

# Efecto del remoldeo sobre las propiedades Marshall

## de la mezcla asfáltica

Ing. Pedro Castro F. Msc. MBA. LANAMME

### INTRODUCCION

La metodología del modelo de diseño Marshall fue desarrollada con el propósito de determinar las proporciones óptimas del ligante asfáltico y agregado (separado por tamices), que permiten lograr, simultáneamente, características de estabilidad, durabilidad, flexibilidad y porosidad, en la mezcla asfáltica así proporcionada.

Con el advenimiento de las teorías de control y verificación de la calidad, surge la imperiosa necesidad de monitorear, rutinariamente, el cumplimiento en la producción de mezcla asfáltica de acuerdo con un diseño de mezcla específico, para una serie de parámetros de aceptación y uniformidad. Dentro de estos parámetros a observar, ocupan un lugar preponderante las magnitudes que determinaron la selección de las dosificaciones óptimas, a saber: los parámetros Marshall.

La determinación eficiente de los parámetros Marshall para la mezcla asfáltica producida en una planta requiere de las siguientes acciones:

- Muestreo oportuno y representativo, de acuerdo con criterios de selección aleatoria (muestreo aleatorio periódico).
- Preparación de los especímenes de ensayo.
- Evaluación de los especímenes de ensayo.

Todo de acuerdo con buenas prácticas de laboratorio, en apego total a la normativa estandarizada.

Dentro de este contexto de muestreo y ensayo se ha planteado la incertidumbre de como aplicar, al pie de la letra, las normativas de ensayo, sin introducir elementos de variabilidad y sesgo. Es así, por tanto, que en Costa Rica se ha hecho el esfuerzo valioso de dotar a las plantas de herramientas indispensables para los intereses del control y la verificación de la calidad: se han puesto en práctica planes de muestreo aleatorio periódico (una muestra

cada 750 toneladas de producción o, como máximo, cada dos días de producción) y se ha desarrollado la cultura del moldeo de especímenes en planta.

El moldeo en planta ha venido a sustituir el moldeo en el laboratorio, de manera que se evita la necesidad de que las muestras se enfrien, se almacenen y se vuelvan a calentar, de previo al moldeo correspondiente. En este contexto se ha considerado oportuno evaluar la diferencia real entre las características Marshall (estabilidad, flujo y gravedad específica bruta), para especímenes moldeados en planta, respecto a los correspondientes preparados en el laboratorio.

### ESQUEMA EXPERIMENTAL

Este estudio comparativo para modelo en planta respecto al moldeo en laboratorio se basa en el contraste de las características de los especímenes Marshall compactados en ambos sitios, correspondientes a la producción de las mismas plantas y a los mismos periodos de producción.

El estudio desarrollado consideró el factor experimental denominado "sitio de moldeo", de manera que se tomaron en cuenta dos niveles experimentales: moldeo en planta y moldeo en el laboratorio. Adicionalmente se incorporó un efecto de bloque por planta (elemento de variabilidad que se toma en cuenta con el propósito de minimizar el error experimental), dado que se utilizaron resultados de cuatro diferentes plantas de producción de mezcla asfáltica (cada una con diferentes materiales y procesos).

En total se analizaron 30 muestras de mezcla asfáltica, para cuatro diferentes plantas (tres continuas y una de bache), correspondientes al primer semestre de 2000.

No en todos los casos se cuenta con la información de los 30 especímenes, pero como mínimo se dispone de 28 resultados por parámetro evaluado.

Los especímenes moldeados en planta

fueron preparados por el laboratorio de control de calidad del contratista. Los especímenes moldeados en el laboratorio fueron preparados por personal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LANAMME). La evaluación de todos los especímenes correspondió, en todos los casos al personal del LANAMME.

**Nota:** Los resultados de este estudio están sujetos a la aplicación de estructuras granulométricas densas, con tamaño máximo de 19.0 mm, con ligantes asfálticos no modificados, y con diferentes condiciones de preparación experimental (en lo referente a las muestras moldeadas en planta).

### RESULTADOS DEL ESTUDIO

A partir de los resultados de los ensayos de laboratorio correspondiente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de acuerdo con el siguiente modelo estadístico.

$$\text{Parámetro}_{ijk} = \mu + \text{Efecto-sitio moldeo} + \text{Efecto-planta} + \epsilon_{ijk}$$

#### Donde:

Parámetro  $_{ijk}$ : parámetro evaluado, de acuerdo con el sitio de moldeo "i", para la planta "j", para la observación "k".

Efecto sitio.moldeo: efecto específico del sitio de moldeo "i" (planta o laboratorio) sobre el parámetro evaluado.

Efecto-planta: efecto específico de la planta "j" (y todos los cambios que esto conlleva en cuanto a las características de la mezcla asfáltica, y a la metodología de muestreo y preparación de especímenes) sobre el parámetro evaluado.

$\epsilon_{ijk}$ : error experimental asociado con el sitio de moldeo "i", la planta "j" y la observación "k". Se refiere a la variabilidad de los parámetros evaluados, no asociada con los efectos de sitio de moldeo y planta.



De esta forma, fue posible evaluar si una diferencia en el sitio de moldeo (planta / laboratorio) explica variabilidad en los diferentes parámetros respuesta considerados. La determinación de efectos significativos (casos donde un cambio en el sitio de moldeo determina cambios en el parámetro respuesta), se hace con un nivel de confianza del 95%.

### EFFECTO DEL REMOLDEO SOBRE LA ESTABILIDAD MARSHALL

La Tabla No. 1 presenta los resultados correspondientes a la evaluación del efecto del sitio de moldeo (planta / laboratorio) sobre el parámetro de estabilidad Marshall.

**Tabla No. 1: Evaluación de la relación entre el sitio de moldeo y el parámetro de estabilidad Marshall.**

Efecto	F (1)	F acept. (2)	Resultado (3)	R <sup>2</sup>
Sitio moldeo	4.39	4.26	Significativo	0.44
Planta	4.79	3.01	Significativo	

#### Notas:

- (1) El parámetro "F" relaciona la variabilidad en el parámetro respuesta explicada por cambios en el efecto (sitio de moldeo o planta), respecto a la variabilidad total en el parámetro respuesta.
- (2) El parámetro "F acept." se refiere al mínimo valor que el parámetro "F" debe alcanzar, para que un efecto sea significativo al explicar variabilidad en el parámetro respuesta con un nivel de confianza del 95%.
- (3) El resultado se refiere a si cada efecto particular es significativo para explicar variabilidad en el parámetro respuesta, a un nivel de confianza del 95%.

A partir del análisis realizado, es posible concluir que el efecto sitio de moldeo determina diferencias significativas en el parámetro de estabilidad. No existe un patrón de diferencia en un sentido definido, es decir, que en algunos casos el parámetro de estabilidad es superior en los especímenes moldeados en el laboratorio (mayoría de casos), y en otros casos el parámetro de estabilidad es superior en los especímenes moldeados en planta (los menos), pero se dan diferencias.

Del bajo coeficiente de determinación en el modelo para estabilidad en función del sitio de moldeo y la planta ( $R^2 = 0.44$ ) y del hecho de que no es posible establecer que el parámetro de estabilidad sea mayor para alguno de los dos sitios de moldeo evaluados, se puede suponer que existen elementos de variabilidad adicional, que determinan un elevado error experimental (variabilidad no asociada con cambios en el sitio de moldeo y cambios de planta), tales fuentes de variabilidad pueden relacionarse con patrones de dispersión generales (como por ejemplo la ocurrencia general de cambios en la materia prima y/o en los procesos productivos).

### EFFECTO DEL REMOLDEO SOBRE EL FLUJO MARSHALL

La Tabla No. 2 presenta los resultados correspondientes a la evaluación del efecto del sitio de moldeo (planta / laboratorio) sobre el parámetro de flujo Marshall.

**Tabla No. 2: Evaluación de la relación entre el sitio de moldeo y el parámetro de flujo Marshall.**

Efecto	F (1)	F acept. (2)	Resultado (3)	R <sup>2</sup>
Sitio moldeo	40.90	4.26	Significativo	0.67
Planta	2.36	3.01	No significativo	

#### Notas:

- (1) El parámetro "F" relaciona la variabilidad en el parámetro respuesta explicada por cambios en el efecto (sitio de moldeo o planta), respecto a la variabilidad total en el parámetro respuesta.
- (2) El parámetro "F acept." se refiere al mínimo valor que el parámetro "F" debe alcanzar, para que un efecto sea significativo al explicar variabilidad en el parámetro respuesta con un nivel de confianza del 95%.
- (3) El resultado se refiere a si cada efecto particular es significativo para explicar variabilidad en el parámetro respuesta, a un nivel de confianza del 95%.

A partir del análisis realizado se puede establecer que el efecto del sitio de moldeo es altamente significativo (nótese el valor del parámetro "F" de 40.90) sobre el parámetro de flujo Marshall (Figura No. 1). Los flujos medidos en especímenes moldeados en el laboratorio son significativamente menores que los correspondientes a especímenes moldeados en la planta.

Es posible apreciar que el efecto planta no es significativo al 95% de confianza. De manera que las cuatro plantas evaluadas presentan similitud en los correspondientes parámetros de flujo. Esto puede deberse a la ocurrencia de situaciones no controladas, que determinan poca diferencia entre los resultados promedio para las cuatro plantas consideradas; de manera que el error experimental (variabilidad no explicada por el modelo) es alto respecto a la variabilidad por planta. Ejemplo de estas situaciones no controladas, y en apariencia generalizadas, son aquellas relacionadas con los procedimientos de laboratorio correspondientes: condiciones variables de moldeo, variabilidad en los equipos y técnicas de moldeo, etc.

### EFFECTO DEL REMOLDEO SOBRE LA GRAVEDAD ESPECIFICA BRUTA

La Tabla No. 3 presenta los resultados correspondientes a la evaluación del efecto del sitio de moldeo (planta / laboratorio) sobre el parámetro de gravedad específica bruta.



Tabla No. 3: Evaluación de la relación entre el sitio de moldeo y el parámetro de gravedad específica bruta.

Efecto	F (1)	F acept. (2)	Resultado (3)	R <sup>2</sup>
Sitio moldeo	0.04	4.24	No significativo	0.76
Planta	25.68	2.99	Significativo	

#### Notas:

- (1) El parámetro "F" relaciona la variabilidad en el parámetro respuesta explicada por cambios en el efecto (sitio de moldeo o planta), respecto a la variabilidad total en el parámetro respuesta.
- (2) El parámetro "F acept." Se refiere al mínimo valor que el parámetro "F" debe alcanzar, para que un efecto sea significativo al explicar variabilidad en el parámetro respuesta con un nivel de confianza del 95%.
- (3) El resultado se refiere a si cada efecto particular es significativo para explicar variabilidad en el parámetro respuesta, a un nivel de confianza del 95%.

Los resultados evaluados permiten establecer que el efecto del sitio de moldeo no es significativo, al 95%, para explicar variabilidad en el parámetro de gravedad específica bruta (Figura No. 2). De esta forma, es posible pensar que no hay una diferencia significativa entre la gravedad específica bruta para especímenes moldeados en planta y la correspondiente magnitud para especímenes moldeados en el laboratorio. Es decir, el efecto del "remoldeo" no determina diferencias en la gravedad específica bruta, y, como consecuencia, no determina diferencias en el contenido de vacíos (siempre que se utilice la misma gravedad específica máxima teórica de referencia).

El efecto de la planta sí es altamente significativo ( $F = 25.68$ ) para explicar la variabilidad en la gravedad específica bruta, de manera que las diferencias en la gravedad específica bruta se relacionan directamente con cambios en las condiciones propias de cada planta (por ejemplo en cuanto a gravedad específica del agregado bruto).

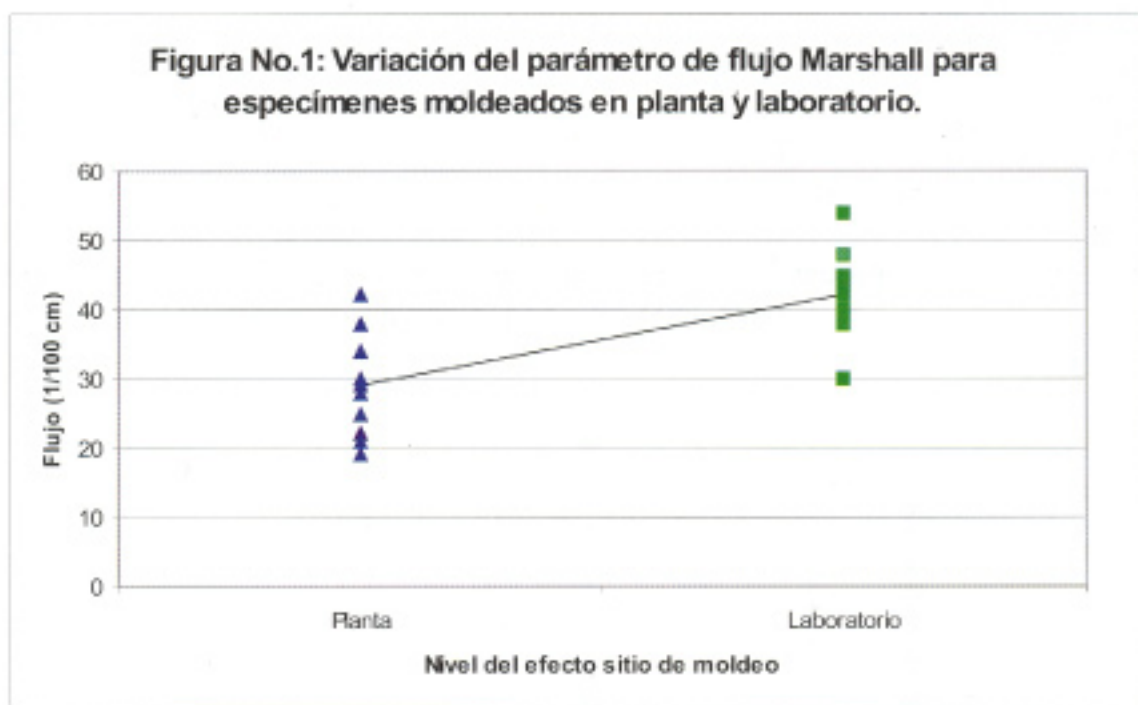
#### CONCLUSIONES

Existe sustento estadístico en las siguientes aseveraciones:

- El remoldeo (moldeo en el laboratorio a partir de una muestra de la producción de mezcla asfáltica) determina diferencias significativas en el parámetro de estabilidad Marshall, respecto al moldeo en planta. Sin embargo, existen elementos de variabilidad en el comportamiento de la mezcla de diferentes plantas, que determinan que en algunos casos la estabilidad de los especímenes de laboratorio sea mayor (mayoría de los casos), mientras que en otros casos ocurre lo contrario (mayor estabilidad en especímenes moldeados en la planta.)

- El remoldeo determina valores de flujo más bajos para las muestras compactadas en el laboratorio, respecto a las muestras compactadas en planta. Los valores de flujo para especímenes de planta son muy superiores a los correspondientes a los especímenes del laboratorio (la diferencia media cuantificada es de 13 centésimas de centímetro). Tal efecto puede relacionarse con el envejecimiento del ligante asfáltico experimentado durante el proceso de enfriamiento y calentamiento posterior (en el laboratorio), de manera que la cohesión en el mastique asfáltico de los especímenes se incrementa (por la mayor rigidez asociada).

**Nota:** el notorio incremento del flujo en los especímenes remoldeados evidencia la relativamente baja fricción interna en las estructuras de agregado correspondientes a las mezclas evaluadas, de manera que cambios de rigidez en el ligante asfáltico influyen radicalmente sobre la resistencia a la deformación (cuantificada indirectamente mediante el método Marshall). Es probable que curvas granulométricas abiertas (tipo mezcla con matriz de agregado grueso), con agregado de mayor cubicidad, determinen menores efectos relativos de la rigidez del ligante



asfáltico sobre el parámetro de flujo.

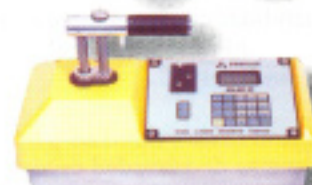
•El remoldeo no afecta los parámetros de gravedad específica bruta y, consecuentemente, contenido de vacíos (si se utiliza un valor común de gravedad específica máxima teórica). En apariencia, la rigidez del ligante asfáltico a la temperatura de moldeo (sobre 140°C) no se incrementa notoriamente por el efecto de enfriamiento y calentamiento, de manera que, aplicando la misma energía de compactación que en la planta, es posible lograr la misma dosificación.

Así, la evidencia apunta a que es posible realizar un adecuado control volumétrico en la producción de una planta asfáltica, moldeando los especímenes en el laboratorio (con las ventajas de mayor control en el proceso y mayor uniformidad en los resultados obtenidos en posteriores caracterizaciones); sin embargo, para dar seguimiento histórico a los parámetros de resistencia a la deformación (estabilidad y flujo Marshall), es evidente la necesidad de realizar el moldeo en la planta asfáltica, dado que el efecto de remoldeo (en el laboratorio) puede afectar los resultados finales en forma no coherente con la realidad del proceso constructivo (la mezcla que efectivamente se coloca en un proyecto no es sujeto de un proceso de enfriamiento y recalentamiento de previo a

Representación de los Laboratorios Electrónicos TROXLER para Costa Rica; con los precios más bajos del mercado y con soporte técnico/ingenieril de experiencia.

Asesoría en compra, instalación, mantenimiento, operación y desarrollo de aplicaciones en equipos para el análisis de mezclas de concreto asfáltico e hidráulico.

Líderes a nivel mundial en equipos para medición de compactación: capas asfálticas, capas delgadas, capas de base, suelos, etc.



Doc & Bib de Centroamérica

Tel: 394-4317 / Fax: 551-7315

**Figura No.2: Variación del parámetro de gravedad específica bruta para especímenes moldeados en planta y laboratorio.**

