



*Ministerio de Educación de la Nación  
Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional La Plata*

EXPOSICIÓN DE TESIS DE  
BECARIOS DE INVESTIGACIÓN **2013**  
**“Nicolas Ellena”**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL LA PLATA**

Decano:

**Ing. Carlos Fantini**

Vicedecano:

**Ing. Fernando Zabala**

Consejo Asesor de Ciencia y Tecnología

Secretaria Ejecutiva:

**Dra. Andrea Pereyra**

Consejeros:

**Dr. Jorge Reyna Almandoz**

**Dr. Osvaldo Pascual**

**Ing. Mario Rosato**

**Mg. Ing. Gerardo Botasso**

**DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL**

Director:

**Mg. Ing. Gerardo Botasso**

Secretario:

**Prof. Jorge Sota**

## **INDICE**

---

### **ALONSO AGUSTINA**

Ensayos acelerados de desarrollo de hongos sobre cementos de diferentes adiciones.

### **CATRIEL GISELA**

Evaluación del envejecimiento del ligante asfáltico en su etapa en servicio.

### **CEDRIK SOLEDAD**

Evaluación de la resistencia a tracción de geotextiles no tejidos embebidos en emulsión asfáltica modificada mediante dos métodos de ensayo.

### **CELI IGNACIO**

Aplicación y ajuste del procedimiento para el moldeo de probetas de suelo granular en el ensayo.

### **URRUSPURU JUAN**

El diseño de canales como un problema de optimización numérica.

### **EMILIANO MUÑOZ; NICOLÁS VARRIANO; VALIGURA FLAVIA; ALEGRE SANTIAGO; GIRBAL JAVIER; BORMAPÉ NATALIA.**

Optimización del diseño en viviendas de madera.

### **FARIAS DIEGO**

Funcionamiento de plantas asfálticas y su correlación con el análisis de precios.

### **GERARDI CAROLINA**

Caracterización de los materiales y dosificación de lechadas asfálticas y microaglomerados en frío.

### **GIMENEZ FRANCO**

Suelos dispersivos o erodables.

### **PALMITANO FLORENCIA**

Optimización de la sección de proyecto de un canal trapecial revestido.

### **IRVIN QUISPE SALLO**

Evaluación del módulo de elasticidad estático de hormigones de distinta clase.

**PRUNELL SABRINA**

Evaluación superficial de pavimentos asfálticos a través del índice de estado.

**APAS LIGHUEN**

Desarrollo de modelos de correlación entre parámetros marshall y módulo dinámico en mezclas asfálticas en función de la frecuencia y temperatura de ensayo.

**LEGATO NAHUEL**

Evaluación de las propiedades de hormigones con incorporación de residuos de arena de fundición.

**ASUAJE DARIO**

Introducción a la caracterización de mezclas asfálticas con el ensayo marshall, mediante la automatización de la prensa empleada.

**NABER MARCOS**

Determinación de la capacidad y velocidad de succión en diferentes tipos de hormigón.

**OCCHIUTO CHRISTIAN**

Optimización de la sección de proyecto de conductos rectangulares con escurrimiento a superficie libre.

**ROSSI JAVIER**

Valoración de la acción de geosintéticos entre capas de hormigón para pavimentos.

**ZAPATA IGNACIO**

Fundamentos teóricos del contador de partículas. Su aplicación en las emulsiones asfálticas.

**NICOLAS ELLENA**

Análisis de dispersión de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso en asfaltos de uso vial

# “ENSAYOS ACELERADOS DE DESARROLLO DE HONGOS SOBRE CEMENTOS DE DIFERENTES ADICIONES”

Becario: Agustina Belen Alonso<sup>1</sup>  
Director: Dra. Vilma G. Rosato<sup>2</sup>

---

## 1. Resumen

Los morteros de cemento y hormigones son susceptibles, además de los cambios climáticos, a diversos organismos como líquenes y mohos. Estos daños producidos son principalmente estéticos, pero también pueden ser físicos y químicos. El objetivo se observar el crecimiento del moho *Aspergillus niger* en probetas de mortero de cemento con 1% de ftalocianato cúprico azul y verde para analizar el potencial efecto biocida. Sin embargo, luego de la inoculación y la incubación de las probetas, se halló crecimiento del moho al observar bajo MEBA (Microscopía Electrónica de Barrido Ambiental). Los microanálisis EDE (Espectrometría de Dispersión de Electrones) no detectaron cobre, por lo que el pigmento no es suficiente para lograr acción biocida.

## 2. Abstract

Cement mortars and concretes are subjected, besides weather conditions, to different organisms as lichens and moulds. The damage they cause aer principally aesthetic, but it can also be physical and chemical. The aim of this research is to observe the growth of the mould *Aspergillus niger* on cement mortar test samples with 1% cupric phtalocyanate blue and green pigment to assess the potential biocide effect. However, after inoculation and incubation of the test samples, mould growth was observed under ESEM (Enviromental Scanning Electron Microscopy). On the other hand, EDS microanalysis (Electron Dispersive Spectrometry) did not detect copper, so the pigment is not enough to have a biocide effect.

## 3. Fundamentos

El crecimiento de moho en morteros de cementos y hormigones no solo causa daños estéticos, físicos y químicos, sino que también pueden presentar un grave problema para la salud de las personas que habiten en dicho lugar, dado que estos mohos, en ocasiones, pueden causar alergias.

En trabajos anteriores (1, 2,3), para estudiar el desarrollo de hongos sobre cementos con diferentes adiciones se confeccionaron probetas de mortero con concentraciones diferentes de filler, puzolana y escorias y se observó que el principal factor es el porcentaje de poros mayores a 1 µm.

En este trabajo se tratará de demostrar cómo crece el moho *Aspergillus niger* en probetas con adiciones de pigmentos azul y verde (ftalocianato cúprico) al 1% para verificar si la presencia de cobre es suficiente para lograr efecto biocida. De este modo, los cementos coloreados tendrían, además de la función estética, una mayor resistencia al crecimiento de microorganismos.

---

<sup>1</sup> Becaria de investigación del Centro LEMaC Depto. de Ingeniería Civil

<sup>2</sup> Directora de Beca. Directora del proyecto asociado

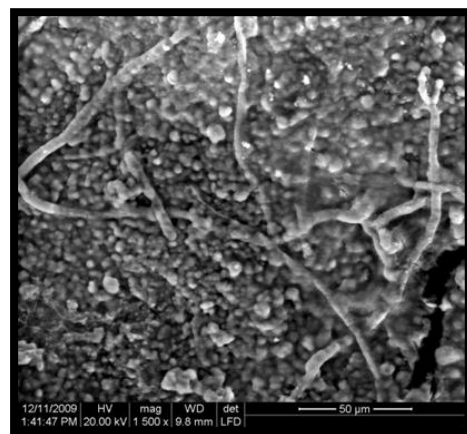
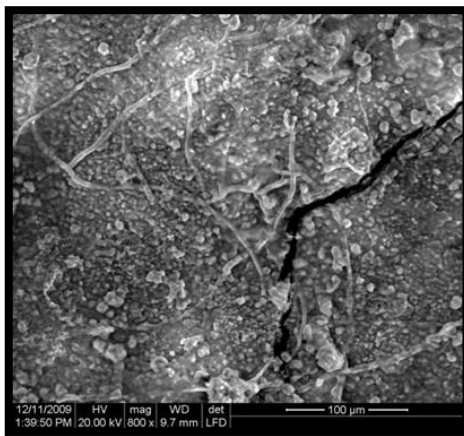
#### 4. Desarrollo experimental

Se moldearon probetas de 6 x 1 x 1 cm. de mortero con un porcentaje de adición de 1% de ftalocianato cúprico en sus dos formas: azul y verde. Luego del curado, las probetas se inocularon con *Aspergillus niger* y se incubaron durante 4 meses en capsulas acondicionadas para mantener la humedad.

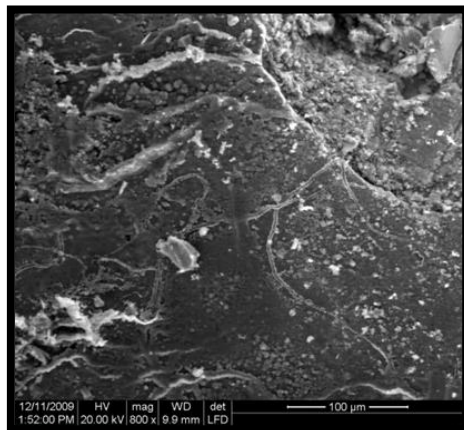
Luego de ese periodo, se observaron bajo microscopio estereoscópico, y bajo microscopio electrónico de barrido ambiental (MEBA). También se hicieron microanálisis de espectrometría de dispersión de electrones (EDE).

#### 5. Análisis de Resultados

En las fotos obtenidas en el MEBA (Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental) se observa que las hifas del moho comenzaron su crecimiento, pero no llegaron a desarrollarse plenamente y esporular, como si se observó en los de morteros de cemento comunes.



En las figuras 1 y 2 se observan las probetas con pigmento verde y el crecimiento de las hifas de *Aspergillus niger*.



En las 3 y 4 se observan las probetas con pigmento azul y el crecimiento de las hifas de *Aspergillus niger*.

Además se realizó un microanálisis de espectrometría de dispersión de electrones (EDE). Los resultados del mismo se detallan en la siguiente tabla. Cabe destacar que no se detectó cobre, siendo este el componente del ftalocianato cúprico.

| Elemento        | C    | O     | Na   | Mg   | Al   | Si    | S    | K    | Ca    | Fe   |
|-----------------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|
| Mortero verde   | 8,15 | 44,39 | 0,98 | 0,79 | 3,77 | 10,62 | 0,82 | 0,35 | 29,30 | 0,68 |
| Mortero celeste | 8,12 | 43,59 | 0,24 | 0,93 | 2,13 | 6,32  | 0,63 | 0,30 | 39,89 | 0,65 |

## 6. Conclusiones

Se observa que el contenido de cobre del pigmento agregado al mortero no tiene efecto, ya que se observó el desarrollo del moho. También se observó que los morteros son de baja porosidad, por lo que se puede considerar que esa haya sido la causa del escaso desarrollo del hongo y no así el cobre, pese a ser un biocida, ya que no se detectó su presencia con EDE debido a su escaso porcentaje.

## 7. Bibliografía

1. Rosato V. G., Sota J. D. y Prunell S. B. 2013- Influence of cement materials' composition on microbiological colonization of dams. EN: Khelifi, S. (Ed.): "Dams: structure, performance and safety management.", Nova Publishing Group, Londres, pp. 265- 278.
2. Rosato, V. G., Sota, J.D., Prunell, S. B., 2012. El crecimiento del moho *Aspergillus niger* y el contenido de calcio de los morteros de cemento normal y con adiciones. 2ª Reunión de Materiales Tecnológicos de Argentina Matte@r 2012, San Rafael, Mendoza, 28 al 30 de mayo de 2012.
3. Prunell S. B., Rosato V. G., Sota J.D. 2012 Adiciones en el cemento Portland y su relación con el biodeterioro. V Congreso Internacional de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 19ª Reunión Técnica "Ing. Oscar R. Batic" y 4º Concurso Nacional de alumnos, Bahía Blanca, 7-9 de Noviembre de 2012. pp. 15-21

# “EVALUACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO DEL LIGANTE ASFÁLTICO EN SU ETAPA EN SERVICIO”

**Becario: Gisela Alejandra Catriel** <sup>(1)</sup>

**Director: Ing. Oscar Raul Rebollo** <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Estudio de los factores relacionados con el envejecimiento por termo-oxidación a corto plazo de ligantes asfálticos y las regulaciones aplicables”

Código UTN: UTI-1094 Código de Incentivos 25/I045

---

## 1. Resumen

Uno de los daños superficiales que contribuyen al deterioro en el tiempo de las mezclas asfálticas es el proceso de envejecimiento.

Los mecanismos que intervienen en el proceso de envejecimiento, están asociados a cambios de orden químico, físico, mecánico y reológico. En general, las alteraciones de orden químico, como la volatilización y la oxidación, producen un reacomodamiento en la estructura molecular del asfalto, la manifestación de respuesta a estos cambios radica en el endurecimiento de las mezclas y por consiguiente la mezcla se convierte lentamente en un material frágil susceptible a agrietarse. La consecuencia de estos cambios es la aparición de grietas por donde se inicia un proceso de deterioro en el pavimento por el ingreso de agua y vapor al interior de la mezcla, lo que conlleva a la pérdida de cohesión y daños por humedad, reduciendo el desempeño del pavimento asfáltico.

Como ya hemos estudiado el envejecimiento del asfalto en su etapa constructiva, en la presente tesis se evalúan las propiedades físicas, químicas y reológicas del asfalto recuperado de la carpeta asfáltica en servicio, luego de un año de haber sido colocada, con la finalidad de establecer el grado de envejecimiento del material en todas sus etapas (constructivas y de servicio).

## 2. Abstract

One of the surface damage that contribute to the deterioration over time of asphalt mixtures is the aging process.

The mechanisms involved in the process are associated with changes in chemical, physical, mechanical and rheological order. In general, changes in chemical nature, such as volatilization and oxidation, produce a rearrangement in the molecular structure of the asphalt, the manifestation of these changes answer lies in the hardening of the mixture and therefore the mixture slowly becomes a brittle material susceptible to cracking. The consequence of these changes is the occurrence of cracks through which a process of decay begins on the pavement by the ingress of water and steam into the mixture, which leads to loss of cohesion and moisture damage, reducing the performance asphalt pavement.

As we have studied the aging of asphalt in its construction stage, in this thesis will evaluate the physical, chemical and rheological properties of asphalt recovered from the asphalt in service, after a year of property have been placed, in order to establish the degree of aging of the material at all stages (construction and operation).

(1) Becario del LEMaC Centro de Investigaciones Viales, Dpto. de Ing. Civil

(2) Director de Beca

### 3. Fundamentos

El asfalto se envejece debido a pérdidas de volátiles y oxidación de ciertas moléculas, produciéndose cambios en sus propiedades. En general presentan una gran resistencia al envejecimiento como consecuencia de su naturaleza, fundamentalmente hidrocarbonada de baja radiactividad, pero durante su manipulación y puesta en servicio están sometidos a una serie de factores y agentes externos que originan cambios en su composición y repercuten negativamente sobre sus propiedades.

El envejecimiento puede ocurrir en dos etapas

- a corto plazo, este fenómeno se debe a la pérdida de componentes volátiles mientras la mezcla está caliente.
- a largo plazo, se produce por las condiciones ambientales y los efectos del clima que generan una oxidación progresiva durante el tiempo de servicio.

En la estructura del asfalto existen maltenos y asfaltenos, en diversas proporciones. Según el grado de aromaticidad de los maltenos y la naturaleza de la concentración de los asfaltenos, se pueden formar dos tipos de estructuras:

- Asfalto tipo sol, en los cuales las micelas del asfalto se mueven libremente entre sí.
- Asfalto tipo gel, en el cual las micelas, por atracción mutua, forman una estructura en toda la masa bituminosa.

Los **asfaltos tipo sol** tienen alta ductilidad, gran susceptibilidad a los cambios de temperatura, su elasticidad no puede medirse y tiene un elevado desarrollo de resistencia con el tiempo.

Los **asfaltos tipo gel** tienen baja ductibilidad, baja susceptibilidad a los cambios de temperatura, su elasticidad no puede medirse y tiene un bajo desarrollo de resistencia con el tiempo. Hay un tipo de asfaltos llamados *medianos* que tiene una estructura intermedia entre sol y gel.

Es por ello que desde la tesis del año anterior se analizó el asfalto para determinar el envejecimiento a corto plazo. El asfalto proveniente de la destilería (camión), su almacenamiento en obra (cisterna), la fabricación en la planta asfáltica (tolva de descarga) y extracción de la muestra en obra luego de ser colocada por la terminadora. Tanto el almacenamiento en destilería como en planta asfáltica debe ser cuidadosamente tratado, ya que la combinación de prolongados tiempos de exposición a altas temperaturas pueden producir pérdidas de componentes volátiles, oxidación y otros procesos que envejecen el asfalto.

Para analizar el asfalto luego de la fabricación de la mezcla, a la salida de la planta y después de su paso por la terminadora, se somete a la mezcla a la "Práctica Estándar para Recuperación de Asfalto de una Solución Usando el Evaporador Rotatorio (Rotovapor)" según norma ASTM D 5404 – 03 para obtener el ligante asfáltico.

Una vez que se cuenta con todas las muestras de asfalto, se analizan en laboratorio por medio de los ensayos físicos de Penetración, según la norma IRAM 6576 y Punto de Ablandamiento, según la Norma IRAM 6841. Para conocer sus propiedades



reológicas, se realiza el ensayo de Viscosidad con el viscosímetro rotacional Brookfield Thermosel según la norma IRAM 6837. Para obtener los componentes químicos y determinar el Índice de Inestabilidad Coloidal, se realiza el ensayo de Cromatografía de Capa Delgada, más conocido con las siglas en inglés TLC, según la norma ASTM D4124.

Para la evaluación a largo plazo del ligante, se tomaron testigos de la carpeta asfáltica colocada en obra luego de un año en servicio. Se llevaron a estufa para disgregar la mezcla (debidamente identificadas) y luego someterla a la “Practica Estándar para Recuperación de Asfalto de una Solución Usando el Evaporador Rotatorio (Rotovapor)” según norma ASTM D 5404 – 03.

Una vez obtenido el asfalto recuperado, se volvieron a realizar los ensayos físicos, químicos y reológicos, con el fin de comparar los resultados de los ensayos de las evaluaciones del trabajo anterior.

#### **4. Desarrollo experimental**

La mezcla asfáltica estudiada en la tesis anterior fue colocada en Plaza Brandsen en el tramo comprendido entre las avenidas 25 y 60, de la ciudad de La Plata.

Después de un año en servicio, se procedió a la extracción de testigos para evaluar el grado de envejecimiento. Para ello se extrajeron 3 testigos de 10 cm de diámetro y espesor variable, siendo los 5 cm superiores los analizados ya que correspondían al ligante estudiado con anterioridad. En las Fotos N° 1 y 2, se puede apreciar la extracción y en detalle, los testigos analizados.



**Foto N° 1.** Extracción de testigos



**Foto N° 2.** Vista de los testigos

Los testigos extraídos fueron cortados para desprejar la capa de mezcla con más que un año de tiempo en servicio. Una vez obtenido el espesor de mezcla estudiada, se procedió a disgregar los mismos, con el fin de obtener el asfalto por medio del ensayo del rotovapor. El ligante fue caracterizado por medio de los distintos ensayos:

- Físicos: Penetración según la norma IRAM 6576 y Punto de Ablandamiento según la Norma IRAM 6841.
- Reologicos: Viscosidad con el viscosímetro rotacional Brookfield Thermosel según la norma IRAM 6837
- Químicos: Cromatografía de Capa Delgada.

En la tabla N° 1, veremos detallada cada una de las caracterizaciones obtenidas en las distintas etapas.

| Datos                                   | Camión      | Tanque      | Mezcla de Planta | Mezcla de Terminadora | Testigos     |
|---|-------------|-------------|------------------|-----------------------|--------------|
| Saturados (%)                           | 16,9        | 15,5        | 14,9             | 14,4                  | 15,7         |
| Nafténico Aromático (%)                 | 45,5        | 45,6        | 40,8             | 38,7                  | 35,5         |
| Polar Aromático (%)                     | 29,1        | 29,5        | 33,0             | 33,0                  | 35,1         |
| Asfáltenos (%)                          | 8,5         | 9,4         | 11,3             | 13,9                  | 13,7         |
| <b>Índice de Inestabilidad Coloidal</b> | <b>0,34</b> | <b>0,33</b> | <b>0,36</b>      | <b>0,39</b>           | <b>0,42</b>  |
| <b>Penetración (0.1 mm)</b>             | <b>52</b>   | <b>52</b>   | <b>82</b>        | <b>33</b>             | <b>27</b>    |
| <b>Punto de Ablandamiento (°C)</b>      | <b>54</b>   | <b>55</b>   | <b>56</b>        | <b>61</b>             | <b>62</b>    |
| <b>Viscosidad a 60 °C (dPa*s)</b>       | <b>3243</b> | <b>3292</b> | <b>5240</b>      | <b>10053</b>          | <b>13170</b> |
| <b>Viscosidad a 135 °C (mPa*s)</b>      | <b>571</b>  | <b>597</b>  | <b>725</b>       | <b>985</b>            | <b>1047</b>  |

**Tabla N° 1.** Resultados de los ligantes asfálticos analizados

El Índice de Inestabilidad Coloidal, nos indica si el ligante es tipo sol o gel. El límite para que sea tipo sol es menor a 0,6.

Por ello se analizó el ligante en sus diferentes etapas con el fin de valorar si existen cambios en la estructura del asfalto debido al envejecimiento.

## 5. Conclusiones

El objeto de esta tesis fue evaluar la influencia del fenómeno del envejecimiento en las propiedades físicas, químicas y reológicas del asfalto, bajo la acción de los distintos grados de temperatura a la cual estuvo sometida la mezcla. Estos procesos son irreversibles y promueven la tendencia a formar asociaciones moleculares que originan diversos problemas durante la producción, refinación, manejo, aplicación y vida en servicio de las mezclas que producimos.

Analizando las características del asfalto durante la confección de una mezcla asfáltica hasta su puesta en servicio se puede decir que mientras exista un control que acote los tiempos de exposición del asfalto a las temperaturas requeridas en el proceso constructivo, con la tecnología representativa de lo disponible en la región, las variaciones registradas en las variables evaluadas, permiten seguir clasificando al ligante como tipo sol.

De esta forma el asfalto está en un entorno de calidad aceptable al momento de entrar en servicio en la calzada lo que permite un buen desempeño durante su vida útil.

## **6. Bibliografía**

- Bolzán, P. y Balige M. (1990). “Sistema de Clasificación de Asfaltos Modificados Basados en sus Propiedades Fundamentales”. Reunión Técnica de la Comisión Permanente del Asfalto.
- Botasso, H. (2007). “Inclusión de Caucho Reciclado en Mezclas Asfálticas”. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental.
- Cárdenas J. y Fonseca E. (2009). “Modelación del Comportamiento Reológico de Asfalto Convencional y Modificado con Polímero Reciclado, Estudiada desde la Relación Viscosidad – Temperatura”. Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquía. N° 12 p. 125-137.
- Figueroa Infante, A. S.; Fonseca Santanilla E. B. y Reyes Lizcano F. A. (2008). “Caracterización físico - química y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado”. Tesis de Investigación denominada Comportamiento Mecánico de una mezcla asfáltica MDC-2 modificada con polímero y polvo de llanta.
- Miro Roccosens, R. y Perez Jimenez, F. (1989). “Evaluación de la Resistencia al Envejecimiento de los Ligantes Bituminosos Mediante el Método Funcional UCL”. Congreso Chileno del Asfalto.
- Vargas, X. y Reyes F. (2010). “El Fenómeno de Envejecimiento de los Asfaltos”. Ingeniería e Investigación, Vol. 30, No. 3, p. 27-44.

# “EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN DE GEOTEXTILES NO TEJIDOS EMBEBIDOS EN EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA MEDIANTE DOS METODOS DE ENSAYO”

**Becaria: Paola Soledad Cedrik** <sup>(1)</sup>  
Director: Ing. Luis Delbono <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Sistema dinámico de valoración para el control de fisuración refleja usando Geosintéticos como S.A.M.I. en la rehabilitación de pavimentos”; Código Universidad: UTI1617; Resolución del Consejo Directivo FRLP N° 164/11; Disposición SCTyP de Rectorado N° 288/11; Incentivos 25/I054.

---

## 1. Resumen

Los Geotextiles embebidos en asfalto son utilizados en la rehabilitación de pavimentos previniendo la reflexión de fisuras, actuando adicionalmente como capa impermeable; los mismos trabajan a tracción dentro del paquete estructural.

Nuevos ligantes han surgido en el mercado buscando mejorar distintas variables, entre ellas la adherencia, donde una dotación excesiva originará una superficie potencial de falla. En base a ello se ensayan a tracción, geotextiles no tejidos en poliéster de 150 g/m<sup>2</sup>, por dos métodos diferentes, luego de ser embebidos a diferente temperatura de aplicación de emulsión asfáltica modificada con polímero del tipo SBS; se analizan los resultados alcanzados por los diferentes métodos y se realiza la comparación con el material virgen.

## 2. Abstract

Embedded Geotextiles are used in asphalt pavement rehabilitation in preventing reflection cracks, further acting as impermeable layer; the same work within the structural tensile package.

New binders have emerged in the market looking to improve different variables, including adhesion, where excessive allocation will result in a potential failure surface. Based on this tensile tested, polyester nonwoven geotextiles 150 g/m<sup>2</sup>, by two different methods, after being embedded in different application temperature polymer modified asphalt emulsion; the results achieved by the different methods are analyzed and compared to virgin material is performed.

## 3. Fundamentos

Los Geotextiles no tejidos permiten la absorción y retención de gran cantidad de emulsión asfáltica en su estructura, brindando una capa preventiva en la reflexión de fisuras. Para su correcto funcionamiento es necesario establecer las condiciones óptimas en las que debe ser instalado.

Para lograr el mayor beneficio del material se determina previamente la retención óptima de emulsión sobre el mismo, según los lineamientos de la norma IRAM 78027, aplicando la emulsión modificada a diferente temperatura, a 25 °C y 60 °C.

Seguidamente se realiza la determinación de la resistencia a tracción del material por dos métodos diferentes; siguiendo la norma IRAM 78018 “método del agarre bajo carga concentrada Grab Test”, (por coincidir las dimensiones de las probetas (100x200mm) con el ensayo de retención de asfalto, IRAM 78027) y según los lineamientos de la norma IRAM 78012 “método de tracción por Banda Ancha, de

(1) Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC. Depto. de Ing. Civil.

(2) Director de Beca

dimensiones de 200x200mm (por considerar que dicho método resulta más representativo de las condiciones de trabajo del material en obra).

#### 4. Desarrollo experimental

##### 4.1. Toma de muestras

Las muestras se tomaron de acuerdo a lo fijado por la norma IRAM 78003 y en las dimensiones indicadas por cada método de ensayo.



Figura 1. Toma de muestras

##### 4.2. Ensayos de retención

Se sumergieron en emulsión asfáltica modificada con polímero y luego se determinó la retención sobre el material según la norma IRAM 78027.



Figura 2. Probetas de Grab Test y Banda Ancha después de ser embebidas en emulsión modificada

La Tabla 1 muestra los resultados de retención de emulsión obtenida para cada tipo de probetas a diferente temperatura. Los mismos corresponden al promedio de cuatro muestras ensayadas.

Tabla 1. Retención de emulsión a diferente temperatura y dimensión de probeta

| Tipo de Ligante                  | Temperatura (°C) | Dimensión probeta (mm) | Sentido       | l/m <sup>2</sup> |
|----------------------------------|------------------|------------------------|---------------|------------------|
| Emulsión modificada con polímero | 25               | 100x200                | Paralelo      | 0,7              |
|                                  |                  |                        | Perpendicular | 0,8              |
|                                  |                  | 200x200                | Paralelo      | 0,9              |
|                                  |                  |                        | Perpendicular | 0,9              |
|                                  | 60               | 100x200                | Paralelo      | 2,2              |
|                                  |                  |                        | Perpendicular | 2,2              |
| 200x200                          | Paralelo         | 2,6                    |               |                  |
|                                  | Perpendicular    | 2,3                    |               |                  |

### 4.3. Ensayos de tracción

Los ensayos se realizaron sobre probetas vírgenes y embebidas en emulsión asfáltica modificada con polímero a 25 °C y 60 °C, mediante la máquina de tracción universal EMIC DL10000. Se ajustaron los parámetros según el método adoptado. La temperatura ambiente para el ensayo de tracción fue 25°C y una humedad relativa del 63%.

Seguidamente se describen los métodos de tracción adoptados.

#### 4.3.1 Método Grab Test. IRAM 78018

Las dimensiones de la probeta son de 100 mm de ancho por 200 mm de largo; en la zona de agarre la mordaza es de 25,4 mm por 50,8 mm, Figura 3. El lado mayor debe estar paralelo a la dirección de aplicación de la carga. Para llevar a cabo el ensayo se fija la distancia entre las mordazas al comienzo del ensayo en  $75 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  y se selecciona el intervalo de cargas de la máquina de manera tal que la carga máxima ocurra entre el 10% y el 90% de la escala de carga completa. Luego se coloca una probeta en las mordazas de forma tal que el lado mayor resulte traccionado, logrando el centrado longitudinal y el transversal.

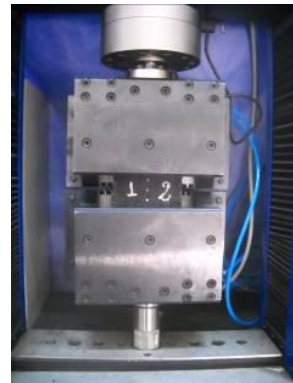
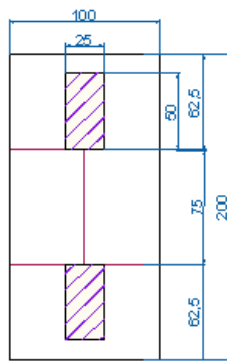


Figura 3. Disposición de la muestra para Grab Test

#### 4.3.2 Método Banda ancha, IRAM 78012

Las mordazas tienen superficie de agarre paralelas y planas. Se sujeta la probeta de 200 mm de ancho por 200 mm de largo, en todo su ancho, en las mordazas de la máquina de ensayo. Se aplica una fuerza longitudinal a la probeta de ensayo hasta que se rompe. El gradiente de deformación se fija en  $(20 \pm 5) \text{ %/min}$ . Se debe ajustar la muestra entre las mordazas de forma tal de asegurar 100 mm de distancia entre mordazas, Figura 4.

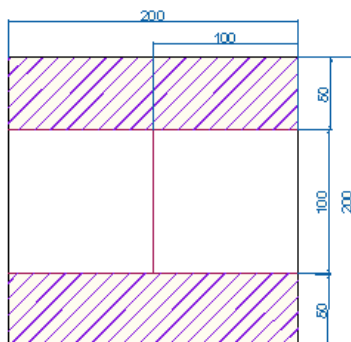
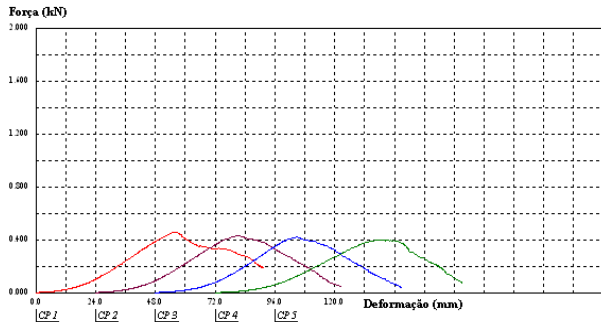


Figura 4. Disposición de la muestra para Banda ancha

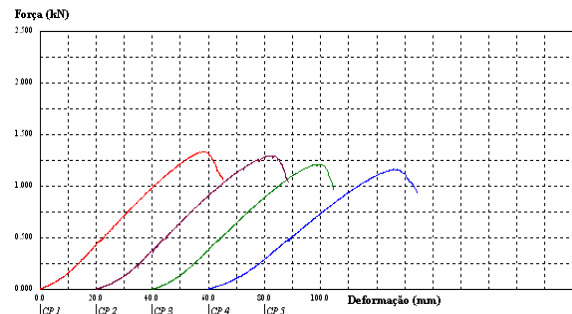
## 5. Análisis de Resultados:

La Figura 5 y Figura 6 presenta las curvas de resistencia a tracción versus deformación del geotextil no tejido virgen.

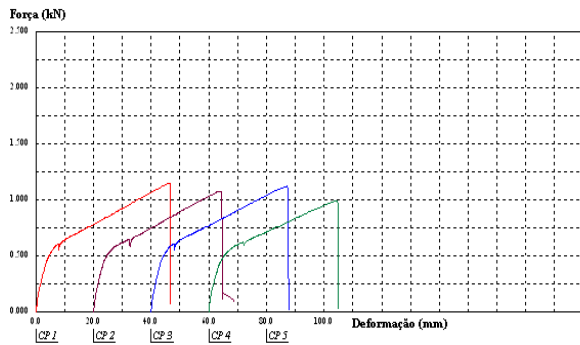
La Figura 7 y Figura 8 presentan las curvas de resistencia a tracción versus deformación del material embebido en emulsión a 25 °C, mientras que la Figura 9 y Figura 10 presentan las curvas para cuando fue embebido a 60 °C.



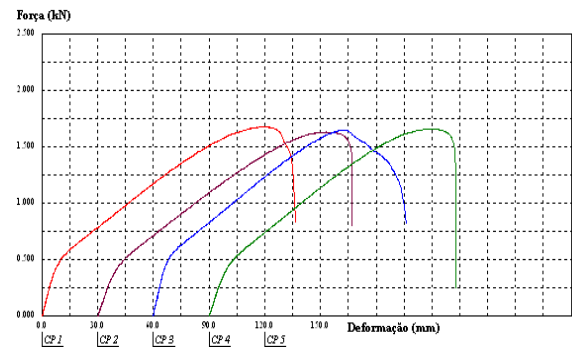
**Figura 5. Curvas tensión-deformación, ensayo Grab Test en probetas virgenes**



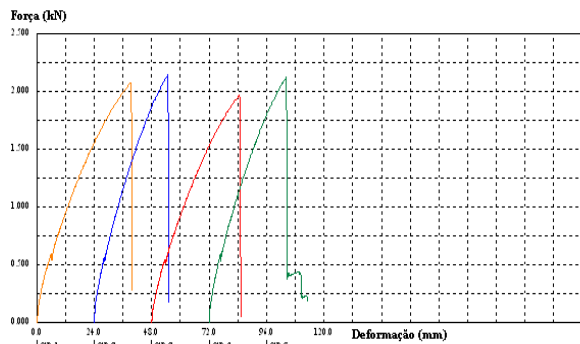
**Figura 6. Curvas tensión-deformación, ensayo Banda Ancha en probetas virgenes**



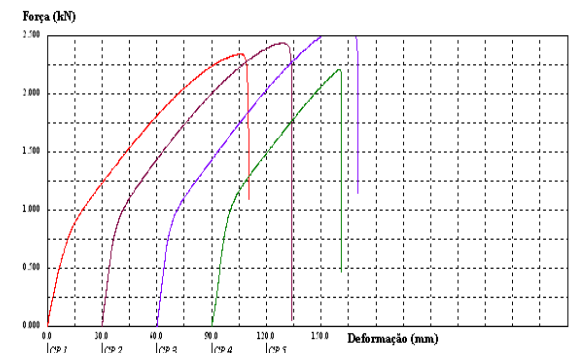
**Figura 7. Curvas tensión-deformación, ensayo Grab Test en probetas embebidas en emulsión a 25 °C**



**Figura 8. Curvas tensión-deformación, ensayo Banda Ancha en probetas embebidas en emulsión a 25 °C**



**Figura 9. Curvas tensión-deformación, ensayo Grab Test en probetas embebidas en emulsión a 60 °C**



**Figura 10. Curvas tensión-deformación, ensayo Banda Ancha en probetas embebidas en emulsión a 60 °C**

La Tabla 2 presenta los resultados alcanzados, por el material antes y luego de ser embebido, a tracción en el sentido de fabricación, realizado por diferentes métodos de ensayo y diferente temperatura.

**Tabla 2. Tracción de probetas por diferente método de ensayo**

| Método      | Muestra          | Tracción (KN/m) | Deformación (mm) |
|-------------|------------------|-----------------|------------------|
| Grab Test   | Virgen           | 4,68            | 61,9             |
|             | Embebida (25 °C) | 7,74            | 85,8             |
|             | Embebida (60 °C) | 10,8            | 45,1             |
| Banda ancha | Virgen           | 6,21            | 63,7             |
|             | Embebida (25 °C) | 8,51            | 115,4            |
|             | Embebida (60 °C) | 11,98           | 93,7             |

Nota: Los resultados son promedio de 4 determinaciones.

La deformación, en milímetros informada, corresponde para la carga máxima.

## 6. Conclusiones

- La cantidad de emulsión asfáltica sobre el material es indiferente al tamaño de la muestra, lo que indica buena homogeneidad de las fibras.
- La retención de emulsión asfáltica modificada con polímero sobre el geotextil no tejido aumenta con el incremento de la temperatura, siendo en promedio de 0,8 l/m<sup>2</sup> a 25 °C y de 2,3 l/m<sup>2</sup> para 60 °C.
- Al transformarse el material, mediante la rotura de la emulsión en su estructura, la forma en que rompen las probetas es diferente. Para el material embebido la rotura es frágil mientras que en el material virgen es dúctil.
- Por los diferentes métodos, se aprecia que el material embebido a 60 °C manifiesta mayor carga con menor deformación que para el material embebido a 25 °C y, mayor carga con mayor deformación que para el material virgen. Esto es producto del reordenamiento de las fibras con la temperatura de aplicación de la emulsión y como resultado de la linealidad de las fibras en el sentido de la carga de tracción.
- El comportamiento de las curvas carga vs deformación es diferente para ambos métodos, no pudiendo realizar un análisis comparativo sobre los mismos.
- Los resultados obtenidos por Banda Ancha son mayores que los obtenidos por el método Grab Test; se recomienda realizar los ensayos de retención y tracción por el método de Banda Ancha por resultar más representativo de las condiciones in situ.

## 7. Bibliografía

- Botasso G., Fensel E., Ricci L. (2002). "Caracterización de Geosintéticos para uso vial".
- Norma IRAM 78003 (1998). "Geotextiles y productos relacionados. Toma de muestras y preparación de las probetas para ensayo".
- Norma IRAM 78027 (2007). "Determinación de la retención de asfalto por los geotextiles empleados en pavimentación asfáltica en todo su ancho".
- Norma IRAM 78012 (2001). "Ensayo de tracción con probetas anchas".
- Norma IRAM 78018 (2004). "Determinación de la resistencia a la tracción de Geotextiles No Tejidos bajo carga concentrada por el método de agarre".



# “APLICACIÓN Y AJUSTE DEL PROCEDIMIENTO PARA EL MOLDEO DE PROBETAS DE SUELO GRANULAR EN EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE”

**Becario: Ignacio Celi**<sup>1</sup>  
Director: Luciano Brizuela<sup>2</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Análisis modulares de laboratorio y obra para diseño mecanicista de pavimentos flexibles”

Código UTN: UTI-1619 Código de Incentivos 25/I-053

---

## 1- Resumen

El módulo resiliente es un parámetro fundamental para caracterizar a los suelos y materiales granulares. El ensayo del mismo, aplicable a suelos de subrasante y materiales de base/subbase sin tratar, intenta reproducir las condiciones de campo mediante la aplicación de cargas dinámicas simulando el paso del tránsito y de una presión de confinamiento representando el entorno dentro del paquete estructural. El valor obtenido constituye la razón entre la tensión cíclica axial aplicada y la deformación específica recuperable.

La obtención del módulo resiliente ( $M_r$ ) con la mayor precisión posible resulta fundamental al momento de utilizar los actuales métodos de cálculo mecanicistas de paquete de pavimento, ya que es uno de los principales factores que rigen el análisis.

En base a los lineamientos de la norma AASHTO T307-99 (2003) que regula el método de ensayo, el LEMaC desarrolló un método de compactación con el objetivo de lograr en forma eficiente y sin dificultades resultados representativos mediante la caracterización dinámica. Este método tuvo inconvenientes con el gradiente de densidad ya que la probeta moldeada no tenía una densidad uniforme a lo largo de la misma.

El objetivo principal de la tesis es poder encontrar un procedimiento en el moldeo de probetas de suelos tipo I que sea capaz de dejar las 5 capas con la misma densidad y que la probeta sea lo más uniforme posible para poder representar las condiciones del campo y poder ensayarla correctamente.

## 2- Abstract

The resilience module is a fundamental parameter to define the carrying capacity of the floor and granular materials. This essay, applicable to subrasant floors and materials of base/subbase without treat, try to reproduce the field conditions by using dynamic loads simulating the traffic and the confinement pressure representing the surrounding inside the structural package. The get value construct the reason between the cyclic axial tension applied and the specific deformation recoverable.

---

<sup>1</sup> Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC Depto de Ing. Civil.

<sup>2</sup> Director de Beca

The obtaining of the resilience module ( $R_m$ ) with the most possible precision results fundamental at the moment of use the actual methods of mechanistic calculations of the asphalt package, because is one of the main factors which rule the analysis.

In base on the linements of the AASHTO T307-99 (2003) norm which regulate the essay method, the LEMaC development a comparison method with the point to manage in a efficient form and without difficulties represented results by using the mechanic characterization. This method had problems with the density gradient because the mold test tube did not have a uniform density at the large of this.

The main objective of this thesis was try to find a procedure in the test tube ground mold type I for resident module that be able to have five layers with the same maximum dry density. And also that the test tube be the most possible uniform so it can represent the field's conditions and can test it correctly.

### 3- Fundamentos

#### a. Estabilizado Granular

Los materiales granulares de la base, sub-base y subrasante sin tratar pueden ser clasificados en dos grandes grupos, Tipo I y Tipo II

Los materiales tipo I son aquellos que tienen un índice de plasticidad de 10 o inferior y pasa menos del 70% sobre el tamiz N°10 (2mm) y menos del 20% sobre el tamiz N°200 (75um). Los materiales tipo II son los que no cumplan los criterios del material tipo I.

Para obtener un material de Tipo I, se necesitó conformar un estabilizado granular (*Figura 1 y 2*).



*Fig. 1 Estabilizado Granular*



*Fig. 2 Estabilizado granular*

Para poder conformar un estabilizado granular que se adecúe a las necesidades requeridas, se hace la granulometría de cada material y se va variando el porcentaje de los mismos para que la curva quede comprendida entre las Curva Mínima y Máxima impuesta por el pliego, en este caso, el de la provincia de Bs As (*figura 3*).

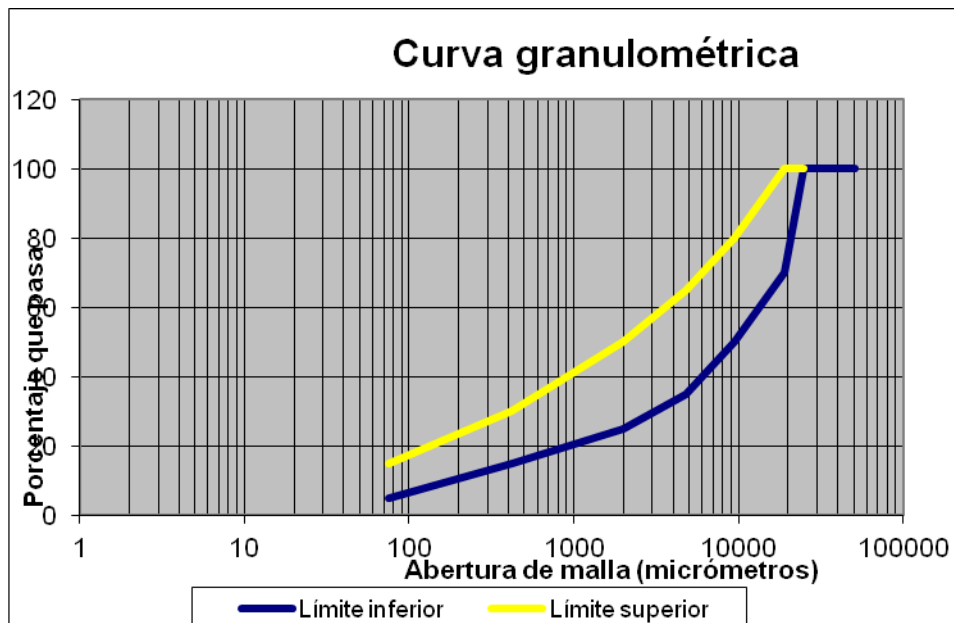


Figura 3. Curva Máxima y Mínima requerida por el pliego de Bs. As.

La razón por la que debe quedar comprendida entre las curvas límites es que el estabilizado debe ser resistente y cohesivo a la vez.

Si queda arriba de la curva Máxima el estabilizado es fino, es decir cohesivo pero no resistente, y si queda debajo de la curva Mínima es un material grueso, es decir muy resistente pero poco cohesivo.

#### b. Densidad real y aparente. Método de la parafina.

El suelo como todo cuerpo poroso tiene dos densidades. La **densidad real** (densidad media de sus partículas sólidas) y la **densidad aparente** (teniendo en cuenta el volumen de poros).

**Densidad real:** Es la relación entre la unidad de peso y la unidad de volumen de la fase sólida del suelo, siendo más o menos constante, ya que está determinado por la composición química y mineralógica de la fase sólida.

**Densidad aparente:** Se define como el peso de una unidad de volumen de suelo que incluye su espacio poroso. La densidad aparente refleja el contenido total de porosidad en un suelo y es importante para el manejo de los suelos (refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire). También es un dato necesario para transformar muchos de los resultados de los análisis de los suelos en el laboratorio (expresados en % en peso) a valores de % en volumen en el campo.

**Método de la parafina:** La densidad aparente puede ser conocida haciendo uso del principio de Arquímedes por lo cual el volumen de la muestra se determina en base al volumen de líquido desalojado. Para ello se cubre la misma con una sustancia repelente al agua como es la parafina (*Figura 5*), se pesa primeramente al aire y luego dentro de un líquido de densidad conocida.

La determinación de la densidad aparente se realiza considerando las siguientes variables: peso sin parafina al aire, peso con parafina al aire, peso con parafina en agua, peso de la parafina que recubre la muestra y densidad de la parafina. La densidad del agua se consideró  $1\text{g/cm}^3$



Figura 5. Probetas recubiertas de parafina

#### 4- Metodología de ensayo

Para poder moldear las probetas se utilizó un estabilizado, conformado por suelo, arena de trituración 0:6, piedra partida 6:12 y piedra partida 6:20. Se realizó la granulometría de cada material y se conformó la curva granulométrica (Figura 8) de acuerdo a la Curva Máxima y Mínima indicada en el pliego de la provincia de Bs. As.

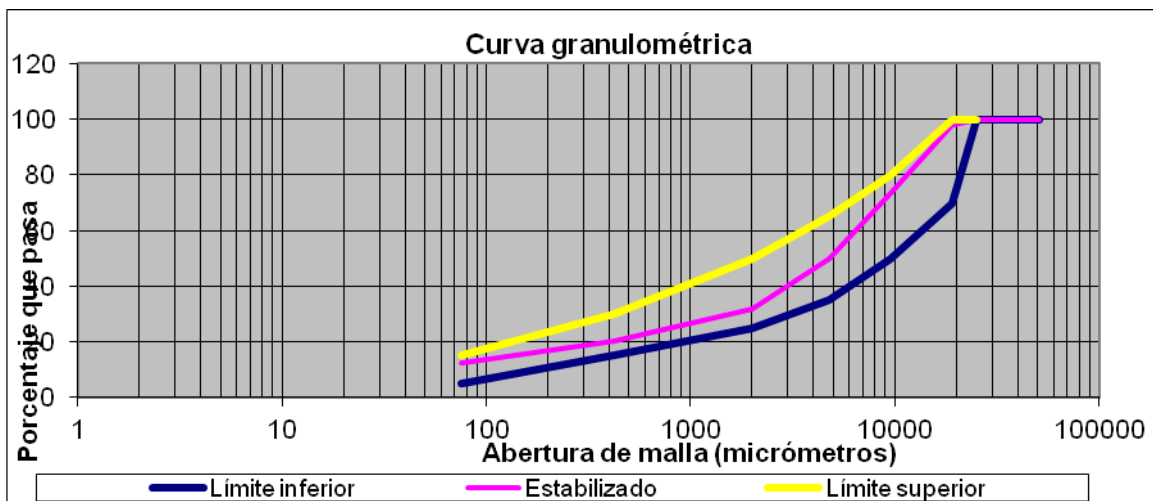


Figura 8. Curva granulométrica

Luego se realizó el Proctor Modificado dando como resultado una Densidad Seca Máxima =  $2.206\text{g/cm}^3$  y una Humedad Óptima = 5,7%.

Para el moldeo de las probetas de Mr se utilizó el 0,98 % de la Densidad Seca Máxima obtenida, por ser el valor mínimo exigido en los pliegos.

El moldeo de las probetas se realizó en el molde de 10cm x 20cm, realizándolo en 5 capas. La compactación fue vibratoria mediante el martillo neumático

Para poder analizar las capas por separado, fue necesario colocar un separador entre capas. Utilizando en los primeros ensayos acetato (Plástico) y al final separadores de metal (Figura 9y 10).

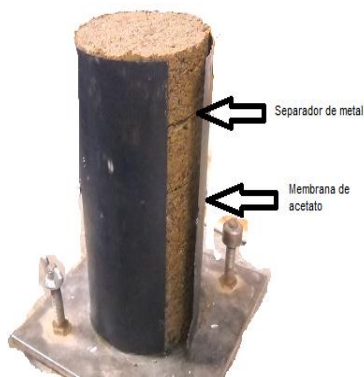


Figura 9. Probeta luego del moldeo

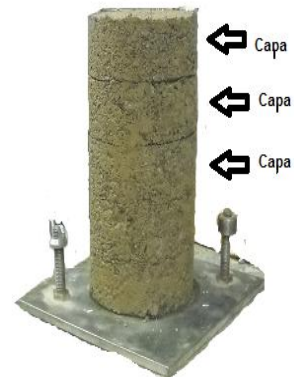


Figura 10. Probeta luego del moldeo

Lo que se esperaba al realizar una probeta con la misma cantidad de suelo en todas las capas era que la última iba a estar más densificada que el resto ya que iba a recibir una energía de compactación mayor (Figura 11).

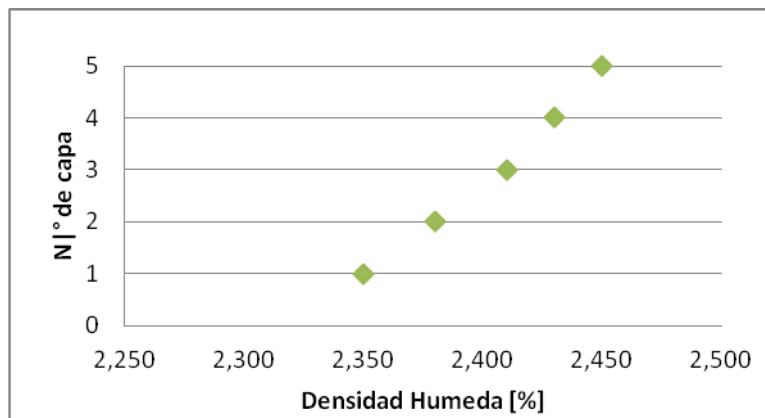


Figura 11. Densificación de cada capa

Una de las variantes que se a utilizar para lograr una compactación uniforme sería variar la cantidad de suelo por cada capa, siendo la inferior la que más contenido de suelo tenga.

Lo que se buscó al analizar las capas por separado fue una ecuación que salve el error de densificación para poder saber con exactitud la cantidad de suelo que se debería colocar en cada capa para que se mantenga uniforme a lo largo de toda la probeta.

Para calcular el suelo en cada capa inicialmente se hicieron los siguientes pasos:

- 1- Ya realizado el ensayo Proctor, se pesó el suelo seco y se agregó 5,7% de humedad (Hopt).
- 2- Se calculó el volumen de cada capa dando  $314\text{cm}^3$
- 3- Con la humedad optima (5,7%), la Densidad seca Máxima ( $2,206\text{g}/\text{cm}^3$ ) se calculó la Densidad húmeda

$$D_{\text{humeda}} = D_{\text{max}} \times (1 + H_{\text{opt}}/100) ; D_{\text{h}} = 2,206 \times 1,057 = 2,332 \text{ g}/\text{cm}^3$$

- 4- La Densidad húmeda se multiplicó por el factor de compactación exigido por el pliego de la Provincia de Bs. As.

$$D_{\text{h}} = 2.332 \times 0.98 = 2,285 \text{ gr}/\text{cm}^3$$

- 5- Con la Densidad Húmeda y el volumen se calculó la cantidad de suelo por cada capa

$$D = \frac{P}{V} \rightarrow P = D \cdot V = 2,285 \frac{g}{cm^3} \cdot 314 cm^3 = 718 g$$

- 6- Hay que colocar en cada capa 718 g.  
7- Para averiguar la densidad de la parafina lo hicimos mediante Arquímedes dando como resultado 0,918gr/cm<sup>3</sup>

#### 4- Análisis de resultado

Al analizar los resultados obtenidos se observa que se obtuvieron densidades superiores a las esperadas. Se supuso que el problema estaba en la relación de la densidad entre el método de la parafina y el método proctor, y se realizó una probeta proctor pero se la desmoldó con el gato hidráulico y se analizó su densidad mediante el método de la parafina. Se obtuvo una densidad menor a las obtenidas anteriormente y apenas poco mayor que la obtenida en el ensayo proctor. Motivo por el cual se deduce que las mismas son comparables.

Esto llevó a pensar que la superficie específica que recubría a la probeta influía en la densidad ya que la parafina se metía en los poros y lo que en realidad se estaba calculando era la densidad del suelo sin los poros externos lo que daba una mayor densificación.

Por este motivo se realizaron 3 probetas con distintas alturas para analizar la superficie de recubrimiento de la probeta.

Se notó que a mayor superficie de recubrimiento, mayor fue su densidad

#### 5- Conclusiones

Como primera conclusión, se observó que el gradiente de densidad no varía significativamente entre las capas y al ser así, no sería un problema de mayor importancia al momento de ser ensayado.

Los métodos utilizados para obtener las densidades (método de la parafina y ensayo próctor) pueden ser comparables entre sí, ya que no arrojan distintos valores haciéndolo de una manera o de otra.

#### 6- Bibliografía

- (Densidad real y aparente parafina) <http://www.exactas.unlpam.edu.ar/academica/catedras/edafologia/practicos/densidad.htm>
- Norma AASHTO T307-99 “Método de ensayo para la Determinación del Módulo Resiliente de Suelos y Agregados”
- Norma de ensayo VN E5-93 “Compactación de suelos”

# “EL DISEÑO DE CANALES COMO UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA”

**Becario: Juan María Urruspuru<sup>1</sup>**

**Director: Ing. Angel F. Queizan<sup>2</sup>**

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DEL ESCURRIMIENTO EN UNA CUENCA URBANA MEDIANTE TÉCNICAS DE MODELACIÓN” - ECOSALP0002164

## 1. Resumen

El proyecto de un canal trapecial revestido implica encontrar el ancho de fondo, el tirante de diseño y la inclinación de los taludes que hagan que el costo de su construcción sea mínimo, respetando las restricciones hidráulicas del problema. Así planteado, el proyecto es un problema de optimización con restricciones, que puede resolverse utilizando métodos numéricos de solución.

Dado que el planteo tiene varias restricciones, algunas de las cuales resultan ser no lineales, se propone utilizar metodologías SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Techniques), que lo transforman en varios problemas de optimización sin restricciones. En el presente trabajo se emplean los métodos de penalty exterior e interior.

## 2. Abstract

The lined trapezoidal channel design, involves finding the bottom width, the normal depth of flow and the slopes of the sides, that minimizes the construction cost, subject to hydraulic constrains.

In that way, the design is a constrained optimization problem, which can be solved by numerical methods.

Because the problem has a considerable number of constraints, and in some cases non linear constraints, SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Techniques) methodologies are proposed to be used, which transforms it into several problems of unconstrained minimization. In this paper methods of exterior and interior penalty are used.

## 3. Fundamentos

Ante el problema de minimizar:

$$F(X) \tag{1-1}$$

---

<sup>1</sup> Becario de investigación del grupo de investigación hidráulica

<sup>2</sup> Director de Beca.

existen varias metodologías de resolución, algunas mas robustas que otras dependiendo de la naturaleza de nuestra función, pero en su generalidad son metodologías estables.

Ahora, si nuestro problema esta sujeto a restricciones del tipo:

$$g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, m \quad (1-2)$$

$$h_k(X) = 0 \quad k = 1, l \quad (1-3)$$

los métodos existentes no son tan estables como los anteriores, es por eso que resulta conveniente encontrar una manera de utilizar las herramientas de optimización de funciones sin restricciones en funciones con restricciones. Este problema se soluciona con la aplicación de metodologías SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Techniques).

Estas técnicas se basan en la creación de una función pseudo-objetivo de la forma:

$$\Phi(X, r_p) = F(X) + r_p P(X) \quad (1-4)$$

donde  $F(X)$  es la función objetivo original.  $P(X)$  es una función penalty cuya forma depende de la técnica SUMT utilizada. El escalar  $r_p$  es un factor que determina la magnitud de la penalización.

El enfoque general sera minimizar la función objetivo como una función sin restricciones pero proveyendo de una penalización para limitar las violaciones de las restricciones. Debido a que la manera en la que se impone esta penalización a menudo conduce a un problema numéricamente mal condicionado, se proporciona un método mediante el cual se concibe sólo una penalización adecuada para el método en las etapas iniciales de optimización, y luego la penalización se incrementa o decrementa (dependiendo del método) en cada iteración a medida que avanza la optimización.

Los métodos de penalty mas utilizados son los de penalty exterior y penalty interior.

El primero es el mas sencillo de implementar, debe su nombre a que penaliza la función objetivo solo cuando las restricciones son violadas, presenta la desventaja que la sucesión de resultados obtenidos se encuentran siempre fuera de la región de diseño; entonces ante una interrupción del proceso tendríamos una sucesión de valores que no están contenidas en la región de diseño y por lo tanto no serian diseños aceptables.

Su función de penalización tiene la forma:

$$P(X) = \sum_{j=1}^m \{ \max[0, g_j(X)] \}^2 + \sum_{k=1}^l [h_k(X)]^2 \quad (1-5)$$



de la Eq.(1-5) se comprueba que la función penalty no es aplicada si todas las restricciones,  $g_j(X)$  y  $h_k(X)$ , son satisfechas, pero si por lo menos una de las restricciones no es verificada, la función penalty deja de ser nula.

La razón por la que las restricciones estén elevadas al cuadrado es por que esto provee una pendiente igual a cero para la penalización en las cercanías de los límites de la restricción, por lo tanto asegurando una continuidad en las derivadas primeras de la función pseudo objetivo en las cercanías de los límites de la restricción. Sin embargo las derivadas segundas no son continuas en dichos límites, siendo esto una posible causa de un mal condicionamiento para métodos de minimización de segundo orden.

En el método de la función penalty interior la secuencia de valores que obtenemos están contenidos en la región de diseño. Esto es una ventaja, ya que ante la interrupción del proceso iterativo tenemos valores que aunque no correspondan a un diseño óptimo son valores asociados a diseños admisibles.

Otra observación debido a esto ultimo, es que el punto inicial debe estar dentro de la región de diseño, esto se puede lograr con un predimensionamiento de la estructura.

El método de penalty interior proporciona una secuencia de mejoras pero lo hace a expensas de la creación de un más complicado problema de minimización sin restricciones. La diferencia radica en la manera en que la función penalización se aplica en las restricciones en desigualdad y en un coeficiente de penalización ( $r'_p$ ) distinto para estas restricciones.

La función de penalización mas comunmente utilizada en el método interior es:

$$P(X) = \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} \quad (1-6)$$

utilizando (1-6) e incluyendo las restricciones en igualdad del método exterior

$$\Phi(X, r'_p, r_p) = F(X) + r'_p \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} + r_p \sum_{k=1}^l [h_k(X)]^2 \quad (1-7)$$

$r_p$  tiene la misma definición que para el método exterior, toma un valor bajo en el comienzo y crece a medida que avanza la optimización, contrariamente  $r'_p$  toma un valor grande en un principio y decrece en cada iteración.

Notesé que  $g_j(X)$  no debe ser positivo para la viabilidad, además,  $\frac{-1}{g_j(X)}$  será un número positivo tendiendo a infinito a medida que  $g_j(X) \rightarrow 0$ , de ahí que la función resulta discontinua cuando  $g_j(X) = 0$ , por lo tanto, se debe tener extrema precaución en el desarrollo del algoritmo de búsqueda de una dimensión, para asegurar que un mínimo factible es encontrado.

La forma general de la función pseudo-objetivo (1-4), incluye sólo un único parámetro que multiplica la función de penalización. A menudo, dificultades numéricas se encuentran porque una función de restricción es de magnitud

diferente o cambia más rápidamente que las otras y, por lo tanto domina el proceso de optimización. Asimismo, la normalización no es toda la cuestión. parece que la razón de cambio de la restricción es el problema más crítico, y mientras que esto está relacionado con la normalización, los detalles matemáticos son algo diferentes.

El concepto aquí es que cada restricción es escalada de manera que el gradiente de la restricción sea del mismo orden que el gradiente de la función objetivo. Esto tiene dos propósitos. Primero, nos aseguramos que la curvatura de la función pseudo-objetivo no esté dominada por una única restricción. Segundo, hará que el método sea menos sensible a los valores iniciales propuestos de  $r_p$  y  $r'_p$ .

El factor de escala se calcula de la siguiente manera:

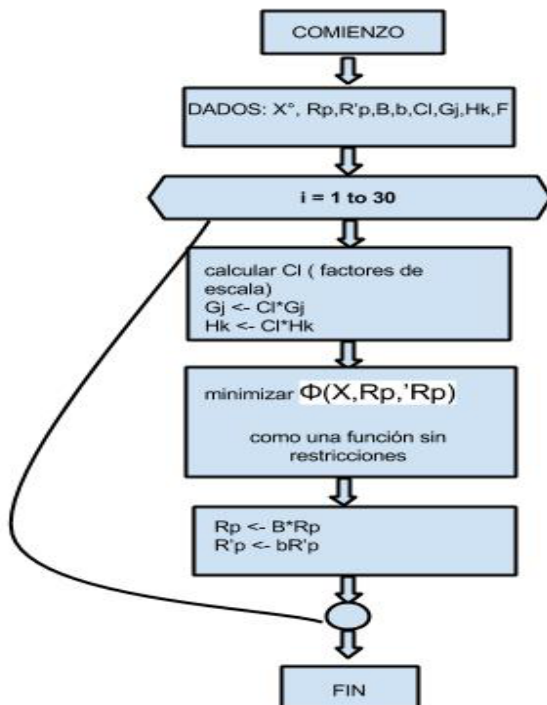
$$c_j = \frac{|\nabla F(X)|}{|\nabla g_j(X)|} \quad j = 1, m \quad (1-8)$$

como esto puede generar un costo computacional alto, se suele utilizar la siguiente aproximación:

$$c_j = \frac{|F(X+\delta X) - F(X)|}{|g_j(X+\delta X) - g_j(X)|} \quad j = 1, m \quad (1-9)$$

#### 4. Desarrollo experimental

A partir de lo explayado anteriormente, desarrollamos un algoritmo de penalty interior para optimizar la sección trapezoidal.



Para esto, utilizamos la plataforma Matlab(2012a) corriendo sobre el SO Debian Wheezy, un procesador AMD dual core(2,4 Ghz) y 2 Gb de memoria ram.

Para encontrar el mínimo en cada iteración de la función pseudo-objetivo se utilizamos la función *fminsearch*, perteneciente al paquete Matlab, ya que utiliza un método libre de derivadas.

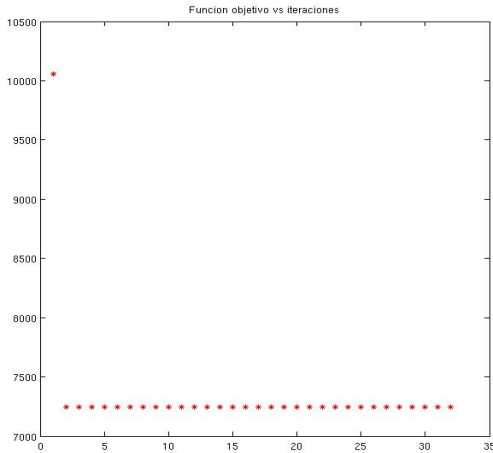
En el gráfico (1) se observa el diagrama de flujo del algoritmo. Donde X es el vector de variables a optimizar, Rp y R'p son los factores de penalización, B y b son los factores en que se modifican Rp y R'p, Ci es el vector de factores de escalado, Gj y Hk son las restricciones y F es la función objetivo, Φ es la función pseudo-objetivo.

1-Diagrama de flujos.

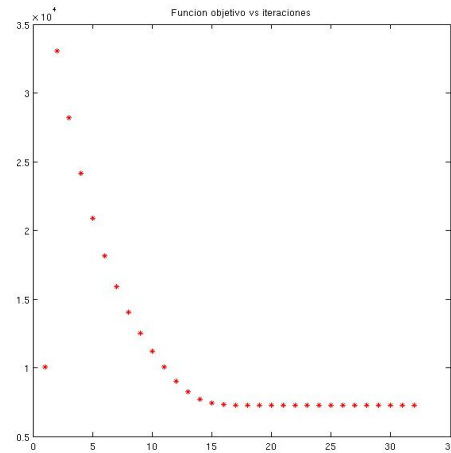
## 5. Análisis de Resultados

Antes de obtener buenos resultados es necesario, para ajustar el algoritmo, jugar con los factores de cambio que modifican a los factores de penalización. Estos dependen de la naturaleza de la función pseudo-objetivo.

Se realizaron corridas escalando las restricciones y no habiéndolas escalado, para así poder comparar los resultados.



2-Convergencia del método escalado



3-Convergencia del método no escalado

Se propone como próximo objetivo implementar métodos de penalización más avanzados, como el método mixto y el método de multiplicador de Lagrangiano aumentado, como así también aumentar el número de restricciones y de variables a optimizar.

## 6. Conclusiones

Se observa una convergencia veloz del método en ambos casos (con escalado y sin el).

Los datos obtenidos son congruentes con las estimaciones.

De la comparación de las gráficas 2 y 3 observamos una notable mejora para el método en el cual las restricciones fueron escaladas.

## 7. Bibliografía

[1] Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: With Applications (Mcgraw Hill Series in Mechanical Engineering)

[2] Chow, V.T. (2000) "Hidráulica de canales abiertos" . Editorial Mc-Graw-Hill, pgs. 158-159. ISBN:958-600-228-4. Estados Unidos

[3] Farias, H. (1990) "Criterio Económico para el Proyecto de Canales Revestidos", Inédito, DRH, FCET, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina.

# “OPTIMIZACION DEL DISEÑO EN VIVIENDAS DE MADERA”

**Becarios: Emiliano Muñoz; Nicolás Varriano; Valigura Flavia; Alegre Santiago;  
Girbal Javier; Bormapé Natalia <sup>(1)</sup>  
Director: Arq. Carlos María Gentile <sup>(2)</sup>**

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL CON TECNOLOGÍAS DE MADERA”

Código UTN: UTI-1094 Código de Incentivos 25/I045

---

## 1. Resumen

El presente informe expone las actividades realizadas el torno a la problemática descrita en el PID: “Optimización del diseño en viviendas de interés social con tecnología de madera”. Desde el “Grupo Viviendas” se han aportado soluciones ingenieriles referidas a la optimización del diseño y sistema constructivo para diversos proyectos en etapa de desarrollo, solicitados por la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (FCAyF) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

## 2. Abstract

This report describes the activities that were done in relation to the problematic described in the I+D Project called: “Design optimization in social interest housing using wood technology”. From the “Housing group” several engineering solutions have been given, specially related to the design optimization and the construction system, for different projects in the development phase. Those solutions were required by the Faculty of Agricultural and Forestry Science from the National University of La Plata.

## 3. Fundamentos

La ciudad de La Plata, al igual que otras aglomeraciones urbanas de Argentina y de la Región, presenta aún un número importante de personas con necesidad habitacional insatisfecha.

Sabido es que la mayoría de las construcciones de carácter precario utilizan la madera como medio rápido y económico para generar un espacio habitacional en el contexto de un asentamiento. Desde hace un tiempo a esta parte, diversos centros de estudios se han abocado al desarrollo tecnológico de materiales que tiendan a satisfacer requerimientos constructivos que surgen de las mencionadas necesidades habitacionales, entre ellos se encuentran el grupo GEMA de la UTN Regional Concepción del Uruguay, el INTA Concordia y el Laboratorio de Investigación de la Madera (LIMAD) de la UNLP.

Los estudios realizados, en los últimos treinta años, han revalorizado las posibilidades y conveniencias de la construcción en madera, llegando a un nivel

altamente desarrollado de las tecnologías empleadas, especialmente en los países escandinavos y norteamericanos.

Estos estudios han arrojado resultados contundentes acerca de la ventaja de trabajar en base a una modulación de paneles prefabricados, tanto en aspectos constructivos, como en aspectos funcionales y de habitabilidad. A su vez, las experiencias han demostrado las virtudes que este sistema constructivo posee frente a otros, como la facilidad, la agilidad y la rapidez en la construcción en base a la prefabricación de piezas parte en forma industrializada. Inclusive se puede hacer el armado de dichas piezas en talleres más precarios y con herramientas menores a pie de obra.

Con el transcurso del tiempo, esta metodología de modulación se ha complementado con nuevos sistemas constructivos, métodos de cálculo más avanzados. En conjunto con la xilotecnología (xilo-: prefijo que significa "madera") y maquinaria especializada han avanzado acondicionándose a las nuevas problemáticas. A sí mismo, este tipo de construcción se está utilizando con mayor frecuencia en la actualidad, amoldándose a las normas internacionales, y lográndose con él (debido a su facilidad de construcción) la optimización de los plazos de obra. Esto último representa una de las ventajas principales de la construcción en módulos, ya que en la industria de la construcción la reducción en el plazo de la obra se traduce en una directa reducción de costos. Otra ventaja es el importante aumento de superficie útil en comparación con los métodos convencionales, alcanzándose valores de hasta un 20%.

A gran escala la industria maderera abarca hectáreas mediante la forestación, lo que genera nuevos pulmones verdes en el planeta. Además se trata de un recurso renovable, en el que su producción no consume combustible fósil.

En nuestro país, las experiencias desarrolladas se reducen a nivel provincial, se evidencia que a nivel nacional no ha habido interés en el desarrollo y promoción de este tipo de sistema constructivo, en particular en lo referido a la vivienda de interés social. Provincias como Misiones, Entre Ríos y Neuquén han desarrollado proyectos con auxilio de la industria maderera local, promoviendo la utilización de los recursos propios, aunque no han tenido un alcance significativo como para marcar una tendencia de este tipo de construcción.

## **4. Objetivos**

### **4.1 .Generales.**

- Promover el vínculo con el INTA Concordia con el fin de efectuar la transferencia de tecnología del sistema constructivo.
- Establecer nuevas relaciones con los grupos interesados en la aplicación de tecnología de madera para la construcción de viviendas de interés social.
- Avanzar en el sistema constructivo que permita disminuir los plazos de ejecución, los costos de la obra, a la vez que se garantiza el confort y seguridad de la misma.

#### 4.2. Específicos.

- Capacitación de los becarios en temas relacionados a la xilotecología, a través de seminarios.
- Optimizar el proceso de diseño y ejecución de las viviendas construidas en madera, sin perder de vista las condiciones impuestas por la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, referidas a la finalidad de la misma y al sistema constructivo a utilizarse.
- Participación en la materialización de las viviendas de madera.

#### 5. Desarrollo.

En esta primera etapa de avance del proyecto se generaron vínculos con los distintos grupos involucrados, de comenzó el estudio de la bibliografía y se efectuaron las tareas demandadas por dichos grupos.

A través del vínculo desarrollado con la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP surgió la propuesta para brindar asesoramiento técnico y participar en el diseño, y posterior ejecución de dos sala de usos múltiples en la estación experimental Julio Hirschorn y en el predio del Departamento de Desarrollo Rural de dicha facultad.

Se realizaron vinculaciones institucionales con centros de estudios especializados en el área a desarrollar, como el INTA Concordia y la UTN Facultad Regional Concepción de Uruguay, con el fin de realizar la transferencia tecnológica para ser aplicada en los proyectos a materializar.

Se realizaron diferentes actividades referentes a la utilización de madera: se organizó el seminario "Madera para uso estructural", se participo en el curso "Construcción de Vivienda Canadiense de Madera", y los alumnos intervinientes en el proyecto asistieron al curso regular Xilotecología, componente de la carrera Ingeniería Forestal de la UNLP.

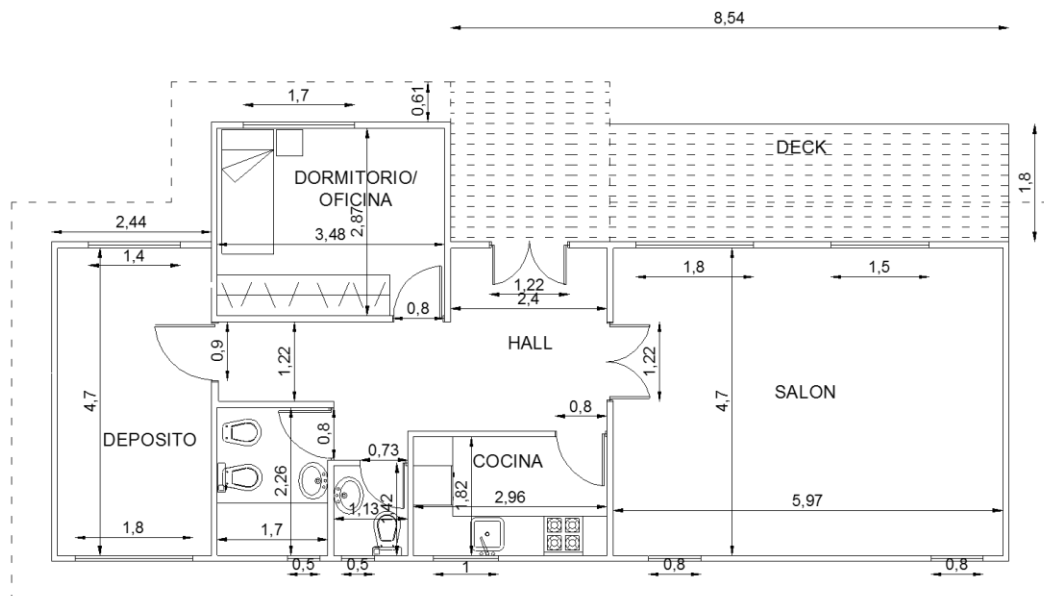


Figura 1: diseño SUM Estación experimental.

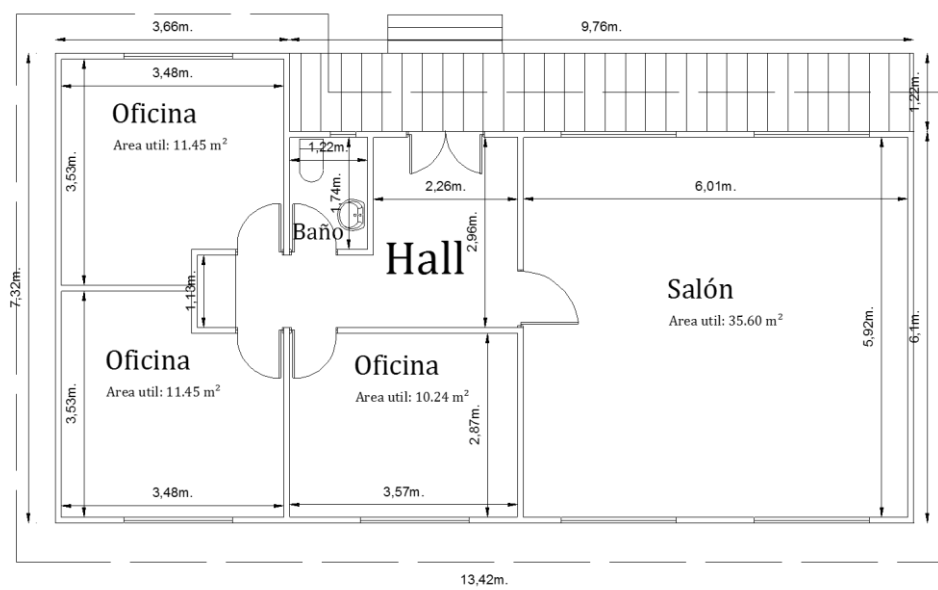


Figura 2: diseño SUM Departamento de Desarrollo Rural.

## 6. Conclusiones

- Se realizaron los vínculos correspondientes con los centros de investigación para la transferencia de tecnología.
- Se aportaron soluciones técnicas a la FCAYF para el diseño de los salones a ejecutar y se realizó el cálculo de las cimentaciones.
- Se hizo la recopilación de bibliografía y se comenzó con el estudio de la misma. También los alumnos participantes del curso de Xilotecología lograron la aprobación de la cursada.

## 7. Bibliografía

- “Hanono, M; (2001) “Construcción en madera”; CIMA Producciones Graficas y Editoriales.
- Mac Donnel H; Mac Donnel H.P.; (1999); “Manual de la Construcción Industrializada”; Revista Vivienda SRL.
- Primiano J; (1998); “Curso Práctico de Edificación con Madera”; Editorial Construcciones Sudamericanas.
- Balbo M.; Jordán R.; Simioni D.; (2003); “La Ciudad Inclusiva”; ISBN 92-1-322259-9
- [http://www.mapaasentamientos.com.ar/Relevamientos\\_de\\_asentamientos\\_2013.pdf](http://www.mapaasentamientos.com.ar/Relevamientos_de_asentamientos_2013.pdf)

# “FUNCIONAMIENTO DE PLANTAS ASFÁLTICAS Y SU CORRELACIÓN CON EL ANÁLISIS DE PRECIOS”

**Becario: Diego Hernán Farías** <sup>(1)</sup>

Director: Ing. Esteban Matias Oviedo - Arq. Gustavo Alejandro Das Neves <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Análisis Técnicos y Económicos en Sistemas de Gestión de Plantas Asfálticas”

Código UTN: UTI-1094 Código de Incentivos 25/I045

---

## 1. Resumen

Las plantas asfálticas tienen como propósito la producción de mezclas asfálticas que cumplan con las especificaciones requeridas. Para ello es necesario que todas las tareas, materiales y equipos intervinientes se coordinen adecuadamente; y que los insumos y mano de obra empleada sean de buena calidad. En este trabajo se analizarán las variables intervinientes en la operación y explotación de las plantas asfálticas discontinuas, y su incidencia en el costo final de producción. Como resultado se obtendrá el análisis de precios para la producción de una tonelada de mezcla asfáltica CAC D20.

## 2. Abstract

Asphalt plants are intended to produce asphalt mixtures that meet the required specifications. This requires that all work, materials and equipment involved are properly coordinated; and inputs and labor used are of good quality. In this paper the variables involved in the operation and use of discontinuous asphalt plants, and their impact on the final cost of production will be discussed. As a result the price analysis for the production of one ton of asphalt will be obtained CAC D20.

## 3. Fundamentos

Para que la mezcla asfáltica resulte de acuerdo a las especificaciones requeridas es necesario que los insumos utilizados, como el cemento asfáltico, agregados pétreos, aditivos, rellenos minerales sean de buena calidad, así como también la mano de obra interviniente en el proceso de producción. También es importante tener en cuenta las tareas de mantenimiento que la planta requiera, de modo de mantener el comportamiento óptimo de la misma, y todas las tareas complementarias que exige la producción como la provisión y acopio de áridos, cemento asfáltico, combustibles, equipos de carga y transporte; como así también el montaje de la infraestructura necesaria para la explotación de la misma, como oficinas, balanza de pesaje de camiones, pañol de herramientas, etc.. Todo esto posee un costo, el cuál debe ser incorporado en el precio final del producto.

En general se observa para empresas chicas y medianas que la contabilización de esos gastos es deficiente o al menos con un gran nivel de incertidumbre sobre la incidencia de las variables intervinientes; utilizándose para en la mayoría de los casos fórmulas estándar que tienen en cuenta la amortización, intereses del capital invertido, reparaciones y repuestos, consumo de combustibles y

(1) Becario de Investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC. Dpto de Ing. Civil.

(2) Co-Director de Beca.



lubricantes, sin tener en cuenta las particularidades de cada equipo y grupo de trabajo.

En el marco del PID “Análisis Técnicos y Económicos en Sistemas de Gestión de Plantas Asfálticas” y a modo de introducción del mismo se aborda el tema con el objetivo de identificar las variables intervinientes y su incidencia en el precio final de la mezcla, empleando las fórmulas estándar mencionadas para la determinación de los costos.

#### 4. Desarrollo Experimental

En términos generales, las plantas asfálticas se pueden clasificar en continuas y discontinuas, diferenciándose fundamentalmente en el método de dosificación.

Las plantas continuas producen en forma constante por lo que es necesario mantener una dosificación volumétrica continua y constante de cada uno de los materiales intervinientes.

Las plantas discontinuas en cambio, pesan cada uno de los materiales intervinientes cada vez que se inicia un nuevo pastón (también denominadas como plantas de dosificación por pesadas o por pastones),

Estas plantas tienen un sistema de alimentación de áridos en frío donde se ingresan las fracciones comerciales de los áridos acopiados lo que permite lograr mezclas más homogéneas a lo largo de la jornada de producción.

En principio veremos las partes componentes de este tipo de plantas, para profundizar en una segunda etapa sobre las características de operación y mantenimiento de cada una de ellas

##### ***Partes Componentes***

Acopio de Áridos: Es el espacio físico en el cual se depositan los agregados pétreos separados por fracciones comerciales. Desde allí, en general una pala mecánica recoge los áridos y carga las tolvas a medida que resulta necesario. Es importante acotar la distancia entre los acopios y las tolvas; y a la vez ubicar más cerca el árido más utilizado.



Figura 1

Alimentación y dosificación en frío: La alimentación puede ser mediante cinta transportadora continua, alimentador de vaivén, alimentador vibratorio, alimentador por gravedad. En general en plantas de pequeña o mediana envergadura el sistema de alimentación es mediante tolvas descubiertas y cintas transportadoras.

Éstas están compuestas por tres, cuatro o seis tolvas donde se ingresan las distintas fracciones comerciales de áridos. Poseen compuertas en su parte inferior que limita la descarga de agregado, cuyo sistema de accionamiento puede ser neumático o hidráulico.

El sistema de dosificación en frío de los áridos es generalmente por abertura de compuerta de las tolvas, donde se dosifica por caudal.



Figura 2



Figura 3

Secador de Áridos: Después de salir de las tolvas frías, los áridos son descargados en el secador, donde se secan y se eleva la temperatura de los mismos al nivel deseado. El secador consiste en un cilindro metálico, que gira alrededor de su eje, y en su interior posee aletas para arrastrar a los áridos y exponerlos a la llama y gases calientes que produce el quemador de llama graduable que se encuentra en el extremo inferior del cilindro. El vapor es removido por la circulación controlada de gas y aire producida por el ventilador.

Algunos de los secadores poseen termómetros para medir la temperatura de los áridos. En algunas plantas continuas el secador también cumple la función de mezclador.



Figura 4

Sistema de colectores de polvo:

- *Vía húmeda:* los gases del proceso son extraídos por el ventilador extractor para luego ser regados con agua atomizada; la mezcla de agua con polvo se transfieren a los tanques de asentamiento.
- *Vía seca:* (filtros de manga) el gas contaminado entra en el filtro, choca la lámina deflectora, el flujo procede hasta las mangas ocurriendo la separación del material particulado y el aire, acumulándose en el tejido de las mangas.

Sistema de cribado: Consiste en un conjunto de tamices vibratorios que se encuentran a la salida del secador y a través del cual pasan los agregados ya secos y son almacenados en un nuevo conjunto de silos en caliente, de modo de

obtener las fracciones de áridos segregadas y ajustar el ingreso de cada una de ellas al mezclador, obteniendo así la granulometría deseada para la mezcla. La superficie de las cribas debe ser suficientemente grande para admitir la máxima alimentación permisible a las tolvas. Las tolvas en caliente deberán ser lo suficientemente grande para acomodar el material necesario de cada tamaño cuando el mezclador está operando en toda su capacidad.

*Sistema de almacenamiento y calentamiento del cemento asfáltico:* Las cisternas de almacenamiento son cilindros metálicos con aislante térmico y las capacidades de los tanques deberían estar en función de la capacidad de producción de modo tal de ser suficiente para permitir una operación uniforme (en general 25Tn. mínimo), siendo las capacidades más usuales las de 40Tn, 32Tn y 26Tn. Estos tanques deben disponer de serpentines de circulación de vapor o aceite que puedan emplearse para calentar el producto cuando sea necesario. El sistema de calentamiento consta de una caldera y una bomba centrífuga que hace circular el aceite caliente por la serpentina sumergida en el cemento asfáltico. La cisterna también posee termómetros para controlar la temperatura dentro del tanque.

*Sistema dosificador de cemento asfáltico:* El asfalto es pesado individualmente y descargado luego de los áridos en el tambor mezclador, mediante picos aspersores o una barra esparcidora cuya longitud será al menos igual a los 3/4 partes de la longitud de la mezcladora.

*Mezclador:* En la mayoría de las plantas el mezclador es de ejes gemelos provistos con paletas que giran en sentido opuesto, batiendo y moviendo constantemente la mezcla asfáltica. El tambor mezclador posee una tolva en su parte inferior para descargar el “pastón” una vez finalizada correctamente la mezcla.

*Sistema de control, laboratorio y báscula de pesaje:* La planta se opera electrónicamente desde la cabina de mando. En el laboratorio se controlan las características de los áridos y de la mezcla asfáltica. La báscula de pesaje, ubicada cerca de la entrada de la planta, pesa la cantidad de material cargado sobre cada camión, aunque se podría prescindir de ésta por ser muy precisa la cantidad producida en este tipo de plantas.

*Medidas de seguridad:* Todas las piezas móviles como poleas, engranajes, cadenas, etc., deberán hallarse debidamente protegidos para evitar cualquier accidente. Las plantas deberán disponer de escaleras metálicas seguras para el acceso a las plataformas superiores, dispuestas de tal manera para que el fiscalizador pueda tener acceso a todos los sitios de control de las operaciones, para realizar los respectivos muestreos.

### ***Operación de la Planta***

Personal necesario:

- 1 Jefe de planta: encargado general de las tareas de operación y mantenimiento
- 1 Plantista: opera la planta y coordina las tareas de producción.
- 1 Palero: opera la pala cargadora frontal para la provisión de áridos.

2 Ayudantes: encargados de la limpieza general y apoyo para las reparaciones.

Capacidad de Producción: Se pueden encontrar plantas que van desde las 60 hasta 600 tn/h, siendo la más habitual, encontrar plantas de 100 tn/h.

Mantenimiento: éstas deberán optimizarse de modo de evitar costos innecesarios. Las tareas rutinarias son lubricación y limpieza. Tareas esporádicas: pueden ser preventivas como la sustitución y refacción de elementos en forma programada, o reactivas cuando ocurre de manera inesperada.

Materiales: éstos deberán ser de calidad y acopiados debidamente, evitando la contaminación entre áridos de distintas fracciones y orígenes, y los deterioros que se pudieran producir en el cemento asfáltico durante su almacenaje y manipulación. Para lograr homogeneidad en la producción a lo largo del tiempo es recomendable mantener continuidad con los proveedores.

Equipos: En lo que respecta exclusivamente a la producción se cuenta esencialmente con la planta asfáltica completa y una pala cargadora frontal; y eventualmente una balanza.

## **5. Conclusiones**

El presente trabajo ha cumplido con el objetivo de tener una primer aproximación al funcionamiento, operación y explotación de una planta asfáltica discontinua.

Se han identificado las variables de mayor incidencia.

En una segunda etapa de este trabajo se intentará profundizar en la obtención de estos costos en forma particular para distintas empresas de modo tal de generar una nueva estructura de variables que permita llegar a un costo más ajustado de los equipos.

## **6. Bibliografía**

The Asphalt Institute. (1983) "Asphalt Technology and Construction Practices – Instructor's Guide". 2° Edición.

# “CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y DOSIFICACIÓN DE LECHADAS ASFÁLTICAS Y MICROAGLOMERADOS EN FRÍO”

**Becaria: Carolina Gerardi** <sup>(1)</sup>  
Directora: Ing. Cecilia J. Soengas <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Metodología teórico práctica para el diseño de tratamientos superficiales bituminosos bajo condiciones de servicio”

Código UTN – 1618. Disposición 315/11

---

## 1. Resumen

Las lechadas asfálticas y los microaglomerados en frío son utilizados en la mayoría de las vías de comunicación para acondicionar la transitabilidad. Son mezclas delgadas que no modifican el gálibo del camino mejorando la seguridad, estética y el confort de los usuarios

En el país no existe reglamentación o normas para dosificar microaglomerados en frío, por tal motivo, esta tesis se basa en el estudio de los métodos de dosificación de lechadas asfálticas y su posterior aplicación en la dosificación de microaglomerados en frío.

## 2. Abstract

The slurry seal and cold microagglomerates are used in most of the road communication pathways to condition trafficability. These are thin mixtures that do not modify the gauge road, improving the safety, aesthetics and user confort. The country has no regulations or standards for dosing microagglomerates, for this reason, this thesis are based on the study of methods of slurry seal dosage and subsequent application of cold microagglomerates dosage.

## 3. Fundamentos

Las lechadas asfálticas y los microaglomerados en frío son mezclas fabricadas a temperatura ambiente, compuestas por áridos, emulsiones bituminosas, agua y filler (en caso necesario). Se utilizan principalmente para impermeabilizar pavimentos envejecidos o como tratamientos de sellado. La principal diferencia entre lechadas y microaglomerados radica en el tamaño máximo de los agregados y el tipo de emulsión utilizada. En el caso de las lechadas, poseen tamaños máximos inferiores a 6mm y emulsiones asfálticas convencionales o modificadas; mientras que los microaglomerados, constituidos por dos capas de lechadas, el tamaño máximo de sus partículas será de entre 8 y 12mm y solo se utiliza como ligante, emulsiones asfálticas modificadas.

El estado de la superficie a revestir determina el espesor de la lechada asfáltica y por lo tanto la curva granulométrica a utilizar. En la norma IRAM 6833 se definen cuatro tipos de granulometrías, comenzando por la tipo I que es la más fina hasta la Tipo IV que es la más gruesa y la más utilizada.

### 3.1. Dosificación de lechadas asfálticas

(1) Becaria del Área Materiales Viales, LEMaC Centro de Investigaciones Viales. Dpto. Ingeniería Civil.

(2) Tutora de la Tesis

Existen diversos métodos, mayormente empíricos, para dosificar una lechada. De acuerdo con los resultados y experiencias obtenidas en el país, la metodología más aplicada es la siguiente:

- Obtener las cantidades teóricas de áridos, emulsión y agua.
- Verificar y ajustar estos resultados, mediante ensayos.

### 3.2. Determinación teórica de los componentes

Una vez determinado el tipo de agregados de acuerdo al estado de la superficie a tratar, se define el tipo de emulsión dependiendo de las características granulométricas, el clima, maquinarias disponibles, etc. Se utilizará filler en caso que sea necesario corregir la curva granulométrica o para mejorar el comportamiento de la mezcla en los ensayos mecánicos.

En este estado del diseño, se determina el porcentaje teórico de asfalto residual, de la bibliografía consultada, se optó por utilizar el método de cálculo Duriez.

Este método realiza un cálculo del área superficial de los áridos, basado en la granulometría, y determina el porcentaje teórico de cemento asfáltico utilizando una constante denominada "módulo de riqueza".

Para calcular el área específica de los agregados se utiliza la expresión 1:

$$\text{Contribución del área (m}^2\text{/Kg)} \quad C = \frac{2,5}{\sqrt{D \cdot d}} \quad (1)$$

Donde:

D = tamaño máximo de los elementos mayores, en mm

d = tamaño máximo de los elementos menores, en mm

La contribución del área de cada fracción multiplicada por el porcentaje respectivo de retenidos parciales (P1, P2, P3, etc.), da como resultado la contribución al área total de esa fracción.

Si para cada fracción se aplica la ecuación aproximada (1), la fórmula final será la ecuación expresada en 2:

$$E \left( \frac{\text{m}^2}{\text{Kg}} \right) = \frac{C_1 P_1 + C_2 P_2 + C_3 P_3}{100} = \textit{Superficie específica del material} \quad (2)$$

Una vez obtenida la superficie específica E, se puede calcular la cantidad de ligante. Esto se puede hacer por medio de la ecuación 3:

$$L(\%) = K \sqrt[5]{E} \quad (3)$$

Siendo:

L el porcentaje de asfalto residual de la lechada

K el módulo de riqueza, que toma valores entre 5 y 7 según la granulometría elegida. Conociendo la superficie específica del material y el módulo de riqueza, es posible hallar la cantidad de ligante mediante la Ecuación (3).

El valor calculado sirve como punto de partida para la formulación de lechadas, se debe ajustar mediante ensayos mecánicos valores en un entorno al obtenido y así determinar la cantidad óptima de ligante.

### 3.3. Determinación del tenor de agua para ajuste de la consistencia

Para determinar el valor óptimo de agua, se preparan en laboratorio mezclas con una cantidad fija de emulsión calculada previamente, y con cantidades progresivamente crecientes de agua. Debe resultar una mezcla que se pueda agitar fácilmente con una varilla metálica y que al volcarla dentro de un aro de ensayo se distribuya con un simple movimiento de vaivén, pero que conserve su forma cuando, luego de 2 minutos, el aro sea retirado.

También se puede utilizar el método del cono de consistencia, en el cual la mezcla se coloca en un molde tronco-cónico de medidas normalizadas, apoyado sobre una placa en la cual están grabadas circunferencias concéntricas de radios normalizados.

La consistencia de la lechada será óptima, cuando al esparcirse alcance zonas de las circunferencias concéntricas de 2 y 3 cm.

### 3.4. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Se utilizan dos ensayos en forma conjunta. El W.T.A.T (Wet Track Abrasión Test) que permite determinar el contenido mínimo de asfalto correspondiente a la máxima pérdida de abrasión admisible. Y el L.W.T (Loaded Wheel Tester) que determina el máximo contenido de asfalto de acuerdo al límite admisible de absorción de arena en la probeta. Los resultados de ambos ensayos se representan mediante un gráfico donde es posible fijar el rango válido de contenido de asfalto, tal que se eviten exudaciones por exceso como elevados desgastes por defecto.

## 4. Desarrollo experimental

Para comenzar con la dosificación del microaglomerado, se eligió la curva granulométrica tipo IV establecida en la norma IRAM 6833 "Asfaltos. Lechadas Asfálticas. Recomendaciones para su Preparación, Ensayos y Aplicaciones", de acuerdo al tipo de árido que estaba disponible en el laboratorio. En base a esto se formuló una mezcla con 60 % de arena 0:3 y 40 % de piedra 0:9, con la granulometría que se aprecia en el Gráfico N° 1.

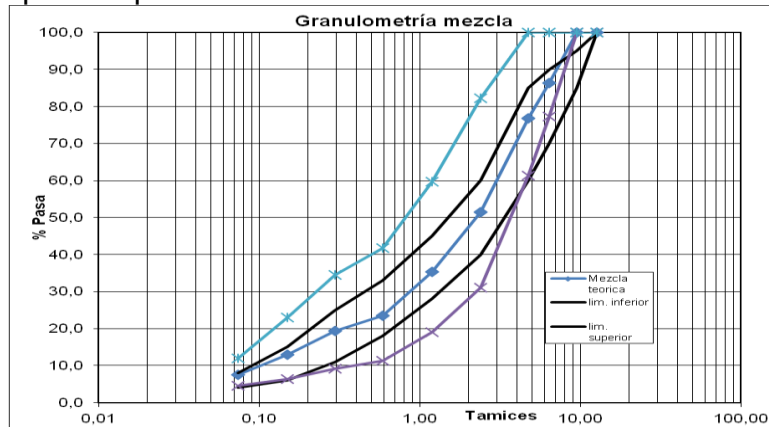


Gráfico N° 1. Curva granulométrica de la mezcla de áridos

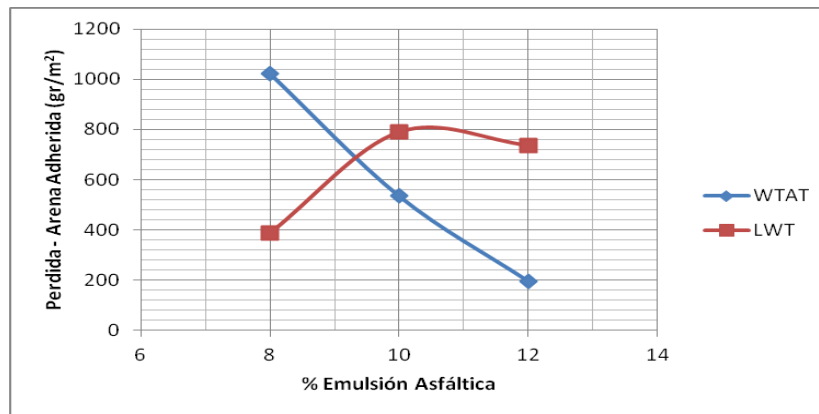
Se utilizó emulsión asfáltica catiónica de corte lento siendo su residuo asfáltico de 59%. Los ensayos de compatibilidad entre árido y emulsión, fueron acordes a lo estipulado en la normativa.

Para determinar el porcentaje óptimo de agua de la mezcla se aplicó el método del cono de consistencia, manteniendo constante el contenido de emulsión asfáltica (7%), pero aumentando progresivamente el contenido de agua en 2g, desde 8g hasta 16g cada 100g de agregado seco.

Al terminar el ensayo se observó que, en todos los casos, la mezcla no alcanzó la zona especificada por la norma (entre 2 y 3cm).

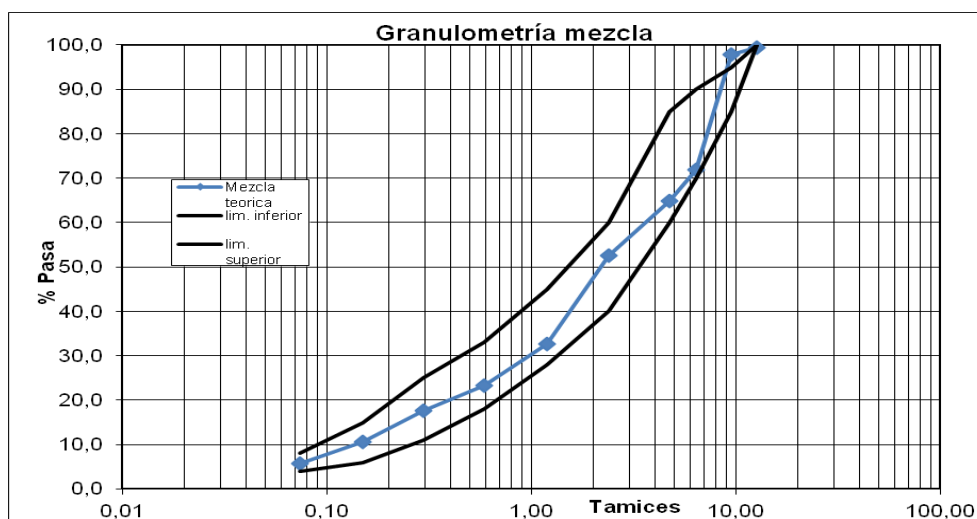
Se repitió el ensayo aumentando el contenido de emulsión a un 9%, obteniendo similares resultados. Se tomó como valor más próximo al óptimo, un contenido de agua del 10% (10g de agua cada 100g de agregado seco)

Para ajustar el contenido de emulsión asfáltica se moldearon y ensayaron probetas de LWT y WTAT, dando como resultado un contenido óptimo de emulsión de entre 8 y 9%. En el Gráfico N° 2 se puede observar el gráfico citado.



**Gráfico N° 2.** Porcentaje óptimo de emulsión a utilizar en una lechada

En una segunda dosificación se analizaron granulométricamente diferentes áridos. Se formuló una mezcla conformada con un 42% de piedra 6:12 y 58% de arena 0:6 con la granulometría que se aprecia en el Gráfico N° 3



**Gráfico N°3.** Granulometría de Áridos 6:12 y 0:6



La emulsión asfáltica utilizada esta vez fue de otra marca comercial, siendo también catiónica de rotura controlada con un residuo asfáltico del 63 %. También se realizaron los ensayos de compatibilidad, obteniendo muy buenos resultados.

Mediante el método teórico de Duriez se determinó un contenido aproximado de emulsión asfáltica del 16 %, que sirvió como base para analizar luego la consistencia del microaglomerado, y teniendo en cuenta el agua que ésta le aporta a la mezcla. En base a la granulometría, el módulo de riqueza K y la superficie específica, por medio de las Fórmulas (1), (2) y (3) se obtuvo el porcentaje de emulsión aproximado.

Con estos datos, se formularon probetas para el ensayo de LWT con diferentes porcentajes de agua pero manteniendo fijo el valor de emulsión asfáltica calculado. A la hora del ensayo, ninguna de las probetas alcanzó los 1000 ciclos de compactación que estipula la norma.

### **5. Análisis de Resultados**

Al realizar el ensayo de Consistencia, por el método del Cono, no se pudieron obtener los resultados deseados. Es decir ninguna mezcla alcanzó el diámetro entre 2 y 3 cm como estipula el método.

En la primera dosificación, si bien se pudo obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, no se observó una buena solidez de la mezcla al moldear las probetas correspondientes al ensayo del L.W.T.

En el segundo microaglomerado realizado, no se pudo verificar ni ajustar de forma práctica los valores de emulsión asfáltica y agua calculados de manera teórica, debido a que las probetas no superaron el periodo de compactación en el ensayo de L.W.T. Por lo tanto, tampoco se continuó con el resto de los ensayos.

### **6. Conclusiones**

Se han estudiado teóricamente las metodologías de dosificación de lechadas asfálticas y microaglomerados en frío. A pesar de las pequeñas diferencias que radican entre estas dos capas delgadas, no se logró una correcta dosificación, siguiendo la metodología normalizada y existente hasta el momento.

Se puede desprender que los estudios teóricos no han dado buenos resultados. Hasta el momento en la obra, la dosificación se realiza por medio de “prueba y error” en los contenidos de ligante asfáltico y agua, verificándolos con los ensayos de W.T.A.T y L.W.T.

Para el próximo año, se pretenden realizar diversas dosificaciones para poder formular ó mejorar, una nueva metodología de dosificación.

### **7. Bibliografía**

- Norma IRAM 6833 (Año 1998) “Asfaltos para Uso Vial. Lechadas asfálticas. Recomendaciones para su preparación, ensayo y aplicación”.
- Cuattrocchio A. C. (2000) “Consistencia con el cono, de las lechadas bituminosas”.
- Boletín técnico de la ISSA (1190) “Método de ensayo para la medición del asfalto excedente en mezclas bituminosas mediante la utilización de máquina de ensayo de rueda cargada y adhesión de arena”.
- Lesueur D. y Potti J. J. (Año 2005). “Diseño de mezclas en frío: una propuesta racional basada en la comprensión actual de la rotura de emulsiones bituminosas”. Artículo de la Revista de la Asociación Española de Carreteras N° 138 enero – febrero.

# “SUELOS DISPERSIVOS O ERODABLES”

**Becario: Gimenez, Franco Leonel** <sup>(1)</sup>

Director: Villanueva, Martín <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Análisis modulares de laboratorio y obra para diseño mecanicista de pavimentos flexibles”

Código UTN: UTI-1619 Código de Incentivos 25/I-053

---

## 1. Resumen

Dentro de los suelos con características especiales, a saber: suelos expansivos, suelos colapsables, suelos orgánicos, suelos solubles, se encuentran también los suelos dispersivos o erodables, motivadores de la presente tesis.

Estos suelos entran de manera espontánea en solución en presencia de agua o forman cárcavamiento, tubificación y erosión retrogresiva o remontante a bajos niveles de gradiente hidráulico.

Es indiscutible su estudio para prevenir eventos que podrían resultar perjudiciales o hasta derivar en el colapso total de la estructura de la que forman parte.

## 2. Abstract

In soils with special features, including: expansive soils, collapsible soils, organic soils, soluble soils are also dispersive or erodible soils, motivators of this thesis.

These soils fall spontaneously in solution in the presence of water or form carcavamiento, tubificación and retrogressive erosion or remontante to low hydraulic gradient.

Unquestionably his study to prevent events that could be harmful or even lead to the total collapse of the structure of that part.

## 3. Marco teórico

Se definen dispersivas: arcillas cuya concentración de sales de sodio (Na) en el agua intersticial, pasa de 40% o 60% del total de sales disueltas

Se definen erodables: arena fina, polvo de roca, limo no cohesivo y depósitos eólicos propios de ambientes tranquilos y constantes que resultan en una granulometría relativamente homogénea.

Se puede presumir la presencia de dichos suelos en campo si existe alguna indicación en la superficie, como turbidez excesiva en cualquier depósito de agua, erosión en grietas de los caminos, erosión tipo túnel a lo largo de las quebradas o arcillas unidas formando rocas, áreas de producción con poca cosecha, etc.

Ensayos simples y rápidos en campo pueden ser útiles para realizar una evaluación preliminar del carácter dispersivo del suelo.

Ensayos físicos:

### ◆ *Ensayo Crumb*

Es un útil indicador sólo en una dirección, pues si el ensayo indica dispersión, el suelo probablemente lo sea, caso contrario, se someterá la muestra a otros ensayos.

(1) Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC Depto. de Ing. Civil

(2) Director de Beca

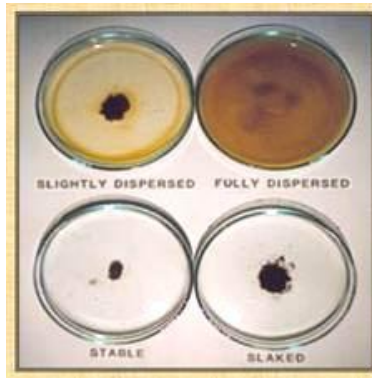
Se lleva a cabo colocando una probeta cúbica de suelo de 15cm de lado (o una porción con un mismo volumen) en agua desmineralizada, para luego observar su dispersión como el grado de nubosidad del agua.

Grado 1: Ninguna Reacción.

Grado 2: Reacción Ligera.

Grado 3: Reacción Moderada.

Grado 4: Reacción Fuerte.



**Figura 1. Diferentes reacciones del ensayo Crumb.**

◆ *Ensayo de doble hidrómetro - SCS (Soil Conservation Service)*

La prueba se realiza en muestras con contenido de agua natural. La distribución de tamaño de la partícula se determina primero con la prueba del hidrómetro estándar, en la que se dispersa la muestra de suelo en agua destilada con agitación mecánica fuerte y un dispersante químico. Otra prueba del hidrómetro se hace en paralelo con un duplicado de la muestra de suelo, pero sin agitación mecánica y sin un dispersante químico.

El "porcentaje de dispersión" es la relación entre la masa seca de partículas más pequeñas que 0.005 mm de diámetro, de la segunda prueba respecto a la primera expresada en porcentaje.

Los criterios para evaluar el grado de dispersión utilizando los resultados de la prueba del doble hidrómetro son:

| Porcentaje de dispersión | Grado de dispersión |
|--------------------------|---------------------|
| < 30%                    | No dispersivo       |
| 30 - 50%                 | Intermedio          |
| > 50%                    | Dispersivo          |

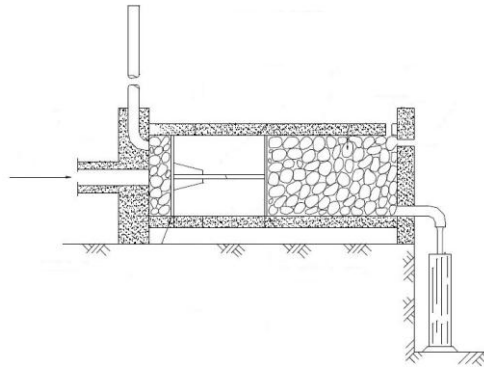
◆ *Ensayo Pinhole*

Consiste en hacer pasar agua bajo diferentes cargas y duraciones a través de un orificio de 1mm de diámetro ubicado en el centro de una probeta cilíndrica de suelo de 40mm de largo.

Se comienza con una cabeza hidráulica de 50mm de presión, y se registra el tiempo de inicio. Se registran los volúmenes de agua recogidos al cabo de 2, 4, 6, 8 y 10 minutos, así como el estado de la turbidez del agua.

Si el efluente es oscuro y el caudal ha estado entre los valores de 1.0 y 1.4 ml/s la prueba está completa. Se desmonta el aparato y se corta transversalmente la

muestra, se compara el diámetro del orificio, si éste supera en 2 o en 1.5 veces el diámetro de la aguja, se clasifica como arcilla dispersiva.



**Figura 2. Dibujo esquemático del equipo del ensayo Pinhole.**

Las condiciones a simular en el ensayo son las de un terraplén con una fisura en el suelo.

Ensayos químicos:

Son los que analizan la composición química del agua de poros de una muestra de suelo para determinar su grado de dispersividad.

#### **4. Desarrollo experimental**

Durante el desarrollo experimental, se decidió hacer el ensayo Crumb, por su sencillez en realización y lectura.

Para su ejecución se resolvió tomar muestras de 10gr de suelo y ponerlas en contacto con 250ml de agua desmineralizada, procediendo de dos maneras distintas en la colocación de los materiales, es decir, disponiendo primero el agua y luego agregando el suelo, y viceversa.



**Figura 3. Colocación de las muestras.**

Una vez iniciado el ensayo, se controló a los 15 y 30 minutos.

Las muestras a ensayar se denominaron P2, P5, P7, P9, Muestra 1 y Muestra 3 (muestras de la región platense que llegaron al laboratorio de investigaciones viales LEMaC) y A, B, C, D, E, F, G y H (rocas provenientes de la zona del río La Leona, Santa Cruz, Argentina) de los cuales a estos últimas sólo se las ensayó

colocando la muestra en agua (y no colocando agua a la muestra), ya que se poseía escasa cantidad de cada una



**Figura 4. Ensayo con rocas dispersivas.**

## **5. Análisis de Resultados**

Las muestras P2, P5, P7, Muestra 1 y Muestra 3, no reaccionaron de ninguna manera frente al agua desmineralizada, en cambio, la muestra P9 se sedimentó un poco pero fue debido a que el agua desmineralizada no la cubría totalmente.

Las muestras provenientes del río La Leona tuvieron diferentes reacciones. Las muestras A, D, F, G, y H comenzaron presentando grietas (inicio del ensayo) y luego se desmenuzaron (primeros 15 minutos) y sedimentaron (final del ensayo), mientras que las muestras B, C y E se agrietaron (en primeros minutos) y dividieron (últimos minutos del ensayo).

Luego del tiempo transcurrido (30 minutos) se decidió agitar mecánicamente las ocho muestras con el fin de ver su reacción. Se observó que el agua de las primeras quedaron totalmente turbias (las partículas de las rocas deflocularon) mientras que las segundas se dividieron en fragmentos más pequeños que los que había.

Transcurridos 30 minutos luego de dicho agitación, los suelos se encontraban en la misma situación que antes. Dos días después, se observó que las muestras sedimentaron en el recipiente.

## **6. Conclusiones**

- En los resultados obtenidos se puede observar que los suelos tomados de la zona de la ciudad de La Plata son no dispersivos mientras que los suelos del río La Leona resultaron dispersivos.
- Se podría afirmar según los resultados y el grado de dispersión del ensayo Crumb, que los suelos A, D y F presentan una fuerte dispersión, los suelos G y H una reacción moderada mientras que los suelos B, C y E una reacción ligera. Para determinar el por qué de los distintos tipos de dispersión deberían realizarse ensayos químicos.
- Para realmente complementar la caracterización de la dispersibilidad de los suelos deberían realizarse los otros diferentes ensayos.

## **7. Bibliografía**

- Hernández Tovar J., Gomez Granados J. "Estudio y caracterización de suelos dispersivos". 2012
- Jiménez Sálas J., Justo Alpaés J. "Geotecnia y cimientos I" 2da Edición.
- Duque-Escobar G. Potes-Escobar C. "Mecánica de los suelos".
- Porteros H., Alba Hurtado J. "Identificación y ensayos de suelos dispersivos".
- Norma ASTM D6572 - 00 "Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test"

# “OPTIMIZACIÓN DE LA SECCIÓN DE PROYECTO DE UN CANAL TRAPEZIAL REVESTIDO”

Becario: **Florencia Carla Palmitano** <sup>(1)</sup>

Director: Ing. Alicia Lilian Gamino <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DEL ESCURRIMIENTO EN UNA CUENCA URBANA MEDIANTE TÉCNICAS DE MODELACIÓN” Código UTN: ECOFALP0002164

---

## 1. Resumen

En el proyecto de canales trapeziales revestidos, para un conjunto de valores fijos del caudal, la pendiente longitudinal y la rugosidad, existen infinitas combinaciones posibles del tirante de diseño, el ancho de fondo y la inclinación de los taludes; que permiten conducir el caudal de diseño.

Para poder acotar esta variabilidad en las dimensiones a adoptar deben incorporarse como elementos de decisión aspectos no sólo de índole hidráulica sino también económica, lo que dificulta la formulación del problema.

Para reducir la complejidad del abordaje y evitar la utilización del laborioso método de prueba-error se utilizan en el presente trabajo técnicas numéricas de optimización que permiten hallar la sección transversal del menor costo.

## 2. Abstract

In lined trapezoidal channel design, for a set of fixed values of flow, longitudinal slope and roughness, there are endless amounts of possible combinations of the normal depth of flow, the bottom width and the slope of the sides; to carry the given flow rate.

To narrow this variability in the dimensions to be adopted, there must be contemplated as decisive elements, aspects not only of hydraulic nature, but also economic, action that complicates the formulation.

To reduce the approach complexity, and to avoid the usage of the time-consuming trial-error method, numeric techniques for optimization are used instead in this paper, which allow to find the minimum cost hydraulic section.

## 3. Fundamentos

La utilización de canales revestidos para el transporte de agua tiene numerosas ventajas, tales como: a) se limitan las pérdidas por infiltración, con lo que permiten un uso eficiente del agua, b) como el revestimiento proporciona un límite rígido, garantiza protección contra la erosión del fondo, y resulta esencial para la estabilidad de los taludes y c) la superficie lisa del revestimiento reduce las pérdidas de energía por fricción y permite escurrimientos con mayores velocidades medias. Estas ventajas no resultan suficientes para decidir el revestimiento, ya que debe considerarse el costo de la construcción de un canal revestido.

En general, los canales se diseñan bajo la hipótesis de régimen uniforme, y una de las ecuaciones más utilizadas para tener en cuenta la resistencia al escurrimiento es la de Chezy-Manning:

$$U = \frac{1}{n} R_h^{2/3} i^{1/2} \quad (1.1)$$

(1) Becario de investigación del Grupo de Investigación Hidráulica

(2) Director de Beca

Combinando esta ecuación con la expresión del caudal para régimen permanente y uniforme:

$$Q = U.A \quad (1.2)$$

y considerando que el radio hidráulico  $R_h$  puede obtenerse como:

$$R_h = A/P \quad (1.3)$$

se obtiene

$$Q = UA = \frac{A}{n} R_h^{2/3} i^{1/2} \rightarrow \frac{Qn}{i^{1/2}} - \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} = 0 \quad (1.4)$$

En estas ecuaciones A es el área de escurrimiento, P es el perímetro mojado, U es la velocidad media, Q es el caudal,  $R_h$  es el radio hidráulico i es la pendiente longitudinal, y n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Para una misma área de la sección transversal del canal, éste conducirá mayores caudales para las formas transversales que tengan el menor perímetro mojado <sup>[Ref.1] [Ref.3]</sup>. A la sección así obtenida se la denomina *sección hidráulicamente más eficiente*. En general para poder materializar las formas hidráulicamente más eficientes resulta necesario proceder al revestimiento del canal, para así garantizar que dicha forma sea estable en el tiempo, y no se vea deformada por procesos de erosión y sedimentación. La sección trapecial hidráulicamente más eficiente es el semihexágono ( $m=0,577$  y  $P=3xBf$ ).

En el proyecto de canales trapeciales revestidos, para un conjunto de valores fijos de Q, n e i, existen infinitas combinaciones posibles del tirante de diseño, el ancho de fondo y la inclinación de los taludes; que verifican la Ec.(1.4). Con el objeto acotar esta variabilidad en las dimensiones a adoptar debe incorporarse como elemento de decisión al factor económico, lo que dificulta la formulación del problema. Para reducir la complejidad del abordaje y evitar la utilización del laborioso método de prueba-error se pueden utilizar técnicas numéricas de optimización que permiten hallar la sección óptima que, respetando la ecuación de resistencia tiene, a su vez, el menor costo <sup>[Ref.2]</sup>.

La utilización de estas técnicas al diseño de canales fue propuesta entre otros por Trout <sup>[Ref.7]</sup>, French <sup>[Ref.2]</sup>, Farías <sup>[Ref.4]</sup>, Froehlich <sup>[Ref.8]</sup>, Swamee, Mishra <sup>[Ref.5]</sup>, Blackler y Guo <sup>[Ref.7]</sup> y Ayman <sup>[Ref.9]</sup>. Este último autor propone, en el año 2010, la utilización del utilitario MATLAB para resolver el problema de optimización en canales triangulares con fondo redondeado, línea de investigación que se aplica en el presente trabajo para secciones trapeciales. Para el análisis del costo mínimo, algunos autores (Ref 3 y Ref 5) utilizan revestimientos diferenciados para el fondo del canal y los taludes. En este estudio se utiliza el mismo revestimiento para fondo y taludes, práctica usual en los canales revestidos en el país.

En el proyecto "OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DEL ESCURRIMIENTO EN UNA CUENCA URBANA MEDIANTE TÉCNICAS DE MODELACIÓN" se propone utilizar estas técnicas en el diseño de un sistema de desagües pluviales urbanos. El presente trabajo constituye un avance en esa dirección.

Para el canal trapecial a analizar, las variables de diseño a optimizar resultan ser el ancho de fondo (Bf), la inclinación de los taludes (m) y el tirante hidráulico (h). Para la resolución se utilizan funciones del MATLAB específicas para problemas de optimización numérica sin restricciones.

En la Figura 1 se muestra un corte de la sección transversal del canal revestido. En ella Bf es el ancho de fondo, h el tirante, r es la revancha, m es la pendiente de los taludes y e es el espesor del revestimiento.



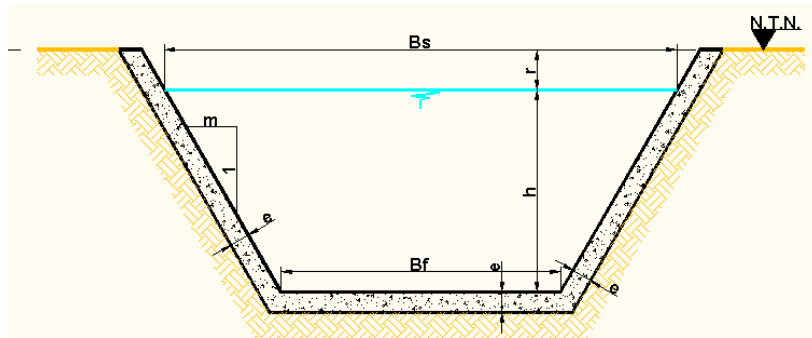


Figura 1 – Sección transversal del canal revestido

En las fórmulas estándar para el cálculo del área  $A$ , perímetro mojado  $P$  y ancho superficial  $B_s$  del canal se hace intervenir a la revancha  $r$  resultando las siguientes expresiones:

$$A = B_f (h+r) + m (h+r)^2 \quad (1.5)$$

$$P = B_f + 2 (h+r) \sqrt{1+m^2} \quad (1.6)$$

El modelo propuesto de optimización propuesto minimiza el costo total  $C$  por unidad de longitud del canal, considerado con la revancha  $r$ . Los costos de construcción incluyen tanto a los de excavación como a los de revestimiento. Las restricciones son: a) el cumplimiento de la Ec.(1.4), b) la velocidad media  $U$  menor que la máxima admitida por el material del revestimiento, y c) valores máximos y mínimos para la inclinación de los taludes. El modelo resulta del tipo de optimización no lineal con restricciones, y puede plantearse así:

Minimizar:

$$C(B_f, h, m) = c_1 [B_f (h+r) + m (h+r)^2] + c_2 [B_f + 2 (h+r) \sqrt{1+m^2}] \quad (1.7)$$

Esta es la función objetivo, que representa el costo de construcción por unidad de longitud del canal, con  $c_1$ : costo de la excavación y  $c_2$ : costo del revestimiento.

Sujeto a:

$$\frac{Qn}{\sqrt{i}} - \frac{B_f h + m h^{5/3}}{B_f + 2h\sqrt{1+m^2}^{2/3}} = 0 \quad (1.8)$$

$$m_{\min} \leq m \leq m_{\max} \quad (1.9)$$

$$U - U_{\max} \leq 0 \quad (1.10)$$

Sin embargo, este problema puede transformarse en un problema de optimización sin restricciones. El propósito del presente trabajo es minimizar el costo de construcción del canal trapezoidal revestido, dado por la (Ec.(1.7)) para distintos valores de  $Q$ , respetando las restricciones dadas por la Ec.(1.8) y Ec.(1.10) con distintos valores de  $m_{\min}$  en la Ec.(1.9).

#### 4. Desarrollo experimental

El problema de optimización sin restricciones para encontrar el costo mínimo de un canal trapezoidal revestido por el que escurre agua en régimen uniforme se resuelve utilizando la función `fminsearch` del utilitario MATLAB.

Con este propósito se adoptan los siguientes costos unitarios  $c_1=728.10 \text{ \$/m}^2$ ,  $c_2=137.52 \text{ \$/m}^3$ . Para completar la geometría del corte transversal indicado en la Figura 1, se toma un espesor del revestimiento de  $e=0,10 \text{ m}$ .

Los primeros ensayos se realizaron para distintos caudales de diseño, con  $n=0.015$ ,  $i=0,001$  y  $r=0,5$ , permitiéndose la variación de la pendiente de los taludes  $m$  entre 0.514 y 1.750, obteniéndose los resultados de la **Tabla 1**.

| Q<br>[m <sup>3</sup> /s] | Bf<br>[m] | h<br>[m] | M     | Costo<br>[\$/m]<br>(Función<br>objetivo) | velocidad<br>U<br>[m/s] |
|--------------------------|-----------|----------|-------|--|-------------------------|
| 1                        | 0,813     | 0,748    | 0,570 | 2945,991                                 | 1,078                   |
| 5                        | 1,488     | 1,368    | 0,568 | 4868,570                                 | 1,612                   |
| 10                       | 1,933     | 1,774    | 0,567 | 6222,970                                 | 1,917                   |
| 15                       | 2,252     | 2,065    | 0,567 | 7240,975                                 | 2,122                   |
| 20                       | 2,510     | 2,301    | 0,566 | 8091,351                                 | 2,280                   |
| 25                       | 2,730     | 2,502    | 0,566 | 8837,073                                 | 2,411                   |
| 30                       | 2,926     | 2,678    | 0,565 | 9509,674                                 | 2,523                   |

**Tabla 1**

Los siguientes ensayos se realizaron para un caudal  $Q=15$  m<sup>3</sup>/s y distintos valores mínimos de  $m$ , obteniéndose para cada caso un juego de valores de Bf, h y m para el mínimo costo. Los resultados se indican en la **Tabla 2**. Para contrastar estos resultados con la sección trapezoidal óptima, se agregan, en la última fila de la tabla, los valores correspondientes a esta sección, y en la última columna los porcentajes de diferencia entre los costos obtenidos.

| Bf<br>[m]   | h<br>[m]    | m            | Costo<br>[\$/m]<br>(Función<br>objetivo) | % --<br>Diferencia<br>en el<br>Costo/m |
|-------------|-------------|--------------|--|--|
| 2,25        | 2,07        | 0,567        | 7240,98                                  | -0,09%                                 |
| 1,51        | 2,00        | 1,041        | 7767,70                                  | 7,18%                                  |
| 2,56        | 2,06        | 0,422        | 7203,00                                  | -0,61%                                 |
| <b>2,33</b> | <b>2,02</b> | <b>0,577</b> | <b>7247,43</b>                           | <b>0,00%</b>                           |

**Tabla 2**

## 5. Análisis de Resultados

Según se muestra en la **Tabla 1**, para los caudales analizados, se observa que los valores de la inclinación de los taludes para la sección óptima en general se encuentran cercanos a los valores mínimos impuestos como restricción para esta variable.

Al comparar los costos de la sección transversal obtenida para los canales diseñados con el criterio de minimización del costo con la que resulta de aplicar el criterio de mínima resistencia hidráulica ( $m=0,577$ ), se observan porcentajes de reducción de costos del 0,09% y del 0,61%, tal como se indica en la **Tabla 2**. Estos porcentajes se logran para valores de  $m$  levemente inferiores a la inclinación correspondiente a la sección de mínima resistencia.

Los antecedentes para el diseño de canales indicados en la [Ref.1] y [Ref.3] no contemplan los costos para hallar la sección hidráulica óptima, aunque sí se señala que la misma no es necesariamente la que tiene la mínima excavación. El costo es, en cambio, explícitamente contemplado en la [Ref.2], [Ref.4] [Ref.5], [Ref.6], [Ref.7], [Ref.8] y [Ref.9].

El caso particular de un canal trapecial revestido analizado en el presente trabajo muestra que, para la elección de los parámetros geométricos de la sección transversal del canal, deben hacerse intervenir los factores económicos asociados a la construcción de la obra. Esta intervención podría desestimarse en un prediseño considerando que el costo del canal resultará proporcional al del revestimiento, más aún teniendo en cuenta que la sección hidráulicamente más eficiente resulta ser la del menor perímetro mojado. Pero los resultados observados en el presente trabajo muestran que si se contemplan los costos de la excavación, existen configuraciones de la sección transversal distintas de la de mínima resistencia, que tienen asociados costos menores que esta última. Las diferencias encontradas serán mayores si se contemplaran los costos del traslado del suelo sobrante, no incluidos en el análisis de este trabajo. Además del caso señalado en el párrafo anterior, quedan abiertas a investigaciones futuras el estudio del comportamiento para distintas pendientes y los análisis de sensibilidad a realizar examinando alternadamente la derivada de la función objetivo con respecto a  $B$ ,  $h$  y  $m$ , circunstancia que permitiría evaluar, en el caso de no poder adoptar la sección óptima, cuál variable resultaría más conveniente cambiar desde el punto de vista económico.

## 6. Conclusiones

Para la elección de  $B$ ,  $h$  y  $m$  correspondientes a un canal trapecial no resulta suficiente con buscar la sección hidráulicamente más eficiente, sino que deben hacerse intervenir factores económicos asociados su construcción.

La utilización del criterio de búsqueda del costo mínimo respetando la ecuación de resistencia al escurrimiento, lleva a la adopción de secciones diferentes a la sección hidráulicamente más eficiente, que tiene el menor perímetro mojado.

En general se observa que las secciones más económicas se logran con inclinaciones del talud levemente inferiores a la de mínima resistencia.

## 7. Bibliografía

- [1] Chow, V.T. (2000) "Hidráulica de canales abiertos" . Editorial Mc-Graw-Hill, pgs. 158-159. ISBN:958-600-228-4. Estados Unidos
- [2] French, R. (1988) "Hidráulica de canales abiertos" Editorial Mc-Graw-Hill, pgs. 287-293. ISBN:968-451-445-X. Estados Unidos
- [3] Streeter, V ; Wylie, B.. (1988) "Mecánica de los Fluidos " Editorial Mc-Graw-Hill, pgs. 478-480. ISBN:968-451-841-2. Estados Unidos
- [4] Farias, H. (1990) "Criterio Económico para el Proyecto de Canales Revestidos", Inédito, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina
- [5] Swamee, P.; Mishra, G. (2000) "Comprehensive design of minimum cost irrigation canal sections". ISSN:0733-9437/00/0010-0322-0327. India
- [6] Trout, T. (1982) "Channel design to minimize lining material costs". ISSN:0044-7978/82/0004-0242-0249. Estados Unidos
- [7] Blackler, G.; Guo, J. (2009) "Least-cost and most efficient channel cross sections". ISSN:0733-9437/09/0004-0248-0250. Estados Unidos
- [8] Froehlich, D. (1994) "Width and depth-constrained best trapezoidal section". ISSN:0733-9437/94/0004-0828-0835. Estados Unidos
- [9] Ayman, H. (2010) "Optimal design of round bottomed triangle channels". ISSN:1813-162X/10/0003-0031-0043. Irak

# “EVALUACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD ESTATICO DE HORMIGONES DE DISTINTA CLASE”

Becario: Irvin Quispe Sallo<sup>(1)</sup>  
Director: Ing. Marcelo Barreda<sup>(2)</sup>

---

## 1. Resumen

El propósito del presente trabajo fue determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson de hormigones de distintos niveles de resistencia a compresión, aplicando la norma IRAM 1865.

## 2. Abstract

The purpose of this study was to determine the static modulus of elasticity and the relationship of Poisson of concretes of different levels of resistance to compression, by applying the standard IRAM 1865.

## 3. Fundamentos

Los valores del módulo de elasticidad estático utilizado en los cálculos para el diseño de estructuras de hormigón, se obtienen generalmente de fórmulas empíricas que suponen una dependencia directa del módulo de elasticidad de la resistencia y de la densidad del hormigón. Estas expresiones son de aplicación cuando se carece de determinaciones experimentales del módulo. En caso contrario, se puede sustituir el valor del módulo resultante de las fórmulas por el determinado experimentalmente, correspondiente a los hormigones a utilizar en un proyecto determinado.

## 4. Desarrollo experimental y análisis de resultados

Se diseñaron mezclas de hormigón de distintos niveles de resistencia a compresión, preparadas y curadas en laboratorio según la norma IRAM 1534. Para efectuar el ensayo es necesario disponer de tres probetas de la misma muestra de hormigón, de esta forma una de ellas se ensaya directamente a compresión a los efectos de valorar la resistencia a la compresión de acuerdo con la norma IRAM 1546, cuyo módulo de elasticidad quiere determinarse, lo que se efectúa con las otras dos probetas. Este valor se utiliza como referencia para estimar el 40% de la resistencia a la compresión.



Figura 1

El compresómetro indicado en la figura 1, el cual se utiliza para el ensayo de probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, consta de dos aros metálicos; el inferior rigidamente unido a la probeta determina un plano de comparación y el superior unido por dos tornillos fijados diametralmente opuestos, materializa un eje de rotación. La distancia  $L$  entre los aros tiene que ser mayor que 3 veces el tamaño máximo del agregado grueso y menor que  $2/3$  de la altura de la probeta, preferentemente  $1/2$  de dicha altura, en nuestro caso  $L$  es 200 mm. La deformación que mide el micrómetro es 2 veces la deformación en el eje de la probeta por estar diametralmente opuesto con la varilla pivote y equidistante con la misma respecto de dicho eje.

La probeta a ensayar debe ubicarse con el compresómetro colocado adecuadamente, bien centrada en la máquina de carga. Se carga la probeta tres veces como mínimo. Durante la primera carga no se registra ningún dato, corrigiéndose cualquier anomalía antes de aplicar la segunda carga. Los cálculos se basan

(1) Becario de investigación del Centro LEMaC Depto de Ingeniería Civil

(2) Director de Beca.

en el promedio de los resultados de las cargas subsiguientes. La velocidad de carga constante es de 0,24 +/- 0,035 Mpa/s. Se registran las cargas aplicadas y las deformaciones longitudinales en 6 puntos como mínimo que permita obtener por interpolación la deformación longitudinal de 50 millonésimas y la correspondiente al 40% de la carga de rotura.

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

- ❖  $\sigma_1$ : tensión correspondiente a la deformación longitudinal específica  $\epsilon_1$ . (MPa)
- ❖  $\sigma_2$ : tensión correspondiente a la carga última. (MPa)
- ❖  $\epsilon_1$ : deformación longitudinal específica de 50 millonésimas.
- ❖  $\epsilon_2$ : deformación longitudinal específica obtenida de la tensión  $\sigma_2$ .

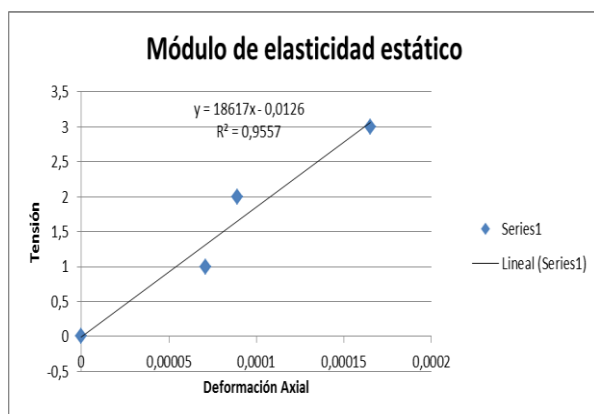
La relación de Poisson ( $\mu$ ) es el valor que se obtiene de la relación entre la deformación transversal y la deformación axial que resulta de la aplicación de una tensión distribuida uniformemente dentro del rango elástico. Para obtener la relación de Poisson, se debe determinar la deformación transversal mediante un extensómetro no adherido, que permita medir con una aproximación de 0,00254 mm el cambio en el diámetro a la mitad de la altura de la probeta, mediante dos medidores de deformación. En el hormigón los valores de la relación de Poisson varían generalmente entre 0,15 y 0,20.

$$\mu = (\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1}) / (\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

- ❖  $\epsilon_{t1}$ : deformación transversal a la mitad de la altura de la probeta producida por la tensión  $\sigma_1$ .
- ❖  $\epsilon_{t2}$ : deformación transversal a la mitad de la altura de la probeta producida por la tensión  $\sigma_2$ .
- ❖  $\epsilon_1$ : deformación longitudinal específica de 50 millonésimas.
- ❖  $\epsilon_2$ : deformación longitudinal específica obtenida de la tensión  $\sigma_2$ .

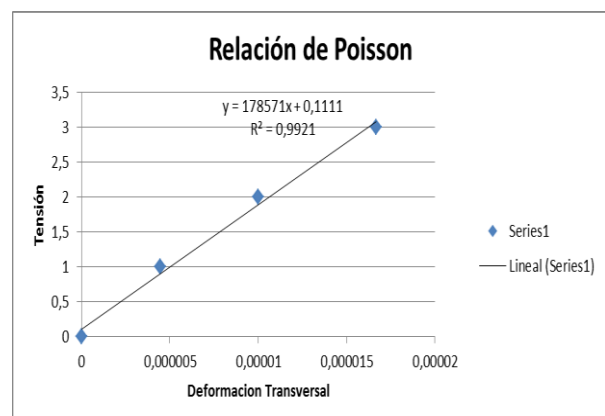
Al ser el hormigón un material heterogéneo, además de la dependencia del módulo con la variación de la carga, la calidad del hormigón, del cemento, la naturaleza de los agregados, la humedad de la muestra, etc. En general todas estas influencias se engloban en un solo parámetro que es la resistencia. Su dependencia con esta última no es muy definida, puesto que el módulo de elasticidad depende de las propiedades elásticas del mortero como también de la de los agregados que apenas influyen en la resistencia del hormigón.

Resistencia a compresión del hormigón  $f'_c = 7,4\text{MPa}$



$$y = 18617x - 0,0126$$

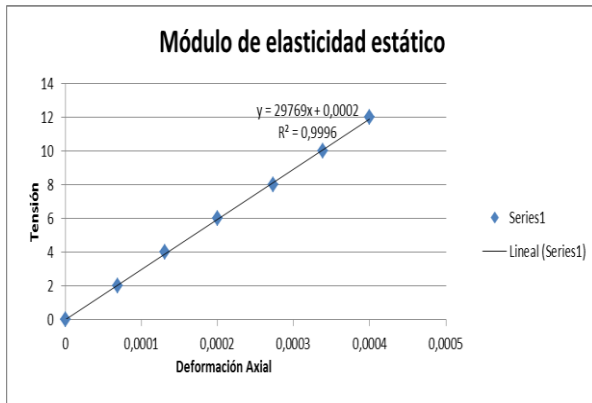
$$E = 18752 \text{ MPa}$$



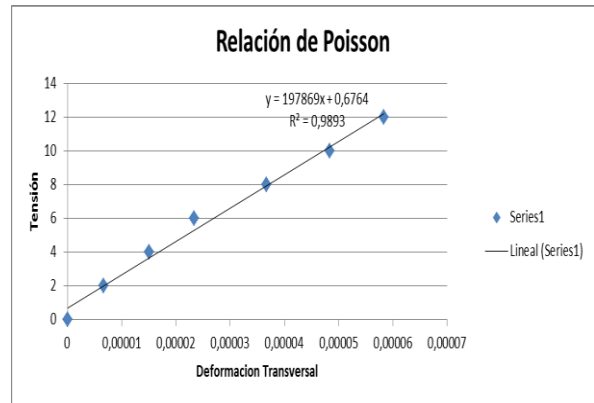
$$y = 178571x + 0,1111$$

$$\mu = 0,07$$

Resistencia a compresión del hormigón  $f'c = 27,4\text{MPa}$

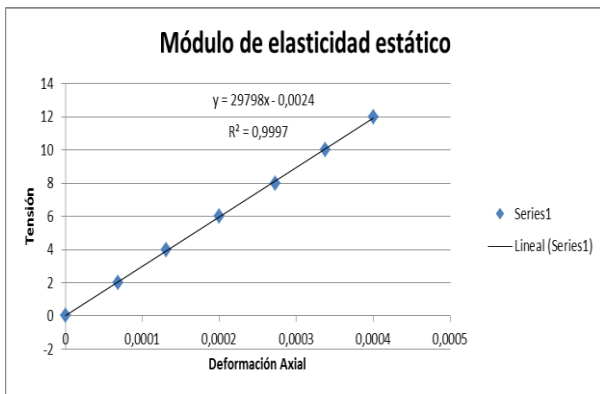


**$y = 29769x + 0,0002$**   
 **$E = 29768 \text{ MPa}$**

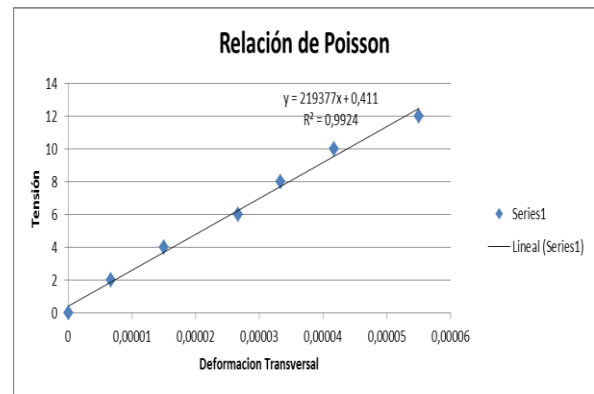


**$y = 197869x + 0,6764$**   
 **$\mu = 0,15$**

Resistencia a compresión del hormigón  $f'c = 30,8 \text{ MPa}$

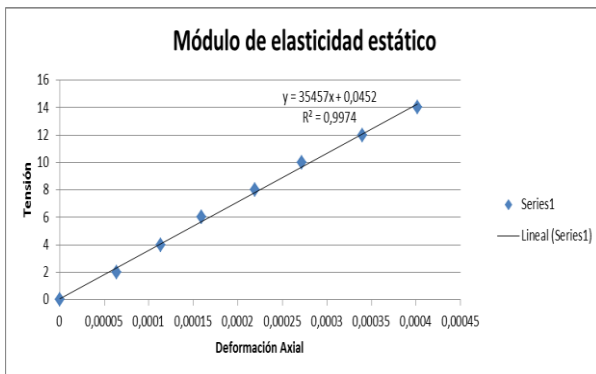


**$y = 29798x - 0,0024$**   
 **$E = 29785 \text{ MPa}$**

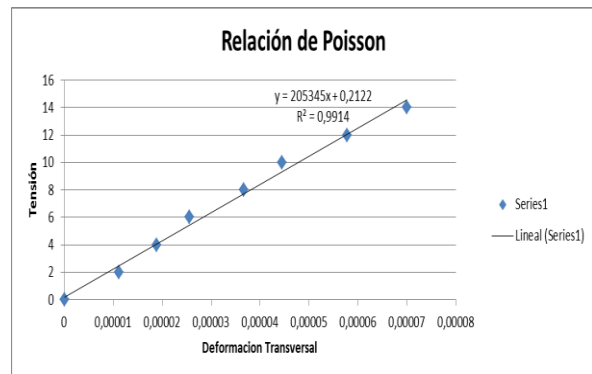


**$y = 219377x + 0,411$**   
 **$\mu = 0,15$**

Resistencia a compresión del hormigón  $f'c = 34,3 \text{ MPa}$

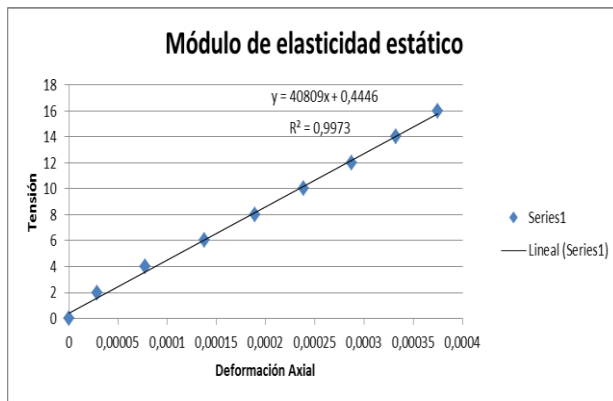


**$y = 35457x + 0,0452$**   
 **$E = 35190 \text{ MPa}$**

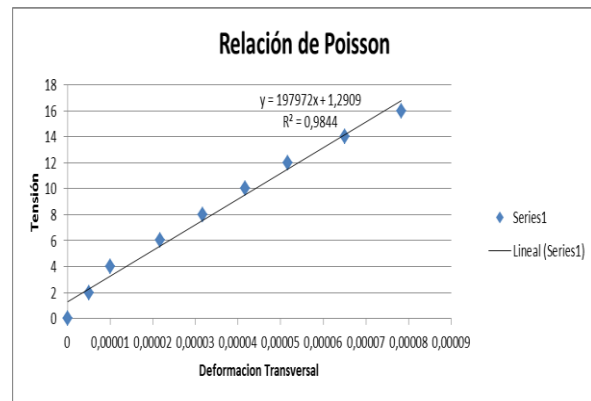


**$y = 205345x + 0,2122$**   
 **$\mu = 0,17$**

Resistencia a compresión del hormigón  $f'c = 40,4 \text{ MPa}$

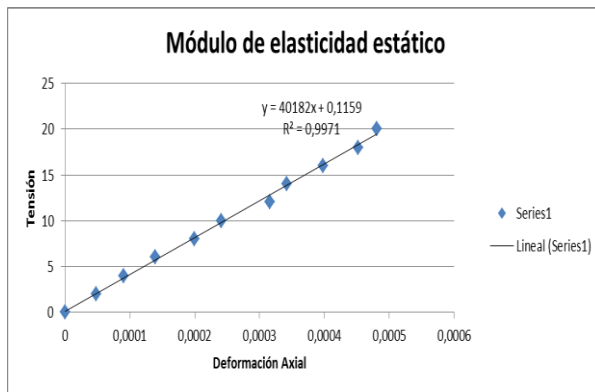


**$y = 40809x + 0,4446$**   
 **$E = 38317 \text{ MPa}$**

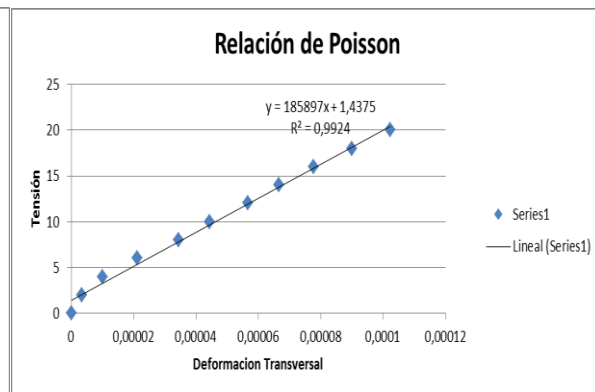


**$y = 197972x + 1,2909$**   
 **$\mu = 0,19$**

Resistencia a compresión del hormigón  $f'c = 47,2 \text{ MPa}$



**$y = 40182x + 0,1159$**   
 **$E = 39634 \text{ MPa}$**



**$y = 185897x + 1,4375$**   
 **$\mu = 0,18$**

Según el ACI 318S-05, con valores del peso unitario del hormigón ( $Wc$ ) comprendidos entre 1500 y 2500  $\text{kg/m}^3$ , el módulo de elasticidad puede ser determinado así:

$$E_c = Wc^{1.5} \times 0,043 \sqrt{f'c}$$

donde para  $Wc$  se tomó el valor 2350  $\text{kg/m}^3$  del CIRSOC 101. Esta ecuación es válida para resistencias características de hasta 41 MPa.

Según el CIRSOC 201, Se puede estimar el valor  $E_c$  con la siguiente expresión:

$$E_c = 4700 K \sqrt{f'c}$$

que es de aplicación a hormigones con agregados gruesos de distinta tipología. En este caso se empleó piedra partida granítica por lo que se multiplica por la constante de ajuste  $K = 1,2$ .

Según el código modelo CEB-FIP (1990), el módulo de elasticidad del hormigón  $E_c$ , puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$E_c = 2.15 \times 10^4 (f'c/10)^{1/3}$$

que es válida para resistencias características de hasta 80 MPa. Esta relación fue desarrollada para hormigones con agregados de cuarcita. En este caso se usó piedra partida granítica por lo que al  $E_c$  se le multiplica por el factor de ajuste  $\alpha_e = 1,2$ .

Estrictamente, los valores de la resistencia a compresión empleados en la fórmula del ACI están referidos a la resistencia característica del hormigón, pero con el fin de comparar los valores de ensayo con los obtenidos de las fórmulas, se emplearon valores medios.

**Tabla 1. Módulos de elasticidad y relaciones de Poisson**

| Resistencia a compresión (MPa) | Determinación experimental (MPa) | ACI 318 (MPa) | CIRSOC 201 (2005) (MPa) | CIB-FIP (1990) (MPa) | Relación de Poisson ( $\mu$ ) |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 7,4                            | 18.752                           | 13.326        | 15.342                  | 23.339               | 0,07                          |
| 27,4                           | 29.768                           | 25.642        | 29.523                  | 34.723               | 0,15                          |
| 30,8                           | 29.785                           | 27.186        | 31.301                  | 37.524               | 0,15                          |
| 34,3                           | 35.190                           | 28.689        | 33.031                  | 38.893               | 0,17                          |
| 40,4                           | 38.317                           | 31.136        | 35.848                  | 41.072               | 0,19                          |
| 47,2                           | 39.634                           | 33.654        | 38.748                  | 43.255               | 0,18                          |

En la Tabla 1, se observa que los valores del módulo de elasticidad obtenidos experimentalmente resultan, en la mayoría de los casos, superiores a los determinados mediante la fórmula del ACI 318 y del CIRSOC 201. Comparando los valores experimentales con los obtenidos empleando la expresión propuesta por el código modelo CEB-FIP (1990), se observa en todos los casos que los valores del módulo obtenido mediante la fórmula son superiores a los obtenidos mediante el ensayo.

**Tabla 2. Diferencias entre valores experimentales y formulas empíricas**

| Ec (MPa)<br>Determinación experimental (MPa) | $\Delta$ Ec (MPa) |                  |                      |
|--|-------------------|------------------|----------------------|
|  | ACI 318 (MPa)     | CIRSOC 201 (MPa) | CIB-FIP (1990) (MPa) |
| 18.752                                       | + 5.426           | + 3.410          | - 4.587              |
| 29.768                                       | + 4.126           | + 245            | - 4.955              |
| 29.785                                       | + 2.599           | - 1.518          | - 7.739              |
| 35.190                                       | + 6.501           | + 2.159          | - 3.703              |
| 38.317                                       | + 7.181           | + 2.469          | - 2.755              |
| 39.634                                       | + 5.980           | + 886            | - 3.621              |

De la Tabla 2, se deduce que los valores experimentales se aproximan más a los obtenidos mediante la fórmula del CIRSOC 201 que a los restantes.

## 5. Conclusiones

Se lograron obtener, mediante ensayos de laboratorio, los valores del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson para hormigones de distinto nivel de resistencia.

En virtud de las discrepancias halladas entre los valores experimentales y los obtenidos mediante las fórmulas, sería conveniente poder emplear el valor del módulo determinado experimentalmente, correspondiente a los hormigones a utilizar en un proyecto determinado.

## 6. Bibliografía

1. IRAM 1865, Métodos de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson de probetas y testigos cilíndricos de hormigón sometidos a esfuerzos de compresión axial, 2009.
2. IRAM 1534:2004 – Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral.
3. IRAM 1546:1992 – Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de compresión.
4. CIRSOC 201, Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.
5. CIRSOC 101, Reglamento Argentino de cargas permanentes y sobrecargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras.
6. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S- 05) y Comentarios (ACI 318SR-05).
7. CEB – FIP Model Code 90.
8. P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro. CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, México 1998.



# “EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A TRAVÉS DEL ÍNDICE DE ESTADO”

Becario: Sabrina B. Prunell <sup>(1)</sup>

Director: Ing. J. Julián Rivera <sup>(2)</sup>

---

## 1. Resumen

Las vías terrestres son unos de los principales medios de vinculación de un país, teniendo además por objeto brindar al usuario la posibilidad de moverse con seguridad y confort. Algunas agencias viales han llevado adelante estudios sobre diversos tramos de vía, sobre los cuales se realizaron mediciones de diversos aspectos que afectarían la calidad de circulación, generándose modelos que permiten predecir la percepción del usuario.

El objetivo del presente trabajo trata sobre cómo y mediante qué instrumentos se realizan las mediciones de esos parámetros implicados, en la determinación en particular del modelo para Índice de Estado en la evaluación superficial de vías con capa de rodamiento asfáltica.

## 2. Fundamentos

Tal vez una de las iniciativas más difundidas en la evaluación superficial de vías terrestres ha sido la llevada adelante por AASHTO mediante su Índice de Serviciabilidad Presente (*PSI* de su sigla en inglés), que va de 0 a 5, para vías casi intransitables a vías en óptimo estado, respectivamente. Este índice toma un valor a través de una ecuación que tiene como variables a la rugosidad (*SV*), el ahuellamiento (*RD*), las fisuras (*C*) y los desprendimientos (*P*) mediante la siguiente fórmula en pavimentos flexibles:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log(1 + SV) - 1,38(RD)^2 - 0,01(C + P)0,5$$

En nuestro país, en cambio, ha sido más difundido el uso de otra fórmula que combina los mismos parámetros que el *PSI*, llamada de Índice de Estado (*IE*), que va de 0 a 10 y que se expresa mediante la siguiente ecuación para todos los tipos de pavimentos en general:

$$IE = 10 * e^{-(\sum ai * Di)}$$

*IE* = Índice de Estado

*e* = 2,718 (base de los logaritmos neperianos)

*ai* = coeficientes de peso, que depende del tipo de la capa de rodamiento del pavimento evaluado según sea flexible con capa de rodamiento asfáltico, flexible con tratamiento bituminoso superficial, o rígido. Se adoptan valores comprendidos entre 0,04 y 0,08.

*Di* = coeficientes que valorizan el grado de falla. Adoptan valores comprendidos entre 0 y 10, correspondiendo los mayores valores a las situaciones más desfavorables.

(1) Becario de investigación del LEMaC Centro de Investigaciones Viales

(2) Director de Beca

La expresión que define al *IE* en pavimentos asfálticos es la siguiente:

$$IE = 10 * e^{-(0,04D1+0,05D2+0,07D3+0,04D4)}$$

- D1* = rugosidad, relacionado con mediciones expresadas en m/km
- D2* = ahuellamiento, relacionado con mediciones expresadas en mm
- D3* = fisuras, relacionado con mediciones expresadas en %
- D4* = baches, relacionado con mediciones expresadas en %

### 3. Desarrollo

**Coficiente *D1*:** La rugosidad valora las desviaciones del perfil longitudinal de un camino. Su valor, junto con el de otros parámetros, define la calidad de circulación que el camino le ofrece al vehículo. Los equipos habitualmente utilizados en el país para el análisis de este parámetro son de medición dinámica, basados en la medición circulando por el camino a velocidades similares a la de los vehículos. Bajo este concepto, si existe un nivel de rugosidad alto se deberá recurrir a alguna técnica de reparación o reconstrucción.

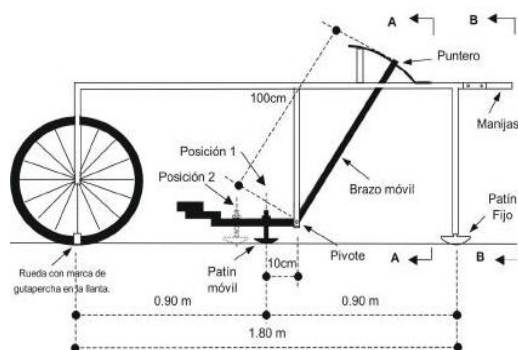
El Banco Mundial en 1986 creó un Índice de Rugosidad Internacional (*IRI*), por medio de este índice los distintos equipos pudieron ser llevados a una misma unidad de medida, expresada en m/km.

La medición del *IRI*, según la precisión del equipo utilizado, se puede analizar de acuerdo a 4 clases distintas:

|         |  |
|---------|--|
| CLASE 1 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mira y Nivel</li> <li>• TRRL Beam</li> <li>• Perfilómetros estáticos (Equipo Merlín)</li> </ul> |
| CLASE 2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfilómetros estáticos</li> <li>• Perfilómetros dinámicos</li> </ul>                           |
| CLASE 3 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bump integrator</li> <li>• Mays meter</li> </ul>  |
| CLASE 4 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dan resultados referenciales, para estimaciones gruesas de la rugosidad.</li> </ul>             |

Nos interesa de estos, en particular para el estudio en vistas a su potencial de implementación por parte del LEMaC, el Equipo Merlín, el cual consta de un marco formado por dos elementos verticales y uno horizontal. El elemento vertical delantero es una rueda y el trasero tiene adosados lateralmente dos soportes inclinados, uno en el lado derecho para fijar el equipo sobre el suelo durante los ensayos y otro en el lado izquierdo para descansar el equipo. El elemento horizontal se proyecta hacia la parte trasera, con dos manijas que permiten levantar y movilizar el equipo haciendo rodar la rueda en forma similar a una carretilla.

En la parte central del elemento horizontal se proyecta hacia abajo una barra vertical que no llega al piso en cuyo extremo inferior pivotea un brazo móvil. El extremo inferior del brazo móvil está en contacto directo con el piso mediante un patín empernado y ajustable, el cual se adecua a las imperfecciones del terreno mientras que el extremo superior termina en un indicador que se desliza sobre el borde de un



tablero, de acuerdo a la posición que adopta el extremo inferior del patín al entrar en contacto con el pavimento. Un movimiento vertical de 1 mm en el extremo inferior del patín móvil, produce un desplazamiento de 1 cm del puntero. Para registrar los movimientos del puntero se utiliza una

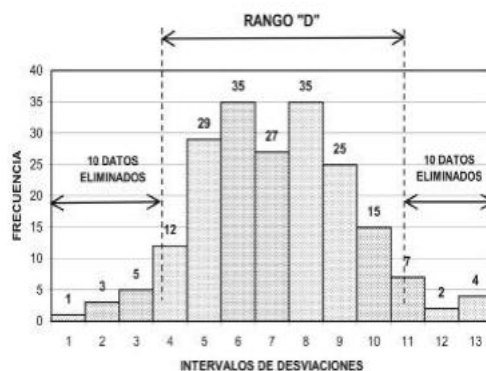
escala gráfica con 50 divisiones de 5 mm cada una, que va adherida en el borde del tablero sobre el cual se desliza el puntero.

Para determinar el valor de rugosidad se deben efectuar 200 observaciones cada una de las cuales son detectadas por el patín móvil del equipo y que a su vez son indicadas por la posición que adopta el puntero sobre la escala graduada del tablero, observándose las lecturas. Las observaciones deben realizarse cada dos metros. En cada observación el instrumento debe descansar sobre el camino en tres puntos (la rueda, el apoyo fijo trasero y el estabilizador para ensayo). La posición que adopta el puntero corresponderá a una lectura entre 1 y 50 que se anotará en una planilla de campo, dicha planilla consta de una cuadrícula compuesta por 20 filas y 10 columnas.

La prueba empieza estacionando el equipo al inicio del trecho de ensayo, el operador espera que el puntero se estabilice y observa la posición que adopta respecto de la escala ubicada sobre el tablero, realizando así una lectura que es anotada por el auxiliar en la cuadrícula, luego el operador toma el instrumento de las manijas elevándolo y desplazándolo a una distancia de 2 m, se observa que posición toma el puntero y así sucesivamente hasta tomar las 200 lecturas.

Para generar esos 200 datos, que corresponden a las 200 posiciones que adopta el brazo móvil, se requiere una escala de 50 unidades colocadas sobre el tablero del rugosímetro. La división número 25 debe corresponderse a la posición central del puntero sobre el tablero cuando el perfil del terreno coincide con la línea o curva promedio. Cuando las distintas posiciones que adopte el puntero coincidan con la división número 25 el ensayo mostrará que tiene un perfil cercano a una línea recta (baja rugosidad) lo contrario sucede cuando las posiciones que adopta el puntero están alejadas de la división número 25, ya que el pavimento demostrará un perfil con múltiples inflexiones (alta rugosidad).

Las posiciones adoptadas por el puntero pueden expresarse en forma de histograma, de éste se descartan 10 datos de su extremo inferior y 10 datos de su extremo superior, que pertenecen a posiciones poco significativas. Una vez descartados estos datos se calcula el Ancho del Histograma ( $D$ ) considerando las fracciones que pudiesen resultar como consecuencia de la eliminación de datos.



El  $D$  obtenido con los datos suministrados por el equipo, se relaciona con el IRI a través de las siguientes expresiones:

$$2,4 < IRI < 15,9 \implies IRI = 0,593 + 0,0471D \text{ (Ecuación 1)}$$

$$IRI < 2,4 \implies IRI = 0,0485D \text{ (Ecuación 2)}$$

La Ecuación 1 se utiliza para evaluar pavimentos en servicio, con superficie de rodadura asfáltica, granular o de tierra, cuando la rugosidad se encuentre en el

intervalo indicado. La Ecuación 2 se utiliza para evaluar la calidad de pavimentos recién construidos.

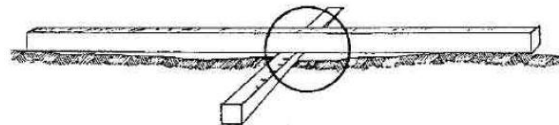
Finalmente, sea cual sea la forma de medición empleada, una vez medida la rugosidad se determina el coeficiente *D1* utilizando la tabla de corrección.

| Rugosidad (m/Km) | Coefficiente D1 correspondiente |
|------------------|---------------------------------|
| 0 - 1.1          | 0                               |
| 1.2 - 1.4        | 1                               |
| 1.5 - 1.7        | 2                               |
| 1.8 - 2.0        | 3                               |
| 2.1 - 2.3        | 4                               |
| 2.4 - 2.7        | 5                               |
| 2.8 - 3.3        | 6                               |
| 3.4 - 3.9        | 7                               |
| 4.0 - 4.5        | 8                               |
| 4.6 - 5.0        | 9                               |
| Mayor de 5.0     | 10                              |

**Coefficiente *D2*:** Cuando se le aplican cargas a un pavimento su estructura registra una acumulación de deformaciones plásticas a las que se las denomina ahuellamiento, el cual se desarrolla gradualmente y aparece como una depresión continua en las bandas de circulación de los neumáticos. Esta deformación es irrecuperable, dejando una mala calidad de circulación para los vehículos y generando una disminución de la seguridad del mismo. Dicho deterioro se ve potenciado por un inadecuado diseño de la mezcla y/o por un paquete estructural deficitario. Para medir dicha deformación, se utiliza una regla que varía su longitud entre 1,2 y 2,0 m, siendo en nuestro medio la primera la más utilizada.

Una vez medida la profundidad existente entre el nivel inferior de la regla y el pavimento, en mm y con la regla de 1,2 m, se determina el coeficiente *D2* mediante la siguiente tabla:

| Profundidad de deformación medida en mm. | Coefficiente "D2" correspondiente |
|--|-----------------------------------|
| 0 - 5                                    | 0                                 |
| 6 - 9                                    | 1                                 |
| 10 - 12                                  | 2                                 |
| 13 - 16                                  | 3                                 |
| 17 - 20                                  | 4                                 |
| 21 - 25                                  | 5                                 |
| 26 - 30                                  | 6                                 |
| 31 - 35                                  | 7                                 |
| 36 - 40                                  | 8                                 |
| 41 - 45                                  | 9                                 |
| 46 y más                                 | 10                                |



**Coefficiente *D3*:** Para definir este coeficiente se utiliza un catálogo que indica los grados de fisuración que pueden presentar los pavimentos flexibles. El método para definir el *D3* es visual, ya que sólo es necesario comparar la fotografía de la carta de fisuras con la fisura real y elegir el coeficiente adecuado. El catálogo utilizado es el siguiente:

| Fotografía | Descripción   | Coefficiente |
|------------|---|--------------|
|            | Fisura formada en una sola línea, generalmente longitudinal y aislada con tendencia a ramificarse                         | 2            |
|            | Fisura ramificada con tendencia a formar una malla ramificada en sectores de pavimento                                    | 4            |
|            | Fisura en forma de malla que abarca una superficie más amplia de pavimento y con tendencia a formar la piel de cocodrilo. | 6            |

|  |   |    |
|--|---|----|
|  | Fisura generalizada en forma de malla cerrada, de reticulado más ético, formando la llamada "piel de cocodrilo" desprendimiento del material en correspondencia con algunas fisuras | 8  |
|  | Fisura totalmente generalizada con desprendimiento de panes de material y formación de baches.  | 10 |

**Coefficiente D4:** El coeficiente D4 se define estimando el porcentaje de camino afectado por el desprendimiento de agregado grueso en zonas localizadas:

| Peladuras Superficiales (%) | Baches descubiertos | Coefficiente D4 |
|-----------------------------|---------------------|-----------------|
| 1 - 9                       | -                   | 1               |
| 10 - 29                     | -                   | 2               |
| 30 - 49                     | -                   | 3               |
| 50 - 69                     | 0.1 - 0.3           | 4               |
| 70 - 89                     | 0.4 - 0.6           | 5               |
| 90 - 100                    | 0.7 - 1.0           | 6               |
|                             | 1.1 - 1.3           | 7               |
|                             | 1.4 - 1.6           | 8               |
|                             | 1.7 - 2.0           | 9               |
|                             | Mayor de 2,0        | 10              |

#### 4. Conclusiones

- Debido a diversos factores, la capa de rodamiento de un pavimento, experimenta una serie de fenómenos medibles como por ejemplo, rugosidad, ahuellamiento, fisuras y baches.
- La evaluación superficial de un camino, consecuentemente, es una herramienta importante para el estudio de la conservación, rehabilitación o reconstrucción del mismo, ya que permite conocer qué nivel de serviciabilidad presenta.
- El LEMaC cuenta con los equipos que permiten realizar esta evaluación determinando el Índice de Estado, el cual sirve de indicativo para establecer cuál será la técnica de reparación.

#### 5. Bibliografía

- FARAGGI, V. et al. Manual práctico para el uso del rugosímetro MERLIN: Desarrollo de un sistema de gestión integral para la conservación de las vías urbanas. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil, Chile, 1991.
- MAZZITELLI, D. F.; RODRÍGUEZ, P. G.; SANVITALE, A. J. Metodología de evaluación de estado de los pavimentos. Dirección Nacional de Vialidad – Cenattev, Argentina, 1981.
- PAGOLA M. Evaluación de pavimentos. Cátedra de Transporte III. Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 2003.
- PAGOLA, M.; PONCINO, H.; GIOVANON, O. Escala internacional de medida de la adherencia neumático-calzada (IFT). XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Argentina, 1997.
- RIVERA, J. Curso de evaluación y rehabilitación de vías. Universidad de Piura, Perú, 2012.

# “DESARROLLO DE MODELOS DE CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS MARSHALL Y MÓDULO DINÁMICO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y TEMPERATURA DE ENSAYO”

**Becaria: Ana Lighuen APAS** <sup>(1)</sup>

Director: Mg. Ing. Luis Agustín RICCI <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Análisis modulares de laboratorio y obra para diseño mecanicista de pavimentos flexibles”

Código UTN: UTI-1619 Código de Incentivos 25/I-053

---

## 1. Resumen

El presente trabajo describe las experiencias realizadas para establecer una correlación entre parámetros característicos de una mezcla asfáltica y su comportamiento modular dinámico. Desde el LEMaC, gracias a la disponibilidad en equipos y materiales, se pudieron analizar con exactitud parámetros característicos de sencilla determinación y establecer valores de módulo dinámico de una mezcla asfáltica densa convencional en caliente, permitiendo encontrar una expresión que los vincula y de esta manera poder estimar el valor del módulo de rigidez a partir de estos valores.

## 2. Abstract

This paper describes experiments carried out to establish a correlation between characteristic parameters of an asphalt mixture and its modular dynamic behavior. From LEMaC, thanks to the availability of equipment and materials, could be analyzed with characteristic parameters accuracy of simplified assessment and determine values of dynamic modulus of conventional dense asphalt mixture in hot, allowing to find an expression that links and thus able estimate the value of the modulus of rigidity from these values.

## 3. Fundamentos

El módulo de rigidez es un parámetro que valora la respuesta de un pavimento asfáltico ante sollicitaciones dinámicas. No siendo un valor único para un mismo material, se ve influenciado principalmente por la variación de la temperatura de ensayo y la frecuencia de aplicación de la carga, como así también por las propiedades del ligante asfáltico y los agregados utilizados. La variación de las propiedades dinámicas por el cambio de la temperatura provoca una disminución apreciable en el valor del módulo de rigidez a medida que esta aumenta. El efecto de la frecuencia de aplicación de la carga se manifiesta a través del movimiento de los vehículos pesados sobre la estructura, y genera módulos mayores a medida que la velocidad se incrementa, es decir a medida que aumenta la frecuencia de carga.

El módulo de rigidez se determina en laboratorio por medio de distintos procedimientos sometiendo a las muestras a deformación en su rango lineal, bajo cargas repetidas o cargas con velocidad de deformación controlada. Se deben medir los esfuerzos y las deformaciones, junto con la diferencia de fase entre el esfuerzo y la deformación. Dentro de los tantos procedimientos para su ejecución, el procedimiento más empleado y con el cual se llevaron a cabo los ensayos de este trabajo es el de tracción indirecta por compresión diametral.

(1) Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC. UTN FRLP

(2) Director de Beca

Para su determinación es necesario un complejo y costoso equipo que se debe implementar en laboratorio. El equipo de ensayo deberá contar con una cámara de acondicionamiento térmico, prensa de actuación dinámica neumática o hidráulica, celda de carga, LVDT, transductores de las señales de los instrumentos a una computadora y un programa adecuado para el registro continuo de las cargas y deformaciones como también para los cálculos necesarios para determinar el valor del módulo de rigidez.



Figura 1. Ensayo de Módulo de Rigidez, Tracción Indirecta.

Actualmente el país cuenta con pocos laboratorios con el equipamiento necesario para la ejecución de este ensayo. Es esta la principal razón por la que se propone establecer una relación que permita a la comunidad toda estimar el módulo de rigidez de una mezcla asfáltica de fácil manera a partir de parámetros característicos de las mismas que resultan más sencillos, económicos y accesibles tanto en ejecución como en equipamiento necesarios. Ahondando en bibliografía extranjera se encuentran ecuaciones que correlacionan dichos parámetros con el módulo de rigidez, pero se cuestiona su aplicación en mezclas regionales dada la influencia de sus materiales componentes, con características propias de la región. Se propone entonces tomarlas como base, adecuarlas con parámetros regionales y lograr una aproximación óptima para las mezclas asfálticas del país.

#### **4. Desarrollo experimental**

En primera instancia se procedió a tomar una muestra de mezcla asfáltica en el momento en que se colocaba en obra y una vez en laboratorio se le realizaron los ensayos pertinentes para obtener sus parámetros característicos: densidad ( $\text{gr/cm}^3$ ); vacíos (%); estabilidad (Kg); fluencia (mm); porcentaje de cemento asfáltico (%) por el método de recuperación y granulometría de los áridos. Luego se procedió a extraer testigos de la misma obra y sobre ellos se realizó el ensayo de módulo de rigidez según norma UNE-EN 12697-26 Anexo C: tracción indirecta sobre probetas cilíndricas, variando la temperatura en rangos de  $5^\circ\text{C}$ ;  $10^\circ\text{C}$  y  $20^\circ\text{C}$ . A su vez cada testigo fue ensayado en cuatro frecuencias por cada temperatura: 0,5Hz; 1,0Hz; 2,0Hz y 5,0Hz. El valor del módulo de rigidez para un testigo ensayado a una temperatura y frecuencia dada se obtiene como promedio de cinco determinaciones logradas aplicando la carga perpendicular al eje y otras cinco determinaciones posteriores al haber rotado la probeta  $90^\circ$ . Obtenidos los valores del módulo de rigidez de los testigos, se los disgregó y se recuperó el ligante asfáltico por el método del rotovapor, permitiendo determinar el porcentaje de ligante asfáltico real de cada testigo así como también la granulometría del

material pétreo y el análisis del asfalto recuperado. Con todos los valores obtenidos se armó una planilla madre en Excel que integra todas las variables. Se analizaron los resultados de los ensayos, se depuró y ordenó la planilla identificando testigos dentro de un mismo rango de valores para hacerlos equivalentes. Luego, para una condición específica de temperatura y frecuencia de ensayo, se graficaron cada uno de los parámetros medidos versus el valor del módulo resultante para cada testigo, buscando relaciones concordantes con el comportamiento de las mezclas. Se obtuvieron así líneas de tendencia con ecuaciones que representan los valores de módulo en función de la variable medida. Se identificaron las líneas de tendencia que mejor  $R^2$  obtenían. El  $R^2$  es el coeficiente de correlación, cuanto más se acerque a la unidad mejor será la estimación. Para efectuar una primera aproximación del modelo, se tomaron como válidas estas ecuaciones de línea de tendencia para cualquier combinación de temperatura y frecuencia. Con el objeto de ajustar el modelo, aquellas variables que daban un coeficiente de correlación muy inferior a la unidad directamente fueron descartadas de lo que a posterior sería la ecuación final de correlación. Es por esto que de todos los gráficos solo se consideraron las siguientes variables explicativas del módulo: vacíos, porcentaje de asfalto, pasa tamiz #40, pasa tamiz #8, pasa tamiz 3/8", pasa tamiz 3/4", temperatura y frecuencia de ensayo. Como se dijo algunas variables no se consideraron por tener un valor muy pequeño de  $R^2$ , otras por depender entre sí (por ejemplo densidad y vacíos) y otras por abundancia de datos como es el caso del pasa tamiz #200 y pasa tamiz #4.

En cuanto a los parámetros referidos a la granulometría se decide poner las fracciones finas con ecuaciones exponenciales y las gruesas con ecuaciones cuadráticas. Esto se debe a que existe un rango óptimo de fracción gruesa donde se obtienen mayores valores de módulo, en cambio en las fracciones finas esto no pareciera suceder, aumentando el módulo a medida que aumenta la fracción fina.

Cada una de las líneas de tendencia expresa el valor del módulo en función de otra variable, y por lo tanto no se podrían sumar linealmente entre sí, además algunas variables independientes tienen más relevancia que otras. Es por ello que se incorporaron coeficientes de ajustes, y para aquel segmento inexplicable se debió sumar un término independiente. Los coeficientes de ajuste y el término independiente se obtienen por iteraciones sucesivas mediante la ejecución de la herramienta SOLVER dentro del programa Excel. El concepto de las iteraciones sucesivas, se basa en buscar aquellos valores que den menor error en las estimaciones. Por eso se decidió colocar una columna de módulo estimado cuyos valores surgen de la ecuación de correlación, una segunda columna que indica la diferencia entre el módulo estimado y el módulo medido, y por último una tercera columna con el cuadrado de la diferencia. Luego se efectúa la suma de las sumas de todos los errores, bajo todas las condiciones de ensayo (tres temperaturas y cuatro frecuencias por temperatura) y se le pide al programa que ese valor sea el mínimo posible. Por último se establece un rango de aceptación para la estimación, el cual sería un  $\pm 30\%$  del valor del módulo promedio obtenido por ensayo.

## **5. Análisis de Resultados**

Se muestra a continuación las gráficas resultantes de comparar las variables explicativas seleccionadas y el módulo de rigidez. Se puede observar también la



línea de tendencia y el coeficiente de correlación obtenido para cada aproximación.

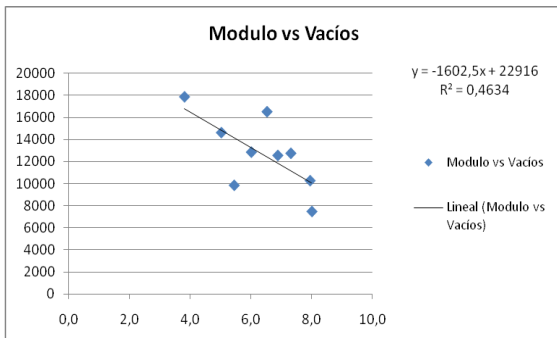


Figura 1. Módulo de Rigidez versus Vacíos

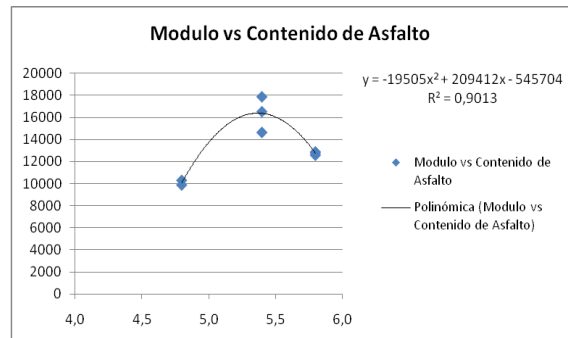


Figura 2. Módulo de Rigidez versus % Asfalto

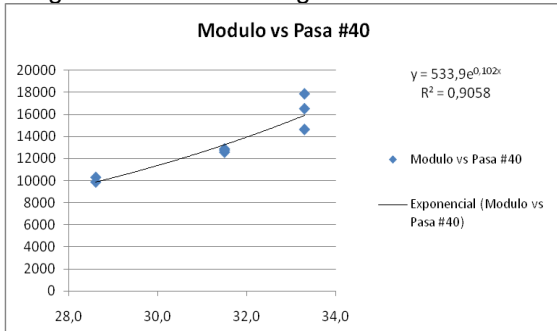


Figura 3. Módulo de Rigidez versus pasa#40

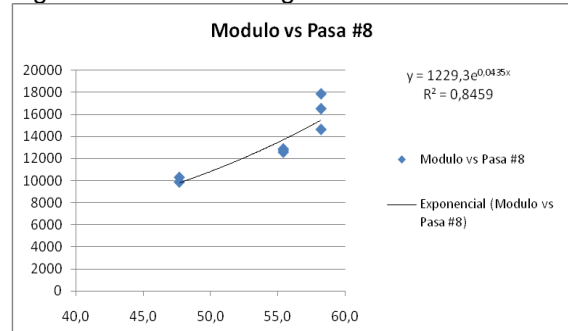


Figura 4. Módulo de Rigidez versus pasa#8

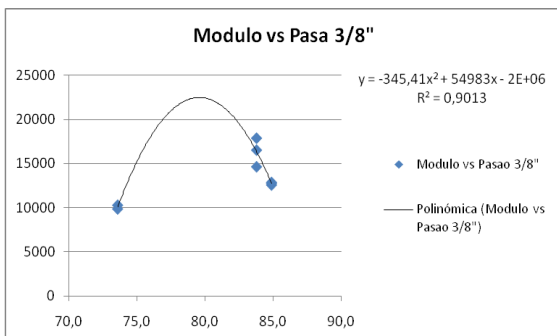


Figura 5. Módulo de Rigidez versus pasa3/8"

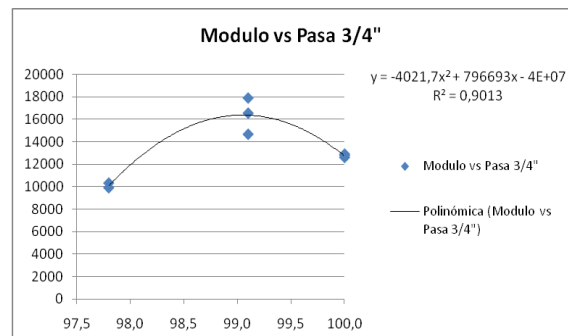


Figura 6. Módulo de Rigidez versus pasa3/4"

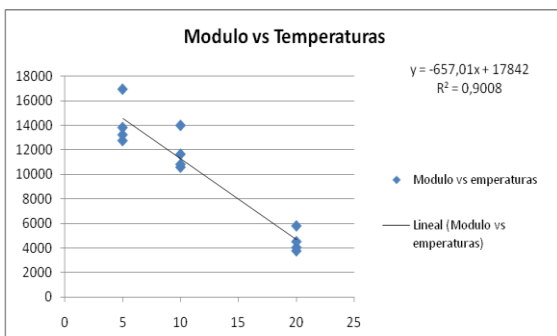


Figura 7. Módulo de Rigidez versus temperatura

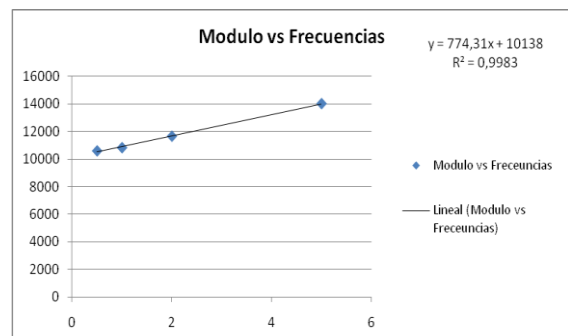


Figura 8. Módulo de Rigidez versus frecuencia

Como puede observarse tomadas las variables en forma independiente, cada una de ellas, podría explicar el módulo en mayor o menor medida, sin embargo el problema reside en buscar la combinación más adecuada entre variables, que logren la estimación más ajustada. Se sumaron todas las ecuaciones y a cada término de dicha suma se le aplicó un coeficiente de ajuste que el programa de

iteraciones sucesivas debió hallar, tratando de minimizar los errores. La ecuación de correlación ajustada obtenida se presenta a continuación:

$$E = \alpha(-1602,5V + 22916) + \beta(19505A^2 + 209412A - 545704) + \chi(533,9e^{0,102P40}) + \delta(1229,3e^{0,0435P8}) + \varepsilon(-345,41P3/8^2 + 54983 P3/8 - 2000000) + \varphi(-4021,7 P3/4^2 + 796693P3/4 - 40000000) + \gamma(-657,01T + 17842) + \eta(774,31F + 10138) + \text{ind}$$

Donde

V = Porcentaje de vacíos  
 A = Porcentaje de asfalto  
 P40 = Porcentaje de pasa#40  
 P8 = Porcentaje de pasa#8  
 P3/8 = Porcentaje de pasa3/8"

P3/4 = Porcentaje de pasa3/4"  
 T = temperatura de ensayo (°C)  
 F = Frecuencia de ensayo (Hz)  
 $\alpha ; \beta ; \chi ; \delta ; \varepsilon ; \varphi ; \gamma ; \eta$  = coeficiente  
 Ind = -1008,25

Aplicando esta ecuación, y tomando un rango de aceptación para la estimación de  $\pm 30\%$  del valor del módulo, se observa que de un total de 84 estimaciones efectuadas, 70 (lo que corresponde al 83%) serían aceptables y que las estimaciones más dispares se dan en la mayor temperatura.

## 6. Conclusiones

Acotando el problema al estudio de una misma tipología de mezclas asfálticas, se ha podido lograr una primera aproximación de una ecuación de correlación que pueda obtener el módulo de rigidez de una mezcla con suficiente precisión. Dejando de lado las condiciones de ensayo, como lo son la temperatura y frecuencia, de los parámetros explicativos del módulo de rigidez, aquel que mejor coeficiente de correlación ha obtenido es el contenido de ligante, seguido de las fracciones de áridos de mayor tamaño 3/4" y 3/8".

Aumentar el número de muestras ensayadas llevaría a tener resultados más contundentes si se mantiene las tendencias aquí expresadas, así como también incluir las características del ligante empleado en la ecuación, serían los pasos a seguir en la evolución del presente trabajo.

Se propone para siguientes investigaciones trabajar en aspectos estadísticos, que ayuden al manejo de la información y permitan lograr una ecuación de correlación más ajustada.

## 7. Bibliografía

- AENOR. (2006). "EN 12697-26 MEZCLAS BITUMINOSAS, METODOS DE ENSAYO PARA MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE, PARTE 26: RIGIDEZ". España.
- British Standard. (2012). "BS-EN 12697-26:2012 BITUMINOUS MIXTURES, TEST METHODS FOR HOT MIX ASPHALT, PART 26: STIFFNESS". UK.
- Bari J., Witczak M. (2006). "DEVELOPMENT OF A NEW REVISED VERSION OF THE WITCZAK E\* PREDICTIVE MODEL FOR HOT MIX ASPHALT MIXTURES". Arizona Department of Transportation, Phoenix, Arizona. EEUU.
- Garcia G., Thompson M. (2007) "HMA DYNAMIC MODULUS PREDICTIVE MODELS – A REVIEW". Illinois Center for Transportation. EEUU.
- Bonaquist R., Christensen D. (2005) "A PRACTICAL PROCEDURE FOR DEVELOPING DYNAMIC MODULUS MASTER CURVES FOR PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN". Annual Meeting of the Transportation Research Board. EEUU.

# “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE HORMIGONES CON INCORPORACIÓN DE RESIDUOS DE ARENA DE FUNDICIÓN”

Becario: Alejandro Nahuel Legato <sup>(1)</sup>  
Director: Ing. Marcelo F. Barreda <sup>(2)</sup>

---

## 1. Resumen

La industria de la fundición genera año a año grandes cantidades de arena como residuo principal de la elaboración de machos y moldes, ferrosos y no ferrosos. Dichas arenas suelen tener como destinos la reinserción en el proceso de fundición, el descarte, con su consecuente impacto ambiental, y el empleo en otras industrias, como lo es la industria de la construcción.

En el presente trabajo se desea evaluar el desempeño del hormigón en estado fresco y endurecido con previa incorporación de residuos de arenas de fundición (RAF).

## 2. Abstract

The smelting industry generates every year large amounts of sand as residue master of the development of male and molds, ferrous and non ferrous metals. These sands usually have as destinations; the reintegration in the casting process, the discard, with its consequent environmental impact, and employment in other industries, as is the construction industry.

In this paper we want to evaluate the performance of concrete in fresh and hardened by prior incorporation of foundry sands.

## 3. Fundamentos

En la industria de la fundición se destacan dos tipos de moldeo: El **moldeo en verde**, el cual se caracteriza por el uso de arena de sílice, bentonita como aglomerante, y agua. Se usa tanto en grandes como en pequeñas series. El segundo, el **moldeo químico**, que emplea aglomerante químico, generalmente resinas sintéticas (furánicas y fenólicas). Se emplea para la fabricación de piezas grandes y en series cortas.

En cuanto a las técnicas de fundición se diferencian por tipo de molde, según material y vida útil del mismo. Se distinguen los moldes **permanentes** de los **perdidos**. Los primeros son metálicos, con alto costo de fabricación y mantenimiento, justificándose su uso en grandes series. Los segundos, son aquellos en los cuales el molde únicamente se utiliza una vez. Realizada la colada y posterior desmoldeo se obtienen las piezas con destrucción del molde. Proceso similar se sigue con los machos que son los elementos insertados en el molde con objeto de conseguir huecos o zonas de difícil ejecución directa en el molde. Son muy utilizados por su gran adaptabilidad en cuanto a tamaño y forma de las piezas a producir, y por su bajo costo.

Con el objetivo de minimizar la cantidad de arena a usar en las fundiciones, por economía y cuidado ambiental, se suele implementar las siguientes medidas:

(1) Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC. Depto. de Ing. Civil.

(2) Director de Beca

- **Reutilización** de la arena usada, con agregado de arena nueva.
- **Regeneración** de la arena usada; lo cual es una valorización interna, y consiste en depurar la arena usada hasta el punto de que pueda sustituir a la arena nueva en la fabricación de machos y moldes. Las instalaciones de regeneración pueden ser térmicas, mecánicas, neumáticas y combinadas. Tras la regeneración se clasifica y criba el regenerado.
- **Valorización externa.** Consiste en su uso como materia prima en productos tales como hormigones y mezclas asfálticas.

#### 4. Desarrollo experimental

En estado endurecido a las probetas de hormigón se les evaluó su resistencia a compresión, según **Norma IRAM 1546**, como así también su resistencia a la tracción por compresión diametral, siguiendo la **Norma IRAM 1658**. Las edades de ensayo fueron: 7,28 ,60 Y 90 días. El curado de las mismas se realizó en cámara húmeda.

El método de dosificación empleado es el método racional propuesto por el American Concrete Institute (ACI) a través de su comité 211.

Del peso total de agregado **grueso** (piedra partida granítica), el 40% corresponde a tamaño 10mm: 30mm y el restante 60% a piedra 6mm: 20mm.

En cuanto a la parte **fin** (arenas), el 75% corresponde a arena gruesa (0mm: 6mm) y el 25% a arena fina.

A continuación se exponen las granulometrías, dosificaciones y resultados de ensayos mecánicos:

| Arena Fina           |            |        |                     |            |            |        | Promedio   |        |
|----------------------|------------|--------|---------------------|------------|------------|--------|------------|--------|
| Tamiz                | % Retenido | % Pasa | % Retenido          | % Pasa     | % Retenido | % Pasa | % Retenido | % Pasa |
| 3/8"                 | 0          | 100    | 0                   | 100        | 0          | 100    | 0          | 100    |
| # 4                  | 0          | 100    | 0                   | 100        | 0          | 100    | 0          | 100    |
| # 8                  | 0          | 100    | 0                   | 100        | 0          | 100    | 0          | 100    |
| # 16                 | 0          | 100    | 0                   | 100        | 1          | 99     | 0          | 100    |
| # 30                 | 4          | 96     | 3                   | 97         | 4          | 96     | 4          | 96     |
| # 50                 | 22         | 78     | 20                  | 80         | 24         | 77     | 22         | 78     |
| # 100                | 89         | 11     | 87                  | 13         | 90         | 10     | 89         | 11     |
| MF                   |            |        |                     |            |            |        | 1,15       |        |
| Arena 0:6            |            |        |                     |            | Promedio   |        |            |        |
| Tamiz                | % Retenido | % Pasa | % Retenido          | % Pasa     | % Retenido | % Pasa |            |        |
| 3/8"                 | 0          | 100    | 0                   | 100        | 0          | 100    |            |        |
| # 4                  | 7          | 93     | 6                   | 94         | 6          | 94     |            |        |
| # 8                  | 37         | 63     | 31                  | 69         | 34         | 66     |            |        |
| # 16                 | 57         | 43     | 51                  | 49         | 54         | 46     |            |        |
| # 30                 | 74         | 26     | 69                  | 31         | 72         | 28     |            |        |
| # 50                 | 81         | 19     | 77                  | 23         | 79         | 21     |            |        |
| # 100                | 91         | 9      | 90                  | 10         | 91         | 9      |            |        |
| MF                   |            |        |                     |            | 3,36       |        |            |        |
| Piedra Partida 10:30 |            |        | Piedra Partida 6:20 |            |            |        |            |        |
| Tamiz                | % Retenido | % Pasa | Tamiz               | % Retenido | % Pasa     |        |            |        |
| 2"                   | 0          | 100    | 2"                  | 0          | 100        |        |            |        |
| 1 1/2"               | 0          | 100    | 1 1/2"              | 0          | 100        |        |            |        |
| 1"                   | 5          | 95     | 1"                  | 0          | 100        |        |            |        |
| 3/4"                 | 70         | 30     | 3/4"                | 7          | 93         |        |            |        |
| 1/2"                 | 97         | 3      | 1/2"                | 57         | 43         |        |            |        |
| 3/8"                 | 98         | 2      | 3/8"                | 79         | 21         |        |            |        |

|                            |            |        |                            |            |        |
|----------------------------|------------|--------|----------------------------|------------|--------|
| # 4                        | 98         | 2      | # 4                        | 98         | 2      |
| # 8                        | 98         | 2      | # 8                        | 99         | 1      |
| MF                         | 7,67       |        | MF                         | 6,84       |        |
| Agregados Combinados 25/75 |            |        | Agregados Combinados 60/40 |            |        |
| Tamiz                      | % Retenido | % Pasa | Tamiz                      | % Retenido | % Pasa |
| 3/8"                       | 0          | 100    | 2"                         | 0          | 100    |
| # 4                        | 5          | 95     | 1 1/2"                     | 0          | 100    |
| # 8                        | 25         | 75     | 1"                         | 2          | 98     |
| # 16                       | 41         | 59     | 3/4"                       | 32         | 68     |
| # 30                       | 55         | 45     | 1/2"                       | 73         | 27     |
| # 50                       | 65         | 35     | 3/8"                       | 87         | 13     |
| # 100                      | 90         | 10     | # 4                        | 98         | 2      |
| MF                         | 2,80       |        | # 8                        | 99         | 1      |
|                            |            |        | MF                         | 7,17       |        |

**Tabla N°1. Granulometría de los agregados finos y gruesos.**

| RAF 1   |            |            |           | RAF 2   |            |            |           |
|---------|------------|------------|-----------|---------|------------|------------|-----------|
| Pi (gr) | 500,6      |            |           | Pi (gr) | 500,2      |            |           |
| Tamiz   | % Ret Peso | % Ret Acum | % Pasante | Tamiz   | % Ret Peso | % Ret Acum | % Pasante |
| 3/8"    |            |            |           | 3/8"    |            |            |           |
| # 4     |            |            |           | # 4     |            |            |           |
| # 8     | 1,0        | 0,2        | 99,8      | # 8     | 0,4        | 0,1        | 99,9      |
| # 16    | 7,8        | 1,6        | 98,4      | # 16    | 1,4        | 0,3        | 99,7      |
| # 30    | 26,0       | 5,2        | 94,8      | # 30    | 8,2        | 1,6        | 98,4      |
| # 50    | 141,6      | 28,3       | 71,7      | # 50    | 80,0       | 16,0       | 84,0      |
| # 100   | 475,4      | 95,0       | 5,0       | # 100   | 458,4      | 91,6       | 8,4       |
| F       | 498,4      |            |           | F       | 498,6      |            |           |
| MF      |            | 1,30       |           | MF      |            | 1,10       |           |
| RAF 3   |            |            |           | RAF 4   |            |            |           |
| Pi (gr) | 502        |            |           | Pi (gr) | 500        |            |           |
| Tamiz   | % Ret Peso | % Ret Acum | % Pasante | Tamiz   | % Ret Peso | % Ret Acum | % Pasante |
| 3/8"    |            |            |           | 3/8"    |            |            |           |
| # 4     |            |            |           | # 4     |            |            |           |
| # 8     |            |            |           | # 8     | 4,0        | 0,8        | 99,2      |
| # 16    | 0,8        | 0,2        | 99,8      | # 16    | 13,4       | 2,7        | 97,3      |
| # 30    | 38,8       | 7,7        | 92,3      | # 30    | 115,0      | 23,0       | 77,0      |
| # 50    | 211,2      | 42,1       | 57,9      | # 50    | 357,7      | 71,5       | 28,5      |
| # 100   | 490,2      | 97,6       | 2,4       | # 100   | 496,2      | 99,2       | 0,8       |
| F       | 499,2      |            |           | F       | 499,4      |            |           |
| MF      |            | 1,48       |           | MF      |            | 1,97       |           |
| RAF     |            |            |           | RAF     |            |            |           |
| Pi (gr) | 500        |            |           | Pi (gr) | 500        |            |           |
| Tamiz   | % Ret Peso | % Ret Acum | % Pasante | Tamiz   | % Ret Peso | % Ret Acum | % Pasante |
| 3/8"    |            |            |           | 3/8"    |            |            |           |
| # 4     |            |            |           | # 4     |            |            |           |
| # 8     | 0,6        | 0,1        | 99,9      | # 8     | 7,0        | 1,4        | 98,6      |
| # 16    | 4,4        | 0,9        | 99,1      | # 16    | 30,8       | 6,2        | 93,8      |
| # 30    | 57,4       | 11,5       | 88,5      | # 30    | 123,6      | 24,7       | 75,3      |
| # 50    | 296,4      | 59,3       | 40,7      | # 50    | 400,6      | 80,1       | 19,9      |
| # 100   | 495,6      | 99,1       | 0,9       | # 100   | 495,4      | 99,1       | 0,9       |
| F       | 499,0      |            |           | F       | 498,2      |            |           |
| MF      |            | 1,71       |           | MF      |            | 2,12       |           |

**Tabla N°2. Granulometría de los RAF.**

| Materiales (kg/m <sup>3</sup> ) | H-0 | H-1 | H-2 | H-3 | H-4 | H-5 | H-6 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Agua                            | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| Cemento CPC 40                  | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 |
| Piedra 10:30                    | 425 | 425 | 425 | 425 | 425 | 425 | 425 |
| Piedra 6:20                     | 638 | 638 | 638 | 638 | 638 | 638 | 638 |
| Arena de trituración            | 611 | 611 | 611 | 611 | 611 | 611 | 611 |
| Arena silícea                   | 204 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| RAF                             | 0   | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 |
| Aditivo Plastificante           | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
|                                 |     |     |     |     |     |     |     |
| Relación a/c = 0,44             |     |     |     |     |     |     |     |

**Tabla N°3. Dosificaciones.**

| Ensayos RAF      |            |                   |      |      |      |
|------------------|------------|-------------------|------|------|------|
| Hormigón         | Ensayo     | Edad              |      |      |      |
|                  |            | 7 d               | 28 d | 60 d | 90 d |
|                  |            | Resistencia (MPa) |      |      |      |
| H-0 (Referencia) | Compresión | 28,5              | 37,8 | 40,8 | 41,0 |
| A = 10 cm        | Tracción   | 3,1               | 3,6  | 4,1  | 3,8  |
| H-1              | Compresión | 21,4              | 27,4 | 31,9 | 32,0 |
| A = 10 cm        | Tracción   | 3,0               | 3,6  | 3,8  | 3,4  |
| H-2              | Compresión | 25,8              | 38,5 | 39,1 | 40,7 |
| A = 7 cm         | Tracción   | 3,4               | 4,0  | 3,9  | 3,8  |
| H-3              | Compresión | 32,4              | 39,9 | 41,7 | 41,4 |
| A = 4,5 cm       | Tracción   | 3,7               | 3,8  | 4,3  | 4,2  |
| H-4              | Compresión | 32,5              | 38,3 | 40,9 | 41,0 |
| A = 4,0 cm       | Tracción   | 3,6               | 3,8  | 3,8  | 3,8  |
| H-5              | Compresión | 23,8              | 33,3 | 35,7 | 38,2 |
| A = 13 cm        | Tracción   | 3,4               | 3,8  | 3,7  | 3,8  |
| H-6              | Compresión | 28,6              | 36,6 | 39,6 | 42,0 |
| A = 4 cm         | Tracción   | 3,4               | 3,5  | 4,2  | 4,5  |

**Tabla N°4. Resistencias a compresión simple y a tracción simple por compresión diametral.**

## 5. Análisis de Resultados

En estado fresco, se midieron asentamientos comprendidos entre 4 y 13 cm (Tabla N° 4). Estos valores pueden ajustarse hasta obtener el asentamiento deseado, modificando la dosis de aditivo plastificante empleada.

En estado endurecido, sólo los hormigones H-1 y H-5 presentaron una resistencia mecánica significativamente inferior al hormigón de referencia (H-0). El resto de los hormigones presentaron, en general, valores similares en todas las edades (Tabla N° 4).

La existencia de compuestos peligrosos por degradación de los productos aglomerantes, debe ser tenida en cuenta para valorar la incidencia en la disminución de la resistencia de algunos de los hormigones.

## 6. Conclusiones

La mayoría de los residuos estudiados pueden ser empleados sin inconvenientes, desde el punto de vista de su comportamiento en estado fresco y endurecido, como reemplazo de la arena fina natural, en la elaboración de hormigones. En todos los casos, resulta necesario ajustar previamente las proporciones de las dosificaciones mediante pastones de prueba realizados en laboratorio, para obtener la trabajabilidad y resistencia requeridas para una estructura determinada.

## 7. Bibliografía

- Ministerio de medio ambiente y medio rural marino, España-(2009)-“Forja y fundición, Mejores técnicas disponibles de referencia Europea”.
- IHOBE-(1998)-“Arenas de moldeo en fundiciones férreas”.
- **Norma IRAM 1536** - “Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono.”
- **Norma IRAM 1546** – “Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión. Cement concrete. Compression test method.”
- **Norma IRAM 1658** – “Hormigón. Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral.”

# “INTRODUCCIÓN A LA CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EL ENSAYO MARSHALL, MEDIANTE LA AUTOMATIZACIÓN DE LA PRENSA EMPLEADA”

**Becario: Darío Asuaje** <sup>(1)</sup>

Director: Mg. Ing. Luis Agustín Ricci <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Análisis Modulares de Laboratorio y Obra para Diseño Mecanicista de Pavimentos Flexibles”

Código UTN: UTI 1619 Código de Incentivos 25/I-053

---

## 1. Resumen

La tesis tiene como primer objetivo la introducción en la temática referida a las mezclas asfálticas, con el fin de familiarizarse en las técnicas de caracterización de mezclas, en especial con el procedimiento Marshall. Tanto en el plano práctico (aprovechando las tareas de laboratorio) como en el teórico.

Una vez avanzada la etapa de reconocimiento y experiencia en la metodología Marshall de caracterización de mezclas, se procedió a la modificación del equipamiento con los fines de obtener el registro continuo de cargas y deformaciones. Instrumentados los cambios se dosificaron dos mezclas (una sin filler de aporte y otra con la adición de cal como filler) las cuales se ensayaron para luego hacer un análisis de las curvas de ensayo y arribar a las conclusiones del trabajo.

## 2. Abstract

The thesis has as its first aim to introduce into the subject referred to asphaltic mixes, in order to learn the techniques of characterization of mixes, especially with the procedure of the Marshall test, including the practical (taking advantage of the laboratory's work) as well as the theoretical knowledge.

Once the initial period of survey and experience in the Marshall method for characterizing the mixes, changes were made to the equipment in order to obtain a continuous record of loads and deformations. Once the changes were made, two mixes were dosified (one without filler and another with the addition of lime as filler), which were then tested in order to analyze the test curves and obtain the conclusions from the work.

## 3. Fundamentos

El ensayo de estabilidad – fluencia realizado, mediante el registro continuo de cargas y deformaciones, nos permite obtener una cantidad abundante de datos, los cuáles no se obtienen mediante el método tradicional donde se utilizan flexímetros y aros dinamométricos. Mediante un software se puede visualizar el comportamiento de la probeta a través la curva carga – deformación, compuesta por las variables dichas. Teniendo así significativas ventajas respecto del método tradicional. En primer lugar es posible obtener, el área bajo la curva que corresponde a la energía absorbida por la probeta ensayada, sumándole que se eliminan posibles errores o subjetividades en la lectura por parte del operario para determinar la carga máxima y la deformación correspondiente.

Además se puede mencionar como ventaja derivada de la curva de ensayo graficada, que en caso de ensayar dos mezclas que den similares resultados de

(1) Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC Depto. de Ing. Civil

(2) Director de Beca.



estabilidad, una puede ser más o menos flexible que la otra, en función de las deformaciones obtenidas y de la forma de la curva.

#### 4. Desarrollo experimental

La automatización del ensayo, consiste en reemplazar el aro dinamométrico convencional por una celda de carga tipo “S” y el flexímetro que registra deformaciones por un LVDT (transformador usado para medir desplazamientos lineales). Pudiendo así, mediante un software instalado en una computadora, que combina el accionar de la celda de carga con la lectura del LVDT realizar el ensayo y obtener las lecturas de estabilidad – fluencia de las probetas Marshall de las mezclas analizadas. Es necesario indicar que si bien lo que uno observa durante el ensayo es una curva, los datos se registran en un archivo de texto (\*.txt) .Una vez obtenidas dichas lecturas se prosiguió a utilizar esos valores del archivo \*.txt para confeccionar una planilla de Excel en la cual se puede visualizar la curva antes mencionada y obtener los valores derivados de las lecturas efectuadas, como son la energía absorbida, la carga máxima registrada, la deformación correspondiente a la carga máxima y la relación entre la carga máxima y la deformación.



Figura 1. Equipo Marshall convencional.



Figura 2. Equipo Marshall adaptado.

#### 4.1 Materiales empleados

Para la confección de las probetas se utilizó:

- Ligante asfáltico convencional Tipo CA-20
- Arena silíceo
- Árido fino, arena de trituración 0:6
- Árido grueso piedra partida granítica 6:20
- Cal Hidráulica comercial

El fabricante del ligante asfáltico ha declarado las siguientes características, que se condicen con la clasificación CA-20 según Norma IRAM 6835:

| Ensayo                 | Unidad  | Norma IRAM | Valor | Valores límites |      |
|------------------------|---------|------------|-------|-----------------|------|
|                        |         |            |       | Mín.            | Máx. |
| Punto de ablandamiento | °C      | 6841       | 49    | ---             | ---  |
| Viscosidad a 60 °C     | dPa.seg | 6837       | 1780  | 1600            | 2400 |
| Índice de penetración  | ---     | 6604       | -0,1  | -1,5            | 0,5  |

Los áridos han provenido de una planta asfáltica comercial de la región. De cada pila de acopio se tomaron muestras representativas, y se llevaron al laboratorio. Las muestras se homogeneizaron, y se cuartearon separando fracciones para

determinaciones de granulometrías y para el moldeo Marshall. A continuación se muestran las granulometrías obtenidas:

| Tamiz | Abert. | CAL   | 6:20  | A.S.  | 0:6   |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 25400  | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 3/4   | 19100  | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 1/2   | 12700  | 100,0 | 40,9  | 100,0 | 100,0 |
| 4     | 4760   | 100,0 | 1,0   | 99,9  | 96,6  |
| 10    | 2000   | 100,0 | 0,9   | 99,5  | 60,3  |
| 40    | 430    | 98,7  | 0,7   | 86,8  | 23,3  |
| 80    | 177    | 88,8  | 0,6   | 8,6   | 15,7  |
| 200   | 74     | 80,3  | 0,4   | 0,6   | 9,6   |

#### 4.2 Dosificaciones

Para determinar los porcentajes de cada material se utilizaron las curvas límites indicadas por la Municipalidad de La Plata en el Pliego correspondiente al ensanche de una importante avenida de la ciudad. Por aproximaciones sucesivas se buscó un esqueleto granular que cumpla con los requisitos.

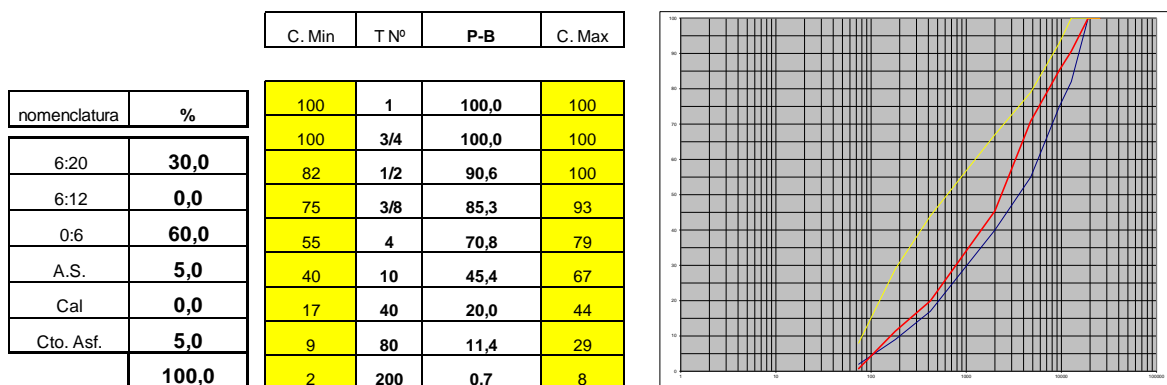


Figura 3. Dosificación sin cal.

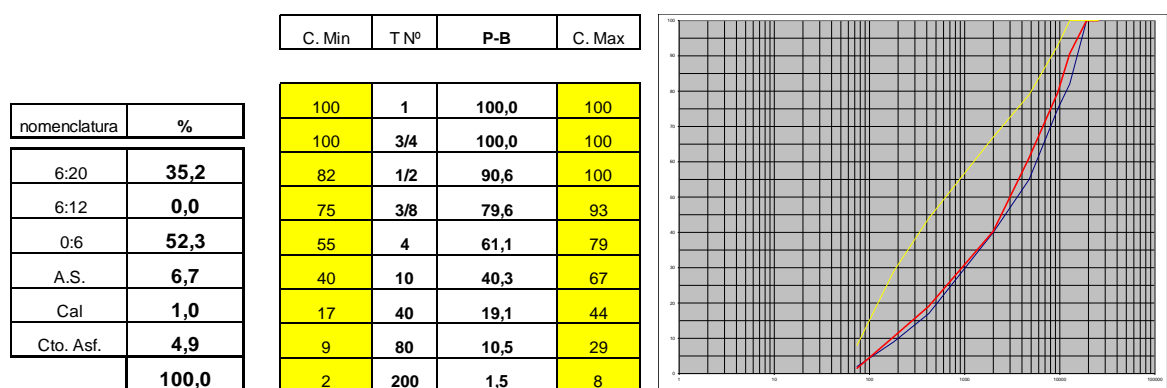


Figura 4. Dosificación con cal.

#### 4.3 Moldeo

Para el moldeo se utilizó un hornillo semicilíndrico horizontal, calefaccionado por baño de aceite que permite llevar a la mezcla a una temperatura de moldeo en el entorno de los 140°C (Figura 5). En el mismo se mezclaron los materiales hasta llegar a una total cobertura por parte del asfalto sobre los diversos agregados. Luego se prosiguió a la confección de las probetas, colocando la mezcla en sus

moldes, y compactándola por impacto. Aplicándole 50 golpes por cara, con un pisón de 4,54 kg de peso y altura de caída de 457 mm.

#### 4.4 Ensayos

Como fuera mencionado, el instrumental utilizado en el ensayo consta de una celda de carga “tipo S”, un LVDT de  $\pm 5,00$  mm de carrera, que miden la carga empleada y la deformación respectivamente, y una prensa electro mecánica Marshall. Tanto el LVDT como la celda de carga se conectaron a un receptor el cual, mediante un sistema Bluetooth, envía las lecturas de Estabilidad y Fluencia a una computadora, a medida que avanza el ensayo. Los datos son registrados mediante un software y procesados para obtener el gráfico de la curva. Cada variable, sea carga o deformación, se miden en función del tiempo, por lo tanto se requiere de esta tercer variable tiempo como elemento de correlación entre cargas y deformaciones. Dicho proceso de correlación e integración es efectuado automáticamente por el software de ensayo. Las tomas de datos se configuraron a un intervalo adecuado para lograr precisión en la curva, ante una velocidad de avance del equipo de 50 mm/min.



Figura 5. Hornillo horizontal.



Figura 6. LVDT  $\pm 5,00$  mm y soporte

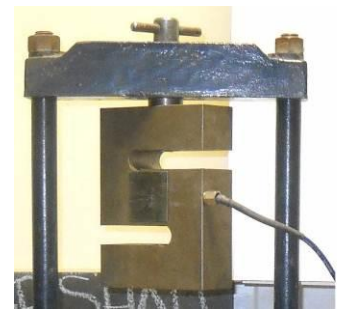


Figura 7. Celda de carga tipo “S”.

#### 4.5 Resultados

Las curvas típicas de ensayo obtenidas se presentan en la Figura 8, dónde se muestra el ensayo de una probeta sin cal (curva de color rojo) y una probeta con cal (curva de color azul).

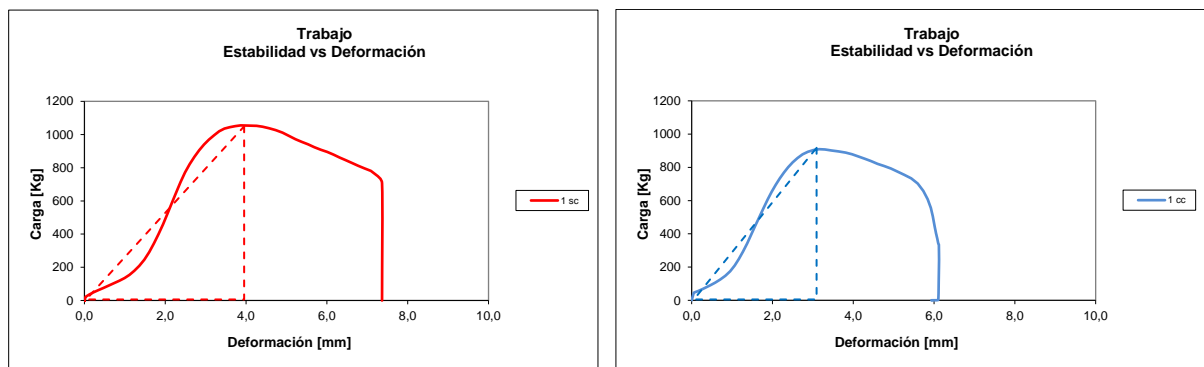


Figura 8. Comparación de curvas obtenidas.

Los resultados se vuelcan en la siguiente tabla resumen:

| Probeta     | Filler  | Deformación corresp. a Carga Máxima | Valor de Carga Máxima | Relación Carga Máxima-Deformación | Area debajo de la curva | Trabajo absorbido en carga | Trabajo absorbido en descarga | Proporciones de áreas |
|-------------|---------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1 sc        | SIN CAL | 3,87                                | 1055                  | 273                               | 5232                    | 1991                       | 3241                          | 0,38                  |
| 2 sc        |         | 4,66                                | 921                   | 197                               | 3789                    | 1801                       | 1988                          | 0,48                  |
| 3 sc        |         | 3,37                                | 884                   | 262                               | 2977                    | 1260                       | 1717                          | 0,42                  |
| 4 sc        |         | 0,49                                | 834                   | 1720                              | 137                     | 56                         | 81                            | 0,41                  |
| Promedio sc |         | 3,97                                | 953                   | 244                               | 3999                    | 1684                       | 2315                          | 0,42                  |
| 1 cc        | CON CAL | 3,16                                | 909                   | 288                               | 3802                    | 1469                       | 2333                          | 0,39                  |
| 2 cc        |         | 3,49                                | 924                   | 265                               | 3733                    | 1467                       | 2266                          | 0,39                  |
| 3 cc        |         | 3,16                                | 871                   | 263                               | 3579                    | 1395                       | 2184                          | 0,39                  |
| 4 cc        |         | 3,49                                | 962                   | 290                               | 3956                    | 1541                       | 2414                          | 0,39                  |
| Promedio cc |         | 3,32                                | 917                   | 276                               | 3767                    | 1468                       | 2299                          | 0,39                  |

Figura 9. Tabla resumen de resultados.

## 5. Análisis de Resultados y Conclusiones

De los valores obtenidos de la lectura de los instrumentos, se han confeccionado las curvas antes mencionadas, para este trabajo se han tomado una curva representativa de cada tipo de mezcla para el informe (Figura 8). En base a los valores de lectura y sus respectivas curvas se ha confeccionado las tablas relacionadas a los mismos (Figura 9). Como primera observación se puede indicar en dicha tabla que las probetas moldeadas con mezcla asfáltica sin cal logran alcanzar en promedio una carga máxima de 953 Kg, frente a 9167 Kg de las moldeadas con cal, esto podría deberse a un cambio sustancial en el esqueleto granular en la fracción 0:6. Otra observación a realizar es la referida al área debajo de la curva (la cual indica el trabajo absorbido durante el ensayo por la probeta ensayada) el promedio de la misma en las probetas sin cal fue de 3999 kg.mm, siendo este valor mayor que en las probetas con cal cuyo promedio fue de 3767 kg.mm. Como último ítem a tener en cuenta se encuentra la deformación producida por la carga, donde las probetas sin cal efectuaron una deformación en promedio de 3,97 mm contra los 3,32 mm de deformación de las probetas con cal.

De las observaciones antes mencionadas y de la observación de las curvas se puede sacar la siguiente conclusión:

Teniendo en cuenta la deformación y el trabajo absorbido, las probetas sin cal tienen mayor ductilidad que las mismas con cal. Siendo estas últimas más rígidas al no poder prolongar su capacidad de carga deformándose más en el proceso post carga pico. Como elemento complementario para reafirmar dicha conclusión se debe observar que la relación entre la Carga Máxima-Deformación es de 276 para las probetas con cal, en comparación con 244 en las sin cal, esto representa la pendiente ascendente o módulo secante y por ende la rigidez del material. Lo que se verifica viendo la Figura 8 (triángulo de trazos), observando que la pendiente hasta llegar a la carga máxima es mayor en el caso de la probeta con cal, característico de los materiales rígidos.

## 6. Bibliografía

Dirección Nacional de Vialidad (2008) "Norma de Ensayo VN-E9-86 Ensayo de Estabilidad y Fluencia por el Método Marshall". ETVN N°1. Argentina.

Andreoni R., Angelone S., et AL (2010) "Análisis de distintos factores que afectan los resultados del ensayo Marshall". XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Argentina.

# **“DETERMINACION DE LA CAPACIDAD Y VELOCIDAD DE SUCCION EN DIFERENTES TIPOS DE HORMIGON.”**

**Becario: Marcos Johel Naber.**<sup>(1)</sup>

Director: Jorge D. Sota.<sup>(2)</sup>

---

## **1. Resumen**

El método de ensayo de la norma IRAM 1871 establece los procedimientos para la determinación de la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido. Ambos parámetros están asociados con la durabilidad de las estructuras de hormigón. El ensayo se realizará en hormigones con un reemplazo parcial del agregado fino por agregados reciclados y residuos de arenas de fundición.

## **2. Abstract**

The test method of IRAM 1871 standard establishes procedures for determining the capacity and speed of capillary suction of water from hardened concrete. Both parameters are associated with the durability of the concrete structures. The test is performed on concrete with partial replacement of fine aggregate by recycled aggregates and foundry sands.

## **3. Fundamentos**

La capacidad y la velocidad de succión del hormigón y particularmente del hormigón de recubrimiento es un parámetro asociado con la durabilidad de las estructuras de hormigón. El método es sensible a los cambios de las características de las mezclas y, particularmente, a las condiciones de curado. Por lo tanto, resulta una herramienta eficaz para especificaciones basadas sobre el desempeño, dependiendo el resultado del contenido de humedad inicial del hormigón.

La succión capilar se produce como consecuencia de la acción de fuerzas de adhesión de las moléculas de agua a las paredes de los poros en el hormigón y otros materiales porosos. La relación agua-cemento (a/c) afecta no solamente la resistencia a la compresión del hormigón, sino también su permeabilidad.

Pequeños cambios en esa relación (a/c) pueden significar apreciables diferencias en la permeabilidad, ya que dependiendo de esta es la cantidad de gel que formara por la hidratación del cemento, a medida que los granos de cemento se van hidratando, generan cristales que bloquean los poros y disminuyen el diámetro de los tubos capilares, esto hace al hormigón menos permeable, quiere decir que cuanto mejor son las condiciones de curado menos poros capilares tendremos en el hormigón.

Esta red de poros formados en el hormigón permite el ingreso de sustancias agresivas, dependiendo del tipo de ambiente en a que se encuentra expuesta la estructura; los ambientes se encuentran considerados por el proyecto de reglamento CIRSOC 201-2005, en función de la durabilidad.

(1) Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC Depto. de Ing. Civil

(2) Director de Beca.

## Método de ensayo de succión capilar según IRAM 1871

El método de ensayo según la norma IRAM 1871 permite calcular la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido.

Se utilizan probetas de 50 +/- 2 mm de espesor, obtenidas por aserrado, realizado a 30 mm del extremo correspondiente a la base, de probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura.

Luego se procede a sellar con pintura impermeabilizante toda la superficie lateral de las probetas para evitar la absorción en ese sector no contemplado en los cálculos.

Previo al ensayo, las probetas se sumergen en agua durante 72 h.

Las probetas se someten a secado en estufa a una temperatura de 50 +/- 2 °C, hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas efectuadas cada 24 +/- 1 h sea menor que 0.1% de la última medición.

Una vez secadas las probetas, se registra la masa seca y se recubren con doble pliego de una película de polietileno durante 24 h, en ambiente de laboratorio.

Luego, las probetas se introducen en un recipiente, con una altura de agua respecto de la base de absorción de 3 +/- 1 mm. Este instante se registra como el tiempo inicial del ensayo.

En los tiempos de t=30 min, t=1 h, t=2 h, t=3 h, t=4 h, t=5 h, t=6 h, t=24 h, t=48 h, y a continuación cada 24 h ± 1 h hasta que la variación de masa de la probeta sea menor que 0,1 % entre dos determinaciones sucesivas, se retira cuidadosamente cada probeta y se determina la masa húmeda.

Para cada probeta (i) en el instante de lectura (t) se determina el incremento de masa por unidad de área (Cit), mediante la fórmula siguiente:

$$C_{it} = \frac{M_{hit} - M_{si}}{A_i}$$

Siendo:

Cit el incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta o del testigo (i) en el instante de lectura (t), en gramos por metro cuadrado;

Mhit la masa húmeda de la probeta (i) en el instante de lectura (t), en gramos;

Msi la masa seca de la probeta (i), en gramos;

Ai el área de la sección transversal de la probeta (i), en metros cuadrados.

La capacidad de succión capilar de cada probeta (Ci), en gramos por metro cuadrado, es el valor del incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta o del testigo (i), en el instante de lectura (t), (Cit), que corresponde al tiempo (t) cuando la variación de masa es menor que 0,1 % entre dos determinaciones sucesivas de la masa húmeda (Mhi).

La capacidad de succión capilar del hormigón (C), en gramos por metro cuadrado, se calcula como el promedio de la capacidad de succión capilar de cada probeta de la serie de ensayo (Ci).

En un único gráfico se vuelca el incremento de masa por unidad de área de la serie de ensayo (Cit), en gramos por metro cuadrado, en función de la raíz cuadrada del tiempo de lectura (t), en segundos a la un medio.

La velocidad de succión capilar del hormigón (S) correspondiente a la serie de ensayo, en gramos por metro cuadrado por segundo a la un medio, ( $\text{gr.m}^2/\text{t}^{1/2}$ ), es la pendiente de la recta obtenida mediante ajuste por cuadrados mínimos de la serie de puntos.

Los ensayos de succión capilar finalizan cuando la diferencia de masa es menor al 0.1% o aparece humedad superficial en la cara superior.

#### 4. Desarrollo experimental

El ensayo fue realizado según la norma IRAM 1871, a diferentes hormigones, tomando como parámetro un hormigón convencional de relación a/c = 0.44, tres hormigones en los cuales se reemplazó la arena silícea por arena de fundición, (H-1, H-2, H-3) y uno al que se reemplazó un 30 % de la arena de trituración por agregado fino reciclado (H-R), dosificación (Tabla 1).

| Dosificaciones: Relación A/C= 0,44 |     |     |     |     |     |
|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Materiales (kg/m <sup>3</sup> )    | H-0 | H-1 | H-2 | H-3 | H-R |
| Agua                               | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| Cemento CPC 40                     | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 |
| Piedra 10:30-Granítica             | 425 | 425 | 425 | 425 | 425 |
| Piedra 6:20-Granítica              | 638 | 638 | 638 | 638 | 638 |
| Arena de trituración-Granítica     | 611 | 611 | 611 | 611 | 428 |
| Hormigón reciclado fino            | 0   | 0   | 0   | 0   | 128 |
| Arena silícea "argentina"          | 204 | 0   | 0   | 0   | 204 |
| RAF                                | 0   | 204 | 204 | 204 | 0   |
| Aditivo Plastificante              | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |

Tabla 1.

De cada tipo de hormigón se confeccionaron 3 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura, se sometió al periodo de curado durante 28 días; y se comenzó con el ensayo de succión capilar de acuerdo a la norma IRAM 1871-2004.

Obteniendo los siguientes resultados indicados en la tabla 2, mostrando la distribución de la capacidad de succión (promedio de cada serie de probetas) con respecto al tiempo de ensayo, ubicados en el gráfico 1, y sus respectivas ecuaciones de velocidad de succión.

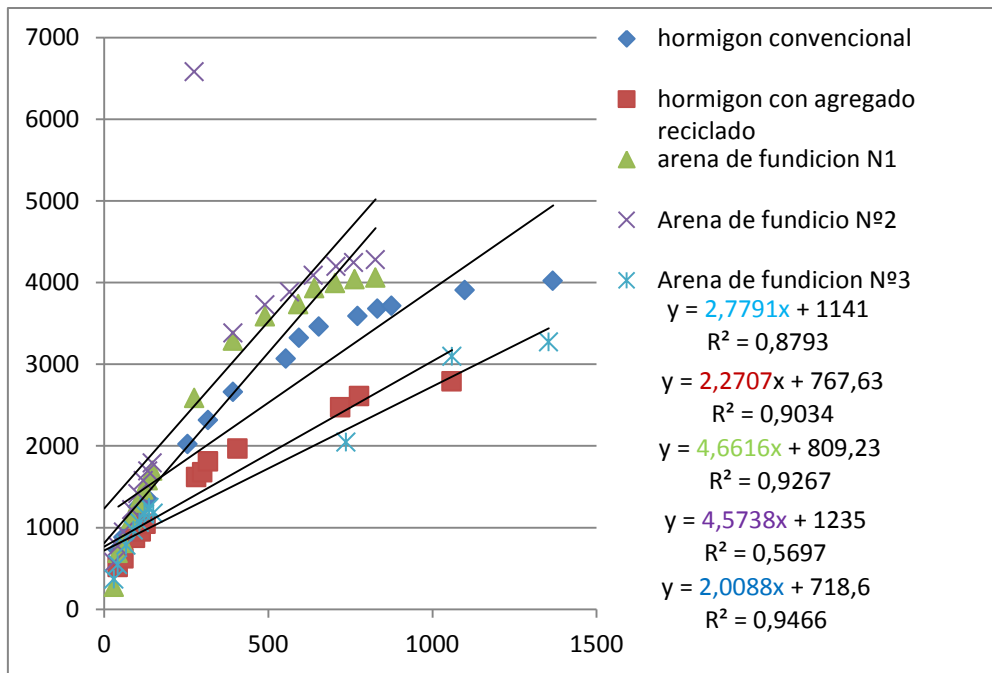


Grafico 1

| Hormigón | V(g.m <sup>2</sup> /s <sup>1/2</sup> ) |
|----------|--|
| H-0      | 2,7791                                 |
| H-R      | 2,2707                                 |
| H-1      | 4,6616                                 |
| H-2      | 4,5738                                 |
| H-3      | 2,0088                                 |

Tabla 2.Velocidad de succión capilar.

## 5. Análisis de Resultados

En los ensayo realizado no apareció humedad superficial en la cara superior de las probetas, terminando el ensayo cuando la diferencia de masa fue menor al 0.1% en dos pesadas sucesivas de 24hs. de diferencia.

En cuanto al H-0, H-R y H- 3, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los límites máximos del Reglamento CIRSOC 201, 4 g/ (m<sup>2</sup>.s<sup>1/2</sup>), mientras que H-1 y H-2, superan este límite. Este resultado puede estar afectado por las características de las arenas de fundición, en función de su origen.

## 6. Conclusiones

Como los resultados de H-1 y H-2, están por encima del valor establecido, en un pequeño porcentaje, lo ideal sería repetir el ensayo, ya que los resultados son muy sensibles al contenido de humedad de la probeta en el momento de iniciarlo y al cuidado con que se realicen las mediciones de succión.

En caso de obtener resultados parecidos lo recomendable sería ajustar la dosificación en el hormigón de referencia, como por ejemplo reducir la relación a/c aumentando el contenido de cemento.

La bibliografía indica que en los casos de usar residuos como parte de las mezclas se debería tener en cuenta el número de ensayos para el análisis estadístico por emplear materiales no contemplados en los reglamentos.



## **7. Bibliografía**

- IRAM 1871, IRAM, Buenos Aires, (2004). Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido.
- CIRSOC 201-2005, INTI, Buenos Aires, (2005) Proyecto de reglamento argentino de estructuras de hormigón,
- – editores Prof. Sota Jorge D., Ing. Ortega Néstor F., Ing. Moro Juan M. – Reprográficas JMA. S.A. CABA, Buenos Aires 2012. AATH Memorias del V Congreso internacional
- Villagrán Zaccardi Y.A., Taus V.L, Di Maio A.A, Pittori A. (2012) “Relación entre la velocidad de succión capilar y la velocidad de secado de probetas de hormigón”.

# “OPTIMIZACIÓN DE LA SECCIÓN DE PROYECTO DE CONDUCTOS RECTANGULARES CON ESCURRIMIENTO A SUPERFICIE LIBRE”

Becario: Christian Gastón Occhiuto <sup>(1)</sup>  
Director: Ing. Osvaldo Guillermo Mena <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:  
“OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DEL ESCURRIMIENTO EN UNA CUENCA URBANA MEDIANTE TÉCNICAS DE MODELACIÓN” Código UTN: ECOFALP0002164

---

## 1. Resumen

En el proyecto de conductos enterrados rectangulares que conducen líquidos a superficie libre, se verifica que para un conjunto de valores fijos del caudal, la pendiente longitudinal y la rugosidad, para conducir el caudal de diseño existen infinitas combinaciones posibles del tirante de diseño y el ancho del conducto.

Una forma de limitar esta variabilidad en las dimensiones a adoptar consiste en incorporar como elementos de decisión aspectos no sólo de índole hidráulica sino también económica, lo que dificulta la formulación del problema.

Para reducir esta dificultad y evitar la utilización del laborioso método de prueba-error, se aplican en el presente trabajo técnicas numéricas de optimización que permiten hallar la sección óptima de menor costo de construcción asociado.

## 2. Abstract

In rectangular buried pipes design under gravity flow, it is verified that for a set of fixed values of flow, longitudinal slope and roughness, there are infinite combinations of the design depth of flow and pipe width, to carry the given flow rate.

To narrow this variability in the dimensions that will finally be adopted, there must be adopted as decisive elements, aspects not only of hydraulic nature, but also economic, action that complicates the formulation.

To reduce this complexity, and to avoid the usage of the time-consuming trial-error method in this paper numeric techniques for optimization are used instead, which allow to locate the optimal section with the lowest associated cost of construction.

## 3. Fundamentos

La progresiva urbanización de cuencas, lleva a concebir las vías preferenciales de escurrimiento de los excedentes pluviométricos como conductos enterrados, ya sea por dificultades en la disposición de espacios necesarios para el escurrimiento en superficie, o por los inconvenientes que tal escurrimiento ocasiona en el tránsito y en la seguridad. En general, estos conductos enterrados no se diseñan para trabajar a presión sino que dentro de ellos se propone que el líquido escurra a superficie libre.

Resulta usual que se adopten conductos circulares de hormigón para la conducción de pequeños caudales. Para mayores caudales, la dificultad de construir in situ conductos circulares de grandes diámetros lleva a optar por secciones rectangulares, que son los motivos de estudio del presente trabajo.

En general, los conductos que conducen líquidos a superficie libre se diseñan bajo la hipótesis de régimen uniforme y una de las ecuaciones más utilizadas para tener en cuenta la resistencia al escurrimiento es la de Chezy-Manning:

$$U = \frac{1}{n} R_h^{2/3} i^{1/2} \quad (1.1)$$

(1) Becario de investigación del Grupo de Investigación Hidráulica

(2) Director de Beca

Combinando esta ecuación con la expresión del caudal para régimen permanente:

$$Q = U.A \quad (1.2)$$

y considerando que el radio hidráulico  $R_h$  puede obtenerse como:

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (1.3)$$

se obtiene

$$Q = U.A = \frac{A}{n} . R_h^{\frac{2}{3}} . i^{\frac{1}{2}} \quad \rightarrow \quad \frac{Q.n.}{i^{\frac{1}{2}}} - \frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}} = 0 \quad (1.4)$$

En estas ecuaciones A es el área de escurrimiento, P es el perímetro mojado, U es la velocidad media, Q es el caudal,  $R_h$  es el radio hidráulico, i es la pendiente longitudinal y n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Observando la Ec.(1.4), se deduce que, para un valor fijo de A, el conducto conducirá mayores caudales para la forma de aquella sección que tenga el menor perímetro mojado [Ref.1]. A la sección así obtenida se la denomina *sección hidráulicamente más eficiente*. La sección rectangular hidráulicamente más eficiente es aquella en la que el ancho del fondo del conducto duplica a su altura (B/h=2). Cabe preguntarse si esta sección será también la que tiene el menor costo. La construcción de un conducto rectangular enterrado involucra los costos del material del conducto, la excavación, el relleno con suelo sobre el techo del conducto hasta alcanzar la cota de proyecto del terreno, y el transporte del suelo sobrante.

En el proyecto de conductos rectangulares, para un conjunto de valores fijos del caudal, la pendiente longitudinal y la rugosidad, existen infinitas combinaciones posibles del tirante de diseño y el ancho del conducto, que verifican la Ec. (1.4).

Con el objeto de acotar esta variabilidad en las dimensiones a adoptar, deben incorporarse como elementos de decisión aspectos no sólo de índole hidráulica sino también económica, lo que dificulta la formulación del problema.

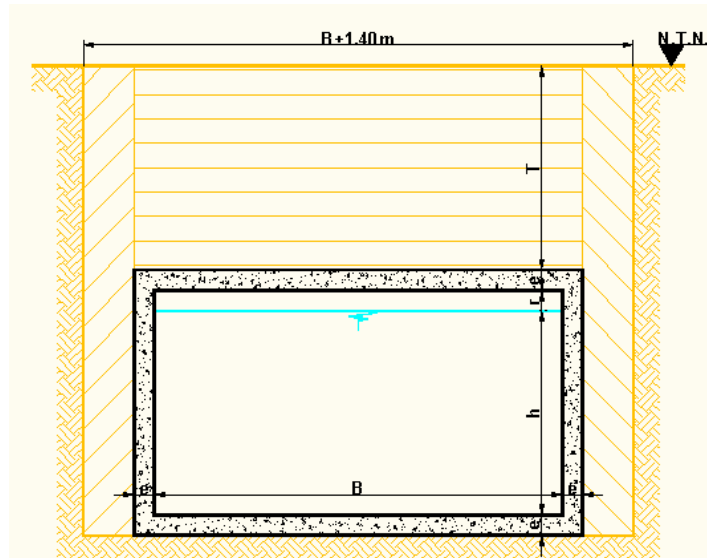
Para reducir la complejidad del abordaje y evitar la utilización del laborioso método de prueba-error se pueden utilizar técnicas numéricas de optimización (aplicables en otras especialidades) que permiten hallar la sección óptima que, respetando la ecuación de resistencia al escurrimiento tiene, a su vez, el menor costo [Ref.3].

La utilización de estas técnicas al diseño de canales fue propuesta entre otros por Trout [Ref.6], French [Ref.3], Farías [Ref.4], Froehlich [Ref.8], Swamee, Mishra [Ref.5], Blackler y Guo [Ref.7] y Ayman [Ref.9]. Este último autor, en el año 2010 utiliza el programa MATLAB para resolver el problema de optimización en canales triangulares con fondo redondeado, línea de investigación que se aplica en el presente trabajo para secciones rectangulares.

En el proyecto "OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DEL ESCURRIMIENTO EN UNA CUENCA URBANA MEDIANTE TÉCNICAS DE MODELACIÓN" se propone utilizar estas técnicas en los diferentes aspectos del diseño de un sistema de desagües pluviales urbanos. Uno de los elementos más representativos del sistema es el conjunto de conductos rectangulares enterrados que lo componen. El presente trabajo constituye así un avance en esa dirección.

Las variables de diseño a optimizar para un conducto rectangular son el ancho del conducto y el tirante hidráulico. Para la resolución se utilizan funciones del MATLAB específicas para problemas de optimización numérica sin restricciones.

En la Figura 1 se muestra la sección transversal del conducto. En ella B es el ancho del conducto, h el tirante, r es la revancha para asegurar que el escurrimiento sea a superficie libre, T es la tapada del conducto y e es el espesor del conducto



**Figura 1- Sección Transversal del Conducto**

En las fórmulas estándar para el cálculo del área A y perímetro mojado P se adopta una revancha r como una proporción del tirante h, resultando así:

$$A = B \cdot h \quad P = B + 2h \quad r = 0,1h \quad (1.5)$$

El modelo propuesto de optimización no lineal propuesto minimiza el costo total C de construcción por unidad de longitud del conducto, considerado con la revancha r.

Las restricciones son: a) la Ec.(1.4) como una restricción de igualdad, b) la velocidad media del flujo U menor que la máxima admisible por el material del revestimiento, y c) el ancho de fondo B mayor que el tirante h.

Así planteado, el modelo resulta del tipo de optimización no lineal con restricciones, y puede escribirse de la siguiente forma:

*Minimizar.*

$$C(B, h) = c_1 [2e B + e + 1,1h] + c_2 [B + 1,40 \cdot 1,1h + 2e + T] + c_3 [T B + 2e] + c_4 [130 B + 2e \cdot 2e + 1,1h] \quad (1.6)$$

*Sujeto a:*

$$\frac{Q \cdot n}{i^{1/2}} - \frac{B \cdot h^{5/3}}{B + 2h} = 0 \quad (1.7)$$

$$U - U_{\max} \leq 0 \quad ; B > 0 \quad ; h > 0 \quad ; B > h \quad (1.8)$$

La Ec.(1.6) es la función objetivo que involucra los costos de construcción por unidad de longitud del conducto. En ella  $c_1$  es costo del hormigón,  $c_2$  es costo de excavación,  $c_3$  es costo del relleno y  $c_4$  es el costo del traslado de la tierra sobrante.

El propósito del presente trabajo es minimizar la función objetivo para distintos valores de Q, respetando las restricciones dadas por la Ec.(1.7) y las Ec.(1.8).

#### 4. Desarrollo experimental

El problema de optimización con restricciones para encontrar el costo mínimo de un conducto rectangular enterrado por el que escurre agua en régimen uniforme a superficie libre se resuelve utilizando la función *fminsearch* del utilitario MATLAB.

Para ello se adoptan los siguientes costos unitarios  $c_1=7280.45 \text{ \$/m}^3$ ,  $c_2=137.52 \text{ \$/m}^3$ ,  $c_3= 103.54 \text{ \$/m}^3$ , y  $c_4= 422.00 \text{ \$/m}^3$  (valores a marzo de 2014).

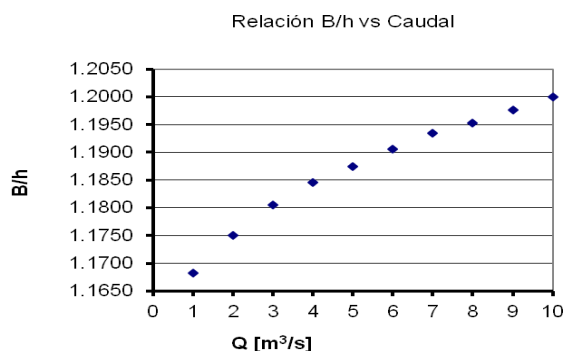
Para completar la geometría del corte transversal indicado en la Figura 1, se toma un valor de la tapada  $T=2,00 \text{ m}$  y un espesor del conducto de  $e=0,20 \text{ m}$ .

Los ensayos se realizaron para distintos caudales, con un valor del coeficiente de rugosidad  $n=0.015$ , una pendiente longitudinal  $i=0,001$ , para  $U_{\text{máx}} \leq 3 \text{ m/s}$ , obteniéndose los resultados de  $B$  y  $h$  indicados en la **Tabla 1**. En ella se comparan los costos de la sección transversal obtenida, con los costos de la aplicación del criterio de mínima resistencia hidráulica. Se indican también los porcentajes de reducción observados.

| Q<br>[m <sup>3</sup> /s] | Sección Hidráulica para Criterio de Costo Mínimo |          |                 |           |            | Sección Hidráulica para Criterio de Mínima Resistencia (B/h = 2) |          |                 | Reducción Costos |
|--------------------------|--|----------|-----------------|-----------|------------|--|----------|-----------------|------------------|
|                          | B<br>[m]   | h<br>[m] | Costo<br>[\$/m] | B/h<br>[] | U<br>[m/s] | B<br>[m]   | h<br>[m] | Costo<br>[\$/m] |                  |
| 1                        | 1,069  | 0.915    | 9,223.44        | 1.1683    | 1.02       | 1.387  | 0.693    | \$9,563.03      | 3.55%            |
| 2                        | 1,390  | 1,183    | 11,884.88       | 1.1750    | 1.22       | 1.798  | 0.899    | \$12,320.29     | 3.53%            |
| 3                        | 1,622  | 1,374    | 13,874.39       | 1.1805    | 1.35       | 2.093  | 1.047    | \$14,377.22     | 3.50%            |
| 4                        | 1,810  | 1,528    | 15,529.93       | 1.1846    | 1.45       | 2.332  | 1.166    | \$16,086.42     | 3.46%            |
| 5                        | 1,970  | 1,659    | 16,977.37       | 1.1875    | 1.53       | 2.535  | 1.268    | \$17,579.11     | 3.42%            |
| 6                        | 2,112  | 1,774    | 18,279.64       | 1.1905    | 1.60       | 2.715  | 1.357    | \$18,920.86     | 3.39%            |
| 7                        | 2,240  | 1,877    | 19,473.44       | 1.1934    | 1.66       | 2.876  | 1.438    | \$20,149.89     | 3.36%            |
| 8                        | 2,357  | 1,972    | 20,582.33       | 1.1952    | 1.72       | 3.024  | 1.512    | \$21,290.73     | 3.33%            |
| 9                        | 2,466  | 2,059    | 21,622.48       | 1.1977    | 1.77       | 3.161  | 1.580    | \$22,360.20     | 3.30%            |
| 10                       | 2,568  | 2,140    | 22,605.55       | 1.2000    | 1.82       | 3.288  | 1.644    | \$23,370.41     | 3.27%            |

**Tabla 1**

En la Figura 2 se muestran los valores de la relación  $B/h$  obtenidos:



**Figura 2 – Relación  $B/h=f(Q)$**

### 5. Análisis de Resultados

Según se muestra en la **Tabla 1**, para los caudales analizados, se observa que la relación  $B/h=1,18 \pm 1,7\%$ . Estos valores resultan sustancialmente menores que el correspondiente a la sección hidráulicamente más eficiente, para la que  $B/h=2$  ([Ref.1] y [Ref.3]). Resulta así que  $(B/h)_{\text{mín costo}} \cong 0.59 (B/h)_{\text{mín resist}}$ .

Al comparar los costos de la sección transversal obtenida para los conductos diseñados con el criterio de minimización del costo con aquella que resulta de aplicar el criterio de mínima resistencia hidráulica, se observan porcentajes de reducción de costos variables entre el 3,27% y el 3,55%, tal como se indica en la **Tabla 1**. Los antecedentes para el diseño de canales indicados en la [Ref.1] no contemplan la intervención de los costos para hallar la denominada sección hidráulica óptima,

aunque sí se señala que la sección hidráulica óptima no necesariamente es la que da necesariamente la mínima excavación. Esta consideración sí es señalada explícitamente en la [Ref.2], [Ref.3],[Ref.4] [Ref.5], [Ref.6], [Ref.7], [Ref.8] y [Ref.9].

El caso particular de un conducto rectangular enterrado analizado en el presente trabajo, muestra que para la elección de los parámetros geométricos de la sección transversal del conducto deben hacerse intervenir los factores económicos asociados a la construcción de la obra. Esta intervención puede justificarse a priori evaluando que la aplicación del criterio de la sección hidráulicamente más eficiente lleva a considerar como tal aquella que tiene el menor perímetro mojado, pero los costos de esta sección no contemplan la influencia del costo del techo del conducto, ni de los movimientos de suelos necesarios para la construcción. La intervención de estos últimos factores lleva a la adopción de secciones diferentes a la sección hidráulicamente más eficiente, como se muestra en la **Tabla 1**.

Quedan abiertos a investigaciones futuras el estudio del comportamiento para distintas pendientes y los análisis de sensibilidad a realizar examinando la derivada de la función objetivo con respecto a  $B$  y con respecto a  $h$ , circunstancia que permitiría evaluar, en el caso de no poder adoptar la sección óptima, cuál variable resultaría más conveniente cambiar desde el punto de vista económico.

## 6. Conclusiones

Para la elección de  $B$  y  $h$  correspondientes a un conducto rectangular enterrado no resulta suficiente con buscar la sección hidráulicamente más eficiente, sino que deben hacerse intervenir factores económicos asociados su construcción.

La aplicación del criterio de la sección hidráulicamente más eficiente lleva a considerar como tal aquella que tiene el menor perímetro mojado.

La utilización del criterio de búsqueda del costo mínimo respetando la ecuación de resistencia al escurrimiento, lleva a la adopción de secciones diferentes a la sección hidráulicamente más eficiente.

La relación  $B/h$  resultante de la aplicación del criterio del costo mínimo resulta ser del 59% del valor correspondiente a la sección hidráulicamente más eficiente.

## 7. Bibliografía

- [1]. Chow, V.T. (2000) "Hidráulica de canales abiertos". Editorial Mc-Graw-Hill, pgs. 158-159. ISBN:958-600-228-4. Estados Unidos
- [2]. Mays, L. (2004) "Urban stormwater management tools". Editorial Mc-Graw-Hill, cap 2, pg.20. ISBN:0-07-142837-2. Estados Unidos
- [3]. French, R. (1988) "Hidráulica de canales abiertos" Editorial Mc-Graw-Hill, pgs. 287-293. ISBN:968-451-445-X. Estados Unidos
- [4]. Farias,H.(1990) "Criterio Económico para el Proyecto de Canales Revestidos", Inédito, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina
- [5]. Swamee, P.; Mishra, G; (2000) "Comprehensive design of minimum cost irrigation canal sections". ISSN:0733-9437/00/0010-0322-0327. India
- [6]. Trout, T. (1982) "Channel design to minimize lining material costs". ISSN:0044-7978/82/0004-0242-0249. Estados Unidos
- [7]. Blackler, G.; Guo, J. (2009) "Least-cost and most efficient channel cross sections". ISSN:0733-9437/09/0004-0248-0250. Estados Unidos
- [8]. Froehlich, D. (1994) "Width and depth-constrained best trapezoidal section". ISSN:0733-9437/94/0004-0828-0835. Estados Unidos
- [9]. Ayman, H. (2010) "Optimal design of roud bottomed triangle channels". ISSN:1813-162X/10/0003-0031-0043. Irak

# “VALORACIÓN DE LA ACCIÓN DE GEOSINTÉTICOS ENTRE CAPAS DE HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS”

**Becario: Javier Rossi<sup>1</sup>**  
Director: Ing. Enrique A. Fensel<sup>2</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Sistema dinámico de valoración para el control de fisuración refleja usando Geosintéticos como S.A.M.I. en la rehabilitación de pavimentos”; Código Universidad: UT11617; Resolución del Consejo Directivo FRLP N° 164/11; Disposición SCTyP de Rectorado N° 288/11; Incentivos 25/I054.

---

## 1. RESUMEN

Esta tesis intenta establecer una base de comparación para futuras investigaciones sobre el control de fisuras en capas de rodamiento de repavimentación sobre capas fisuradas sometidas a procesos de recapado. Para ello se moldearon y evaluaron vigas prismáticas de hormigón para representar este fenómeno.

Si bien es necesario continuar las investigaciones, puede apreciarse una mayor ductilidad post-cracking, así como un retardo en la transmisión de las fisuras.

## 2. ABSTRACT

*This paper tries to establish a basis of comparison for future research on the control of cracks in layers of resurfacing on cracked bearing layers under retreading processes.*

*This molded and evaluated prismatic concrete beams to represent the phenomenon. While further research is needed, can be seen more ductility post-cracking as well as a delay in the transmission of cracks.*

## 3. FUNDAMENTACIÓN

Este trabajo surge en el marco de la tesis doctoral del Ing. Luis Delbono referida al control de fisuración refleja usando geosintéticos.

Aquí se propone valorar la acción de distintos geosintéticos que se usan como elementos para el control de fisuras en capas de rodamiento de repavimentación sobre capas fisuradas sometidas a procesos de recapado, a fin de establecer una base de comparación para futuras investigaciones.

El modelo propuesto se realiza para capas hormigón-hormigón con interposición de geogrillas y geocompuestos adheridos con emulsión asfáltica.

Se propone realizar modelos de vigas prismáticas de hormigón moldeadas en dos capas de distintos espesores y resistencias características, interponiendo distintos geosintéticos y ensayándolas a flexión con cargas aplicadas en los tercios medios. Se compararan con otras vigas de las mismas características pero sin incorporar geosintético, y con vigas monolíticas, manteniendo las demás condiciones de ensayo.

Se valorará además la adherencia entre las capas de los distintos modelos planteados a fin de establecer como parámetro nexa la relación entre ésta y el desarrollo del modelo de fisuración.

---

<sup>1</sup> Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC. Depto. de Ing. Civil.

<sup>2</sup> Director de Beca.

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1. Geosintéticos utilizados

En la confección de las probetas se utilizaron geogrillas de poliéster y de polivinil alcohol. Las geogrillas son estructuras planas a base de polímeros, constituidas por una malla abierta y regular de elementos resistentes a la tracción. Pueden ser fabricados por láminas perforadas o tejidos ligados por procesos térmicos de encolado, en la cual las aberturas tienen dimensiones superiores a las de los constituyentes, usado en contacto con el suelo o con otros materiales.

Para la fabricación de las probetas también se utilizó un geocompuesto que está conformado por una combinación de un geotextil tejido de polipropileno con un mastic asfáltico fuertemente modificado con polímeros. Se usó una segunda muestra que es una variante del anterior y lleva adherida una película de arena, la cual se coloca para favorecer la fricción y con ello la adherencia.

Los geocompuestos son un ensamblado manufacturado de materiales de los cuales al menos unos de los componentes es un geosintético, usado en contacto con el suelo o con otros materiales.

### 4.2. Confección de probetas

Se confeccionaron vigas (Figuras 1 a 4), compuestas por una primera capa de Hormigón pobre (Tabla 1) que simula la base deteriorada de un pavimento, sobre la cual se aplicó un riego de emulsión asfáltica modificada con polímero SBS a razón de  $0,9 \text{ l/m}^2$ ; se colocaron materiales geosintéticos (Poliéster, Polivinil Alcohol, Polipropileno y Polipropileno con arena) luego de que la emulsión corte y sobre ésta se moldeó un hormigón del tipo H30 (Tabla 1) que simula la capa de rehabilitación. Las dimensiones de la viga son de 530 mm de largo, 150 mm de alto y 150 mm de ancho.

Se variaron los espesores de las capas buscando analizar la mejor disposición del material geosintético dentro de la estructura.



Figura 1. Acondicionamiento de los moldes.



Figura 2. Aplicación de la emulsión asfáltica sobre base de hormigón pobre.



Figura 3. Colocación de materiales Geosintéticos.



Figura 4. Vigas desmoldadas.



| Materiales      | Dosificación de Hormigón Pobre de Base |                               |                           | Dosificación de Hormigón de Capa de Rodamiento |                               |                           |
|-----------------|--|-------------------------------|---------------------------|--|-------------------------------|---------------------------|
|                 | Peso (Kg)                              | Densidad (Kg/m <sup>3</sup> ) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Peso (Kg)                                      | Densidad (Kg/m <sup>3</sup> ) | Volumen (m <sup>3</sup> ) |
| Agua            | 170                                    | 1,00                          | 0,170                     | 160  | 1,00                          | 0,160                     |
| Cemento CPC 40  | 170                                    | 3,06                          | 0,056                     | 360  | 3,06                          | 0,118                     |
| Piedra 10-30    | 425                                    |                               |                           | 425  |                               |                           |
| Piedra 6-20     | 638                                    |                               |                           | 638  |                               |                           |
| Agregado Grueso | 1063                                   | 2,67                          | 0,398                     | 1063   | 2,67                          | 0,398                     |
| Arena Gruesa    | 715                                    |                               |                           | 611  |                               |                           |
| Arena Fina      | 283                                    |                               |                           | 204  |                               |                           |
| Agregado Fino   | 998                                    | 2,64                          | 0,378                     | 815  | 2,64                          | 0,309                     |
| Aire            | 0                                      |                               |                           | 0  |                               |                           |
| Plastificante   | 0                                      | 1,20                          | 0,000                     | 0,828  | 1,20                          | 0,001                     |
| A/C             | 1                                      |                               |                           | 0,44   |                               |                           |

Tabla 1. Dosificaciones de H<sup>0</sup> sin aire incorporado.

### 4.3. Ensayo a flexión

Las probetas se curaron en cámara húmeda durante 28 días. Luego fueron ensayadas a flexión en la máquina de compresión Pilots 4, según la norma IRAM 1547 y bajo las siguientes condiciones:

- Carga aplicada en los tercios medios
- Velocidad de carga: 0,017 MPa / s
- Sensibilidad de la máquina: 20 KN



Figuras 5 y 6. Disposición de las vigas en el equipo de ensayo.



Figura 7. Equipo de ensayo.

Figura 8. Detalle del apoyo de las vigas.

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante los ensayos están expresados en la Tabla 2. Las figuras 9 a 14 muestran las vigas después del ensayo.

| Material                | Probeta | Carga Máxima (MPa) | Espesor Base (cm) | Espesor refuerzo (cm) |
|-------------------------|---------|--------------------|-------------------|-----------------------|
| Polivinil Alcohol       | 1       | 2,80               | 5,00              | 9,50                  |
|                         | 2       | 2,60               | 5,50              | 9,50                  |
|                         | 3       | 2,60               | 5,00              | 10,00                 |
| Poliéster               | 1       | 1,48               | 7,50              | 6,50                  |
|                         | 2       | 3,43               | 5,00              | 10,00                 |
|                         | 3       | 2,41               | 6,00              | 9,00                  |
| Polipropileno           | 1       | 1,23               | 6,00              | 8,50                  |
|                         | 2       | 1,65               | 5,00              | 8,00                  |
|                         | 3       | 1,10               | 6,50              | 7,50                  |
| Polipropileno con arena | 1       | 1,48               | 5,00              | 10,00                 |
|                         | 2       | 1,32               | 6,50              | 7,00                  |
|                         | 3       | 0,93               | 8,50              | 6,00                  |
| Blanco                  | 1       | 3,30               | 5,50              | 9,50                  |
|                         | 2       | 2,80               | 6,00              | 9,00                  |
|                         | 3       | 3,10               | 6,00              | 9,00                  |
| Monolítica              | 1       | 2,60               | 14,50             | 0,00                  |
|                         | 2       | 2,20               | 15,00             | 0,00                  |
|                         | 3       | 2,40               | 15,00             | 0,00                  |

Tabla 2. Resultados de los ensayos.



Figura 9 Ensayos para el material PP.



Figura 10. Ensayo del material PVA.



Figura 11 Ensayo del material PPA.



Figura 12. Ensayo del material PET.



Figura 13 Ensayo de vigas de control.



Figura 14. Ensayo de vigas monolíticas.

## 6. CONCLUSIONES

Para las vigas, con cada una de las clases de geosintéticos, no se obtuvo en promedio una mejora en la capacidad de carga, sin embargo se comprobó que con un menor espesor de base se obtuvieron mejores resultados de resistencia a flexión. La mínima carga registrada fue de 0,93 MPa para una probeta de Polipropileno con Arena con un espesor base de 8,5 cm y un espesor de refuerzo de 6 cm; mientras que la máxima carga fue de 3,43 MPa para una probeta de Poliéster con un espesor base de 5 cm y un espesor de refuerzo de 10 cm, superando la máxima carga registrada para las vigas de control (3,3 MPa), lo cual podría sugerir una mejora en la capacidad de carga para este material en particular con las dimensiones indicadas.

En general se comprobó que todas las vigas desplazaron la fisura y retardaron la transmisión desde la capa base hacia la capa de refuerzo. Se prestó especial atención a las vigas Poliéster 2 y 3 por ser las que arrojaron mayores capacidades de carga en los ensayos.

Para la viga PET 2 no hubo desplazamiento entre capas del Hormigón pobre y el H<sup>o</sup> 30. La máxima carga a flexión de 20,8 KN corresponde al trabajo del H<sup>o</sup>30 con las geogrillas de Poliéster. Una vez que rompe el H<sup>o</sup>30 queda la geogrilla trabajando, tomando una carga de 8 KN. En esta viga la fisura ocurrió dentro del tercio medio.

Para la viga Poliéster 3 hubo un desplazamiento de 18 mm de la capa superior en el tercio más cercano a la fisura. La carga máxima de 18,1 KN también corresponde al trabajo del H<sup>o</sup>30 con la geogrilla. Una vez que rompió el H<sup>o</sup>30 la geogrilla continuó trabajando, alcanzando una carga de 5,8 KN. En este caso la fisura se produjo en la base fuera del tercio medio, mientras que en la capa superior se desplazó hacia el interior. Esto muestra una importante ductilidad post-cracking, además de una efectividad para retardar la fisura, evitando parcialmente el fenómeno de fisuración refleja.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Área Medio Ambiente y Obras Civiles (2005) "Geosintéticos". Edición en CD. ISBN 950-42-0065-6. Argentina.
- Ricci, L. A. (2012) "Evaluación de la adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético". Tesis de Maestría en Ingeniería del Transporte, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería (inérita). Buenos Aires, Argentina.

# “FUNDAMENTOS TEORICOS DEL CONTADOR DE PARTICULAS. SU APLICACIÓN EN LAS EMULSIONES ASFALTICAS”

Becario: Zapata Ferrero Ignacio<sup>(1)</sup>

Directora: Ing. Cecilia J. Soengas<sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Metodología teórico práctica para el diseño de tratamientos superficiales bituminosos bajo condiciones de servicio”

Código UTN – 1618. Disposición 315/11

---

## 1. Resumen

La medición del tamaño de partículas es una técnica que se utiliza desde hace ya varios años. Sin embargo su aplicación no pudo ser posible hasta la aparición de computadoras capaces de resolver complejos problemas matemáticos.

En la presente tesis se verán los fundamentos básicos en los que se apoyan los contadores de partículas para poder funcionar, y la importancia de conocer la distribución de partículas en las emulsiones bituminosas.

## 2. Abstract

The particle size measurement is a technique that has been used for several years. However, its application might not be possible until the advent of computers capable of solving complex mathematical problems. The basic foundations on which particle counters are supported to function, and the importance of knowing the distribution of particles in bituminous emulsions will be in this thesis.

## 3. Fundamentos

Las emulsiones asfálticas, como dispersiones agua y asfalto, basan su estabilidad, principalmente en el tamaño de partículas. Una emulsión que presente tamaños de partícula pequeños, tendrá un mejor desempeño en cuanto a estabilidad de la misma. Por lo general los diámetros de las partículas dentro de las emulsiones no superan los 5 micrones, y se concentran en un rango de 10 micrones de diámetro. A su vez el diámetro de las partículas depende fuertemente del emulsificante utilizado, de la energía mecánica entregada al momento de la fabricación, de la naturaleza y cantidad de ligante, de la apertura que haya entre rotor y estator en el molino coloidal de fabricación y de las condiciones hidrodinámicas en las que se produce el proceso de emulsificación de la muestra. De la correcta distribución de partículas dependen la estabilidad al almacenamiento, viscosidad, reactividad y adhesividad, propiedades fundamentales que debe cumplir una correcta emulsión. La utilización de diferentes emulsificantes depende de las características que demanda la emulsión.

Por lo expresado anteriormente resulta de suma importancia conocer cómo es la distribución de partículas dentro de una emulsión asfáltica. La técnica utilizada para la determinación de esta distribución, es la denominada difracción laser que tiene en cuenta el principio físico de la dispersión de ondas electromagnéticas. El método consiste en hacer pasar un haz de luz

(1) Becario del Centro de Investigaciones Viales, LEMaC, Dpto. Ingeniería Civil

(2) Tutor de la Tesis de Investigación

(principalmente laser) a través de una muestra que se quiere medir. Las partículas expuestas a un haz de laser, desvían la luz con un ángulo fijo que depende del diámetro de las partículas. Por detrás de esta muestra se coloca un detector que capta las distribuciones de intensidades luego de que el láser impacta contra la muestra. A diferencia de otros métodos de medición de partículas, como el tamizado, la difracción láser dispone de muchas ventajas: reducidos tiempos de medición, buena reproducibilidad, facilidad de calibración y un amplio rango de medición, por citar algunas. La Figura N° 1 es un esquema de lo antes enunciado.



**Figura N° 1.** Esquema de la medición de partículas

La distribución de la intensidad medida, muestra un sistema con numerosos anillos más o menos concéntricos, cuya separación está en correlación con el tamaño de las partículas. Cuando el haz de láser llega al detector, las partículas grandes generan anillos muy cercanos entre sí, mientras que las partículas pequeñas dan lugar a anillos muy separados. De esta manera, el tamaño de las partículas se puede calcular a partir de la distancia entre los distintos anillos.

Se debe tener especial precaución en las condiciones que presente la muestra que se requiera medir. La misma no tiene que tener grumos o aglomeraciones. Si esto llegara a ocurrir, produciría lecturas equivocadas sobre la distribución de partículas que presente la muestra. En la Figura N° 2, se muestra el contador de partículas que tiene el LEMaC.



**Figura N° 2.** Contador de Partículas del LEMaC

### **3.1. Teoría de Mie**

Para partículas cuyo diámetro no es muy superior a la longitud de onda de la luz utilizada, se utiliza la teoría de Mie. La física de la interacción de una onda electromagnética con una esfera es sumamente complicada. Sin embargo Mie encuentra una solución analítica relativamente sencilla desde el punto de vista matemático. Esta teoría es la solución completa de las ecuaciones de Maxwell para la dispersión de ondas electromagnéticas en partículas esféricas

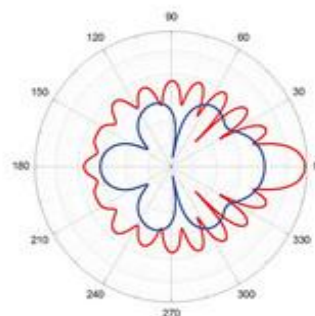
Esta teoría describe la radiación en y alrededor de las partículas esféricas en un medio homogéneo, nos indica que la difracción de la luz es un fenómeno de resonancia. Al recibir un rayo de luz, la partícula crea oscilaciones electromagnéticas en la misma frecuencia que la luz incidente. Esto depende de la relación entre la longitud de onda de la luz con el diámetro de la partícula y el índice de refracción de las partículas con el medio. Para poder utilizar esta teoría se necesita conocer el índice de refracción, y el coeficiente de absorción de la muestra y el medio. Es importante señalar que por medio de este método se transforman los datos de medición de distribución de intensidad, a medidas de volumen.

El límite inferior del rango de tamaños que se puede registrar con la teoría de Mie es de 10  $\mu\text{m}$  (micrones). Para las partículas más pequeñas, la intensidad de dispersión deja de depender de la dirección, es decir, que el tamaño de las partículas ya no se puede determinar a partir de la distribución de los ángulos de la luz dispersa.

Pero esta teoría no fue utilizada siempre. Debido a la complejidad en la resolución de ecuaciones, en mayor medida, ecuaciones diferenciales, y en la cantidad de datos, el modelo que presentaba esta teoría no podía desarrollarse a causa de que no se contaba con ordenadores que pudieran desarrollar estos cálculos. Debido a esto, previamente se utilizaba otra teoría, la teoría de Fraunhofer que analiza partículas en otro rango de diámetros, menores a los expuestos en la teoría de Mie, pero con procedimientos más sencillos que este último, y por lo tanto con una justificada corrección se podía utilizar. Cuando se llegó a contar con computadoras de gran rapidez y eficiencia la teoría de Fraunhofer quedó obsoleta para el análisis de muchos materiales, recurriéndose a la teoría de Mie, en honor al científico Gustav Mie, que fue quien la desarrolló.

### 3.2. El diagrama polar

Para facilitar la interpretación de los resultados de la dispersión de la luz luego de traspasar la muestra, se utiliza un diagrama polar. Mediante este gráfico puede representarse de forma muy clara la distribución de la intensidad de la luz dispersada según el ángulo con que se proyecta. En la Figura N° 3 se aprecia un Diagrama Polar.



**Figura N° 3.** Ejemplo típico de Diagrama Polar

El diagrama muestra en las cifras del exterior el ángulo de dispersión de la luz. La distancia entre el centro del diagrama y la curva de distribución, proporciona la intensidad de la luz dispersada en esta dirección. Es importante tener en cuenta que el eje de intensidad radial es logarítmico: los círculos concéntricos finos y grises están separados por un factor de diez.

Si se compara la línea azul con la roja, se aprecia que para las partículas más grandes (color rojo) la intensidad con respecto a los ángulos de dispersión pequeños (de 0° a aprox. 15°) es casi cien veces mayor que en la dirección de retroceso cerca de los 180°. Para la curva azul, esta diferencia es mucho menor. De esto se deduce que, para un diámetro de partículas muy reducido, la intensidad de la dispersión de la luz es un factor importante.

La dispersión del láser determina el volumen de las partículas. Esto significa que, con ayuda de la dispersión del láser, el resultado de una medición permite saber, por ejemplo, qué porcentaje del volumen total de la muestra tiene partículas más pequeñas de un tamaño determinado. El índice característico se conoce como  $Q3(x)$ . También se puede saber qué porcentaje del volumen total de la muestra tiene partículas situadas dentro de un intervalo de tamaños determinado. Este índice característico se conoce como  $dQ3(x)$ .

La Figura N° 4 es una representación de varias curvas de distribución de emulsiones asfálticas con distintos porcentajes de residuos asfálticos. El pico de mayor valor (curva de color amarilla con un por ciento en volumen de 5) corresponde a una emulsión con residuo asfáltico de 58.9 y la menor (curva azul con un por ciento en volumen de 4.5) corresponde a 70.3 de residuo asfáltico. Se puede observar que ambos picos (máximos y mínimos) tienen un rango de tamaño de partículas de 2 a 10  $\mu\text{m}$  (micrones) valores óptimos para una buena estabilidad de la emulsión, indistintamente del contenido de residuo asfáltico.

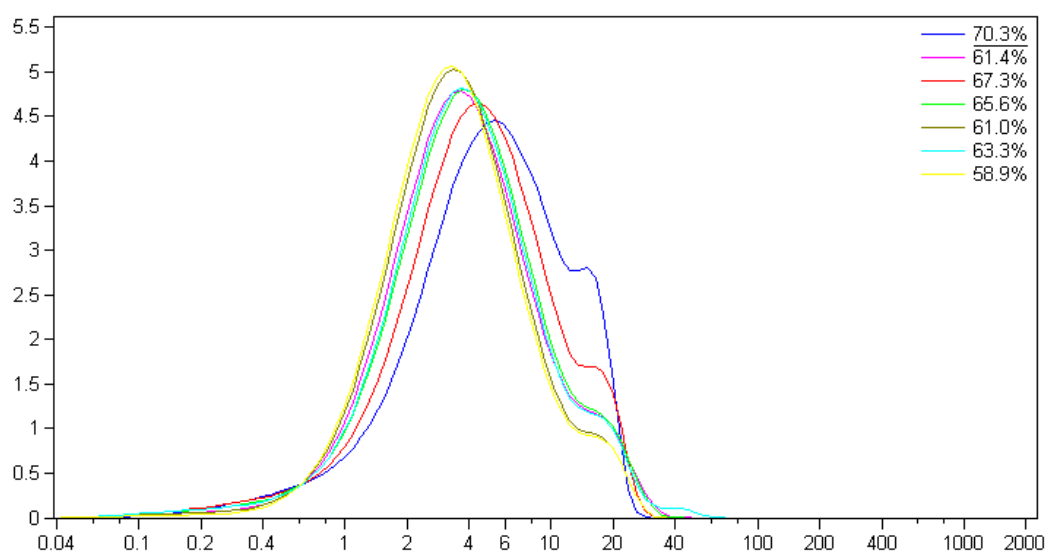


Figura N° 4. Curvas de Distribución de Partículas de Emulsiones asfálticas

#### 4. Desarrollo experimental

En la presente tesis solo se ha planteado realizar la parte teórica ya que la parte práctica se desarrollará en el próximo año (2014), esto se debe a que el equipo fue adquirido a fines del 2013.

Se estiman realizar pruebas con el contador de partículas, verificando diferentes distribuciones con varios ejemplares de emulsiones realizadas con el molino coloidal que tiene el LEMaC. Se pondrá utilizar emulsiones con

distinta dosificación de emulsificante y relación asfalto agua, con el fin de verificar lo que está planteado a nivel teórico.

### **5. Análisis de Resultados**

Por el momento no se pueden definir resultados ya que lo estudiado ha sido exclusivamente teórico. Para este próximo año 2014, se tendrán los resultados de lo planteado en el desarrollo experimental, utilizando emulsiones producidas con el molino que posee el LEMaC.

### **6. Conclusiones**

Podemos decir que el conocimiento de la distribución de partículas en una emulsión asfáltica es una propiedad fundamental a la hora de evaluarla. Gran cantidad de sus propiedades físico-químicas se asocian a la distribución de partículas que presente la misma. Es de vital importancia que las partículas de emulsión se manejen en un cierto rango de diámetros (entre 2 y 6  $\mu\text{m}$ ) para asegurar que se cumplan las características y propiedades con la que fue pensada.

Básicamente un correcto seguimiento en el proceso de elaboración de la emulsión, así como controles de temperatura de la fase acuosa y del asfalto, la dosificación deseada, y que la abertura de la boca del molino sea la adecuada, llevará a una emulsión satisfactoria. Recordar que aberturas de molino excesivas, producen emulsiones con un rango elevado de diámetro de partículas, que finalmente llevarán a una coalescencia entre la fase acuosa y la bituminosa muy temprana, y por ende la emulsión no tendrá la estabilidad adecuada para su uso.

### **7. Bibliografía**

- Soengas, C., González, R. (2003) Cuaderno "Emulsiones asfálticas"
- Cartilla Técnica "Particle sizing of asphalt emulsions" de la Empresa Horiba (Año 2011)
- Martines Verdu J. (Año 2010) "Análisis del tamaño de partículas"
- Frontini G. (Año 2009) "Identificación de propiedades con mediciones de dispersión de luz" Apunte de la Universidad Nacional de Mar del Plata
- Apunte "Medición del tamaño de partículas" de la empresa Frisch
- Musuruana E. y Sánchez de Rosasco S. (1985) Libro "Las emulsiones asfálticas en las construcciones viales".



# “ANÁLISIS DE DISPERSIÓN DE CAUCHO RECICLADO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO EN ASFALTOS DE USO VIAL”

**Becario: Nicolás Ellena (†)** <sup>(1)</sup>  
Director: Mg. Ing. Gerardo Botasso <sup>(2)</sup>

Proyecto de I+D+i de pertenencia:

“Determinación de las causas de ahuellamiento en concretos asfálticos en caliente en rutas de la provincia de Mendoza”

Código UTN: IFI 1332 Código de Incentivos 25/I-JO1

---

## 1. Resumen

La presente tesis pretende realizar un análisis sobre las dispersiones de caucho reciclado en cementos asfálticos de usos vial, con el propósito de valorar la interacción asfalto caucho y los cambios generados en el umbral de prestación del nuevo producto denominado asfalto modificado con caucho proveniente de NFU.

A tal fin se recorren las técnicas de caracterización de los ligantes asfálticos, desde el punto de vista de la composición, de su reología y comportamiento físico mecánico.

## 2. Abstract

This thesis aims to perform an analysis of the dispersions of recycled rubber in asphalt cement for road use, in order to assess the asphalt rubber interaction and the changes generated on the threshold of providing the new product called rubber modified asphalt from NFU.

To this end the characterization techniques of asphalt binders are crossed, from the viewpoint of the composition, rheology and mechanical physical behavior.

## 3. Fundamentos

Desde hace varios años se ha estudiado en el LEMaC sobre la factibilidad de incorporación y la reutilización de molienda de neumáticos fuera de uso (NFU) como materia prima para la modificación de las mezclas bituminosas empleadas en la construcción de carreteras. Curiosamente, el gran crecimiento en el empleo de los asfaltos modificados con polímeros fue en paralelo con las experiencias de betunes modificados con polvo de neumáticos, pero mientras los primeros llegaron a consolidarse como el máximo estándar de calidad, los segundos han sufrido una serie de vaivenes en su desarrollo, sin llegar nunca a marcar una tecnología que se use en forma estandarizada en nuestro país y en el mundo. Desde entonces se han hecho multitud de ensayos, pero de forma muy general se pueden resumir en dos las tecnologías empleadas en la modificación de mezclas asfálticas:

- Modificación por “Vía Húmeda”: Este procedimiento consiste en la dispersión del caucho dentro del asfalto. Luego este se emplea posteriormente en la fabricación de las mezclas asfálticas.
- Modificación por “Vía Seca”: En este caso, el caucho molido se trata como un “árido”, mezclándose con el asfalto y el resto de áridos para obtener una mezcla bituminosa de características especiales.

(1) Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC Depto. de Ing. Civil 1

(2) Director de Beca, Director del Proyecto.

### El asfalto:

El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción del calor y/o cargas permanentes. Es una componente natural de la mayor parte de los petróleos en los que existe en una disolución y que se obtiene como residuo de la destilación del crudo pesado.

La composición química de los asfalto resulta ser de mucha utilidad a la hora de conocer las propiedades del mismo y controlar su funcionamiento posterior en una mezcla asfáltica, resultando ser una mezcla de numerosos hidrocarburos parafinicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos. La mayoría de los hidrocarburos livianos son eliminados, quedando los más pesados y de moléculas más complejas. Al eliminarse los más livianos, los hidrocarburos más pesados no pueden mantenerse en disolución y se van uniendo por absorción de partículas coloidales ya existentes, aumentando su volumen. Las moléculas más livianas se constituyen en el medio dispersante o fase continua.

Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de hidrocarburos pesados (asfaltenos) se encuentran dispersas en un medio aceitoso más ligero (maltenos) compuesto por hidrocarburos saturados, resinas y aromáticos, sin que exista una separación entre las dos fases sino una transición. (Estado micelar del asfalto Nellensteyn, 1924)

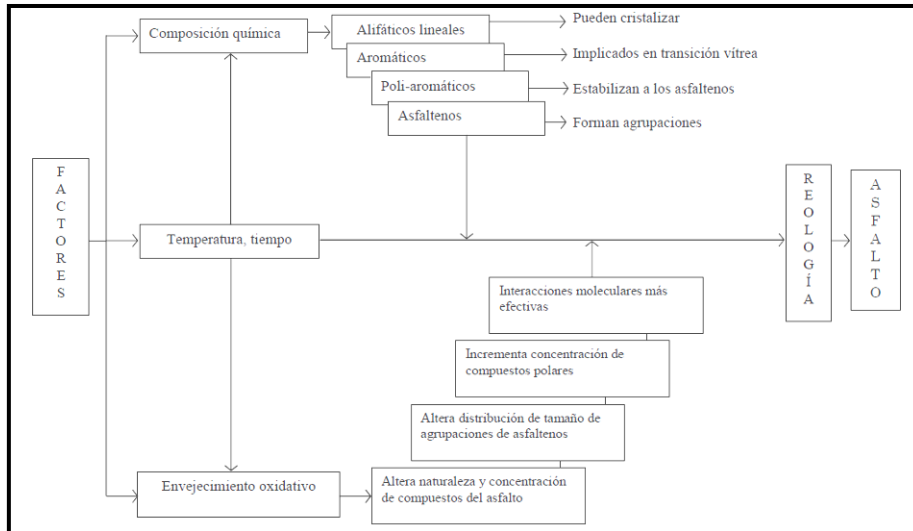
Desde el punto de vista Macro- estructural el asfalto puede ser considerado como una mezcla de diversas moléculas polares y no polares las cuales interactúan unas con otras. Pueden formar asociaciones débiles y redes que se dispersan en el asfalto y pueden existir concentraciones localizadas de moléculas similares. (Petersen 1994).

Por otro lado la aromaticidad es definida como una medida de la cantidad de compuestos aromáticos en relación a la cantidad moléculas alifáticas y cíclicas presentes en los asfaltos, expresándose como el grado condensación de los anillos aromáticos del sistema. (Jennings et al. 1993)

Labaut en 1950 propuso que los asfaltos con maltenos altamente aromáticos pueden dispersar bien a los asfaltenos y los denominó tipo sol (Newtonianos), mientras que en los asfaltos con escasa aromaticidad los denominó tipo gel( No newtonianos) mientras que pueden existir sistemas tipo sol-gel. Los procesos de oxidación pueden generar cambios en el estado de los ligantes.

El comportamiento reológico de los asfaltos depende fuertemente de la temperatura. A temperaturas bajas,  $-20^{\circ}\text{C}$ , los asfaltos se tornan frágiles y quebradizos, se dice entonces que se encuentran en estado vítreo. A temperaturas superiores a los  $60^{\circ}\text{C}$ , el asfalto es generalmente un líquido newtoniano. Entre ambos extremos, los ligantes presentan un comportamiento viscoelástico. El material experimenta transiciones en su estructura, pasa a ser de un sólido vítreo a un fluido viscoelástico, posteriormente a un fluido viscoelástico para luego terminar a elevadas temperaturas como un fluido newtoniano.

Además de la temperatura existen otros factores que influyen en la reología como los son: la polaridad, el peso molecular y la distribución de los componentes del asfalto, como así también la posibilidad de modificarlo con adiciones poliméricas. En la figura N° 1 se muestran las características de los procesos reológicos del asfalto



**Figura N° 1- Esquema de los cambios reológicos en los asfaltos**

En los años 1990 en el marco del programa SHRP se desarrollaron nuevos procedimientos y se adaptaron nuevos equipos para evaluar las propiedades reológicas de los materiales bituminosos. El viscosímetro rotacional, RV; Brookfield, reemplazo a los viscosímetros de tubo capilar con el fin de determinar curvas de viscosidad-temperatura para estimar las propiedades del asfalto como son las temperaturas de mezclado, compactación y bombeo, al menos en los ligantes convencionales. El reómetro de corte dinámico, DSR, fue seleccionado para medir la rigidez de los asfaltos a temperaturas altas e intermedias alcanzadas en los pavimentos y el reómetro de viga de flexión, BBR, elegido para medir las condiciones de flujo del asfalto a bajas temperaturas. También se suma la tracción directa, DTT, en los asfaltos, con el mismo propósito. Los análisis reológicos se realizan sobre muestra con tratamiento de envejecimiento en condiciones de producción, RTFO envejecimiento a corto plazo, y con técnicas de envejecimiento a largo plazo, PAV.

En estos equipos se pueden simular condiciones de envejecimiento del asfalto, velocidades diferentes de aplicaciones de carga torsionales, de flexión y/o de tracción, frecuencias y temperaturas diferentes a efectos de encontrar las leyes de variación de las principales propiedades evaluadas.

En la fotografía N° 1 se pueden observar los equipos citados.



**Fotografía N° 1 Equipos utilizados en la valoración reológica de los ligantes asfálticos**

#### El caucho reciclado de NFU:

Los neumáticos están compuestos principalmente por tres productos: Caucho Natural y sintético, un encordado de acero y fibra textil. A su vez el caucho usado en la fabricación de neumáticos está compuesto por un grupo de polímeros (compuestos químicos de elevado peso molecular) entre los que se cuentan el polisopreno sintético, el polibutadieno y el más común que es el estireno-butadieno, todos basados en hidrocarburos. Se agregan además otros materiales al caucho tales como: suavizantes, que mejoran el manejo del caucho antes de la vulcanización; óxido de zinc y de magnesio, comúnmente denominados activadores, que son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias horas a pocos minutos; antioxidantes, para dar mayor vida útil al caucho sin que se degrade por la acción de oxígeno y el ozono; y finalmente negro de humo, especie de humo negro obtenido por combustión incompleta de gases naturales, que entrega mayor resistencia a la abrasión y a los esfuerzos tensionales.

#### **4. Desarrollo experimental**

##### El asfalto utilizado:

Se ha seleccionado un ligante asfáltico que clasifica como CA-20 según su viscosidad, lo que permite que el medio dispersante sea lo suficientemente abundante como para garantizar la microdispersión del caucho reciclado de NFU.

##### El caucho utilizado:

Se selecciona el menor tamaño de molienda que pasa el 100% la malla 25 de ASTM (710 micrometros). Este tamaño es el menor que se ha podido lograr con la molienda en frio.



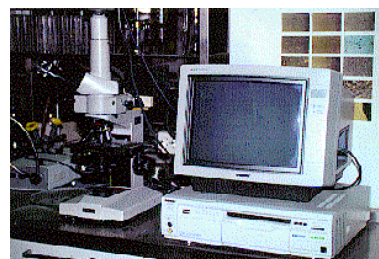
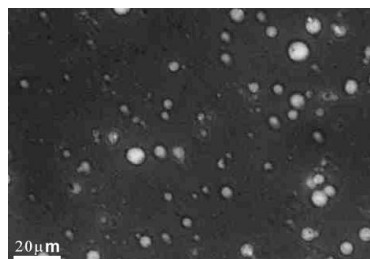
**Fotografía N°2 Caucho triturado de NFU**

##### La dispersión:

Se utiliza equipamiento diseñado para dispersar polímeros en laboratorio.

Se incorpora a una temperatura del sistema de 175°C durante un tiempo de 45 minutos a una velocidad de 6000 rpm. Con ello se elabora 1 kg de asfalto modificado con caucho de NFU con una proporción en peso del 8%.

La dispersión se ha logrado visualizar en un microscopio óptico con fluorescencia:



**Fotografía N°3: Vista de la dispersión de caucho de NFU en asfalto CA-20**



Fotografía 4: Vista del sistema de dispersión

Valores obtenidos:

| Ensayo   | Unidad     | CA – 20  | Determinaciones<br>Con variaciones<br>de temperatura | CA-20 +<br>8% NFU |
|--|------------|----------|--|-------------------|
| Penetración  | 1/10<br>mm | 79       |  | 44                |
| Punto de ablandamiento   | °C         | 47       |  | 56                |
| Recuperación elástica Lineal                                   | %          | 16       |  | 21                |
| Recuperación elástica Torsional                                | %          | 8        |  | 33                |
| Ductilidad a (25 °C)   | cm.        | > 112    | A 5 °C   | 15                |
| Viscosidad (60 °C) , 1 rpm, S29, (P )                          | dPa s      | 2100     |  | -                 |
| Viscosidad (135 °C), 10 rpm, S21, (P )                         | dPa s      | 4,12     |  | 10.11             |
| Viscosidad (150 °C), 10 rpm, S21, (P )                         | dPa s      | 2,07     |  | 5.06              |
| Viscosidad (170 °C), 10 rpm, S21, (P )                         | dPa s      | 0,98     |  | 2.39              |
| Viscosidad (190 °C), 10 rpm, S21, (P )                         | dPa s      | 0,532    |  | 1.20              |
| Punto de Inflamación   | °C         | 228      |  | 235               |
| Oliensis   |            | Negativo | Indice de penetración                                | -0.1              |
| Solubilidad en tricloroetileno                                 | %          | 99       | Módulo de corte G* (88° C)                           | 2.22              |
| Indice de penetración  |            | -0,9     | Angulo de fase $\delta$                              | 72                |
| Módulo de Corte G* (58° C)                                     | kPa        | 2,30     | Corte Dinámico<br>Factor G*/ sen $\delta$            | 2.33              |
| Angulo de fase $\delta$  | °          | 83       |  |                   |
| Corte Dinámico Factor G*/ sen $\delta$                         | kPa        | 2,32     |  |                   |
| RTOFT - Determinaciones sobre el residuo después de envejecido |            |          |  |                   |
| Penetración  | 1/10<br>mm | 70       |  | 35                |
| Punto de ablandamiento   | °C         | 50       |  | 60                |
| Ductilidad del residuo 25 ° C                                  | Cm         | 105      | A 5°C  | 12                |
| Indice de penetración  |            | -1,79    |  | -0.5              |
| Perdidas de masa   | %          | 0,008    |  | 0.01              |
| Módulo de corte G* (64° C)                                     | kPa        | 3,97     | Módulo de corte G* (88° C)                           | 4.27              |
| Angulo de fase $\delta$  | °          | 78,5     | Angulo de fase $\delta$                              | 57                |
| Corte dinámico factor G*/ sen $\delta$                         | kPa        | 4,05     | Corte dinámico<br>factor G*/ sen $\delta$            | 5.09              |
| Viscosidad (60 °C) , 1 rpm, S29, (P )                          | dPa s      | 4065     |  | -                 |
| Viscosidad (135 °C), 10 rpm, S21, (P )                         | dPa s      | 7,32     |  | 29.32             |
| Viscosidad (150 °C), 10 rpm, S21, (P )                         | dPa s      | 4,10     |  | 12.30             |
| Viscosidad (170 °C), 10 rpm, S21, (P )                         | dPa s      | 1,85     |  | 5.20              |
| Viscosidad (190 °C), 10 rpm, S21, (P )                         | dPa s      | 0,98     |  | 2.21              |

Tabla Nº 1: variaciones reológicas del ligante asfáltico

- (1) Becario de investigación del Centro de Investigaciones Viales LEMaC Depto. de Ing. Civil 5  
 (2) Director de Beca, Director del Proyecto.

En la tabla N° 1 se puede observar el análisis realizado sobre las muestras de asfalto sin modificar y asfalto modificado con 8% de NFU que pasa la malla 25 de ASTM.

## **5. Análisis de Resultados y Conclusiones**

De las determinaciones realizadas se puede decir que se observa una modificación importante de las propiedades reológicas del asfalto.

Esto se evidencia en los cambios registrados en la penetración, punto de ablandamiento, recuperación elástica por torsión.

Se observa en la fotografía la humectación parcial de las partículas de caucho dispersas, no alcanzado lo que sucede habitualmente en los polímeros vírgenes donde la humectación es mayor.

Esto mejora con el tiempo de digestión de caucho en el asfalto, logrando embeberse de los aceites del mismo.

Desde el punto de vista del análisis con el reómetro de corte, realizado en el laboratorio de YPF se pueden observar los cambios de rangos de temperaturas en la rama alta del comportamiento del ligante, cambiando de 58 °C la temperatura del factor de ahuellamiento a 88°C

La experiencia realizada hasta aquí es parte de una tesis de maestría y una tesis doctoral que trata sobre el tema.

Se ha logrado utilizar un desecho de la vida diaria y optimizar las propiedades del ligante asfáltico, modificando su comportamiento reológico, aumentando la ventana de desempeño del mismo.

## **6. Bibliografía**

AGNUS J., IOSCO O. (1999). Durabilidad de Mezclas Asfálticas Preparadas con Ligante Modificados con Polímeros. Comisión de Investigaciones Científicas. LEMIT.

ANGELONE S., MARTINEZ F. (2006). Deformación de mezclas asfálticas permanentes. IMAE Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

GOLEEN S. W., PROCESS CONSULTING SERVICES, INC., HOUSTON, TEXAS; S. CRAFT, CHEMPRO, INC., LAPORTE, TEXAS; AND D. C. VILLALANTI, TRITON ANALYTICS CORP., HOUSTON, TEXAS (2005). Refinery analytical techniques optimize unit performance. USA.

HERBERT F. (1998) Lund Manual Mc Graw-Hill de Reciclaje, Volumen I, 1996.

HERVÁS RAMÍREZ LORENZO (2006) Los residuos urbanos y asimilables. Capítulo IX: Los neumáticos fuera de uso. Junta de Andalucía. Comunidad Europea. Fondo Europeo de cohesión.