficos de control elaborados a partir de los resultados de control de calidad de los proyectos viales en Costa Rica

En la Figura 6 se pueden observar algunos de los parámetros de diseño que históricamente han presentado mayores incumplimientos según los resultados de control de calidad analizados por la Auditoría Técnica. Estos parámetros son la relación polvo/asfalto, el contenido de vacíos en la mezcla y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto. Estos incumplimientos podrían ser causados en parte por estar produciendo mezcla asfáltica en un rango que evidencia riesgo según las restricciones calculadas en los diseños. De ahí la importancia de revisar rutinariamente la consistencia de los diseños de mezcla, ya que estas revisiones permitirían definir los rangos en

que se debe mantener el contenido de asfalto para lograr minimizar el riesgo de un potencial incumplimiento.

CONCLUSIONES

- La Auditoría Técnica del LanammeUCR ha implementado una metodología para revisar los diseños de mezcla presentados a la Administración con el objetivo de analizar su consistencia con respecto a la metodología Marshall. Dicha metodología ha permitido evidenciar que existen restricciones relacionadas con el rango de contenido de asfalto, lo cual podría causar un riesgo potencial de incumplir los parámetros de diseño durante el proceso de producción definidos en la disposiciones viales costarricenses para la metodología Marshall y requisitos de la mezcla asfáltica.
- La recomendación que ha realizado la Auditoría Técnica a través de sus informes ha sido la de implementar un procedimiento que permita realizar una revisión integral del diseño de mezcla asfáltica que se presenta a la Administración, para corroborar que los parámetros volumétricos de la mezcla se cumplen en todo el rango de contenido de asfalto propuesto para la producción, o por lo menos advertir que el diseño de mezcla posee una restricción que se debe considerar al momento de la producción de mezcla asfáltica; todo esto con el propósito principal de garantizar la calidad de la mezcla asfáltica que se produce en dicho diseño.

REFERENCIAS

Asphalt Institute. *The Asphalt Handbook (MS-4)*. Séptima edición Kentucky, EE.UU. 2007.

Kandhal, P., Roberts, F. et al. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. National Center for Asphalt Technology. Segunda edición, 1996.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. *Disposiciones Generales para la construcción y Conservación Vial: AM-01-2001 y MN-01-2001*. Octubre 2002.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. *Cartel de Licitación Pública N° 2009LN-000003-CV*. Setiembre 2011.