

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL**

**FACULTAD REGIONAL LA PLATA  
FACULTAD REGIONAL MENDOZA**

**VALORACION DEL  
DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA  
ASFÁLTICA DENSA  
MODIFICANDO EL TIPO DE  
FILLER Y ASFALTO**

La presente publicación pertenece al Proyecto de Investigación y desarrollo "CORRELACION ENTRE MODULOS DINAMICOS Y DEFORMACIONES PLASTICAS PERMANENTES EN MEZCLAS ASFALTICAS DENSAS" Código de homologación de la UTN: MAIFILP0002089TC- Programa de Incentivos 25/IM01

**PARTE I**

**LEMaC- Centro de Investigación Vial UTN-FRLP  
Laboratorio Vial UTN-FRM**

**Agosto 2015**

## AUTORES:

---

Valoración del desempeño de una mezcla asfáltica densa  
modificando el tipo de filler y asfalto / Gerardo Botasso ... [et al.]. -  
1a ed. . - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2015.  
136 p. ; 29 x 21 cm.

**ISBN 978-987-1896-43-1**

1. Ingeniería. 2. Asfalto. I. Botasso, Gerardo  
CDD 624

### **Becarios de investigación alumnos:**

Soledad Cedrick (FRLP)  
Juan Gatti (FRLP)  
Carolina Buscaglia (FRLP)  
Lucas Saino (FRLP)  
Irvin Quispe (FRLP)  
Ignacio Zapata (FRLP)  
Carolina Gerardi (FRLP)  
Dario Asuaje (FRLP)

### **Docentes Investigadores:**

Edgardo Espinoza (FRM)  
Omar Valdivia (DPV Mendoza)  
Héctor Rodríguez (DNV Mendoza)  
Esteban Allasino (FRM)  
Armando Salinas (FRM)  
Facundo Rosales (FRM)  
Cecilia Soengas (FRLP)  
Oscar Rebollo (FRLP)  
Luis Ricci (FRLP)  
Julián Rivera (FRLP)

### **Director:**

Gerardo Botasso (FRLP)

VALORACION DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA  
MODIFICANDO EL TIPO FILLER Y ASFALTO

## INDICE:

Capítulo	Página
1. Caracterización de Materiales. Diseño Marshall	4 a 55
2. Valoración de la Adherencia Árido Ligante. Test de Lottman AASHTO T 283	56 a 76
3. Valoración a la Resistencia al Ahuellamiento. Norma UNE-EN 1297-22 Procedimiento B	77 a 106
4. Valoración de la Rigidez de las Mezclas Asfálticas. Ensayo de Módulo de Rigidez por Tracción Indirecta. Norma UNE-EN 1297-26 Anexo C	107 a 121
5. Valoración por Medio del Método UCL, Caracterización Universal de Ligantes	122 a 133
6. Conclusiones Generales	134 a 136

# CAPITULO 1:

## CARACTERIZACION DE MATERIALES. DISEÑO MARSHALL DE LAS MEZCLAS

---

### RESUMEN

Las mezclas asfálticas en caliente resultan ser una de las alternativas de mayor utilización en el mercado vial argentino. Están compuestas mayoritariamente por áridos, filler, cemento asfáltico y aditivos.

En el presente trabajo se pretenden valorar los cambios registrados en las propiedades de una mezcla asfáltica densa del tipo CAC D19, modificando el origen del filler de aporte. En este caso se genera un cambio del 100 % del pasante en el tamiz IRAM N° 200; por un lado considerando un filler de origen granítico y por otro de origen calizo, cal hidráulica hidratada, variando según el caso el contenido de asfalto y las respectivas relaciones de concentraciones volumétricas y críticas, como así también las relaciones entre sus respectivos pesos.

Por otro lado se utilizan dos tipos de asfaltos, combinados con las variaciones de fillers ya explicadas. Un asfalto CA-30 y como asfalto modificado un AM-3.

La idea de generar estas variantes radicales en la mezcla, modificando el origen de dos componentes, pretende poner en evidencia las modificaciones registradas en diferentes propiedades a la hora de calificar el desempeño de la mezcla. El diseño se ha realizado por medio de la metodología Marshall. Se ha trabajado en la valoración de la adherencia, la cohesión, la susceptibilidad térmica, el envejecimiento, la resistencia al ahuellamiento, la tracción indirecta y sus módulos de rigidez.

Se presentan en formato de gráficos y tablas las variables enunciadas, y se hace el análisis de resultados contextualizando las conclusiones con las situaciones intermedias registradas en las mezclas habitualmente utilizadas en las obras.

### 1. INTRODUCCION

Las mezclas asfálticas son sistemas complejos en donde sus propiedades se ven afectadas por las características de sus componentes. Es sabido que una inadecuada valoración de los mismos, como así también de sus proporciones, pueden traer aparejados comportamientos inesperados frente a diferentes tipos de sollicitaciones y conllevar a riesgos de falla que potencialmente no han sido cuantificados.

El trabajo se realiza en el contexto de colaboración de dos grupos de trabajo, por un lado el Laboratorio Vial de la UTN Mendoza y por otro el LEMaC de la UTN La Plata. En este acuerdo se pretende impactar en los criterios de diseño que se consideran en las mezclas asfálticas en obras provinciales, en donde en muchos casos el diseño Marshall puede constituirse en el eje central de ese

proceso y donde, en otros casos, la posibilidad de utilizar variaciones en el filler o en el tipo de asfalto, resulta ser un tema que solo se cuantifica si se generan cambios en las relaciones volumétricas y mecánicas del ensayo Marshall.

En esta PARTE I del trabajo, se presenta el uso de materiales disponibles en la provincia de Buenos Aires, para luego en una segunda etapa valorar la influencia con áridos de la provincia de Mendoza. Se destaca que los áridos gruesos y finos son 100 % provenientes de la trituración de roca maciza, mientras que en el caso de las mezclas formuladas en el contexto de la vialidad mendocina, provendrán de la trituración de canto rodado.

Las variables consideradas, fueron elegidas porque pueden llevar a los mayores cambios en la resistencia al envejecimiento, cohesión, rigidez y resistencia al ahuellamiento, entre otras variables, y porque aparecen aun hoy en día como las más cuestionadas por fuera de la matriz de áridos. Ellas son:

- Variaciones en el tipo de filler (material pasante en el tamiz IRAM N° 200). Se diseñan dos condiciones posibles, por un lado mezclas con 100 % de filler proveniente del polvo de roca, del árido fino (como en este caso la roca es de origen granítico, se llamará a éste FILLER GRANITICO, FG), por otro se reemplazará el 100 % de ese pasante en el tamiz IRAM N° 200 por cal hidráulica hidratada (en este caso se llamará FILLER CAL, FC).
- Variación del cemento asfáltico. Se consideran dos tipos de asfaltos, por un lado un cemento asfáltico convencional que clasifica como un CA-30 y un cemento asfáltico modificado denominado según la clasificación como AM-3.

A efectos de poder trabajar con pasa tamiz IRAM N° 200 en la mezcla que solo provenga de la cal, se ha lavado la arena de trituración, utilizando sólo la fracción retenida en la malla de 75 micrones.

La estrategia de valoración de la mezcla se ha decidido ampliar por encima de los parámetros iniciales que permiten establecer los valores referenciales proporcionales de la dosificación. Las determinaciones realizadas son las siguientes:

- Diseño de la mezcla por el método Marshall. Capítulo 1.
- Valoración de la adherencia pasiva entre los áridos y el ligante asfáltico mediante la aplicación del test de Lottman, observando los posibles fenómenos de desprendimiento producidos al someter a las mezclas a las condiciones del ensayo (Norma de aplicación AASHTO T 283 modificada). Capítulo 2.
- Valoración de la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas obtenidas por medio del ensayo de Wheel Tracking (Norma de aplicación Método de ensayo para mezclas bituminosa, parte 22: Ensayo de Rodadura, norma UNE-EN 12697-22. Procedimiento B). Capítulo 3.
- Valoración de la rigidez de las mezclas asfálticas mediante el ensayo de módulo de rigidez por tracción indirecta (según la normativa UNE-EN 12697-26, Anexo C: Tracción Indirecta). Capítulo 4.

- Caracterización universal de ligantes – Método UCL, a fin de valorar aspectos tales como cohesión, envejecimiento, susceptibilidad térmica y adhesividad, en función de la acción del tipo de mezcla y fundamentalmente del tipo de ligante. Capítulo 5.

Considerando los valores obtenidos en cada aspecto de las diferentes mezclas, surgidas de la combinación de las dos variables, se espera encontrar relaciones que permitan realizar un análisis amplio de los efectos producidos en las mezclas cuando se generan cambios en el origen del filler y en el tipo de cemento asfáltico utilizado.

En base a los valores que se obtengan en el proceso, las condiciones iniciales consideradas en este trabajo como una constante de entrada pueden variar. Vale decir que es posible que en función de los valores obtenidos en el conjunto, se pueda pensar en un ajuste del proceso de trituración, en adecuaciones de forma, etc. No se tratan esos cambios aquí, pero se señalan los caminos a explorar para que la mezcla logre un mejor desempeño, analizando el conjunto de variables valoradas.

En esta primer parte del proceso se involucra la caracterización de los áridos, del ligante asfáltico y la utilización de la metodología Marshall para obtener la primera dosificación que cumpla como condición necesaria con los valores habitualmente exigidos para tal fin. Este paso será el inicial para establecer las condiciones básicas de la dosificación.

Se podrían sumar a estos aspectos de diseño granular, volumétricos y mecánicos, criterios tales como los del método Bailey y la metodología SuperPave, a modo de complementar los criterios de selecciones de granulometrías y sus respectivas curvas. Estos aspectos no son tratados en este artículo.

No se generarán cambios en las condiciones físicas y mineralógicas de los áridos, que permitan mejorar el desempeño de la mezcla, como ya se ha señalado. Se asumen como válidos los mismos mas allá de las deficiencias que en algunas de sus propiedades pudieran observarse.

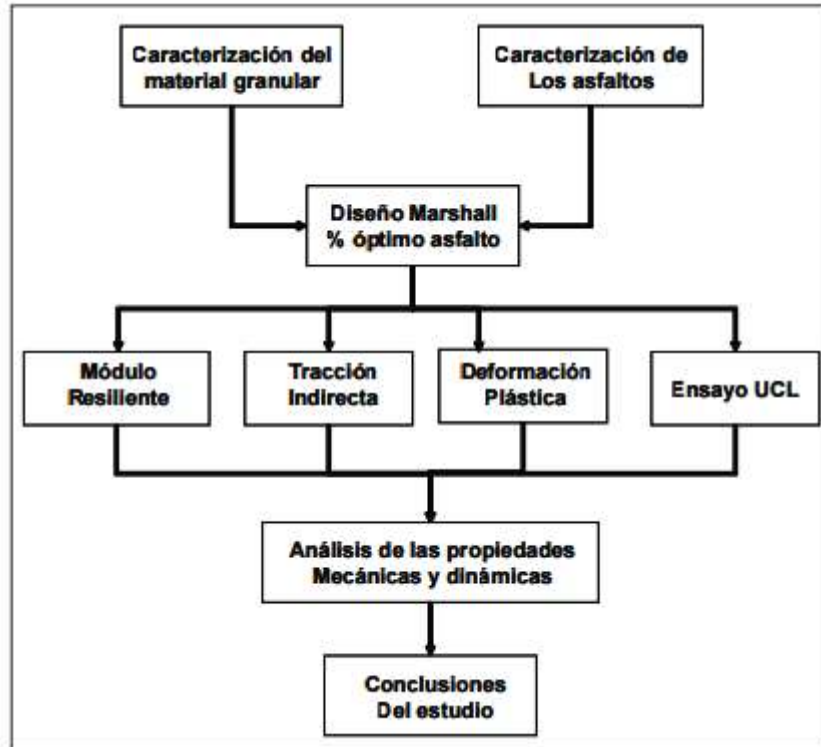
Una vez que se llegue a establecer una dosificación la misma será sometida a valoraciones que complementan en forma suficiente el diseño.

Por lo tanto el proceso de dosificación no generará vuelta atrás en la aceptación de las condiciones de los materiales, sino que se asumen los valores obtenidos como los que hay que utilizar. Esta situación muchas veces se trata de esta forma en los diseños en obra. El grupo de trabajo aclara que se pueden rechazar aquellos materiales con valores considerados inadecuados, promoviendo cambios en los procesos de trituración o en las partidas comerciales adquiridas. En este caso como el objetivo es poder vislumbrar y/o establecer relaciones entre las determinaciones expresadas en cada parte de este documento, se trabajará asumiendo los valores que se hayan obtenido, sin requerir cambios en los mismos.

No se realizarán rediseños de la fórmula obtenida por el método Marshall, en función de los valores obtenidos en estos ensayos complementarios de diseño.

Si bien los mismos se realizan para definir la dosificación final en este caso, alcanza con que pongan de manifiesto los defectos de la dosificación obtenida por el ensayo Marshall.

En el siguiente esquema se puede visualizar una síntesis de las etapas y procesos de la investigación



**Esquema de la Investigación**

## 2. ESPECIFICACION TECNICA REQUERIDA

Los requerimientos se fundamentan en las siguientes especificaciones de carácter mínimo: Exigencias a cumplir por los **áridos gruesos retenidos en el tamiz Nº 4 de 4,75 mm.**

### Exigencias del árido grueso

Ensayo	Norma	Exigencia
Partículas trituradas	IRAM 1851	En capas de rodamiento, como mínimo el 75 % de sus partículas con 2 ó más caras de fractura y el porcentaje restante por lo menos con una. Para el caso de la trituración de rodados, el tamaño mínimo de las partículas a triturar debe ser al menos 3 veces el tamaño máximo del agregado triturado resultante. Para las restantes capas, se admitirá hasta un 25 % de agregados naturales.
Elongación	IRAM 1687	Determinación obligatoria
Índice de lajas	IRAM 1687	Para capas de rodamiento $\leq 25 \%$ Para las restantes capas $\leq 30 \%$
Coeficiente de desgaste Los Ángeles	IRAM 1532	Para capas de rodamiento $\leq 25 \%$ Para las restantes capas $\leq 30 \%$
Coeficiente de coeficiente acelerado (aplicar en mezclas para carpeta de rodamiento)	IRAM 1543	$\geq 0.40$ (valor indicativo)
Durabilidad por ataque de sulfato de sodio	IRAM 1525	$\leq 10 \%$
Polvo adherido	VN E 68-75	$\leq 1.0 \%$ para Capas de rodamiento $\leq 1.5 \%$ para las restantes
Plasticidad	IRAM 10501	No plástico
Micro Deval	IRAM 1762	Determinación obligatoria en mezclas para carpeta de rodamiento.
Relación vía seca-vía húmeda, de la fracción que pasa el tamiz IRAM 0.075	VN E7-65	$\geq 50 \%$ . Si el pasante por el tamiz IRAM 75 $\mu\text{m}$ vía húmeda es mayor del 5 %
Análisis del estado de la roca	IRAM 1702 y 1703	Determinación obligatoria
Limpieza		Exento de terrones de arcilla, materia vegetal ú otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa.
Ensayo de compatibilidad árido-ligante	IRAM 6842	Para el caso en que el ensayo arrojera un valor inferior al 95 % de superficie cubierta, debe incorporarse a la mezcla asfáltica un aditivo mejorador de adherencia que permita superar dicho valor.



## Exigencias a cumplir por los áridos finos pasante el tamiz N° 4 de 4,75 mm

### Exigencias del árido fino

Ensayo	Norma	Exigencia
Procedencia	--	En capas de rodamiento, el árido fino debe proceder de la trituración de roca sana de cantera o grava natural. En capas intermedias y de base donde el uso de árido no triturado está permitido, las características del mismo se fijan en la Especificación Técnica Particular.
Limpieza	--	Exento de terrones de arcilla, materia vegetal ú otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa.
Resistencia a la fragmentación	--	Cuando el material que se triture para obtener árido fino sea de la misma naturaleza que el árido grueso, éste último debe entonces cumplir las condiciones exigidos en la Tabla anterior para el coeficiente de desgaste Los Angeles. Se puede emplear árido fino de otra naturaleza que mejore alguna característica, en especial la adhesividad, pero en cualquier caso procederá de árido grueso con coeficiente de desgata Los Ángeles inferior a veinticinco (25)
Equivalente arena	IRAM 1682	≥ 50 %.
Plasticidad de la fracción que pasa el tamiz IRAM 425 µm	IRAM 10501	No plástico
Plasticidad de la fracción que pasa el tamiz IRAM 75 µm	IRAM 10501	≤ 4 %
Relación vía seca-vía húmeda, de la fracción que pasa el tamiz IRAM 75 µm	VN E 7-65	≥ 50 % si el pasante por el tamiz IRAM 75 µm vía húmeda es mayor del 5 %.
Granulometría	IRAM 1501 IRAM 1505	Debe permitir encuadrar dentro del huso preestablecido la gradación resultante, junto con la composición de las restantes fracciones.

### Exigencias a cumplir por el filler de aporte

Se **define como filler** a la fracción pasante del tamiz IRAM 75 µm de la mezcla compuesta por los áridos y el filler de aporte.

Densidad aparente (D. Ap.) en Tolueno (NLT-176):

$$0,5 \text{ gr/cm}^3 < D. \text{ Ap.} < 0,8 \text{ gr/cm}^3$$

Puede admitirse el empleo de un filler cuya D. Ap. Se encuentre comprendida entre los valores de  $0,3 \text{ gr/cm}^3$  y  $0,5 \text{ gr/cm}^3$  siempre que sea aprobado por la Inspección, previa fundamentación mediante la ejecución de los ensayos y experiencias que estime conveniente.

Se define como filler de aporte, a aquellos que puedan incorporarse a la mezcla por separado y que no provengan de la recuperación de los áridos. Los materiales a utilizar como filler de aporte podrán estar constituidos por los siguientes:

- Cemento Portland
- Calcáreo molido (polvo calizo)
- Cal hidratada
- Cal hidráulica hidratada

Las características granulométricas serán las que se pueden ver en la siguiente tabla.

#### **Granulometría del Filler**

<b>Tamiz IRAM</b>	<b>Porcentaje en peso que pasa</b>
425 $\mu\text{m}$ (N° 40)	100
150 $\mu\text{m}$ (N° 100) mínimo	> 90 %
75 $\mu\text{m}$ (N° 200) mínimo	> 75 %

En cuanto a la mezcla asfáltica especificada deberá encontrarse dentro de los siguientes husos granulométricos en la siguiente tabla.

#### **Entornos granulométricos de la mezcla**

<b>Tamices</b>	<b>CAC D – 19</b>
25 mm (1")	100
19 mm (3/4")	83 – 100
9,5 mm (3/8")	60 – 75
4,75 mm (N° 4)	45 – 60
2,36 mm (N° 8)	33 – 47
600 $\mu\text{m}$ (N° 30)	17 – 29
300 $\mu\text{m}$ (N° 50)	12 – 21
75 $\mu\text{m}$ (N° 200)	5 - 8

En cuanto a los valores volumétricos y mecánicos mínimos planteados en la especificación utilizada, son que se pueden ver en la siguiente tabla.

### Exigencias sobre la mezcla densa

Parámetro		Exigencia
Ensayo Marshall VN E 9	Nº de golpes por cara	75 ó 50, el número de golpes por cara se define en la Especificación Técnica Particular
	Estabilidad (kN)	>9 kN
	Relación Estabilidad-Fluencia (kN/mm)	2,5 – 4,5, en caso de utilizarse ligantes modificados este rango se determina en la Especificación Técnica Particular
	Porcentaje de vacíos en mezcla	3 % – 5 %
	Porcentaje relación betún – vacíos (VAM)	Determinación obligatoria. Se fija en la Especificación Técnica Particular en función del tamaño máximo nominal y el porcentaje de vacíos de diseño.
	Porcentaje relación betún-vacíos	68 % - 78 %
Porcentaje de resistencia conservada mediante el ensayo de tracción indirecta		>80 %
Evaluación de la resistencia al ahuellamiento		Determinación obligatoria en capas de rodamiento e intermedias
Porcentaje de árido fino no triturado en mezcla		0% (caro) en capa de rodamiento ≤ 8 % en capas intermedias y de base
Porcentaje mínimo de cal hidratada en peso sobre mezcla recomendado		1 %
Relación en peso filler/ asfalto		0,8 – 1,3
Proporciones máximas de filler en mezclas, en caso de utilizarse ligantes modificados este límite podrá ser establecido por la Especificación Técnica Particular.		Cv/ Cs < 1,0 Se limita la proporción relativa de rellenos minerales cuya concentración crítica sea inferior a 0,22 (Cs < 0,22) a un máximo de un 2 % en peso de la mezcla

### 3. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES

Como se ha fijado una sistemática de ensayo para explorar los efectos de dos variables principales en las mezclas asfálticas formuladas, también se plantea para las obras que se realicen en estas dos regiones del país, a nivel provincial, se explore la posibilidad de contar con un proceso de caracterización de los materiales que permita arribar al conocimiento de los mismos, no sólo desde el punto de vista físico-mecánico, sino también composicional y reológico.

#### 3.1. Áridos

La fracción gruesa y la fina de los áridos poseen el mismo origen, y fueron extraídas de una cantera ubicada en Sierras Bayas, provincia de Buenos Aires. Resulta de significación conocer las características de la zona de explotación y, al momento de la selección de las fracciones, considerar la potencialidad de acuerdo al tipo de yacimiento a explotar. En este caso se trata de una

formación ígnea, de un macizo rocoso continuo como se puede observar en la siguiente figura. La tecnología para la obtención de fragmentos es la voladura y el proceso de trituración en este tipo de rocas, tanto en forma primaria como secundaria, ha sido con trituradoras de cono. De esta forma se parte de una roca continua y se obtienen agregados gruesos y finos que después del proceso de caracterización pretrológico, físico y mecánico cumplen con las expectativas para el diseño de la mezcla densa tipo CAC D19 planteada.



**Macizo rocoso. Perforaciones para voladura.  
Trituración primaria de cono. Tomado de muestras.**

Una vez tomadas las muestras se confeccionan cortes delgados para el análisis petrológico. Es importante que esta valoración se realice antes de proceder a triturar la roca. En este caso en donde la instalación que se muestra es del tipo fija, se conoce de antemano la tipología general del macizo a explotar y se analizan sólo las posibles variaciones de una composición de roca ya conocida. Aunque en el caso de las experiencias que se realicen en Mendoza, la antelación del proceso de caracterización permitirá considerar qué tipo de técnicas de trituración resultan más efectivas para el tipo de roca a triturar.

Las denominaciones de las fracciones según su tamaño son las siguientes:

#### **Denominación de las fracciones**

<b>Fracción Comercial</b>	<b>N° de Centro</b>
6:20	3092
0:6	3093
Cal	1506

A continuación se conforma el reporte de caracterización de áridos con definiciones básicas de cada ensayo:

- **Definiciones de petrografía**

La **Petrología** estudia las rocas en su conjunto, sus características geométricas de campo, características petrográficas (componentes), composición química detallada de la misma y de los distintos minerales que la constituyen, condiciones físico-químicas de formación y los procesos evolutivos durante su génesis.



Los **estudios petrográficos** abordan la descripción física en términos visuales de las rocas, mediante la microscopía de luz polarizada (esencialmente con luz transmitida, aunque también reflejada, y en algunos casos microscopía electrónica). Estos estudios ofrecen una valiosa información relativa a la *naturaleza de sus componentes (esencialmente minerales), sus abundancias, formas, tamaños y relaciones espaciales*, lo cual permite clasificar la roca y establecer ciertas condiciones cualitativas o semicuantitativas de formación, así como posibles procesos evolutivos.

Los componentes petrográficos son aquellos componentes de la roca que tienen entidad física, tales como granos minerales, asociaciones particulares de determinados minerales, otros fragmentos de rocas relacionados o no genéticamente con la roca que los engloba, componentes de la matriz y cemento, material amorfo o criptocristalino (vidrio volcánico, geles de sílice), espacios vacíos (poros, vacuolas...), fracturas discretas o selladas, etc.

Algunos componentes petrográficos se presentan en todos los tipos de rocas, tales como los granos minerales o poros, que son muy abundantes en las rocas sedimentarias e ígneas volcánicas, pero son muy pequeños y escasos en rocas metamórficas e ígneas plutónicas; otros se presentan sólo en algunos tipos, como el vidrio volcánico en las rocas magmáticas volcánicas; otros se presentan en cualquiera de los tipos rocosos pero sólo ocasionalmente, como las fracturas.

La norma IRAM 1571 clasifica y describe las rocas más comunes y los minerales constituyentes. La IRAM 1649 describe el examen petrográfico de los áridos utilizados en hormigones. La IRAM 1702 analiza el estado físico de la roca donde se extraen agregados para uso vial y la IRAM 1703 describe las características basadas en el análisis del estado de la roca.

- **Definiciones de los ensayos físicos y marco normativo**

**Ensayo de Peso Específico Aparente:** De acuerdo a la Norma VN – E13 - 67, de Vialidad Nacional de 1998 (versión vigente) define al ensayo: como la relación del peso de un volumen del material seco a una temperatura dada y el peso de igual volumen de agua destilada a esa temperatura. El volumen incluye los poros impermeables del material.

La Norma IRAM 1533 también define a este ensayo.



**Ensayo de Peso Específico Saturado:** De acuerdo a la Norma VN – E13 - 67, de Vialidad Nacional de 1998 (versión vigente) define al ensayo como la relación entre el peso saturado a superficie seca de un volumen del material a una temperatura dada y el peso de igual volumen de agua destilada. El volumen incluye los vacíos permeables e impermeables del material.

La Norma IRAM 1533 también define a este ensayo.



**Ensayo de Peso Específico Seco:** De acuerdo a la Norma VN – E13 - 67, de Vialidad Nacional de 1998 (versión vigente) define al ensayo como la relación entre el peso de un volumen del material seco a una temperatura dada y el peso de igual volumen de agua destilada estando el material en condición de saturado a superficie seca. El volumen incluye los vacíos permeables e impermeables del material.

La Norma IRAM 1533 también define a este ensayo.



**Ensayo de Peso Específico Aparente y Absorción de Agregados Pétreos finos.** De acuerdo a la norma VN-E14-67 se define el ensayo y las condiciones de humedad con el voluménometro de Lechatellier. Se determinan bajo tres condiciones, real, saturado superficie seca y aparente. El **Peso Específico Aparente de Rellenos Minerales** lo dispone la VN-E15-89.



**Ensayo de Absorción de Agregados Pétreos Gruesos:** De acuerdo a la Norma VN–E13 - 67, de Vialidad Nacional de 1998 (versión vigente) define al ensayo como el volumen de los vacíos permeables del material, expresados en porcentajes del peso en el aire del mismo, secado en estufa a 105/110 °C hasta constancia de peso.

La Norma IRAM 1533 también define a este ensayo.



**Peso por Unidad de Volumen Suelto:** Se realizó el ensayo en base a lo estipulado por la Norma IRAM 1548

Expresa el volumen ocupado por el agregado en condiciones de vertido sin energía de por medio.

**Peso por Unidad de Volumen Compactado:** Se realizó el ensayo en base a lo estipulado por la Norma IRAM 1548

Peso que ocupa el árido considerando que se ejerce una acción de acomodamiento de las fracciones.



**Determinación del Polvo Adherido:** De acuerdo a la Norma VN – E68 - 75, de Vialidad Nacional de 1998 (versión vigente) define al ensayo como la cantidad de polvo adherido a la superficie de los agregados pétreos que no se desprende totalmente por simple tamizado, referido a un área superficial total.



**Material Fino que Pasa el Tamiz IRAM 75 µm, por Lavado:** La norma IRAM 1540 establece el método de separación de las partículas arcillosas y de otra naturaleza que estén adheridas a la superficie del agregado, así como los materiales solubles, mediante un lavado repetido con agitación y posterior decantación.



**Resistencia al Desgaste con la Máquina Los Ángeles:** La norma IRAM 1532 establece el método de ensayo de desgaste de los agregados gruesos. Se debe tener en cuenta a su vez la norma IRAM 1501, inciso 6 para obtener las distintas fracciones de agregado a utilizar. En base a ello se tienen 7 curvas con distinto peso de las muestras como así también el total de la carga abrasiva. Se usa la máquina Los Ángeles con el fin de determinar la pérdida en peso del material analizado.



**Durabilidad por Ataque con Sulfato de Sodio:** En la norma IRAM 1525 se distinguen entre agregados finos y gruesos para la realización del ensayo. A su vez se puede realizar una determinación cuantitativa y una cualitativa (aquí se dividen en grupos por deterioros. Estos deterioros se clasifican en: fisuración, desmenuzamiento, rotura, escamado y se debe registrar el número de partículas que representan cada deterioro.



**Determinación del Índice de Lajosidad:** La norma VN-E38-86 define como el Índice de Lajosidad de una fracción de agregados al porcentaje en peso de las partículas que la forman en cuya dimensión mínima (espesor) es inferior al  $\frac{3}{5}$  de la dimensión media de la fracción, definición que coincide con la Norma IRAM 1687 apartado 1.



**Determinación del Índice de Elongación (agujas):** La norma VN-E38-86 define como el Índice de Elongación de una fracción de áridos al porcentaje en peso de las partículas que la forman en cuya dimensión máxima (longitud) es superior al  $\frac{9}{5}$  de la dimensión media de la fracción, definición que coincide con la IRAM 1687 apartado 2.



**Ensayo de Cubicidad:** La norma IRAM 1681 define al factor de cubicidad al valor numérico que permite formular un juicio sobre las características de forma de las partículas de un agregado grueso. Este factor de cubicidad toma valores próximos a uno para agregados en cubicidad óptima y valores próximos a cero para los de cubicidad deficiente (partículas sumamente achatadas o lajositas).



**Análisis Granulométrico:** Es por ello que los tamices no responden a una normativa específica. La norma IRAM 1677 establece los requisitos granulométricos que deben cumplir los agregados gruesos para uso vial. La norma IRAM 1678 para los agregados gruesos para uso vial en mezclas bituminosas





### **Sustancias Nocivas. Materiales deletéreos:**

Basado en la norma ASTM C142 y AASHTO T112, Se determina la proporción de terrones de arcilla y partículas deleznable (friables) en los agregados.



**Ensayo de equivalente arena:** Este ensayo muestra un método para determinar el equivalente de arena de la fracción granulométrica de los áridos finos.

Se fundamenta en liberar de la muestra de ensayo los posibles recubrimientos de arcilla adheridos a las partículas de arena mediante la adición de una solución coagulante que favorece la suspensión de las partículas finas sobre la arena, determinando su contenido respecto de las partículas de mayor tamaño. Norma IRAM 1682.



**Material de Relleno Mineral:** Método de determinación de la Relación Crítica ("Concentración Crítica") es lo que define la Norma IRAM 1542. Define la Concentración Crítica la cual es la relación entre el volumen real del material de relleno ("filler") y el volumen aparente del mismo en una mezcla bituminosa, por encima de la cual la mezcla comienza a perder su carácter viscoso.



**Proporción de Agregado Grueso con dos o más Caras de Fractura por Trituración.** La Norma IRAM 1851 permite determinar una característica específica de los agregados gruesos obtenidos por trituración, que se emplean en numerosos materiales granulares utilizados en la construcción de carreteras, como estabilizados granulares, algunos tratamientos superficiales y lechadas, y en las mezclas asfálticas. Se define como cara de fractura de una partícula al plano de fractura presente en la misma, cuya dimensión lineal mayor es, como mínimo, 1/3 de la longitud máxima de la partícula considerada.



### **Agregado grueso 6:20**

- **Análisis petrológico**

Se analizó la fracción 6:20 mediante un microscopio Olympus BX 51. Tal como lo cita la norma IRAM 1517 en su anexo, las observaciones petrográficas son orientativas ya que solo en servicio se verán verdaderamente los resultados de los materiales en su conjunto.

Del análisis petrográfico se desprende que se trata de una muestra de textura granuda de grano medio y coloración gris.

Al microscopio, puede observarse dicha textura granuda formada por una abundante proporción de tablillas de Plagioclasa muy delgadas, en las que pueden apreciarse abundantes flexuras (deformación de las capas geológicas que se han llenado en forma discontinua) producto de una deformación.

En algunos casos estos minerales presentan signos de exsolución (separación de dos minerales diferentes al enfriarse el mineral compuesto que los contenía) a modo de "islas", lo cual se relaciona con cambios composicionales.

Otro mineral presente es el cuarzo, en forma de grandes cristales con bordes irregulares, extinción ondulante y pequeñas fracturas internas (intracristalinas) también compatibles con rasgos de deformación mecánica.

Ocupando los espacios libres entre cristales de mayor tamaño, se desarrolla un mosaico granular de cuarzo recristalizado de menor tamaño de grano.

En algunos bordes de cristales de cuarzo también se observan "mirmequitas" las cuales tienen su origen en reacciones químicas entre cristales vecinos.

Junto con el cuarzo en mosaico se observa la presencia de biotita, algo deformada, flexurada y cristales de anfíbol.

La alteración es muy débil, está representada por la presencia de clorita asociada a biotita, y posible sericita vinculada a la plagioclasa. Como minerales accesorios se observa circón y titanita.

En la siguiente imagen se observa lo visto en el microscopio óptico y abajo está la categorización:

## Clasificación "granitoide de composición tonalítica"

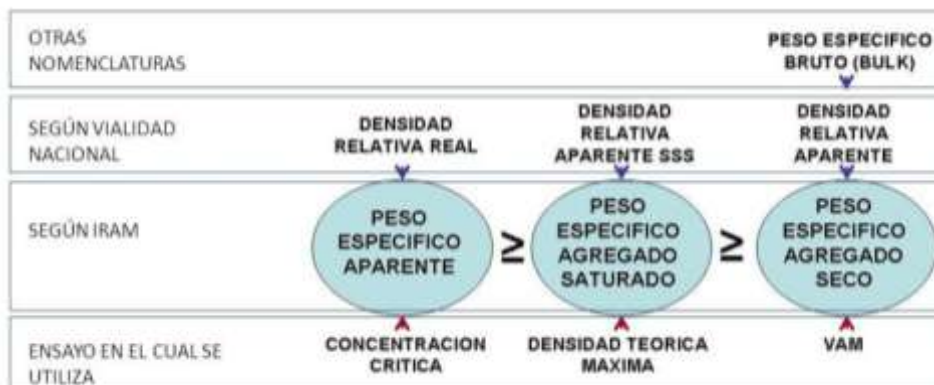


### Microfografía en el microscopio

La caracterización petrológica del árido fino fue coincidente, ya que provienen del mismo sustrato rocoso y del mismo sitio de explotación.

- **Ensayos físicos**

Resulta importante poder caracterizar las fracciones intervinientes bajo una normativa que sea coherente en cuanto a nomenclatura y definición de los parámetros que se miden. Existen marcos normativos aplicables que no siempre resultan homogéneos. Estas familias de normas provienen de la Dirección Nacional del Vialidad y de IRAM. Se señala especialmente las definiciones un tanto confusas que se generan principalmente a la hora de considerar los pesos específicos. Se destacan así las siguientes nomenclaturas definidas en el siguiente cuadro.



### Relaciones y usos de los pesos específicos de los agregados

A continuación se pueden observar las determinaciones realizadas, con su respectivo marco normativo, considerándose la información fundamental

requerida para la correcta valoración de las propiedades de las fracciones gruesas, finas y filler. Se pueden observar las imágenes del árido grueso, fino, filler cal y filler granítico.



**Árido Grueso**



**Árido Fino**



**Filler granítico**



**Filler Cal**

### Determinaciones físicas sobre Áridos Grueso, Fino y Filler

Determinaciones	Norma	Unidades	Árido Grueso	Árido Fino	Filler CAL
Peso específico aparente	VN-E13-67 IRAM 1533	g/cm <sup>3</sup>	2.753	2.774	
Peso específico saturado	VN-E13-67 IRAM 1533	g/cm <sup>3</sup>	2.720	2.699	
Peso específico seco	VN-E13-67 IRAM 1533	g/cm <sup>3</sup>	2.716	2.640	2.618
Absorción al agua	VN-E13-67 IRAM 1533	%	0.32	1.10	
PUV suelto	IRAM 1548	g/cm <sup>3</sup>	1.374	1.599	
PUV compactado	IRAM 1548	g/cm <sup>3</sup>	1.552	1.803	
Polvo adherido	VN-E68-75	ml	0.8	--	
Porcentaje de finos en el tamiz 200	IRAM 1540	%	0.2	8.9	
Desgaste Los Ángeles	IRAM 1532	%	20.4	--	
Índice de lajosidad	IRAM1687/1881 VN-E38-66	%	20.2	--	
Índice de elongación	IRAM1687/1881 VN-E38-66	%	22.5	--	
Durabilidad en sulfato de sodio 5 ciclos	IRAM 1525	%	2.1	--	
Equivalente arena	IRAM 1682	%	--	85.0	
Granulometría	IRAM 1677	Tamices % pasa ac.			
		3/4"	99.8	100	100
		5/8"	80.0	100	100
		1/2"	60.7	100	100
		3/8"	33.4	100	100
		1/4"	5.5	100	100
		4	2.5	96.7	100
		8	1.0	70.6	100
		30	0.6	31.7	100
		50	0.4	24.2	99.7
200	0.2	8.9	82.4		

### 3.2. Asfaltos

Las propiedades reológicas de los asfaltos dependen de las proporciones en que están presentes sus componentes, las cuales varían de acuerdo con el origen de los crudos de petróleo. El comportamiento reológico del ligante tiene una influencia significativa en las propiedades de la mezcla asfalto-agregado (ahuellamiento, fatiga y susceptibilidad térmica).

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales en el tiempo. Los asfaltos son materiales cuyo comportamiento reológico depende principalmente de la temperatura y la velocidad de carga.

Los principales problemas que se presentan en los pavimentos asfálticos en servicio son la resistencia a la fatiga y la deformación permanente, como consecuencia de una inadecuada dosificación ligante-agregado, sus interacciones, el método y la temperatura de colocación, mezclado y compactación de la mezcla asfáltica.

Las propiedades deseables en las mezclas asfálticas son: resistencia al desplazamiento, a la fatiga, al deslizamiento, a la deformación plástica, que sean impermeables, durables y posean grado adecuado de flexibilidad. El desempeño, durabilidad y resistencia de la mezcla asfáltica depende directamente de las propiedades del ligante y el agregado, su interrelación, y de los procesos de elaboración, colocación y compactación.

Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original (las cuales dependen de su contenido de asfaltenos, resinas y aceites), mejorando así el desempeño del pavimento a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades, la mayoría de ellos intenta reducir la dependencia de la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica.

El asfalto se clasifica como un material viscoelástico porque exhibe características viscosas y elásticas simultáneamente, es decir que es un material de comportamiento intermedio entre el sólido de Hooke (elástico) y el líquido de Newton (viscoso). A temperaturas elevadas ( $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), el cemento asfáltico se comporta como un fluido viscoso (muestra la consistencia de un lubricante utilizado como aceite para motores), mientras que a bajas temperaturas ( $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se comporta casi como un sólido elástico (como una banda de goma). Cuando se aplica una carga, el ligante se estira o comprime adoptando diferentes formas. Cuando se retira la carga, retorna a su forma original. A una temperatura intermedia, que es la condición prevista para el pavimento, el cemento asfáltico tiene características de fluido viscoso y sólido elástico.

Para establecer las temperaturas de mezclado y compactación para el diseño de las mezclas asfálticas se busca el empleo de temperaturas equiviscosas, con el fin de minimizar el efecto que puede causar la rigidez del ligante sobre las propiedades volumétricas de la mezcla durante el mezclado en caliente en

planta, independiente del tipo de ligante, original o modificado y de la gradación del agregado.

Se puede utilizar el viscosímetro rotacional (RTV) consiste en un cilindro rotacional coaxial que mide la viscosidad por medio de un torque requerido para rotar un eje sumergido en la muestra de asfalto y permite determinar la curva reológica del asfalto. Para caracterizar las propiedades viscoelásticas de los asfaltos, se recomienda el uso del reómetro de corte dinámico (DSR), el cual mide la respuesta de la deformación específica de corte del espécimen sometido a un torque; y finalmente el reómetro de viga flexible (BBR) permite caracterizar las propiedades elásticas del asfalto a bajas temperaturas.

El Instituto del Asfalto (Asphalt Institute) recomendó en 1962 emplear la viscosidad Saybolt Furol del asfalto como criterio fundamental para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla. Las correspondientes a un rango de viscosidad de 170 +/- 20 centistokes como temperatura de compactación, y la temperatura de mezclado de 280 +/- 30 centistokes.

Estos valores siguieron vigentes incluso durante el furor de la década de los noventa de las especificaciones SuperPave para el diseño de mezclas asfálticas, en las cuales se mantuvieron los valores establecidos por el Instituto del Asfalto en los sesenta, pero empleando para su determinación al viscosímetro rotacional y cambiando las unidades de viscosidad en centistokes por unidades del Sistema Internacional: (0, 17 +/- 0,02) Pa.s para la temperatura de mezclado y (0,28 +/- 0,03) Pa.s para la temperatura de compactación.

Estos valores han sido de uso generalizado desde entonces y hacen parte de las especificaciones de la norma ASTM D 2493 "Standard viscosity-temperature chart for asphalts", incluso aparecen en la actualización de 2006 del Instituto del Asfalto.

Yildirim, Ideker y Hazlett (2006) realizaron un estudio con 50 ligantes asfálticos modificados y sin modificar disponibles comercialmente, para verificar la validez de la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación por medio de las curvas reológicas de acuerdo con las directrices de la norma de la American Society for Testing and Materials ASTM D 2493. Los autores utilizaron la ley de potencia para establecer una relación lineal entre los valores de viscosidad (log-log) y los de temperatura (log), concluyendo que los valores de temperatura de mezclado y compactación obtenidos por métodos convencionales para los asfaltos modificados, son más altos de lo requerido en la vía.

Otro trabajo, sobre las diferencias entre las temperaturas de mezclado y compactación de asfaltos, es el de Delmar Salomón Coe y Huachun Zhai Cui (2004), quienes emplearon la viscosimetría rotacional para determinar la energía de activación de flujo de ligantes asfálticos modificados y sin modificación, provenientes de diferentes crudos. A partir de la ecuación de

Arrhenius, establecieron que la energía de activación de flujo para todos los ligantes asfálticos se encuentra entre 44 kJ/mol y 90 kJ/mol, estableciendo que a partir de fuentes de asfaltos y tipos de polímeros diferentes resultan energías de activación de flujo distintas. Una explicación posible a este hecho tiene que ver con la diversidad presente en la composición de los ligantes asfálticos y con la interacción entre los componentes de polímeros y asfaltos.

Además, encontraron que la energía de activación de flujo disminuye cuando el contenido polimérico rebasa la concentración de polímero crítica, lo que se debe en principio a la variación de interacciones entre las moléculas de los polímeros y los componentes de los asfaltos, y aumenta debido al envejecimiento por oxidación, ya que a partir de la oxidación se incrementa el número de moléculas polares en los ligantes asfálticos, lo que resulta en un incremento de las fuerzas intermoleculares.

La composición química (estructura y asociaciones moleculares) del ligante asfáltico influye en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, así como en su desempeño, por lo que su estudio reviste gran importancia. Así mismo, las propiedades reológicas del asfalto dependen de las proporciones en que están presentes sus componentes, las cuales varían de acuerdo con el origen de los crudos de petróleo.

Históricamente se han estudiado dos modelos principales de estructura química del asfalto: el modelo micelar de Nellensteyn y el modelo continuo SHRP (Wahr, 2002). En el modelo micelar, se supone que el asfalto está formado por grandes moléculas de asfaltenos rodeadas por aromáticos polares y no polares, suspendidas en aceites saturados, todos los constituyentes peptizados en una solución coloidal. Los saturados y aromáticos se pueden considerar como los medios de dispersión de los aromáticos polares, que son los responsables del comportamiento viscoelástico del asfalto a temperatura ambiente. Los modelos de SHRP no están de acuerdo con el modelo micelar de "supermolécula"; por el contrario, se considera al asfalto simplemente como un compuesto de dos fases: una polar y una no polar. Sus propiedades dependen de la compatibilidad y habilidad de los constituyentes para coexistir sin transformación de fase en el tiempo, también están influenciadas por el grado de aromaticidad. La estructura química primaria de los cementos asfálticos incluye: anillos aromáticos, anillos cíclicos (aromáticos nafténicos), alifáticos (alcanos), heteroátomos (O, N, S) que forman asociación entre moléculas (inducen polaridad) e influyen en forma significativa en el comportamiento mecánico del asfalto, y metales (Va, Ni, Fe) que tienen influencia sobre el envejecimiento y la huella dactilar del asfalto.

Estudios del Dr. Bahia establecen que en el caso de los asfaltos modificados es posible y conveniente considerar, en especial para el rango de los asfaltos modificados tipo AM-3 (en Argentina), las siguientes temperaturas de mezclado y de compactación:

T Mezclado: 175 ° C  
T compactación: 165 °C

SHRP genera una clasificación de los asfaltos según la ASTM D 6373 basándose en las propiedades reológicas que se relacionan con el desempeño de las mezclas asfálticas.

Esta norma permite clasificar a los asfaltos según grados de desempeño, con rangos de temperatura máximos y mínimos en los cuales la mezcla resiste a las fallas típicas de los pavimentos. El PG (por sus siglas en inglés Performance Grade – Grado de Performance, en español) se define con dos números, entre los cuales el asfalto le brinda a la mezcla la potencialidad de no fallar por deformaciones permanentes, fisuras por fatiga o fisuración térmica.

Para ello también se propone una forma de conocer las temperaturas extremas de un pavimento en una determinada condición geográfica.

Se convierten así datos históricos de la temperatura del aire obtenidos de estaciones meteorológicas en temperaturas del pavimento. La temperatura alta se define como el valor promedio de temperaturas durante siete días consecutivos que resulta el mayor promedio respecto a los demás conjuntos promedios de siete días dentro de un año de mediciones. Se calcula el promedio histórico y la desviación estándar de la muestra. Para la temperatura baja se considera las mínimas absolutas de cada año y se calcula el promedio y la desviación estándar de la muestra.

En las tablas siguientes se pueden observar los rangos de temperaturas y las ecuaciones de conversión para alta y bajas temperaturas.

### Rangos de PG del asfalto

Temperatura de Alta (°C)						
46	52	58	64	70	76	82
Temperatura de Baja (°C)						
-4	-10	-16	-22	-28	-34	-40



## Ecuaciones de conversión de temperaturas

$$T_{alta} = 54,32 + 0,78.T_{aire} - 0,0025.Lat^2 - 15,14.log_{10}(H + 25) + z(9 + 0,61.\sigma_{aire})^{0,5}$$

$$T_{baja} = -1,56 + 0,72.T_{aire} - 0,004.Lat^2 + 6,26.log_{10}(H + 25) - z(4,4 + 0,52.\sigma_{aire})^{0,5}$$

donde:

$T_{alta}$ : temperatura del pavimento para altas temperaturas.

$T_{baja}$ : temperatura del pavimento para bajas temperaturas.

$T_{aire}$ : temperatura del aire en la superficie del pavimento.

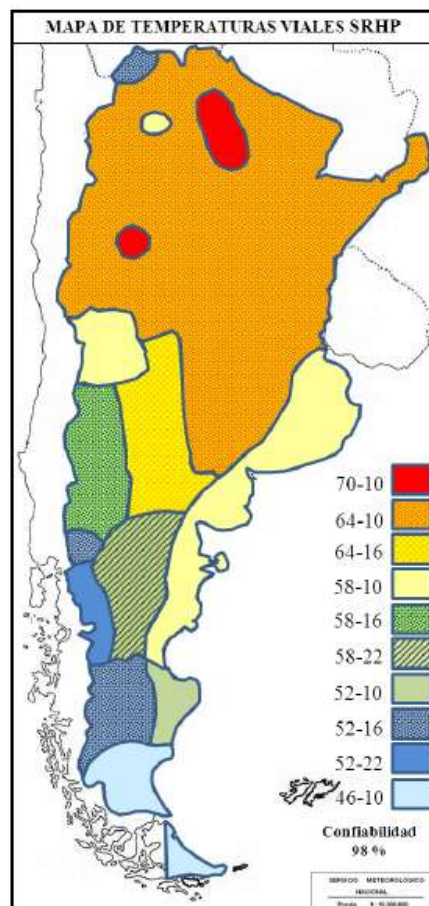
$Lat$ : latitud geográfica en la que se ubica el pavimento.

$H$ : profundidad en mm desde la superficie a la que se quiere conocer la temperatura del pavimento.

$z$ : coeficiente estadístico a obtener de tabla para distribución normal en función de la confiabilidad ( $z = 2,055$  para 98 % de confiabilidad).

$\sigma_{aire}$ : desviación estándar de las mediciones de temperatura del aire.

losco y Agnus Dei realizaron el mapa de temperaturas de Argentina en el LEMIT, dando como resultados los siguientes:



Mapa de PG en Argentina

Para caracterizar los asfaltos de esta forma se han utilizado para los parámetros reológicos el viscosímetro rotacional (LEMaC) y el reómetro de corte (YPF)



**Vista del viscosímetro rotacional y reómetro de corte**

Se utilizaron dos tipos de asfaltos

- asfalto CA-30
- asfalto modificado AM-3

Los dos cementos asfálticos utilizados se caracterizan en base a los siguientes parámetros, los cuales permiten clasificarlos y obtener las temperaturas de mezclado y de compactación.

#### **Caracterización el ligante convencional CA-30:**

<b>CARACTERISTICA</b>	<b>VALOR</b>
Denominación comercial	ASFASOL 30
Clasificación por viscosidad (IRAM 6835)	CA - 30
Punto de Ablandamiento (IRAM 6841)	51 (°C)
Penetración (IRAM 6576)	60 (0,1 mm)
Índice de Penetración (IRAM 6604)	- 0,5
Grado PG	70 -16

<b>Ensayo de Viscosidad Brookfield</b>		<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
60 °C	0,3 rpm, vel. fluir 0,1, torque 34,0, aguja SC4-Nº 27	dPa.s	2800
	0,5 rpm, vel. fluir 0,17, torque 57,0, aguja SC4-Nº 27	dPa.s	2810
	0,7 rpm, vel. fluir 0,24, torque 79,8, aguja SC4-Nº 27	dPa.s	2820
	0,8 rpm, vel. fluir 0,27, torque 91,2, aguja SC4-Nº 27	dPa.s	2800
135 °C	100 rpm, vel. fluir 34,0, torque 19,8, aguja SC4-Nº 27	mPa.s	400
	140 rpm, vel. fluir 47,6, torque 28,8, aguja SC4-Nº 27	mPa.s	410
	150 rpm, vel. fluir 51,0, torque 29,7, aguja SC4-Nº 27	mPa.s	410
	200 rpm, vel. fluir 68,0, torque 39,7, aguja SC4-Nº 27	mPa.s	409

En base a los resultados de las viscosidades, se recomienda:

**Temperatura compactación: 148 °C**  
**Temperatura mezclado: 160 °C**

Los valores de **caracterización del AM-3** son las siguientes:

<b>Características</b>	<b>Norma IRAM</b>	<b>Valor</b>
Penetración	6576	52 (0.1 mm)
Punto de Ablandamiento	6841	80 (°C)
Viscosidad a 170 °C	6837	5.8 (dPa.s)
Recuperación Elástica por Torsión total (a 25°C)	6830	71 (%)
DSR s/m virgen a 76 °C G* δ G*/senδ		1.05 kPa 66.5 ° 1.15 kPa
DSR s/m envejecida G* δ G*/senδ		2.56 kPa 68.8 ° 274 kPa
<b>Grado PG</b>		<b>76 - 22</b>
<b>Clasificación</b>	6596	<b>AM - 3</b>

**Temperatura compactación: 165 °C**  
**Temperatura mezclado: 175 °C**

#### 4. DISEÑO DE MEZCLAS POR EL METODO MARSHALL

Las mezclas asfálticas han sido típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento. De cualquier manera, aun con la correcta conjunción de estos procedimientos y el desarrollo del criterio de diseño de la mezcla, no se pueden asegurar siempre buenos grados de desempeño de las mismas.

##### **El método Marshall**

El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5"), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa.

Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto-agregado (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad - análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y fluencia de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.

Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado; o más simplemente, parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado (vacíos de aire (Va); vacíos en el agregado mineral (VAM); vacíos llenados con asfalto (RBV); y contenido de asfalto efectivo, descontando el porcentaje de asfalto absorbido por los áridos, proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica. Es necesario entender las definiciones y los procedimientos analíticos descritos, para tomar decisiones concernientes a la selección del diseño de mezclas asfálticas. La información aplica tanto a mezclas elaboradas en laboratorio, como a probetas asfálticas extraídas en el campo.

El agregado mineral es poroso, y puede absorber agua y asfalto a un grado variable. Además, el cociente de absorción entre el agua y el asfalto varía con cada agregado.



### Esquema de vacíos del agregado y del sistema agregado asfalto

En el procedimiento de ensayo se pondrá en juego este nivel de diseño volumétrico, considerando las determinaciones realizadas sobre los áridos y sobre el asfalto.

Para las dosificaciones se ha considerado una combinación granular de agregados que permita entrar en mezcla del tipo CAC D19, como ya se

señalara. Las mezclas diseñadas por la metodología Marshall, son un total de cuatro, las cuales se enuncian a continuación:

- **Mezcla 1. Con 100 % FG proveniente de la arena de trituración con CA-30**
- **Mezcla 2. Con 100 % FG proveniente de la arena de trituración con AM-3**
- **Mezcla 3. Se reemplaza el PT 200 de la arena de trit. Por FC con CA-30**
- **Mezcla 4. Se reemplaza el PT 200 de la arena de trit. Por FC con AM-3.**

**FG: Filler Granítico**  
**FC: Filler Cal**

Se trabajó con cinco puntos de la dosificación Marshall para cada una de ella, se ha considerado el porcentaje de asfalto absorbido por los agregados para la corrección de los vacíos del agregado mineral y se ha valorado el cumplimiento de los parámetros de concentración volumétrica y concentración crítica para que cumplan con los valores exigidos en las especificaciones.

En la siguiente tabla se puede observar la combinación granular que se ha mantenido constante, reemplazando el pasante en el tamiz IRAM N° 200 de las mezclas 1 y 2 por cal hidráulica hidratada. Cuando se produce el reemplazo del filler se mantiene la dosificación de los áridos lavando la arena 0:6 y reemplazando su pasante en el tamiz IRAM N° 200 por la cal, con lo cual se mantienen constantes las proporciones de gruesos y finos para las cuatro mezclas señaladas, y la curva granular de la combinación. Se destaca aquí que las granulometrías de los agregados utilizados son las que se obtuvieron en el proceso de trituración. Después de recorrido el proceso de diseño que se enunciara en la introducción del presente trabajo, no se ha procedido a la corrección de los tamaños de los agregados como una variable de ajuste. Con ello se pretende observar que el cumplimiento de los parámetros obtenidos en el ensayo Marshall, deja abierto el cumplimiento o no del resto de las variables evaluadas en las pruebas de diseño incorporadas por medio el test de Lottman, ahuellamiento, módulo de rigidez y método UCL.

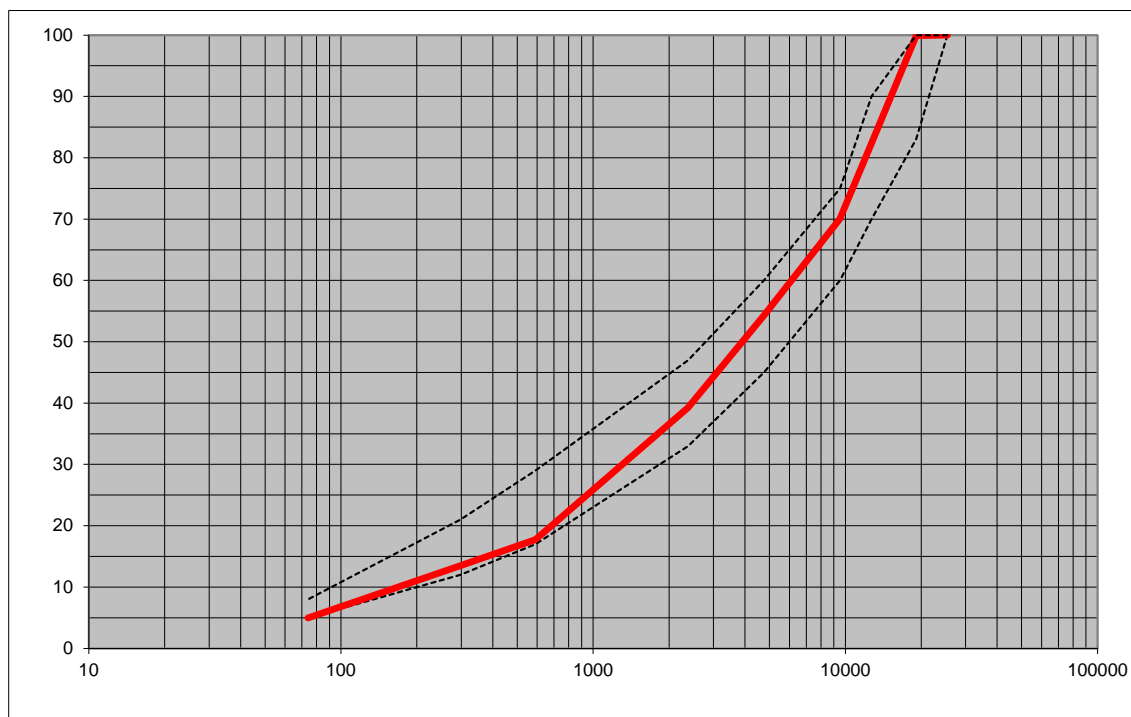
- Mezcla 1. Con 100 % FG proveniente de la arena de trituración con CA-30

### Dosificación de áridos

MATERIALES	%
------------	---

Piedra partida 6:20	<b>45,0</b>
Arena de trituración 0:6	<b>55,0</b>
TOTAL	<b>100,0</b>

Tamiz	Abert.	6:20	0:6	F	C. Min	CURVA	C. Max
<b>1</b>	25400	100,0	100,0	100,0	100	<b>100,0</b>	100
<b>3/4</b>	19100	99,8	100,0	100,0	83	<b>99,9</b>	100
<b>1/2</b>	12700	60,7	100,0	100,0	70	<b>82,3</b>	90
<b>3/8</b>	9520	33,4	100,0	100,0	60	<b>70,0</b>	75
<b>4</b>	4760	2,5	96,7	100,0	45	<b>54,3</b>	60
<b>8</b>	2380	1,0	70,6	100,0	33	<b>39,3</b>	47
<b>30</b>	590	0,6	31,7	100,0	17	<b>17,7</b>	29
<b>50</b>	297	0,4	24,2	99,7	12	<b>13,5</b>	21
<b>200</b>	74	0,2	8,9	82,4	5	<b>5,0</b>	8



## Dosificación de asfalto

Se decide realizar pastones de prueba con las siguientes dosificaciones de cemento asfáltico.

Material	Áridos (%)	Asfalto	Asfalto	Asfalto	Asfalto
6:20	45,0	43,02	42,93	42,84	42,75
0:6	55,0	52,58	52,47	52,36	52,25
CA - 30		<b>4,4</b>	<b>4,6</b>	<b>4,8</b>	<b>5,0</b>
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Los resultados obtenidos son los siguientes:

### Con 4,4 % de asfalto

#### ANALISIS POR METODO MARSHALL

Ensayo efectuado bajo Norma VN-E9-86, VN-E27-84 y VN-12-67.

% cemento asfáltico:

PROB	Dm (gr/cm <sup>3</sup> )	E (kg)	F (mm)	V (%)	Rel E/F (kg/cm)
1	2,413	934	3,1	4,5	3013
2	2,411	914	3,1	4,6	2948
3	2,411	922	3,0	4,6	3073
PROMEDIO	2,412	923	3,1	4,5	3012
MEDIA	2,412	923	3,1	4,526	3011
DESVIO ESTANDART	0,0012	10,1	0,06	0,05	62,5
COEFICIENTE DE VARIACION	0,0479	1,1	1,88	1,01	2,1

Densidad Rice (g/cm<sup>3</sup>) =

VAM =

Relación B/V =

Relación E/F (kg/cm) =

## DETERMINACIÓN DEL VAM

Peso específico asfalto ( $G_b$ ): 1,000

Peso Específico Agregado Seco

6:20 ( $G_1$ ): 2,716

0:6 ( $G_2$ ): 2,640

Dosificación

6:20 ( $P_1$ ): 43,0

0:6 ( $P_2$ ): 52,6

Asfalto ( $P_b$ ): 4,4

Datos Rice

Peso muestra suelta prob 100 cm<sup>3</sup> ( $W_{mm}$ ): 240,2  $100 \cdot G_{mb}$

Densidad Rice ( $D_r$ ): 2,526

Volumen de la muestra suelta ( $V_{mm}$ ): 95,1  $W_{mm}/D_r$

Densidad Marshall promedio

Peso específico bruto de la prob. comp. ( $G_{mb}$ ): 2,402

Peso específico del agregado seco total

Peso específico bruto del agregado total ( $G_{sb}$ ): 2,674  $\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4}}$

Determinación de volúmenes y pesos de una probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Peso de la probeta ( $W$ ): 240,2  $100 \cdot G_{mb}$

Peso de asfalto ( $W_b$ ): 10,6  $(P_b \cdot W)/100$

Peso del agregado ( $W_s$ ): 229,6  $W - W_b$

Volumen de asfalto ( $V_b$ ): 10,6  $W_b/G_b$

Peso específico efectivo del agregado total

Peso esp. Efect. Agregado total ( $G_{se}$ ): 2,717  $(W_{mm} - W_b)/(V_{mm} - V_b)$

Asfalto absorbido en porcentaje en peso del agregado

Porcentaje asfalto absorbido ( $P_{ba}$ ): 0,59  $100 \cdot \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b$



Volumen agregado en probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Volumen de agregado (V<sub>sb</sub>):

85,9 W<sub>s</sub>/G<sub>sb</sub>

Vacios del agregado mineral

VAM:

14,11

$$\frac{100(G_{sb} - G_{mb}) + G_{mb}P_b}{G_{sb}}$$

### Con 4,6% de asfalto

#### ANALISIS POR METODO MARSHALL

Ensayo efectuado bajo Norma VN-E9-86, VN-E27-84 y VN-12-67.

% cemento asf.: 4,6

PROB	Dm (gr/cm <sup>3</sup> )	E (kg)	F (mm)	V (%)	Rel E/F (kg/cm)
1	2,408	1025	3,6	4,4	2847
2	2,408	1032	3,7	4,4	2789
3	2,407	1043	3,7	4,5	2819
PROMEDIO	2,408	1033	3,7	4,5	2818
MEDIA	2,408	1033	3,7	4,458	2818
DESVIO ESTANDART	0,0006	9,1	0,06	0,02	29,0
COEFICIENTE DE VARIACION	0,0240	0,9	1,57	0,51	1,0

Densidad Rice (g/cm<sup>3</sup>) =

2,520

VAM =

14,1

Relación B/V =

78,7

Relación E/F (kg/cm) =

2818

## DETERMINACIÓN DEL VAM

Peso específico asfalto ( $G_b$ ): 

1,000
-------

Peso Específico Agregado Seco

6:20 ( $G_1$ ): 

2,716
-------

0:6 ( $G_2$ ): 

2,640
-------

Dosificación

6:20 ( $P_1$ ): 

42,9
------

0:6 ( $P_2$ ): 

52,5
------

Asfalto ( $P_b$ ): 

4,6
-----

Datos Rice

Peso muestra suelta prob 100 cm<sup>3</sup> ( $W_{mm}$ ): 

240,8
-------

 $100 \cdot G_{mb}$

Densidad Rice ( $D_r$ ): 

2,520
-------

Volumen de la muestra suelta ( $V_{mm}$ ): 

95,6
------

 $W_{mm}/D_r$

Densidad Marshall promedio

Peso específico bruto de la prob. comp. ( $G_{mb}$ ): 

2,408
-------

Peso específico del agregado seco total

Peso específico bruto del agregado total ( $G_{sb}$ ): 

2,674
-------

 $\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4}}$

Determinación de volúmenes y pesos de una probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Peso de la probeta ( $W$ ): 

240,8
-------

 $100 \cdot G_{mb}$

Peso de asfalto ( $W_b$ ): 

11,1
------

 $(P_b \cdot W)/100$

Peso del agregado ( $W_s$ ): 

229,7
-------

 $W - W_b$

Volumen de asfalto ( $V_b$ ): 

11,1
------

 $W_b/G_b$

Peso específico efectivo del agregado total

Peso esp. Efect. Agregado total ( $G_{se}$ ):  $\boxed{2,719} (W_{mm}-W_b)/(V_{mm}-V_b)$

Asfalto absorbido en porcentaje en peso del agregado

Porcentaje asfalto absorbido ( $P_{ba}$ ):  $\boxed{0,63} 100 \cdot \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b$

Volumen agregado en probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Volumen de agregado ( $V_{sb}$ ):  $\boxed{85,9} W_s/G_{sb}$

Vacios del agregado mineral

VAM:  $\boxed{14,08} \frac{100(G_{sb} - G_{mb}) + G_{mb} P_b}{G_{sb}}$

### Con 4,8% de asfalto

#### ANALISIS POR METODO MARSHALL

Ensayo efectuado bajo Norma VN-E9-86, VN-E27-84 y VN-12-67.

% cemento asf.:  $\boxed{4,8}$

PROB	Dm (gr/cm <sup>3</sup> )	E (kg)	F (mm)	V (%)	Rel E/F (kg/cm)
1	2,413	1038	3,8	4,2	2732
2	2,417	1040	4,0	4,0	2600
3	2,413	1040	4,0	4,2	2600
PROMEDIO	2,414	1039	3,9	4,1	2644
MEDIA	2,414	1039	3,9	4,116	2643
DESUDIO ESTANDART	0,0023	1,2	0,12	0,09	76,0
COEFICIENTE DE VARIACION	0,0957	0,1	2,94	2,23	2,9

Densidad Rice (g/cm<sup>3</sup>) =  $\boxed{2,518}$

VAM =  $\boxed{14,1}$

Relación B/V =  $\boxed{82,5}$

Relación E/F (kg/cm) =  $\boxed{2642}$

## DETERMINACIÓN DEL VAM

Peso específico asfalto ( $G_b$ ): 1,000

Peso Específico Agregado Seco

6:20 ( $G_1$ ): 2,716

0:6 ( $G_2$ ): 2,640

Dosificación

6:20 ( $P_1$ ): 42,8

0:6 ( $P_2$ ): 52,4

Asfalto ( $P_b$ ): 4,8

Datos Rice

Peso muestra suelta prob 100 cm<sup>3</sup> ( $W_{mm}$ ): 241,4  $100 \cdot G_{mb}$

Densidad Rice ( $D_r$ ): 2,518

Volumen de la muestra suelta ( $V_{mm}$ ): 95,9  $W_{mm}/D_r$

Densidad Marshall promedio

Peso específico bruto de la prob. comp. ( $G_{mb}$ ): 2,414

Peso específico del agregado seco total

Peso específico bruto del agregado total ( $G_{sb}$ ): 2,674  $\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4}}$

Determinación de volúmenes y pesos de una probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Peso de la probeta ( $W$ ): 241,4  $100 \cdot G_{mb}$

Peso de asfalto ( $W_b$ ): 11,6  $(P_b \cdot W)/100$

Peso del agregado ( $W_s$ ): 229,8  $W - W_b$

Volumen de asfalto ( $V_b$ ): 11,6  $W_b/G_b$

Peso específico efectivo del agregado total

Peso esp. Efect. Agregado total ( $G_{se}$ ): 2,727  $(W_{mm} - W_b)/(V_{mm} - V_b)$

Asfalto absorbido en porcentaje en peso del agregado

Porcentaje asfalto absorbido ( $P_{ba}$ ):  $\boxed{0,73} 100 \cdot \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b$

Volumen agregado en probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Volumen de agregado ( $V_{sb}$ ):  $\boxed{86,0} W_s / G_{sb}$

Vacios del agregado mineral

VAM:  $\boxed{14,05} \frac{100(G_{sb} - G_{mb}) + G_{mb} P_b}{G_{sb}}$

### Con 5,0% de asfalto

#### ANALISIS POR METODO MARSHALL

Ensayo efectuado bajo Norma VN-E9-86, VN-E27-84 y VN-12-67.

% cemento asf.:  $\boxed{5,0}$

PROB	Dm (gr/cm <sup>3</sup> )	E (kg)	F (mm)	V (%)	Rel E/F (kg/cm)
1	2,404	838	5,0	3,9	1676
2	2,404	839	4,8	3,9	1748
3	2,408	829	4,8	3,7	1727
PROMEDIO	2,405	835	4,9	3,8	1717
MEDIA	2,405	835	4,9	3,824	1717
DESVIO ESTANDART	0,0023	5,5	0,12	0,09	37,0
COEFICIENTE DE VARIACION	0,0960	0,7	2,37	2,41	2,2

Densidad Rice (g/cm<sup>3</sup>) =  $\boxed{2,501}$

VAM =  $\boxed{14,6}$

Relación B/V =  $\boxed{82,7}$

Relación E/F (kg/cm) =  $\boxed{1716}$

## DETERMINACIÓN DEL VAM

Peso específico asfalto ( $G_b$ ): 1,000

Peso Especifico Agregado Seco

6:20 ( $G_1$ ): 2,716

0:6 ( $G_2$ ): 2,640

Dosificación

6:20 ( $P_1$ ): 42,8

0:6 ( $P_2$ ): 52,3

Asfalto ( $P_b$ ): 5,0

Datos Rice

Peso muestra suelta prob 100 cm<sup>3</sup> ( $W_{mm}$ ): 240,5  $100 \cdot G_{mb}$

Densidad Rice ( $D_r$ ): 2,501

Volumen de la muestra suelta ( $V_{mm}$ ): 96,2  $W_{mm}/D_r$

Densidad Marshall promedio

Peso específico bruto de la prob. comp. ( $G_{mb}$ ): 2,405

Peso específico del agregado seco total

Peso específico bruto del agregado total ( $G_{sb}$ ): 2,674  $\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4}}$

Determinación de volúmenes y pesos de una probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Peso de la probeta ( $W$ ): 240,5  $100 \cdot G_{mb}$

Peso de asfalto ( $W_b$ ): 12,0  $(P_b \cdot W)/100$

Peso del agregado ( $W_s$ ): 228,5  $W - W_b$

Volumen de asfalto ( $V_b$ ): 12,0  $W_b/G_b$

Peso específico efectivo del agregado total

Peso esp. Efect. Agregado total ( $G_{se}$ ): 2,716  $(W_{mm} - W_b)/(V_{mm} - V_b)$

Asfalto absorbido en porcentaje en peso del agregado

Porcentaje asfalto absorbido ( $P_{ba}$ ): 
$$\boxed{0,58} 100 \cdot \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b$$

Volumen agregado en probeta de 100 cm<sup>3</sup>

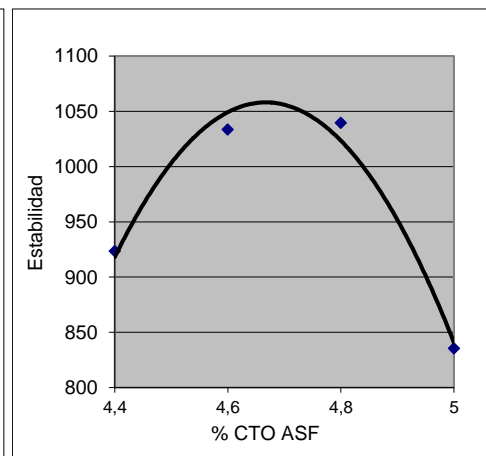
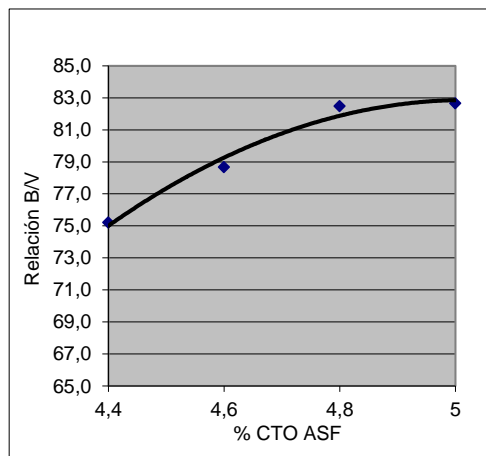
Volumen de agregado ( $V_{sb}$ ): 
$$\boxed{85,5} W_s / G_{sb}$$

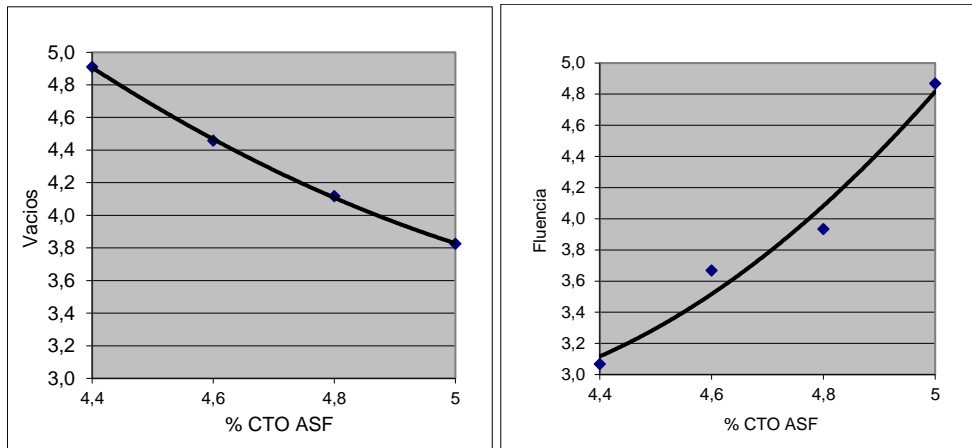
Vacios del agregado mineral

VAM: 
$$\boxed{14,55} \frac{100(G_{sb} - G_{mb}) + G_{mb} P_b}{G_{sb}}$$

El cuadro resumen de estos resultados y las gráficas obtenidas se vuelcan a continuación.

Parámetro	Asfalto 4.4 %	Asfalto 4.6 %	Asfalto 4.8 %	Asfalto 5.0 %
Estabilidad (Kg)	92.3	10033	1039	835
Fluencia (mm)	3.1	3.7	3.9	4.9
Dm (g/cm <sup>3</sup> )	2.402	2.408	2.414	2.405
Drice (g/cm <sup>3</sup> )	2.526	2.520	2.518	2.501
Vacios (%)	4.9	4.5	4.1	3.8
VAM (%)	14.1	14.1	14.1	14.6
Relación B/V (%)	75.2	78.7	82.5	82.7





De los resultados obtenidos puede establecerse que:

- La Estabilidad máxima debería alcanzarse en el entorno del 4,7 % de asfalto.
- El mínimo VAM corregido por la absorción de asfalto se debería alcanzar también para un contenido del 4,7 %.
- La Relación B/V máxima admisible se alcanza para el 4,7 % de asfalto.

Por lo indicado se decide analizar el contenido del 4,7 % de asfalto como el óptimo para la dosificación.

### **Verificación Marshall para el contenido óptimo del 4,7 % de asfalto**



## ANALISIS POR METODO MARSHALL

Ensayo efectuado bajo Norma VN-E9-86, VN-E27-84 y VN-12-67.

% cemento asf.:

PROB	Dm (gr/cm <sup>3</sup> )	E (kg)	F (mm)	V (%)	Rel E/F (kg/cm)
1	2,322	1050	3,8	3,7	2763
2	2,329	1048	3,6	3,4	2911
3	2,318	1136	3,5	3,8	3246
PROMEDIO	2,323	1078	3,6	3,6	2973
MEDIA	2,323	1077	3,6	3,605	2967
DESVIO ESTANDART	0,0056	50,2	0,15	0,23	247,2
COEFICIENTE DE VARIACION	0,2397	4,7	4,20	6,40	8,3

Densidad Rice (g/cm<sup>3</sup>) =

VAM =

Relación B/V =

Relación E/F (kg/cm) =

## DETERMINACIÓN DEL VAM

Peso específico asfalto (G<sub>b</sub>):

Peso Especifico Agregado Seco

6:20 (G<sub>1</sub>):

0:6 (G<sub>2</sub>):

Dosificación

6:20 (P<sub>1</sub>):

0:6 (P<sub>2</sub>):

Asfalto (P<sub>b</sub>):

Datos Rice

Peso muestra suelta prob 100 cm <sup>3</sup> (W <sub>mm</sub> ):	241,5	100*G <sub>mb</sub>
Densidad Rice (D <sub>r</sub> ):	2,520	
Volumen de la muestra suelta (V <sub>mm</sub> ):	95,8	W <sub>mm</sub> /D <sub>r</sub>

Densidad Marshall promedio

Peso específico bruto de la prob. comp. (G <sub>mb</sub> ):	2,415
---	-------

Peso específico del agregado seco total

Peso específico bruto del agregado total (G <sub>sb</sub> ):	2,674	$\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4}}$
--	-------	---

Determinación de volúmenes y pesos de una probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Peso de la probeta (W):	241,5	100*G <sub>mb</sub>
Peso de asfalto (W <sub>b</sub> ):	11,4	(P <sub>b</sub> *W)/100
Peso del agregado (W <sub>s</sub> ):	230,1	W-W <sub>b</sub>
Volumen de asfalto (V <sub>b</sub> ):	11,4	W <sub>b</sub> /G <sub>b</sub>

Peso específico efectivo del agregado total

Peso esp. Efect. Agregado total (G <sub>se</sub> ):	2,724	(W <sub>mm</sub> -W <sub>b</sub> )/(V <sub>mm</sub> -V <sub>b</sub> )
---	-------	---

Asfalto absorbido en porcentaje en peso del agregado

Porcentaje asfalto absorbido (P <sub>ba</sub> ):	0,69	$100 \cdot \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b$
--	------	--

Volumen agregado en probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Volumen de agregado (V <sub>sb</sub> ):	86,1	W <sub>s</sub> /G <sub>sb</sub>
---	------	---------------------------------

Vacios del agregado mineral

<b>VAM:</b>	<b>13,92</b>	$\frac{100(G_{sb} - G_{mb}) + G_{mb}P_b}{G_{sb}}$
-------------	--------------	---

En función de los resultados obtenidos queda confirmado entonces el 4,7 % de asfalto como el contenido óptimo. Se procede entonces a continuar con el resto de las verificaciones.

### Análisis de la concentración volumétrica de finos

El *filler* se comporta de dos formas diferentes. Por un lado, de forma inerte, permite rellenar los huecos que deja la matriz del agregado en la mezcla asfáltica. Por otro lado produce modificaciones físico-químicas en el asfalto cuando interactúa con el mismo, produciéndole, principalmente una reducción a

la susceptibilidad térmica, que se traduce en una mejor respuesta de la mezcla a los problemas de ahuellamiento, producido a altas temperaturas.

Se puede decir que son tres las principales funciones del filler:

- Función rellenadora de la mezcla.
- Modificador del comportamiento reológico y cohesivo del sistema filler/betún.
- Acción estabilizante frente al agua.

La incorporación de filler a la mezcla asfáltica le efectúa a la misma, múltiples beneficios ya que cambia sustancialmente las propiedades del asfalto. Entre las más importantes se pueden citar:

- Mayor consistencia
- Mayor viscosidad
- Mayor tenacidad
- Menor susceptibilidad térmica

También cambia las propiedades de la mezcla asfáltica en su conjunto:

- Mayor estabilidad
- Mejor resistencia a la tracción
- Mejor resistencia al desgaste
- Mejor adhesividad entre el árido y el ligante

Sin embargo, una incorporación excesiva de filler a la mezcla puede producir una disminución de las ventajas vistas anteriormente. Para poder encontrar este límite, en el cual la incorporación de filler, deja de ser beneficiosa, la Comisión Permanente del Asfalto propone:

$$\frac{C_v}{C_c} \leq 1$$

Dónde:

C<sub>v</sub>: Concentración volumétrica

C<sub>c</sub>: Concentración crítica

La concentración crítica es una característica propia de cada tipo de filler y se obtiene por medio del ensayo según la norma la Norma VN-E-11-67. La misma considera añadir pequeñas porciones de filler secado a 100-105 °C, en 20 cm<sup>3</sup> de kerosene anhidro en un tubo de 25 cm<sup>3</sup> graduado al 0,1 cm<sup>3</sup> y de diámetro interno 15 mm. El peso de filler empleado debe ser tal que el volumen de sedimento esté comprendido entre 8 y 12 cm<sup>3</sup>. La concentración crítica se puede expresar con la siguiente fórmula:

$$C_c = \frac{P}{V * \rho}$$

Dónde:

P = Peso del filler en gramos

V = Volumen del sedimento en cm<sup>3</sup>

ρ = Peso específico del filler seco

La concentración volumétrica, nos indica la cantidad de filler que tiene la mezcla en relación a la cantidad de asfalto que se utilizará. Con la siguiente fórmula se calcula:

$$C_v = \frac{\text{Filler}}{\text{Filler} + \text{betun}} \text{ (en volumen)}$$

Dado los resultados, se efectúa el análisis de Concentración Volumétrica de Finos, realizando la mezcla de los mismos según la proporción establecida por la Dosificación y estableciendo mediante el ensayo correspondiente, la Concentración Crítica y mediante cálculo teórico la Concentración de Finos de la Mezcla. La Relación Cv/Cc finalmente resulta menor a 1,00 según puede observarse en la siguiente tabla:

Parámetros	Mezcla 100 % de Arena 0:6
PT N° 200 (de la arena 0:6)	8.9 (%)
Peso Específico Aparente (mezcla de 6:12 y 0:6)	2.732 (g/cm <sup>3</sup> )
Concentración Crítica (CC)	0.34

Asfalto (%)	4.4	4.6	4.7	4.8	5.0
Concentración Volumétrica (CV)	0.28	0.27	0.27	0.26	0.25
Relación CV/CC	0.82	0.80	0.78	0.77	0.75

### Dosificación de Áridos

6:20	45 %
0:6	55 %
Cal	0

### Dosificación de la Mezcla Asfáltica

Material	Porcentaje de cada material				
<b>6:20</b>	43.02	42.93	42.89	42.84	42.75
<b>0:6</b>	52.58	52.47	52.42	52.36	52.25
<b>Cal</b>	0	0	0	0	0
<b>Asfalto</b>	4.4	4.6	4.7	4.8	5.0

En las siguientes fotos se puede ver parte del ensayo de concentración crítica



Foto para la determinación de la concentración crítica

Por lo tanto, la dosificación final de la mezcla queda definida en la siguiente tabla

**Dosificación final resultante**

- **Mezcla 1. Con 100 % FG proveniente de la arena de trituración con CA-30**

Material	4.7 % de Asfalto CA - 30
6:20	42.9
0:6	52.4
CA - 30	4.7
Porcentaje Total de Mezcla	100

**Mezcla 3. Se reemplaza el PT 200 de la arena de trit. Por FC con CA-30**

**Dosificación de áridos**

Como lo que se intenta es efectuar un análisis comparativo, se mantiene la misma granulometría de áridos, salvo que reemplazando el material pasante por el Tamiz N° 200 aportado por los áridos, por una misma cantidad de material pero de filler de aporte, en este caso cal.

Material	Áridos	4.6 % de Asfalto	4.8 % de Asfalto	5.0 % de Asfalto
Áridos sin PT N°200	95.0	90.6	90.4	90.3
Cal	5.0	4.8	4.8	4.7
CA - 30		4.6	4.8	5.0
Porcentaje	100.0	100.0	100.0	100.0

Como se viera en la dosificación inicial, el porcentaje total de pasa tamiz N° 200, en la curva granulométrica es de 5 %.

Ese porcentaje se retira prácticamente en su totalidad, al lavar a la arena 0:6

Luego se piensa en producir el reemplazo con cal de ese porcentaje considerando en la tabla anterior que el 95 % lo constituyen la mezcla de 6:20 y arena 0:6 lavada y el resto lo aporta con cal.



Foto del lavado de la arena de trituración

**Dosificación de asfalto**

Se decide realizar pastones de prueba con dosificaciones de cemento asfáltico de 4,6%, 4,8% y 5,0%.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

## Con 4,6 % de asfalto

### ANALISIS POR METODO MARSHALL

Ensayo efectuado bajo Norma VN-E9-86, VN-E27-84 y VN-12-67.

% cemento asf.:

PROB	Dm (gr/cm <sup>3</sup> )	E (kg)	F (mm)	V (%)	Rel E/F (kg/cm)
1	2,390	883	2,8	5,0	3154
2	2,389	894	2,7	5,0	3311
3	2,389	877	2,6	5,0	3373
PROMEDIO	2,389	885	2,7	5,0	3279
MEDIA	2,389	885	2,7	4,997	3278
DESVIO ESTANDART	0,0006	8,6	0,10	0,02	113,2
COEFICIENTE DE VARIACION	0,0242	1,0	3,70	0,46	3,5

Densidad Rice (g/cm<sup>3</sup>) =

VAM =

Relación B/V =

Relación E/F (kg/cm) =

### DETERMINACIÓN DEL VAM

Cabe aclarar que aquí se tomó el Peso Específico Seco de la mezcla de agregados sin la incorporación del lavado de la 0:6, es decir el porcentaje de Pasa Tamiz N° 200 de la arena de trituración no fue tenido en cuenta en la determinación de este peso específico ya que se reemplaza por el 100 % de cal. En las tablas siguientes se efectúa el cálculo de los Vacíos del Agregado Mineral (VAM)

Peso específico asfalto (G<sub>b</sub>):

Peso Específico Agregado Seco

ARIDOS SIN PTN°200 (G<sub>1</sub>):

CAL (G<sub>2</sub>):

Dosificación

ARIDOS SIN PTN°200 (P<sub>1</sub>):

CAL(P<sub>2</sub>):

Asfalto (P<sub>b</sub>):

VALORACION DEL DESEMPEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA  
MODIFICANDO EL TIPO FILLER Y ASFALTO

Datos Rice

Peso muestra suelta prob 100 cm <sup>3</sup> (W <sub>mm</sub> ):	<input type="text" value="238,9"/>	100*G <sub>mb</sub>
Densidad Rice (D <sub>r</sub> ):	<input type="text" value="2,515"/>	
Volumen de la muestra suelta (V <sub>mm</sub> ):	<input type="text" value="95,0"/>	W <sub>mm</sub> /D <sub>r</sub>

Densidad Marshall promedio

Peso específico bruto de la prob. comp. (G <sub>mb</sub> ):	<input type="text" value="2,389"/>
---	------------------------------------

Peso específico del agregado seco total

Peso específico bruto del agregado total (G <sub>sb</sub> ):	<input type="text" value="2,675"/>	$\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4}}$
--	------------------------------------	---

Determinación de volúmenes y pesos de una probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Peso de la probeta (W):	<input type="text" value="238,9"/>	100*G <sub>mb</sub>
Peso de asfalto (W <sub>b</sub> ):	<input type="text" value="11,0"/>	(P <sub>b</sub> *W)/100
Peso del agregado (W <sub>s</sub> ):	<input type="text" value="227,9"/>	W-W <sub>b</sub>
Volumen de asfalto (V <sub>b</sub> ):	<input type="text" value="11,0"/>	W <sub>b</sub> /G <sub>b</sub>

Peso específico efectivo del agregado total

Peso esp. Efect. Agregado total (G <sub>se</sub> ):	<input type="text" value="2,713"/>	(W <sub>mm</sub> -W <sub>b</sub> )/(V <sub>mm</sub> -V <sub>b</sub> )
---	------------------------------------	---

Asfalto absorbido en porcentaje en peso del agregado

Porcentaje asfalto absorbido (P <sub>ba</sub> ):	<input type="text" value="0,53"/>	$100 \cdot \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b$
--	-----------------------------------	--

Volumen agregado en probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Volumen de agregado (V <sub>sb</sub> ):	<input type="text" value="85,2"/>	W <sub>s</sub> /G <sub>sb</sub>
---	-----------------------------------	---------------------------------

Vacios del agregado mineral

<b>VAM:</b>	<input type="text" value="14,80"/>	$\frac{100(G_{sb} - G_{mb}) + G_{mb}P_b}{G_{sb}}$
-------------	------------------------------------	---



## Con 4,8 % de asfalto

### ANALISIS POR METODO MARSHALL

Ensayo efectuado bajo Norma VN-E9-86, VN-E27-84 y VN-12-67.

% cemento asf.:

PROB	Dm (gr/cm <sup>3</sup> )	E (kg)	F (mm)	V (%)	Rel E/F (kg/cm)
1	2,422	1028	3,4	3,4	3024
2	2,422	1033	3,5	3,4	2951
3	2,421	1025	3,1	3,5	3306
PROMEDIO	2,422	1029	3,3	3,4	3094
MEDIA	2,422	1029	3,3	3,442	3090
DESVIO ESTANDART	0,0006	4,0	0,21	0,02	187,7
COEFICIENTE DE VARIACION	0,0238	0,4	6,24	0,67	6,1

Densidad Rice (g/cm<sup>3</sup>) =

VAM =

Relación B/V =

Relación E/F (kg/cm) =

### DETERMINACIÓN DEL VAM

Peso específico asfalto (G<sub>b</sub>):

Peso Específico Agregado Seco

ARIDOS SIN PTN°200 (G<sub>1</sub>):

CAL (G<sub>2</sub>):

Dosificación

ARIDOS SIN PTN°200 (P<sub>1</sub>):

CAL(P<sub>2</sub>):

Asfalto (P<sub>b</sub>):

Datos Rice

Peso muestra suelta prob 100 cm <sup>3</sup> (W <sub>mm</sub> ):	242,2	100*G <sub>mb</sub>
Densidad Rice (D <sub>r</sub> ):	2,508	
Volumen de la muestra suelta (V <sub>mm</sub> ):	96,6	W <sub>mm</sub> /D <sub>r</sub>

Densidad Marshall promedio

Peso específico bruto de la prob. comp. (G <sub>mb</sub> ):	2,422
---	-------

Peso específico del agregado seco total

Peso específico bruto del agregado total (G <sub>sb</sub> ):	2,675	$\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4}}$
--	-------	---

Determinación de volúmenes y pesos de una probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Peso de la probeta (W):	242,2	100*G <sub>mb</sub>
Peso de asfalto (W <sub>b</sub> ):	11,6	(P <sub>b</sub> *W)/100
Peso del agregado (W <sub>s</sub> ):	230,6	W-W <sub>b</sub>
Volumen de asfalto (V <sub>b</sub> ):	11,6	W <sub>b</sub> /G <sub>b</sub>

Peso específico efectivo del agregado total

Peso esp. Efect. Agregado total (G <sub>se</sub> ):	2,714	(W <sub>mm</sub> -W <sub>b</sub> )/(V <sub>mm</sub> -V <sub>b</sub> )
---	-------	---

Asfalto absorbido en porcentaje en peso del agregado

Porcentaje asfalto absorbido (P <sub>ba</sub> ):	0,54	$100 \cdot \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b$
--	------	--

Volumen agregado en probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Volumen de agregado (V <sub>sb</sub> ):	86,2	W <sub>s</sub> /G <sub>sb</sub>
---	------	---------------------------------

Vacios del agregado mineral

VAM:	13,80	$\frac{100(G_{sb} - G_{mb}) + G_{mb}P_b}{G_{sb}}$
------	-------	---

## Con 5,0 % de asfalto

### ANALISIS POR METODO MARSHALL

Ensayo efectuado bajo Norma VN-E9-86, VN-E27-84 y VN-12-67.

% cemento asf.:

PROB	Dm (gr/cm <sup>3</sup> )	E (kg)	F (mm)	V (%)	Rel E/F (kg/cm)
1	2,409	925	4,0	3,3	2313
2	2,410	932	4,1	3,3	2273
3	2,410	904	4,1	3,3	2205
PROMEDIO	2,410	920	4,1	3,3	2264
MEDIA	2,410	920	4,1	3,304	2263
DESVIO ESTANDART	0,0006	14,6	0,06	0,02	54,5
COEFICIENTE DE VARIACION	0,0240	1,6	1,42	0,70	2,4

Densidad Rice (g/cm<sup>3</sup>) =

VAM =

Relación B/V =

Relación E/F (kg/cm) =

### DETERMINACIÓN DEL VAM

Peso específico asfalto (G<sub>b</sub>):

Peso Especifico Agregado Seco

ARIDOS SIN PTN°200 (G<sub>1</sub>):

CAL (G<sub>2</sub>):

Dosificación

ARIDOS SIN PTN°200 (P<sub>1</sub>):

CAL(P<sub>2</sub>):

Asfalto (P<sub>b</sub>):

Datos Rice

Peso muestra suelta prob 100 cm <sup>3</sup> (W <sub>mm</sub> ):	241	100*G <sub>mb</sub>
Densidad Rice (D <sub>r</sub> ):	2,492	
Volumen de la muestra suelta (V <sub>mm</sub> ):	96,7	W <sub>mm</sub> /D <sub>r</sub>

Densidad Marshall promedio

Peso específico bruto de la prob. comp. (G <sub>mb</sub> ):	2,410
---	-------

Peso específico del agregado seco total

Peso específico bruto del agregado total (G <sub>sb</sub> ):	2,675	$\frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4}}$
--	-------	---

Determinación de volúmenes y pesos de una probeta de 100 cm<sup>3</sup>

Peso de la probeta (W):	241	100*G <sub>mb</sub>
Peso de asfalto (W <sub>b</sub> ):	12,1	(P <sub>b</sub> *W)/100
Peso del agregado (W <sub>s</sub> ):	229,0	W-W <sub>b</sub>
Volumen de asfalto (V <sub>b</sub> ):	12,1	W <sub>b</sub> /G <sub>b</sub>

Peso específico efectivo del agregado total

Peso esp. Efect. Agregado total (G <sub>se</sub> ):	2,704	(W <sub>mm</sub> -W <sub>b</sub> )/(V <sub>mm</sub> -V <sub>b</sub> )
---	-------	---

Asfalto absorbido en porcentaje en peso del agregado

Porcentaje asfalto absorbido (P <sub>ba</sub> ):	0,41	$100 \cdot \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b$
--	------	--

Volumen agregado en probeta de 100 cm<sup>3</sup>

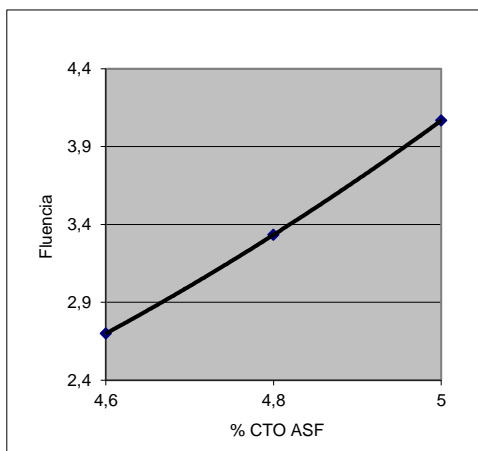
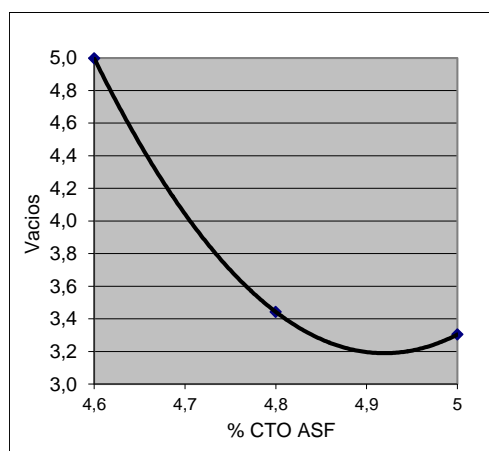
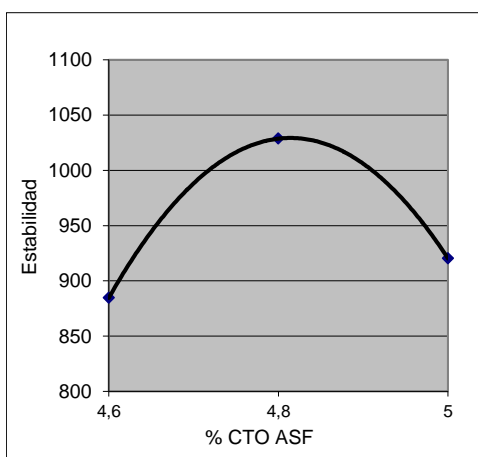
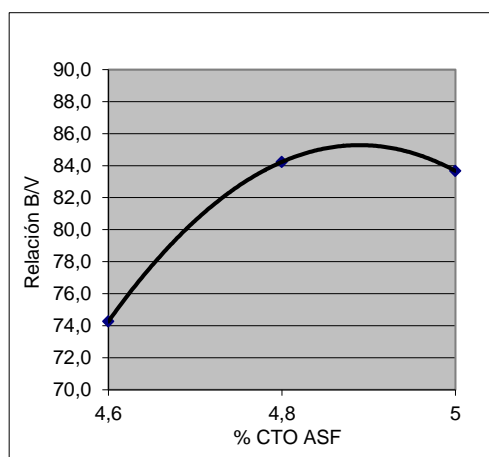
Volumen de agregado (V <sub>sb</sub> ):	85,6	W <sub>s</sub> /G <sub>sb</sub>
---	------	---------------------------------

Vacios del agregado mineral

<b>VAM:</b>	14,41	$\frac{100(G_{sb} - G_{mb}) + G_{mb}P_b}{G_{sb}}$
-------------	-------	---

El cuadro resumen de estos resultados y las gráficas obtenidas, se vuelcan a continuación.

Parámetro	4.6 % de Asfalto	4.8 % de Asfalto	5.0 % de Asfalto
Estabilidad (Kg)	885	1029	920
Fluencia (mm)	2.7	3.3	4.1
Dm (g/cm <sup>3</sup> )	2.389	2.422	2.410
Drice (g/cm <sup>3</sup> )	2.515	2.508	2.492
Vacíos (%)	5.0	3.4	3.3
VAM (%)	14.8	13.8	14.4
Relación B/V (%)	74.3	84.2	83.7



De los resultados obtenidos puede establecerse que:

- La Estabilidad máxima se alcanza en el entorno del 4,8 % de asfalto.
- El mínimo VAM corregido por la absorción de asfalto se alcanza también para un contenido del 4,8 %.
- La Relación B/V máxima admisible es superada con el 4,8 % de asfalto.

Dando como aceptable una Relación B/V por fuera de lo especificado, se decide establecer el contenido del 4,8 % de asfalto como el óptimo para la dosificación.

### **Análisis de la concentración volumétrica de finos**

Dado los resultados, se efectúa el análisis de Concentración Volumétrica de Finos, realizando la mezcla de finos según la proporción establecida por la Dosificación y estableciendo mediante el ensayo correspondiente la Concentración Crítica y mediante cálculo teórico, la Concentración de Finos de la Mezcla. La Relación Cv/Cc finalmente resulta menor a 1,00 según puede observarse en la siguiente tabla.

<b>Parámetro</b>	<b>Mezcla con 100 % de cal</b>
Pasa Tamiz N° 200	100
Peso Específico Aparente de la Cal	2.618
Concentración Crítica (CC)	0.30

<b>Porcentaje de Asfalto</b>	<b>4.6</b>	<b>4.8</b>	<b>5.0</b>
Concentración Volumétrica	0.28	0.27	0.27
Relación CV/CC	0.95	0.92	0.89

### **Dosificación final resultante**

<b>Material</b>	<b>Porcentaje de Áridos</b>	<b>4.8 % de Asfalto</b>
Árido sin Pasa Tamiz N° 200	95.0	90.4
Cal	5.0	4.8
CA – 30		4.8
Porcentaje	100.0	100.0

La dosificación final queda como sigue expresada en todos sus componentes:

- **Mezcla 3. Se reemplaza el PT 200 de la arena de trit. Por FC con CA-30**

<b>Material</b>	<b>Porcentaje</b>
Árido 6:20	42.80
Arena 0:6 (Lavada)	47.73
Cal	4.67
Asfalto CA - 30	4.8

- **Mezcla 2. Con 100 % FG proveniente de la arena de trituración con AM-3**
- **Mezcla 4. Se reemplaza el PT 200 de la arena de trit. Por FC con AM-3.**

Con los contenidos óptimos determinados con el ligante CA-30, se pasó a realizar la verificación por el método Marshall pero con el ligante modificado AM-3

Parámetro	100 % de Arena de Trituración Mezcla 2	100 % de Cal en el PT N° 200 Mezcla 4
Porcentaje óptimo de Asfalto	4.7	4.8
Dm (g/cm <sup>3</sup> )	2.422	2.418
D <sub>rice</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	2.510	2.499
Vacios (%)	3.5	3.2
Estabilidad (Kg)	1210	1290
Fluencia (mm)	4.0	3.8
Relación E/F (Kg/mm)	3025	3394
VAM (%)	14.9	14.8
Relación B/V (%)	76.6	78.3

## 5. CONCLUSIONES

- Se ha recorrido una estrategia de caracterización de materiales componentes de la mezcla asfáltica. Los áridos, los fillers y los asfaltos pueden valorarse considerando los test enunciados en el presente capítulo.
- La caracterización petrológica en este caso, se simplifica a un análisis único, dado que las fracciones provienen del proceso de explotación de un macizo homogéneo. En el caso de estudio de yacimientos de la provincia de Mendoza la heterogenidad en la composición de los rodados hará que el proceso considere los diferentes orígenes de las fracciones de las muestras.
- Tanto en el asfalto convencional como el modificado, resulta de significación incursionar en los aspectos reológicos, a los que se sumarán las valoraciones realizadas en el capítulo 5 por medio del método UCL.
- Mediante el método Marshall se han podido establecer en una primera instancia los porcentajes de asfalto respectivos. Es importante señalar que se debe valorar el porcentaje de asfalto absorbido y por ende los vacíos efectivos al considerarse la absorción de los áridos.
- Las mezclas elaboradas consideran el uso de 100 % por cada caso de una tipología de filler, existiendo combinaciones con CA-30 y AM-3 de Filler 100 % granítico 100 % cal.
- Las dosificaciones óptimas alcanzadas poseen en general una relación betún/vacios elevada siendo particularmente la que se encuentra más alejada del límite superior de las especificaciones, la Mezcla 3.
- Los vacíos del agregado mineral corregidos por el porcentaje efectivo de asfalto, se encuentran en valores superiores al 13 % (cercaos a este valor) generando esto un buen rozamiento interno de las partículas de áridos pero condicionando la capacidad de contener betún.