

## Mezclas bituminosas en frío densamente graduadas empleando áridos bonaerenses y emulsiones asfálticas convencionales y modificadas

### Autores:

Ing Jorge Ripani (\*)

Sr. Sebastián Covacich (\*\*) Ing. R. Adrián Nosetti (\*\*);

Con la colaboración del Ing. Jorge Marcelo Lockhart (\*\*\*)

- \* Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires,  
Calle 122 y 48, (1900) La Plata, Bs. As., Argentina  
Tel/fax: + 0054-221-4891271/72, [gerejecutiva@vialidad.gba.gov.ar](mailto:gerejecutiva@vialidad.gba.gov.ar)
- \*\* La.P.I.V. - Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial – Facultad de Ingeniería -  
Universidad Nacional de La Plata.  
Calle 1 y 47, (1900) La Plata, Bs. As., Argentina.  
Tel/fax: + 0054-221-4236687; [lapiv@ing.unlp.edu.ar](mailto:lapiv@ing.unlp.edu.ar)  
Grupo RILAIC (Red Ibero-Latinoamericana de Investigación en Carreteras),  
[www.rilaic.com](http://www.rilaic.com).
- \*\*\* Profesor Emérito, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
- 

### Resumen

La elección de la técnica y materiales a emplear en una obra vial, generalmente está supeditada a una serie de condiciones entre las cuales se pueden citar: aspectos económicos, ubicación y magnitud de la obra, circunstancias ambientales y de seguridad, disponibilidad de equipos, existencia y usufructo de materiales locales.

La necesidad de un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos, aunado a la creciente preocupación por preservar el medio ambiente, ha inducido al empleo de mezclas asfálticas en frío mediante la utilización de emulsiones.

La posibilidad de aplicación que brinda esta técnica es muy amplia, pudiendo utilizarse tanto en la renovación de las características superficiales de una carretera de alto flujo vehicular, como en la construcción de un camino de baja intensidad de tránsito.

La extensa geografía que presenta el territorio de la provincia de Buenos Aires, con el afincamiento de innumerables pueblos en su interior, alejados de los grandes centros urbanos donde generalmente se ubican las plantas asfálticas en caliente, torna prácticamente inviable desde el punto de vista técnico-económico, la concreción de obras de pavimentación con este tipo de mezclas.

Asimismo, y por tratarse de obras de menor envergadura, resulta considerablemente oneroso el emplazamiento de dichas plantas en la zona de trabajo.

Con la intención de buscar alternativas que permitan satisfacer las necesidades de las poblaciones del interior, en pos de una mejora en la calidad de vida de sus habitantes, es que se ha estudiado la viabilidad de brindar una respuesta, mediante la utilización de mezclas asfálticas densas en frío.

En el presente trabajo se evaluaron en laboratorio dichas mezclas, utilizando dos tipos de emulsiones (convencional y modificada) con áridos de la Provincia de Buenos Aires

Se reportan los ensayos ejecutados, el procedimiento de diseño empleado y los cambios evidenciados en su comportamiento, a partir del empleo de distintos materiales.

## Mezclas bituminosas en frío densamente graduadas empleando áridos bonaerenses y emulsiones asfálticas convencionales y modificadas

### 1.- INTRODUCCIÓN

La calidad de las mezclas bituminosas en frío densamente graduadas depende en gran medida de la capacidad de los agregados para proporcionar un buen esqueleto mineral, a cuyo fin resulta menester que sean lo suficientemente duros y rugosos, de tal modo que aseguren una buena adherencia árido-ligante, con una granulometría continua que permita obtener una buena compacidad, rozamiento interno, resistencia ante las cargas del tráfico y a su vez un buen curado de la mezcla. Asimismo resulta de vital importancia la afinidad y adhesividad del árido con la emulsión y el grado de homogeneidad alcanzado en la distribución.

Teniendo en cuenta lo expresado, en el presente trabajo se reportan los resultados de los ensayos realizados en laboratorio, en mezclas elaboradas con áridos procedentes de la trituración de rocas de canteras situadas en el centro de la provincia de Buenos Aires y emulsiones convencionales y modificadas fabricadas *ad hoc*.

A los efectos de contrastar resultados, se elaboraron mezclas en caliente utilizando el betún base con el que se fabricaron las emulsiones.

### 2.- OBJETIVO DEL TRABAJO

Comparar el comportamiento en laboratorio de mezclas bituminosas densamente graduadas empleando como ligante emulsión convencional, emulsión modificada con polímeros y el asfalto base de éstas, conservando en los tres casos similares parámetros de dosificación.

### 3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

Para la elaboración de la mezcla se utilizó piedra partida 6-20 mm y 6-12 mm, arena de trituración 0-6 mm, arena silícea, cal hidráulica y ligantes bituminosos emulsificados convencionales y modificados. El material pétreo ensayado se obtuvo directamente de los acopios de una obra en ejecución en la ciudad de La Plata y se fraccionó por cuarteos sucesivos hasta obtener una muestra representativa.

Estos materiales se caracterizaron mediante los ensayos que se detallan a continuación:

#### 3.a.- Agregados Gruesos

Los agregados gruesos constituyen el esqueleto mineral, que por su dureza y rozamiento interno, contribuye profusamente a resistir las cargas actuantes. Los áridos empleados provienen de la trituración de rocas duras que conforman el macizo de Tandilia (la cantera se encuentra situada en el partido de Olavarría), presentan aceptable cubicidad, limpieza y suficiente resistencia al desgaste.

En las **Tablas 1** y **2** se reportan los valores de cada uno de los ensayos realizados a estos materiales. Asimismo en la **Figura 1** se representan las curvas granulométricas de estos dos agregados.

**Tabla 1 - Granulometría de los agregados gruesos**

MUESTRA	TAMICES							
	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	4.75 mm (Nº 4)	2.00 mm (Nº 10)	0.42 mm (Nº 40)	0.15 mm (Nº 100)	75 µm (Nº 200)

<b>6-20 mm</b>	<b>100</b>	<b>41</b>	<b>16</b>	<b>7</b>	<b>3.8</b>	<b>0.1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>6-12 mm</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>99</b>	<b>17</b>	<b>2</b>	<b>1.5</b>	<b>1.0</b>	<b>0.5</b>

**Tabla 2 - Características de los agregados gruesos**

ENSAYO	6-12 mm	6-20 mm
Peso Especifico Aparente [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>2.693</b>	<b>2.728</b>
Peso Especifico del Agregado seco [g./cm <sup>3</sup> ]	<b>2.678</b>	<b>2.713</b>
Peso Especifico del Agregado s.s.s. [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>2.683</b>	<b>2.720</b>
Absorción [%]	<b>0.21</b>	<b>0.21</b>
Índice de Lajas	<b>21.4</b>	<b>21.1</b>
Desgaste Los Ángeles [%]	<b>25</b>	<b>14</b>
Polvo Adherido [ml]	<b>1.1</b>	<b>0.9</b>

### 3.b.- Agregados Finos

El árido fino y el filler en conjunto con el ligante son los responsables de la cohesión e impermeabilidad de la mezcla.

La limpieza y plasticidad de los finos tienen una especial importancia en la elección de la emulsión a emplear, debido a su influencia en la velocidad de rotura, envuelta y resistencia conservada.

La arena de trituración proviene de la misma cantera que los agregados gruesos y la arena silíceo procede del río Paraná; ambos materiales carentes de componentes arcillosos.

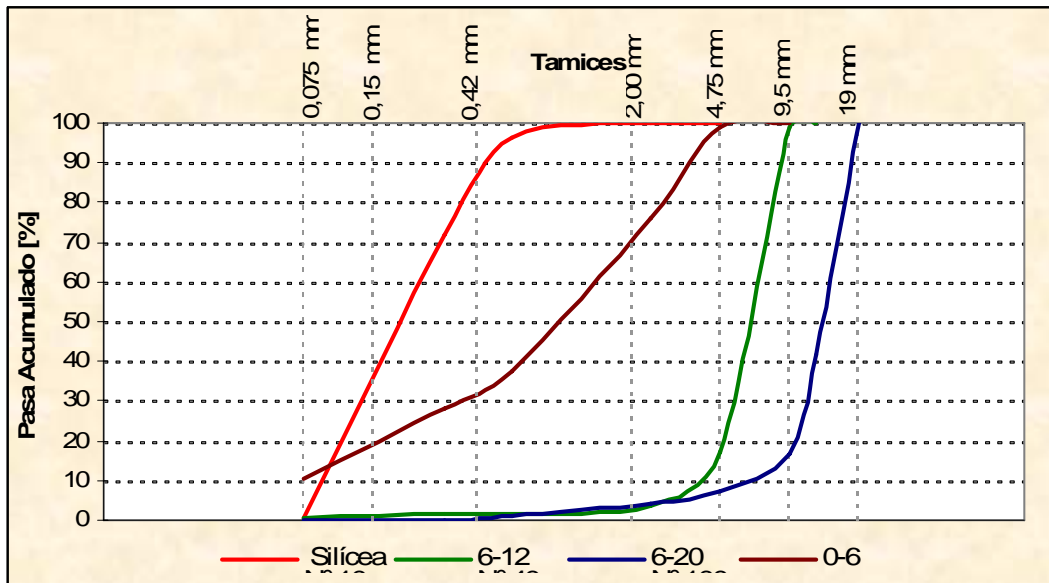
Se detallan en las **Tablas 3 y 4** los resultados de los ensayos efectuados a estos agregados. De igual manera que para los áridos gruesos, en el **Figura 1** se trazaron las respectivas curvas granulométricas.

**Tabla 3 - Granulometría de los agregados finos**

MUESTRA	TAMICES							
	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	4.75 mm (Nº 4)	2.00 mm (Nº 10)	0.42 mm (Nº 40)	0.15 mm (Nº 100)	75 µm (Nº 200)
<b>0-6</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>99</b>	<b>76</b>	<b>71</b>	<b>31</b>	<b>20</b>	<b>10.5</b>
<b>Silíceo</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>86</b>	<b>35</b>	<b>0.7</b>

**Tabla 4 - Características de los agregados finos**

ENSAYO	0-6 mm	Silíceo
Peso Especifico Aparente [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>2.703</b>	<b>2.649</b>
Absorción [%]	<b>0.40</b>	<b>0.23</b>
Equivalente de Arena	<b>78</b>	<b>95</b>



**Figura 1 - Curvas granulométricas de los agregados**

### 3.c.- Filler

En general este material cumple funciones similares a las desempeñadas en las mezclas asfálticas en caliente, es decir, mejora la adherencia árido-betún, coadyuva al espesamiento del ligante y rellena vacíos, influyendo también en el tiempo de rotura de la emulsión.

Debe tenerse en cuenta que un exceso en la relación volumétrica filler-betún residual traerá aparejada una elevada rigidización. Por dicha razón, en las mezclas densas es conveniente relacionar su dosaje con su concentración crítica, con el propósito de asegurar la capacidad de deformación visco-elástica del sistema.

El filler utilizado en la elaboración de las mezclas del presente trabajo, estuvo compuesto por el proveniente de la fracción de los áridos que pasa el tamiz 200 y por cal hidráulica hidratada en carácter de filler de aportación. La suma de ambos materiales se denominará de aquí en adelante filler total de la mezcla.

En las **Tablas 5 y 6** se reportan los resultados de los ensayos efectuados al filler de aportación (cal) y al filler total de la mezcla.

**Tabla 5 - Granulometría de la Cal**

MUESTRA	TAMICES		
	0.42 mm (Nº 40)	0.15 mm (Nº 100)	75 µm (Nº 200)
<b>Cal</b>	<b>100</b>	<b>99.1</b>	<b>94.3</b>

**Tabla 6 - Peso específico de los fílleres**

MUESTRA	Peso Específico [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Cal</b>	<b>2.475</b>
<b>Filler total de la mezcla</b>	<b>2.681</b>

Para el filler total de la mezcla se obtuvo la concentración crítica (Cs), mediante el ensayo de asentamiento en kerosene (Norma VN-E11).

$$Cs = \frac{\text{Peso seco de la muestra}}{\text{Peso Específico} \times \text{Volumen asentado}}$$

Peso seco de la muestra = **8.64 g**

Volumen asentado en kerosene deshidratado después de 24 hs = **11.7 cm<sup>3</sup>**

Peso específico del filler total de la mezcla = **2.681 g/cm<sup>3</sup>**

$$C_s = 0.275$$

Cabe recordar que esta concentración representa el valor límite del sólido, a partir del cual no es posible un flúido viscoso del ligante bituminoso, ya que las partículas de filler no pueden desplazarse libremente.

### 3.d.- Emulsiones

El tipo de emulsión, aniónica o catiónica está condicionado por la naturaleza mineralógica del árido a utilizar, especialmente por la fracción fina.

Se optó por utilizar emulsiones tipo catiónicas, en virtud de su mayor producción y difusión en el mercado local, y esencialmente porque se logra una buena adhesión con los áridos de origen silíceo. Por tratarse de una mezcla densa, se utilizó una emulsión catiónica de rotura lenta. Estas poseen como emulsionantes, compuestos de amonio cuaternario o aminas, que confieren al glóbulo de asfalto una carga positiva y rompen principalmente por adsorción del agente emulsionante sobre la superficie del agregado cargado negativamente.

Se entiende por rotura de la emulsión, cuando se produce la separación de la fase continua (agua) con el medio dispersivo (asfalto). Alcanzando dicho estado el ligante, pasa a tomar la coloración oscura propia del betún

En las **Tablas 7 y 8** se reportan los valores de los ensayos realizados a las emulsiones utilizadas.

**Tabla 7 - Residuo asfáltico de las emulsiones**

EMULSION	RESIDUO ASFALTICO
Emulsión Convencional (EC)	61.0
Emulsión Modificada (EM)	62.4

**Tabla 8 - Ensayos sobre los residuos asfálticos y el asfalto base**

Ensayos	Emulsión Convencional (EC)	Emulsión Modificada EM	Asfalto Base
Penetración a 25°C (100 g, 5 seg) [0.1mm]	74	56	80
Punto de Ablandamiento [°C]	51.3	63.5	48.4
Retorno Elástico por torsión [%]	-----	18	-----

#### 4.- DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA CON EMULSIÓN

La dosificación de la mezcla se efectuó por el método Marshall con compactación estática. En esta instancia sólo se utilizó la emulsión convencional denominada EC.

##### 4.a.- Granulometría adoptada

Para la dosificación de las mezclas se adoptó una granulometría que cumpla con los requisitos establecidos en el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección Nacional de Vialidad, edición 1.998, Sección D.X Mezclas Densas TM ½". Para ello, en función de los materiales que se poseían, se adoptó el dosaje indicado en la tabla 9.

Es recomendable para este tipo de mezclas, que la granulometría posea porcentajes algo más elevados de vacíos, para facilitar la total eliminación del agua ocluida.

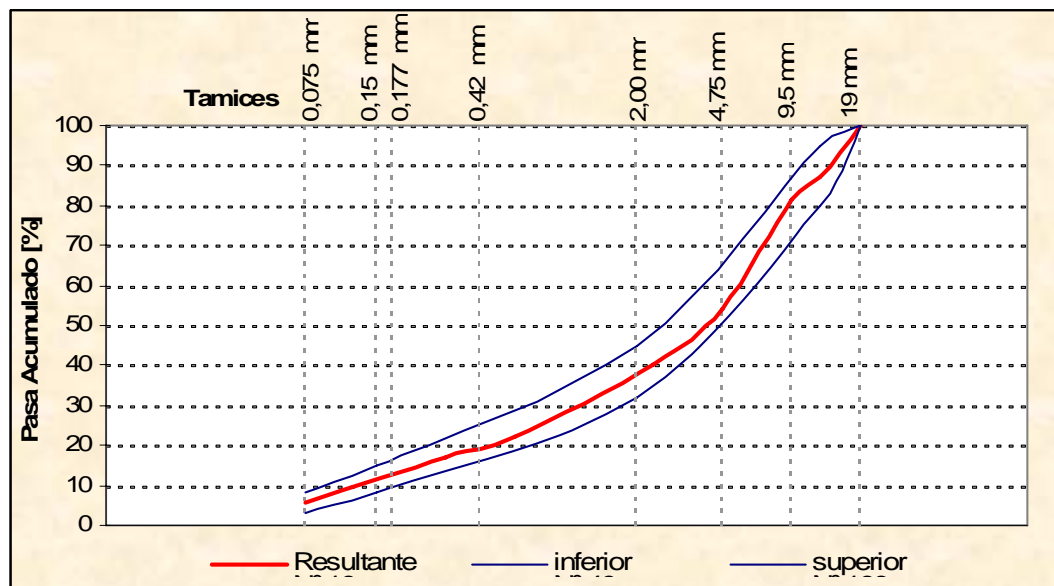
**Tabla 9 - Dosaje de la mezcla de inertes**

Material	Porcentaje
Agregado grueso 6- 20 mm.	22
Agregado grueso 6-12 mm.	30
Agregado fino de trituración 0-6 mm.	42
Arena Silíceo	5
Cal hidráulica hidratada	1

En la **Tabla 10** se presenta la granulometría resultante de la mezcla de inertes referenciándola respecto de los valores límites establecidos por la Dirección Nacional de Vialidad. Dichos valores se representan en la **Figura 2**.

**Tabla 10 - Granulometría resultante y valores límites de la D.N.V.**

MUESTRA	TAMICES							
	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	4.75 mm (Nº 4)	2.00 mm (Nº 10)	0.42 mm (Nº 40)	0.15 mm (Nº 100)	75 µm (Nº 200)
Resultante	100	87	81	54	38	19	11	5.5
Limites D.N.V.	100	80 - 95	--	--	32 - 45	--	8 - 15	3 - 8



**Figura 2 - Granulometría resultante y valores límites de la D.N.V.**

Definida la composición de los áridos en la mezcla, se procedió a calcular el contenido de agua necesaria para el mezclado.

#### 4.b.- Cálculo del contenido de agua de mezclado y humedad de compactación

Para la correcta envuelta de los áridos, es aconsejable que antes de adicionar la emulsión, se añada al árido una cierta cantidad de agua para satisfacer el carácter hidrófilo de éste, denominada comúnmente agua de preenvuelta. Esta agua es el vehículo ideal para que la emulsión llegue a recubrir todas las partículas de agregados. La cantidad de agua de mezclado debe ser la mínima que permita una correcta homogenización de la emulsión dentro de la mezcla, y que ésta no rompa prematuramente al ponerse en contacto con los agregados (principalmente los finos), situación que se originaría instantáneamente si el agua de preenvuelta es insuficiente. Por el contrario, con un excesivo contenido de agua se logra un fácil mezclado, pero

como contrapartida se produce el escurrimiento de la emulsión provocando segregación en la mezcla, además de producir demoras en la evaporación del agua, impidiendo su correcta compactación y retrasando la apertura al tránsito. Para la determinación de este parámetro se utilizó el método indicado por el Ing. Duillo D. Massaccesi en la publicación de Mezclas Asfálticas y Elaboradas en Frío, en el cual propone la utilización de coeficientes de aporte en función del tamaño y origen de los áridos (**Tabla 11**).

**Tabla 11- Coeficientes de aporte en función del tamaño y origen**

PASA TAMIZ	RETIENE TAMIZ	COEFICIENTE
19.0 mm (3/4")	2.0 mm (Nº10)	<b>1.5</b>
2.0 mm (Nº10)	0.42 mm (Nº40)	<b>1.8</b>
0.42 mm (Nº40)	0.177 mm (Nº80)	<b>4.0</b>
0.177 mm (Nº80)	0.075 mm (Nº200)	<b>6.5</b>
Filler	-----	<b>20</b>
Cal Hidráulica	-----	<b>40</b>

Para determinar el aporte de agua se realizó una nueva granulometría con los tamices indicados en la **Tabla 11**. A tal efecto los valores obtenidos se indican en la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad} = 62 \% \times 1.5 + 19 \% \times 1.8 + 7 \% \times 4.0 + 6.5 \% \times 6.5 + 4.55 \% \times 20 + 0.95 \% \times 40$$

$$\text{Humedad} = 3.2 \%$$

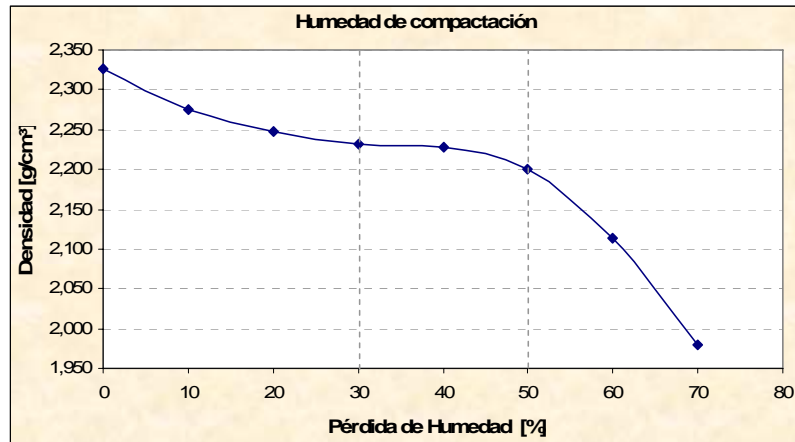
Una vez determinada la cantidad de agua de preenvuelta se elaboraron mezclas con un porcentaje de emulsión que se estima, en virtud de la experiencia, será próximo al óptimo.

Para la determinación del contenido de humedad óptima de compactación, una vez elaborada la mezcla, se moldearon probetas con distintos contenidos de humedad. Para tal cometido se hizo evaporar parte de los fluidos contenidos en la mezcla, de manera tal que la pérdida de humedad fuera incrementándose en intervalos sucesivos en aproximadamente un 10 %, para posteriormente proceder en todos los casos a su compactación bajo las mismas condiciones. Esto es, estáticamente a doble pistón con una carga de 6 toneladas.

La compactación se efectuó en dos etapas: la primera se logró en un tiempo de 2 minutos, manteniéndose la misma durante 1 minuto; luego se dejaron descansar las probetas en los moldes un tiempo aproximado de dos horas y se efectuó una segunda compactación, lográndose de esta manera un significativo aumento de la densidad respecto a la compactación realizada en una sola etapa.

En la **Figura 3** se representa la variación de la densidad con la pérdida de humedad, pudiendo observarse que hasta aproximadamente el 30 % de pérdida de humedad los valores de densidad son significativos, pero como contrapartida, durante la

compactación se produjo la expulsión y escurrimiento de una apreciable cantidad de fluido conteniendo ligante, ocasionando la consiguiente pérdida del mismo, mientras que en el rango comprendido entre el 30 y 50 % de pérdida de humedad, si bien los valores de densidad resultaron algo inferiores, no se produjo pérdida de ligante asfáltico y además los valores se mantuvieron prácticamente constantes. Con pérdidas de humedad superiores al 50 % la mezcla pierde cohesión y trabajabilidad y los valores de densidad caen bruscamente.



**Figura 3 - Variación de la densidad en función del contenidos de humedad**

Por los motivos expuestos se optó por compactar la mezcla una vez que la misma haya perdido un porcentaje de humedad del orden del 40 %.

#### **4.c.- Preparación, compactación y curado de las probetas**

Para la preparación de las probetas, se incorporó a la mezcla de agregados el porcentaje de agua de preenvuelta y se efectuó una primera homogenización hasta obtener una correcta humectación de los áridos. Posteriormente se adicionaron en forma sucesiva los distintos porcentajes de emulsión, de tal manera que el asfalto base residual quede comprendido entre 4 y 6 %. Ulteriormente se efectuó un nuevo mezclado hasta obtener un adecuado recubrimiento de los áridos, dejándose la mezcla al aire hasta que esta pierda un 40 % de los fluidos totales (agua de mezclado más la proveniente de la emulsión). Luego se la introdujo en los moldes Marshall, se le aplicó un varillado para lograr el acomodamiento de las partículas y se procedió a su compactación bajo las condiciones antes citadas.

Una vez moldeadas las probetas se realizó el curado de las mismas en estufa a 50 °C durante tres días.

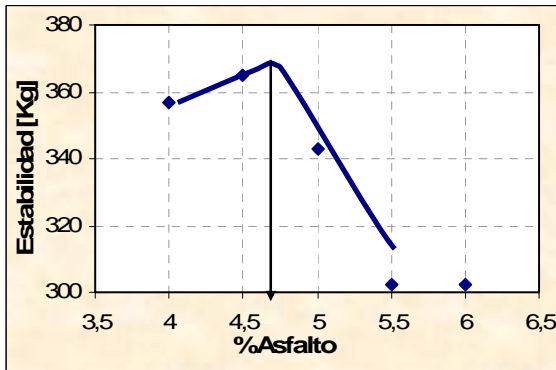
Se determinaron también las densidades aparente y Rice, siguiendo las pautas fijadas por las Normas V.N- E 12-67 y V.N- E 27-84 respectivamente.

Una vez obtenidas las densidades, previo a ensayar las probetas se las sumergió en un baño de agua termostático a  $60 \pm 1$  °C durante un tiempo de  $35 \pm 1$  minutos. Cumplimentado este requisito, las probetas fueron ensayadas en la prensa Marshall siguiendo los lineamientos de la norma VN-E9/86. Los valores consignados son el promedio de tres determinaciones. Se observó que las variaciones en los contenidos de

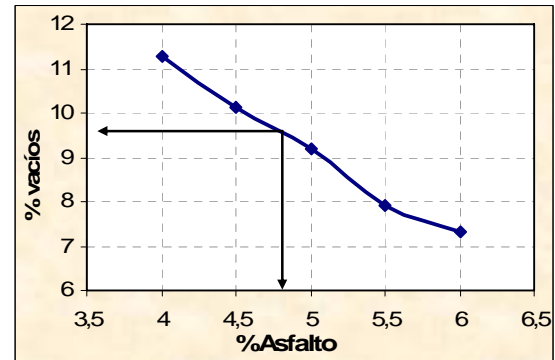
ligante no provocaron cambios significativos en los valores de la fluencia de la mezcla. Los valores obtenidos se consignan en la **Tabla 12**. El porcentaje óptimo de asfalto residual se obtuvo promediando los valores representados en la **Figura 4**, **Figura 5** y **Figura 6**.

**Tabla 12 - Resultados del Ensayo Marshall**

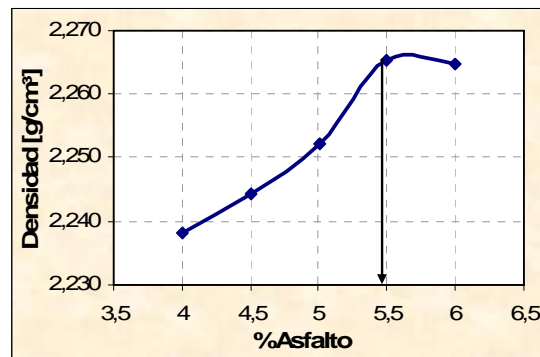
Asfalto Residual	4.0 %	4.5 %	5.0 %	5.5 %	6.0 %
Emulsión [%]	6.0	7.2	8.0	8.8	9.6
Densidad Aparente [kg/cm <sup>3</sup> ]	2.238	2.244	2.252	2.265	2.265
Densidad Rice [kg/cm <sup>3</sup> ]	2.522	2.497	2.480	2.459	2.444
% de Vacíos	11.3	10.1	9.2	7.9	7.3
Estabilidad [Kg]	358	366	344	302	302



**Figura 4 - Estabilidad vs. Asfalto residual**



**Figura 5 - Vacíos vs. Asfalto residual**



**Figura 6 - Densidad vs. Asfalto residual**

De los gráficos precedentes se obtuvo el porcentaje de Emulsión a utilizar en la mezcla según el siguiente cálculo:

$$\% \text{ Asfalto Residual} = (4.7 + 4.8 + 5.5)/3 = 5.0 \quad \text{Emulsión [\%]} = 8.0$$

Definido el porcentaje de ligante se obtuvo la concentración volumétrica de la mezcla, con este valor se calculó la relación Cv/Cs = 1.05, resultando levemente superior a la exigida por algunos pliegos.

Adoptado el porcentaje de emulsión, se realizaron una serie de ensayos utilizando como ligante bituminoso en la elaboración de las mezclas los indicados en los objetivos del trabajo, es decir una mezcla con emulsión convencional (M.E.C.), una mezcla con emulsión modificada con polímeros (M.E.M.) y una mezcla con el asfalto base (M.A.C.).

## 5.- VALORACIÓN DE LA COHESIÓN TRAS INMERSIÓN MEDIANTE EL ENSAYO DE INMERSIÓN - COMPRESIÓN

En primera instancia se realizó el ensayo de Inmersión - Compresión. A tal fin se prepararon mezclas utilizando los distintos tipos de ligante.

Para las mezclas en frío, luego de producida la evaporación del 40 % del agua total, la mezcla se introdujo en un molde de 101.5 mm de diámetro y 101.5 mm  $\pm$  25 mm de altura (NLT – 161/84) y se le aplicó un varilleo para conseguir una superficie cerrada, ulteriormente se compactó estáticamente a doble pistón con una carga de 17 toneladas. La carga se aplicó en dos etapas: para ejecutar la primera se colocó entre el molde y el fondo un suplemento con el objeto de separar estos, y se aplicó una primera carga de 1 MPa (10 kg/cm<sup>2</sup>) para provocar el asentamiento de la mezcla, luego se retiró el suplemento y se aplicó una carga de 17 toneladas, es decir una presión de 21 MPa, ejerciendo la misma durante un minuto.

Una vez desmoldadas las probetas se curaron en estufa a 50 °C durante un tiempo de tres días.

Para valorar el efecto del agua sobre la cohesión de la mezcla, se dividieron las probetas de igual porcentaje de emulsión, en dos grupos de cinco, de manera que la densidad relativa fuese aproximadamente la misma (NLT-162/84).

El primer grupo se colocó en estufa a 25  $\pm$  1 °C durante 24 horas, luego se lo sumergió en un baño de agua regulado a 25  $\pm$  1 °C durante un tiempo de 2 horas, y se procedió a determinar su resistencia a compresión simple (NLT-161/84).

El segundo grupo se colocó en un baño de agua regulado a 60  $\pm$  1°C durante 24 horas. Finalizado este periodo, se retiraron las probetas y se mantuvieron a temperatura ambiente durante 2 horas. Ulteriormente se volvieron a sumergir las mismas en un baño de agua regulado, pero en esta ocasión a una temperatura de 25  $\pm$  1 °C durante dos horas y se determinó el valor de la resistencia a compresión simple del grupo de probetas (NLT-161/84).

Para la mezcla en caliente se utilizó este ensayo de la forma tradicional. Los valores reportados son promedio de todos los resultados individuales y se indican en la **Tabla 13**.

**Tabla 13 - Resultados del ensayo de Inmersión - Compresión**

	Asfalto Residual [%]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	R.C.S. Secas [MPa]	R.C.S. Sat [Mpa]	Resistencia Conservada [%]
<b>M.E.C.</b>	<b>5</b>	<b>2.338</b>	<b>5.7</b>	<b>3.63</b>	<b>3.56</b>	<b>98.1</b>
<b>M.E.M.</b>	<b>5</b>	<b>2.324</b>	<b>6.3</b>	<b>3.87</b>	<b>3.68</b>	<b>94.9</b>
<b>M.A.C.</b>	<b>5</b>	<b>2.323</b>	<b>6.0</b>	<b>4.15</b>	<b>3.57</b>	<b>86.8</b>

En la **Tabla 13** puede observarse que para el ensayo de Inmersión - Compresión, la variación en el tipo de ligante no produjo cambios significativos en los valores de las densidades. Lográndose una mayor densificación en la mezcla con emulsión convencional y por ende un menor porcentaje de vacíos.

Sin embargo las resistencias son mayores para la emulsión modificada, esto es sólo atribuible al polímero incorporado en la emulsión. Los valores máximos de resistencia como era de esperar se logran para el asfalto en caliente.

Puede además observarse que la resistencia conservada, ya sea de la mezcla elaborada con emulsión convencional como con emulsión modificada, presenta valores altamente satisfactorios. En tanto la mezcla elaborada en caliente con el betún base de la emulsión, muestra valores de resistencia conservada algo inferior respecto de las mezclas en frío, aunque igualmente aceptables, dado que el mínimo admisible generalmente impuesto en las especificaciones es del orden del 75 al 80 %.

El ensayo de Inmersión - Compresión no permite diferenciar en gran medida los distintos ligantes utilizados, debido fundamentalmente a las altas cargas de compactación que se utilizan. Por tal motivo las densidades son muy similares.

## **6.- ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA**

Otro de los ensayos ejecutados a las mezclas fue el de Tracción Indirecta por compresión diametral a probetas tipo Marshall, de acuerdo a lo estipulado en la norma NLT 346/90. La compactación para las mezclas en frío fue efectuada estáticamente a doble pistón con una carga de 6 toneladas, mientras que la mezcla en caliente se compactó con pisón Marshall con 75 golpes por cara a una temperatura de 140 °C. Las probetas fueron divididas en dos grupos, uno de ellos se ensayó en seco, a distintas temperaturas (5, 25 y 45 °C) y el otro, tras inmersión, sólo se realizó a 5 °C. De esta manera se pudo evaluar la resistencia a la tracción indirecta a distintas temperaturas y la adhesividad del par árido-ligante.

### **6.a.- Valoración del efecto del agua**

Se elaboraron 6 probetas para cada tipo de ligante. El curado de las mezclas en frío se efectuó a 50 °C en estufa durante tres días.

El ensayo de tracción Indirecta se efectuó a una temperatura de 5 ± 1°C. En la **Tabla 14** se reportan los resultados obtenidos para las mezclas en estudio.

**Tabla 14 - Resistencia Conservada**

	Asfalto Residual [%]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	R.T.I. Seca [MPa]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	R.T.I. Sat. [MPa]	Resistencia Conservada [%]
<b>M.E.C.</b>	<b>5</b>	<b>2.241</b>	<b>9.6</b>	<b>1.57</b>	<b>2.243</b>	<b>9.5</b>	<b>1.33</b>	<b>84.7</b>
<b>M.E.M.</b>	<b>5</b>	<b>2.260</b>	<b>8.8</b>	<b>1.78</b>	<b>2.260</b>	<b>8.8</b>	<b>1.58</b>	<b>88.7</b>
<b>M.A.C.</b>	<b>5</b>	<b>2.369</b>	<b>4.1</b>	<b>3.08</b>	<b>2.369</b>	<b>4.1</b>	<b>3.06</b>	<b>99.3</b>

Para las mezclas en frío se observa que las elaboradas con emulsión modificada, presentan valores de densidad y resistencia a la tracción indirecta tanto en vía seca como en saturada algo mayores. También presenta un menor tenor de vacíos. Esto indica que la compactación estática con 6 toneladas es más representativa que la conseguida con la carga de 17 toneladas., utilizada en el ensayo de Inmersión – Compresión.

#### **6.b.- Valoración del efecto de la temperatura**

Para esta parte del estudio se fabricaron 6 probetas para cada tipo de ligante y se dividieron en dos subgrupos de características semejantes. Uno de ellos se ensayó a 25 °C y el restante a 45 °C. Los resultados son los indicados en la **Tabla 15**, y en el **Figura 7** puede observarse la variación de la resistencia a la Tracción Indirecta en seco con la temperatura de ensayo. En el mismo se aprecia que la caída de la resistencia con la temperatura de ensayo en valor absoluto es mayor para la mezcla en caliente, pues la pérdida de resistencia es de 2.93 MPa. Sin embargo si se consideran las pérdidas de resistencia en valores relativos, los porcentajes de disminución son similares para las distintas mezclas, cuando la temperatura de ensayo pasa de 5 a 45 °C, oscilando entre un 95 y 98 %.

**Tabla 15 - Resistencia a la Tracción Indirecta a 25 °C y 45 °C**

	Asfalto Residual [%]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	R.T.I. a 25 °C [MPa]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	R.T.I. a 45 °C [MPa]
<b>M.E.C.</b>	<b>5</b>	<b>2.235</b>	<b>9.8</b>	<b>0.39</b>	<b>2.231</b>	<b>10.0</b>	<b>0.07</b>
<b>M.E.M.</b>	<b>5</b>	<b>2.258</b>	<b>8.9</b>	<b>0.59</b>	<b>2.253</b>	<b>9.2</b>	<b>0.10</b>
<b>M.A.C.</b>	<b>5</b>	<b>2.361</b>	<b>4.5</b>	<b>0.85</b>	<b>2.360</b>	<b>4.5</b>	<b>0.15</b>

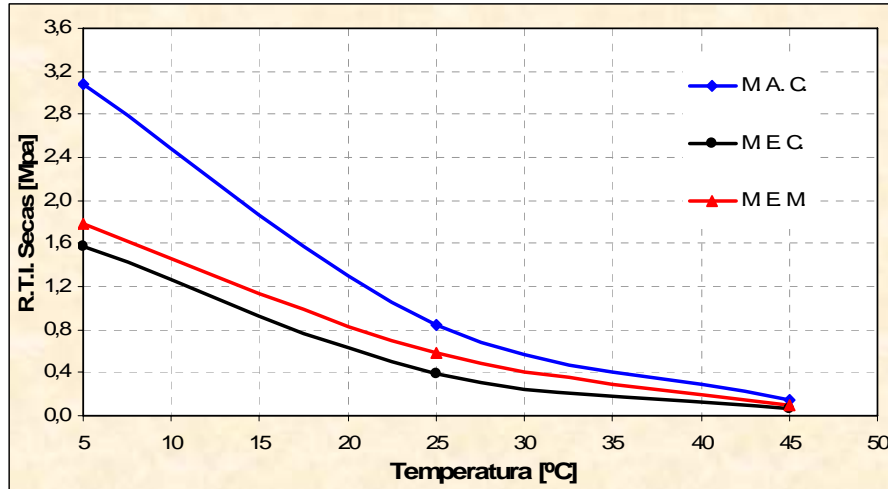


Figura 7 - Variación de la Resistencia a la Tracción con la Temperatura de Ensayo

## 7. ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS (WHEEL TRACKING TEST)

En una primera instancia se intentó moldear las muestras de WWT con la metodología utilizada para las mezclas en caliente, siguiendo las pautas establecidas en la Norma NLT 173-84, pero el grado de densificación alcanzado resultó insuficiente. Se consiguieron densidades de 2.103 g/cm<sup>3</sup> para la emulsión convencional y de 2.071 g/cm<sup>3</sup> para la emulsión modificada. A los efectos de conseguir las densidades deseadas se procedió de la siguiente manera:

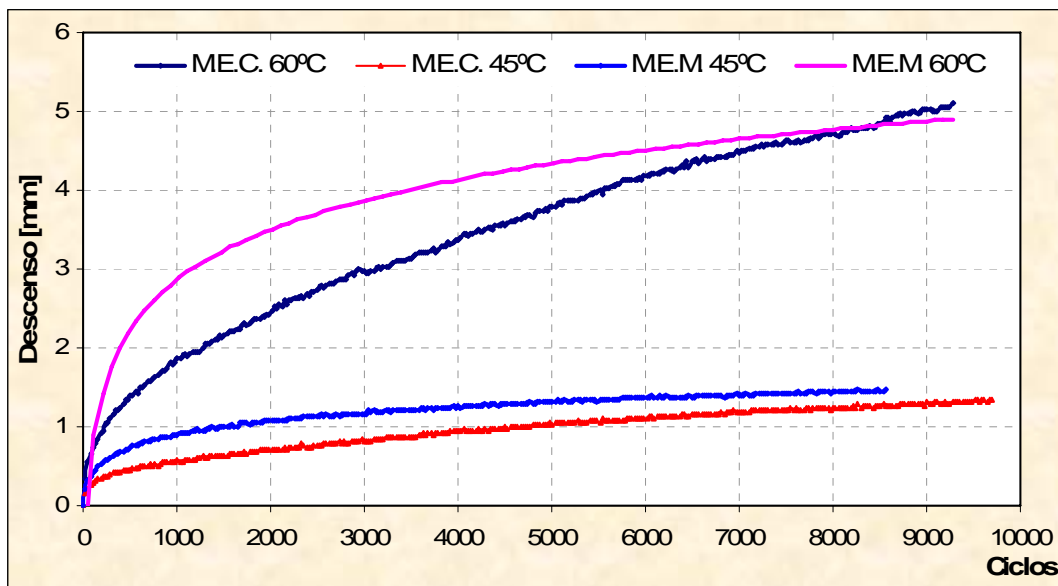
Se hizo evaporar al aire un 40 % de los fluidos totales, luego se introdujo la mezcla en el molde, se la compactó con la placa vibrante. Posteriormente se introdujo el molde en estufa a 60 °C durante 24 horas, lapso en el que evaporó aproximadamente un 60 % de los fluidos totales. Por último se la retiró de la estufa, dejándola enfriar y se la recompactó con la placa vibrante. Finalmente se introdujo en la estufa hasta alcanzar una pérdida del 96 % de los fluidos totales.

Con esta metodología se logró un aumento de la densidad en un 6 % con respecto a las probetas que fueron compactadas una sola vez. Los resultados de densidades se presentan en la **Tabla 16**.

**Tabla 16 - Densidades de las muestras ensayadas**

Densidad Aparente (compactada dos veces) [g/cm <sup>3</sup> ]	
M.E.C a 60 °C	2.245
M.E.M a 60 °C	2.239
M.E.C. a 45 °C	2.241
M.E.M a 45 °C	2.236

El ensayo de ahuellamiento se efectuó a 45 y 60 °C. En la **Figura 8** se presentan las curvas obtenidas en dicho ensayo.



**Figura 8 - Ensayo de Wheel Tracking Test**

En el ensayo Wheel Tracking Test puede observarse que para temperaturas de 45 °C, las curvas de deformaciones para ambos tipos de emulsión son muy similares y los valores de ahuellamiento aceptables, mientras que para temperaturas de 60 °C la mezcla elaborada con emulsión modificada presenta una mayor deformación al inicio del ensayo, pero luego la curva se horizontaliza, mientras que en la emulsión convencional mantiene su pendiente creciente hasta el final del ensayo. Esto indica una

mejor respuesta de la emulsión modificada a las deformaciones plásticas, cuando se la somete a altas temperaturas.

De igual manera puede apreciarse que los valores de ahuellamiento son aceptables para ser utilizadas en capa de rodamiento.

## 7.- CONSIDERACIONES FINALES

- De los ensayos efectuados a las mezclas estudiadas, puede inferirse que para el caso particular que nos ocupa, una dotación del 8% de ligante bituminoso emulsificado resulta el adecuado.
- El ensayo de Inmersión - Compresión no permite diferenciar en gran medida los distintos tipos de ligantes, debido fundamentalmente a las altas cargas de compactación que se utilizan, motivo por el cual las densidades son muy similares.
- La valoración del efecto del agua mediante el ensayo de Tracción Indirecta con muestras compactadas estáticamente con 6 toneladas, permitió visualizar que las mezclas en frío elaboradas con emulsión modificada presentan valores de densidad y resistencia a la tracción indirecta tanto en vía seca como saturada algo superiores.
- La compactación estática con 6 toneladas es más representativa que la conseguida con la carga de 17 toneladas utilizada en el ensayo de Inmersión - Compresión.
- Al evaluar el efecto de la temperatura de ensayo mediante Tracción Indirecta, pudo observarse que la caída de la resistencia con la temperatura en valor absoluto es mayor para la mezcla en caliente. Sin embargo si se consideran las pérdidas de resistencia en valores relativos, los porcentajes de disminución son similares para las distintas mezclas.
- El ensayo Wheel Tracking Test muestra que para temperaturas de 60 y 45 °C las curvas de deformaciones presentan valores de ahuellamiento aceptables para ambas mezclas.

Como tareas futuras se prevé el estudio de los módulos dinámicos de las mezclas reportadas en el presente estudio, para posteriormente ejecutar un tramo experimental, a los efectos de corroborar si los datos obtenidos en laboratorio pueden reproducirse con un cierto margen de tolerancia en campaña. La ejecución de dicho tramo y la evolución del comportamiento será motivo de otra comunicación.

## 9.- BIBLIOGRAFÍA

- ✓ NOSETTI Rodolfo, BIANCHETTO Hugo y DAGUERRE Lisandro “Propiedades de las mezclas asfálticas”. Apuntes de la cátedra de Materiales Viales IV del Magister en Ingeniería Vial de la Facultad de Ingeniería de la U.N.L.P. (2001).
- ✓ RUBIO Baltasar. “Emulsiones asfálticas. Emulsiones modificadas”. XII Curso Internacional de Carreteras, Madrid (1996).
- ✓ AGNUSDEI Jorge. “Emulsiones asfálticas”. Apuntes de la cátedra de Materiales Viales III del Magister en Ingeniería Vial de la Facultad de Ingeniería de la U.N.L.P. (2001).
- ✓ CIAFARDO Oscar, MASSACCESI Duillo. “Concretos asfálticos elaborados con emulsiones bituminosas, proyecto y técnicas constructivas”. Instituto de Pesquisas Rodoviaras, Pub. 417. Río de Janeiro (1970).
- ✓ CIAFARDO Oscar, MASSACCESI Duillo. “Estudios de laboratorio y resultados de obras ejecutadas con concretos asfálticos en frío”. XXV Reunión del Asfalto (1988).
- ✓ FERNANDEZ DEL CAMPO Juan Antonio. “Pavimentos bituminosos en frío”. Editores Técnicos Asociados S.A. (1983).
- ✓ MARTINEZ Adriana Haydée. “Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución”. Tesis Doctoral. Barcelona (2.000).
- ✓ CASTILLO AGUILAR Saúl (1999). “Técnicas y metodologías empleadas en el estudio de una mezcla mixta para la rehabilitación de pavimentos reciclados en frío -in situ- empleando emulsión y cemento”. (1999).