

# Estabilizados de suelo arena y emulsión

## Soil Sand and Emulsion Stabilization

Agustín Azanza<sup>1\*</sup>, Silvia Angelone<sup>2</sup>

### Resumen

Desde mediados y hasta principios de los años 90 del siglo pasado, en la provincia de Santa Fe, Argentina, las bases estabilizadas de Suelo Arena Emulsión (SAE), tuvieron un gran desarrollo con excelentes resultados en numerosas obras de la red vial provincial. Diversas circunstancias provocaron que estos estabilizados entraran paulatinamente en desuso.

En la actualidad, la necesidad de utilizar materiales locales que eviten el aumento de transporte y cargas por las carreteras, la disponibilidad en el mercado de emulsiones asfálticas (formuladas especialmente en función de las características de los materiales, así como de sus procesos constructivos y nuevos equipos de mayor energía de mezclado y compactación), nos llevan a replantear el uso de estas bases nuevamente.

En el presente trabajo se intenta caracterizar el comportamiento mecánico del SAE en función de la variación de sus materiales componentes mediante trabajos de laboratorio.

Con los resultados que se obtengan, más una correcta evaluación impacto-económica, se busca comparar este material con un estabilizado granular para poder justificar su uso como base de firmes.

**Palabras clave:** estabilizado, carretera, ruta, suelo, arena, emulsión, módulo resiliente, módulo dinámico.

### Abstract

*From the middle, and up to the early 1990s, of the 20th century, in the province of Santa Fe, Argentina, stabilized bases of Soil Sand and Emulsion (SSE) had a great development with excellent results in numerous works of provincial roads. Many circumstances provoked these bases to wither away.*

*Currently, the need to use local materials to avoid the increase of transport and dynamic loads on the road, the availability of asphalt emulsions created specially in function of the characteristics of the materials, on one hand; and the construction process with new mixed and compaction equipments, on the other, as well as the remarkable performance shown at the moment by design pavement structure, makes us reconsider the use of these bases again.*

*The present paper aims to make a mechanical characterization of the Soil Sand and Emulsion base, in function of the variability of its materials through laboratory works.*

*Thereby, it is important to make an economic-impact assessment in order to compare this material to a granular base and be able to justify its use in road construction.*

**Keywords:** stabilized, road, route, soil, sand, emulsion, resilient module, dynamic module.

## 1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de estabilizar un suelo para la construcción de pavimentos aparece, en general, cuando los materiales que componen el camino o los disponibles en la zona, presentan un comportamiento mecánico muy susceptible a la acción deteriorante de los agentes externos actuantes sobre la estructura. Un ejemplo de esto son los suelos cohesivos, tan abundantes en la zona litoral argentina, y altamente dependientes de la acción del agua.

Lo recomendable en estos casos por cuestiones económicas, es utilizar esos suelos, mejorados o estabilizados. En la actualidad, su principal empleo es en la construcción de

la capa sub-base o base de la estructura del firme, o en el mejoramiento de la subrasante. También pueden utilizarse en la construcción de caminos de bajo volumen de tránsito, con el objeto de brindar transitabilidad permanente a los mismos. Los vehículos en estos casos, circulan directamente sobre el estabilizado o este último es cubierto por una carpeta de rodamiento delgada.

El tipo y grado de estabilización requerida, es principalmente un problema de disponibilidad y costo de los posibles materiales a utilizar, así como su compatibilidad con las condiciones del suelo existente. El tránsito previsto y las condiciones climáticas son también factores condicionantes en la selección del método de estabilización.

En consecuencia, para seleccionar dicho método deben establecerse las premisas que el estabilizado debe cumplir. (Cassan, Angelone & Martínez, 2005).

La posibilidad de potenciar el comportamiento mecánico del suelo y la arena, los únicos recursos viales disponibles en grandes volúmenes en la zona litoral argentina, aparece como una preocupación permanente. La técnica

\* Autor de contacto: [agusazanza@hotmail.com](mailto:agusazanza@hotmail.com)

<sup>1</sup> Mg. Ing. Civil. Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario (Argentina).

<sup>2</sup> Dra. Ing. Civil. Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario (Argentina).

de su estabilización con emulsión asfáltica a los efectos de obtener un material apto para su uso como base o sub-base de pavimentos flexibles, ha tenido, en consecuencia, una razonable difusión en carreteras nacionales y provinciales de bajo y mediano tránsito.

La provincia de Santa Fe (figura 1), es una de las pocas regiones del país, que combina en su territorio dos de las cualidades menos deseables al momento de evaluar inversiones en infraestructura vial: la escasez de agregado pétreo y la existencia de subrasantes de baja capacidad portante (Enmaccora, Hillar & otros, 2000).



Figura 1. Mapa político de la República Argentina.

A su vez dicha provincia tiene como gran beneficio de poseer en toda su margen Este, el Río Paraná (figura 2). Este último, es lugar de emplazamiento de diversas arenas en todas sus costas que extraen el material del lecho del río y lo proveen para construcciones de todo tipo, de forma rápida y sencilla.

A partir de ello, la necesidad de agudizar el ingenio a fin de obtener los mejores resultados con los mínimos costos. Teniendo en cuenta este concepto encontramos los fundamentos sobre los cuales se basa este trabajo.

La escasez de agregado pétreo en el territorio provincial genera la permanente necesidad de transportarlo desde provincias vecinas con distancias que oscilan en general entre los 200 y 500 km, con los consabidos costos que ello acarrea. Esta situación es prácticamente inevitable al momento de construir carpetas de rodamiento, aunque no es así en el caso de las bases y sub-bases. Efectivamente en este ámbito, una base granular posee en Santa Fe un costo tal que entre el 50 y el 70% del mismo se debe a costos de transporte.



Figura 2. Mapa hídrico de la provincia de Santa Fe (Argentina).

La creciente limitación de los recursos económicos destinados a la inversión en infraestructura vial, hace que la búsqueda de la máxima rentabilidad de la misma sea una premisa cada vez más ineludible. En este sentido el aprovechamiento de los recursos disponibles, entiéndase materiales locales por ejemplo, se transforma en una necesidad imperiosa y obligada, buscando la obtención de materiales compuestos que aporten la máxima capacidad portante posible a un mínimo costo.

La provincia de Santa Fe, posee una importante experiencia en la implementación de un material que se encuadra dentro de los condicionamientos mencionados: el Suelo Arena Emulsión.

## 2. COMPONENTES

El Suelo-Arena-Emulsión, conforma un sistema formado por tres componentes de diferente naturaleza: uno puramente friccional, como la arena, otro pura o mayormente cohesivo, como el suelo y un ligante de características bituminosas. A fin de esbozar en forma sencilla cuáles son las propiedades conferidas por el asfalto a la mezcla de suelo y arena, es interesante realizar un análisis a partir de los extremos.

En este sentido, en un extremo tendríamos solamente un material puramente friccional como la arena, al que le incorporamos emulsión asfáltica. En este caso, el asfalto estaría confiriendo a la arena una cohesión viscoelástica, inexistente sin su presencia, generando un importante incremento en la capacidad portante, al menos frente a humedades no excesivas.

En el otro extremo se encontraría un material puramente cohesivo como un suelo. En dicho caso, la incorporación de emulsión generaría resultados diferentes a los mencionados. De hecho el asfalto permitiría en este caso preservar la cohesión que el suelo posee en estado seco o de baja humedad, ahora frente a la presencia del agua. De alguna forma podríamos decir que el asfalto estaría impermeabilizando al suelo.

Finalmente la incorporación de emulsión asfáltica a una mezcla de suelo y arena, estaría confiriéndole a la vez los beneficios que proveería a la arena y al suelo por separado; es decir que ambas propiedades (cohesión viscoelástica y preservación de la cohesión del suelo) estarían conviviendo entre sí. Cuál de ellas preponderará respecto a la otra dependerá exclusivamente de la relación volumétrica entre ambos componentes. De esta forma, cuando el volumen de suelo sea inferior al volumen de vacíos de la arena compactada, el comportamiento de la mezcla se acercará más al de una arena emulsión, mientras que cuando el volumen de suelo supere al de los vacíos de la arena compactada, el comportamiento se acercará más al de un suelo emulsión. En el punto de equilibrio, llamado de máxima compacidad o máxima densidad del suelo arena, teóricamente la mezcla gozaría de ambas propiedades en forma equilibrada.

En definitiva, la adición de ligante asfáltico a la mezcla de suelo y arena, no solo aporta a ésta de una impermeabilidad, sino que también genera un notable incremento en la capacidad portante. La mezcla así constituida poseerá una sensible variación en su comportamiento mecánico en función de la humedad que posea, medida está siempre como un porcentaje de la humedad óptima de compactación. (Ermaccora, Hillar & otros, 2000)

### 3. CARACTERIZACIONES FÍSICAS

Conocido de dónde proceden los suelos y cómo se han formado, es necesario, en primer lugar, clasificarlos y definirlos de acuerdo con sus propiedades.

El suelo, a diferencia de los materiales normalmente utilizados en edificación, es un material muy heterogeneo. Por ello, es necesario utilizar un lenguaje específico que permita identificar los distintos tipos con una nomenclatura internacional

Para ello se recurre a determinar sus propiedades físicas y mecánicas con la finalidad de definir el comportamiento de los suelos frente a sollicitaciones externas.

Las propiedades físicas se determinan mediante ensayos de identificación y estado efectuados en el laboratorio. El ensayo de granulometría, los límites de A. Atterberg y el ensayo de hinchamiento libre son alguno de los utilizados para efectuar dicha caracterización.

Con estos podemos determinar si cada componente del estabilizado es apto o no para su uso.

### 4. CARACTERIZACIONES MECÁNICAS

Una vez efectuada la caracterización física del material, se debe proceder a su estudio mecánico.

Las propiedades mecánicas de los materiales, al igual que las físicas, se estudian mediante ensayos de laboratorio para determinar sus características de resistencia y de deformabilidad.

Para los suelos sensibles al agua, el parámetro que determina todas las condiciones para su uso en los rellenos, terraplenes y explanadas de las redes viales es el Estado Hídrico. Su determinación no puede hacerse exclusivamente con el cálculo del contenido en agua natural, sino que es necesario relacionarlo con el contenido de agua específico de suelo al que le corresponde un comportamiento particular. El método más corriente para indicar el estado hídrico de un suelo es referirse a los valores de los ensayos PROCTOR Y CBR, realizados sobre cada suelo o clase de suelo a estudiar. (Quiroz Vargas, 2017).

Por otro lado, se hace también mención del ensayo de resistencia a compresión simple, de fácil aplicación en todo campamento de obra.

Las proporciones de materiales utilizados para confeccionar la mezcla fueron (figura 3):

- 54% de Suelo Seleccionado (tipo A-4 según AASHTO).
- 40% Arena Silíceo (Módulo de Fineza 1.80).
- 6% Emulsión de Corte Lento (EBCS YPF 2018).

Los resultados de los ensayos PROCTOR Y CBR (figuras 4 y 5)



**Figura 3.** Preparación en laboratorio de Suelo-Arena-Emulsión.

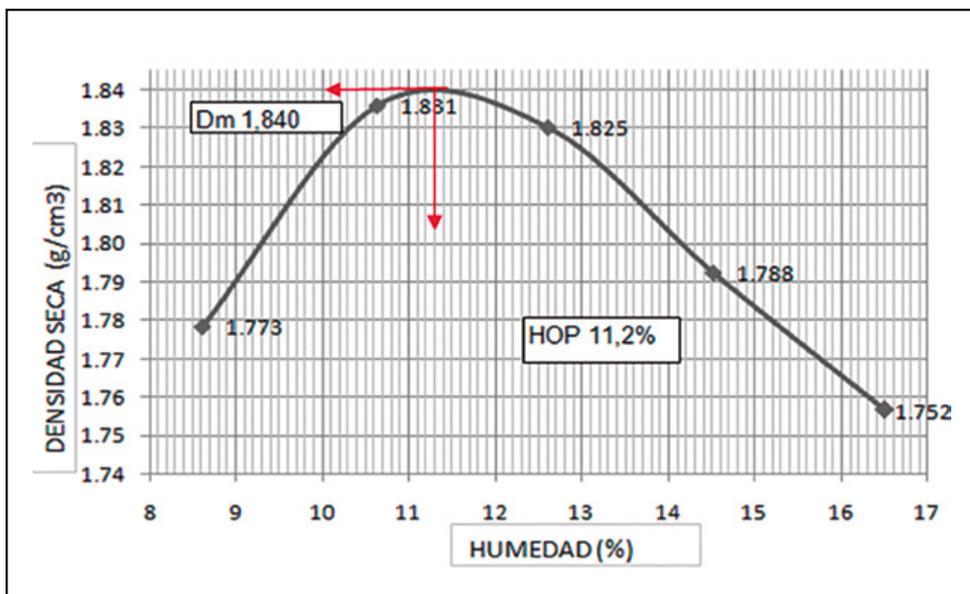


Figura 4. Gráfica ensayo Proctor Normal.

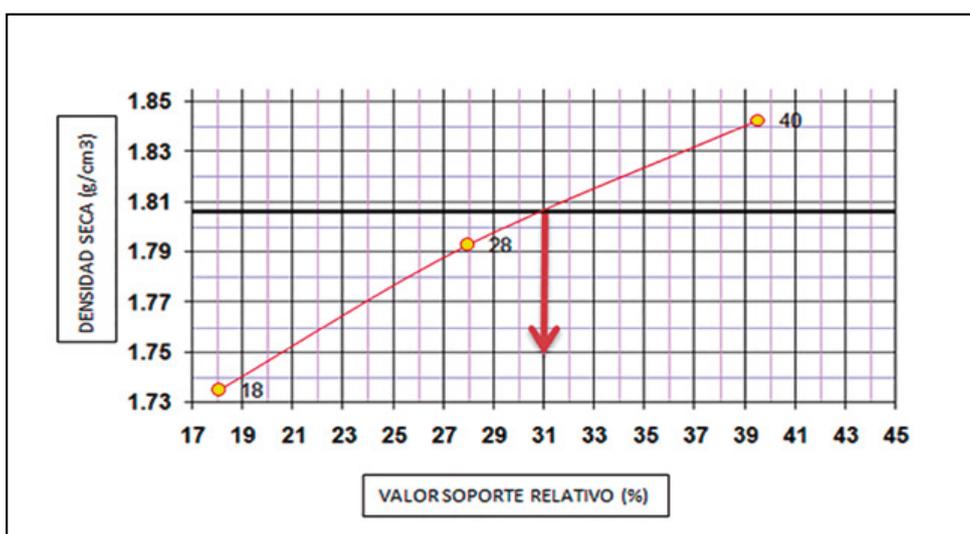


Figura 5. Gráfica ensayo Valor Soporte.

El resultado del ensayo de valor soporte sobre la mezcla de suelo-arena-emulsión fue 31%. Según la figura 5, afirmando que la mezcla puede ser empleada para una sub-base o base.

De todas formas lo ideal hubiese sido aproximarse a un CBR de 50% para poder asegurar su condición de base. Una forma de poder mejorar estos resultados, es utilizar otra arena con un mayor módulo de finura. También se puede aumentar el porcentaje de ésta de modo progresivo, de modo tal que no afecte en gran medida a los costos realizados al final de trabajo.

Se ha mencionado que, ya históricamente, las mezclas de suelo arena emulsión fueron dosificadas mediante el ensayo CBR Simplificado. Si bien los resultados obtenidos a partir de esta práctica han sido satisfactorios, el ensayo CBR es propio de los materiales no ligados, perdiendo representatividad al ser utilizado fuera de dicho ámbito. Es por eso que para el caso de materiales ligados, vamos a estudiar otra forma de caracterización simple en laboratorios de obra, mientras que se conserva el uso del ensayo CBR para los no ligados.

En este caso, el material se va a evaluar de ambas formas, tanto para obtener valores característicos del mismo

tratándolo como ligado y no ligado. Se adopta esta postura, debido a que el estabilizado en estudio posee el porcentaje de asfalto que lo ubica en el límite entre estos dos grupos. Es probable que si se adopta un menor porcentaje de asfalto el material puede tratarse como un no ligado y viceversa. Pero como se ha mencionado con anterioridad, la cantidad de emulsión asfáltica adoptada fue consultada en varias bibliografías, arribando que el porcentaje óptimo es de 6%.

Para analizar el comportamiento del material según condiciones más reales de sollicitaciones, se debe estudiar su Módulo Resiliente y su Módulo Dinámico.

#### Módulo Resiliente para materiales NO LIGADOS

Los ciclos de carga y descarga a los que se ve sometido un pavimento por la acción del tránsito que por él circula, son transmitidos a través de las capas que lo conforman, generando deformaciones en cada una de ellas. Estas deformaciones pueden ser de carácter resiliente, denominándose así cuando la recuperación es instantánea, o plásticas, siendo éstas las que permanecen en el pavimento después

de ser retirada la carga. (Cassan, Angelone & Martínez, 2005).

El módulo resiliente de las bases, sub-bases y sub-rasantes de suelos es un parámetro fundamental de los nuevos métodos de diseño de pavimentos con bases mecanicistas. Varios protocolos de ensayo para determinar los módulos resilientes en laboratorio han sido propuestos y evaluados por diferentes agencias y consecuentemente, un número significativo de modelos describiendo el comportamiento no lineal de este tipo de materiales han sido desarrollados.

Los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles de base empírico-mecanicista basados en la filosofía de la *Guía de Diseño Empírico-Mecanicista de Pavimentos* conocida como *AASHTO 2002*, requieren la adopción de algunas simplificaciones y ajustes para considerar las condiciones locales relacionadas con las características de los materiales, el clima y las técnicas de construcción.

Como las ecuaciones constitutivas y las leyes de fallas no son de fácil obtención o no se dispone de los equipos de ensayos requeridos para determinarlas, la Guía citada, establece para la determinación de las Propiedades de los Materiales, diferentes niveles jerárquicos de acuerdo a la categoría de la carretera, o sea a la importancia, costo y dificultades del proyecto en estudio con el fin de reducir los datos de diseño. Los niveles van del 1 al 3 en orden decreciente a la importancia de la obra como:

- Nivel 1: Se determinan directamente las ecuaciones y parámetros empleando los propios materiales de obra. Este nivel no se evaluará en esta etapa debido a la necesidad de elementos de laboratorio complejos.
- Nivel 2: Se utilizan correlaciones con otras propiedades de los materiales determinadas en laboratorio o *in situ*, para obtener las ecuaciones constitutivas. Es apto para tránsito medio, rutas provinciales.
- Nivel 3: Se adoptan valores apropiados basados en la experiencia con muy pocos o ningún ensayo. Es apto para tránsito bajo, rutas secundarias.

Para el caso de los ensayos realizados en el sector de obra, vamos a estudiar los niveles 2 y 3 para obtener valores de forma indirecta mediante herramientas comunes de laboratorio.

### Cálculo con nivel 2

Para la estimación de los módulos Mr según criterios de este nivel, las constantes k1, k2 y k3 no se obtienen como en el nivel anterior (mediante regresiones efectuadas con los valores de los resultados de ensayo) sino que se estiman a partir de propiedades índices o fundamentales de los suelos como plasticidad, granulometría, densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo, la densidad seca y el contenido de humedad del espécimen durante el ensayo, etc.

Para este trabajo práctico se utilizaron las expresiones de cálculo propuestas a partir de la recalibración efectuada por la Universidad de Wisconsin (*TITI, H., 2007*) para suelos finos cohesivos y para suelos de granos gruesos no plásticos. Las mismas se transcriben a continuación:

Suelos finos cohesivos (subrasante de suelos finos, ecuaciones 1, 2 y 3):

$$k_1 = 226.3 - 3.43 * PI + 307.7 * \gamma_d - 3691 * \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}}\right) \quad [1]$$

$$k_2 = 0.30 - 0.013 * PI + 0.15 * \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}}\right) * \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} - 0\right) \quad [2]$$

$$k_3 = -1.0 + 0.036 * PI + 0.114 * \gamma_d - 3.26 \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}}\right) \quad [3]$$

Suelos de granos gruesos no plásticos (arenas, ecuaciones 4, 5 y 6):

$$k_1 = 8160.65 - 6.293 * P_{N^{e40}} - 13.567 * P_{N^{e40}} - 4930.51 * \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}}\right) * \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} - 0\right) \quad [4]$$

$$k_2 = 0.547 - 0.0003 * P_{N^{e40}} + 0.0082 * P_{N^{e200}} - 0.018 * (\omega - \omega_{opt}) - 0.001 * \omega_{opt} * \gamma_{dmax} \quad [5]$$

$$k_3 = 0.361 + 0.008 * P_{N^{e40}} - 0.00748 * P_{N^{e200}} - 0.114 * (\omega - \omega_{opt}) - 0.005 * \omega_{opt} * \gamma_{dmax} \quad [6]$$

Obteniendo finalmente el Mr: [7]

$$Mr_{N2} = k_1 * pa * \left(\frac{\theta}{pa}\right)^{k_2} * \left(\frac{\tau_{oct}}{pa} + 1\right)^{k_3} \quad [7]$$

Donde:

$k_1, k_2, k_3$  = son constantes de múltiple regresión evaluadas de pruebas de módulos resilientes

$p_a$  = presión atmosférica = 101.5 kPa,

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3 =$  tensión esférica (Se adopta un estado tensional con los siguientes valores de  $\sigma_d = 0,06$  MPa y  $\sigma_3 = 0,04$  MPa)

$\sigma_3$  = presión de confinamiento

$\tau_{oct}$  = tensión octaédrica = 0.01 MPa

$\omega$  = humedad

$\omega_{opt}$  = humedad óptima

$\gamma_d$  = peso específico seco

$\gamma_{dmax}$  = peso específico seco máximo

P = porcentaje que pasa el tamiz indicado

Para este caso nos basamos en las segundas ecuaciones debido a que la mezcla estabilizada se comporta más como una arena que como un suelo plástico. Con los datos brindados (tablas 1 y 2) por el laboratorio de la empresa EDECA S.A. localizado en Chapuy, provincia de Santa Fe (Argentina), se procedió a realizar los cálculos.

**Tabla 1.** Propiedades índices de la mezcla SAE

Humedad (%):	12.00
Peso Específico Seco (KN/m <sup>3</sup> ):	18.17
Peso Específico Seco máximo (KN/m <sup>3</sup> )	18.40
Humedad óptima (%)	11.20

**Tabla 2.** Granulometría reducida de la mezcla SAE

Tamiz N°	% pasa
4	100
40	94.2
200	68.8

Aplicando las ecuaciones anteriores se obtiene:  $k_1 = 1036.68$ ;  $k_2 = 0.86$ ;  $k_3 = -0.50$ .

Obteniendo luego el Módulo Resiliente para el Nivel  $Mr_{N_2} = 163.76 \text{ MPa}$ .

### Cálculo con nivel 3

Para la estimación de los módulos  $Mr$  según criterios de este nivel, se utilizan expresiones empíricas, por lo que hay tantas como estudios se efectuaron y solo son válidas y hasta cierto punto, para los materiales que se utilizaron para obtenerlas.

- $Mr_1 = 10 * CBR$
- $Mr_2 = 38 * CBR^{0.711}$
- $Mr_3 = 18 * CBR^{0.64}$

$Mr_1$ : Método de diseño SHELL (de Heukelomp and Foster - 1960).

$Mr_2$ : U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (de Green and Hall - 1975).

$Mr_3$ : Transport and Road Research Laboratory (TRRL) (de Lister - 1987)

Para este caso se obtuvo un  $CBR = 31\%$ , implicando los siguientes valores de  $Mr$ :

- $Mr_{1N_3} = 310 \text{ MPa}$
- $Mr_{2N_3} = 437 \text{ MPa}$
- $Mr_{3N_3} = 162 \text{ MPa}$

Vale aclarar nuevamente que este tipo de correlación corresponde a materiales NO LIGADOS. Como se desconoce específicamente el modo de caracterizar este compuesto, adoptamos estas relaciones para poder llegar a valores razonables.

Se puede afirmar que lo que se obtuvo de ambos niveles se asemeja bastante, dando prioridad siempre a los primeros niveles en cuanto a confianza de resultados. De todas formas para asemejarnos al comportamiento de un estabilizado granular los valores de Módulos Resilientes tendrían que acercarse más a 250 MPa y no estar en el orden de los 160 MPa. Por eso, a futuro sería conveniente volver a realizar este estudio pero con otro tipo de arena (más gruesa) o aumentando la cantidad de la misma en la mezcla.

### Módulo Dinámico para materiales LIGADOS

Numerosas son las propiedades de interés de las mezclas asfálticas usadas en pavimentación: módulo de deformabilidad, comportamiento a fatiga, resistencia a la acumulación de deformaciones permanentes y resistencia a la tracción. Entre ellas, el módulo de deformación o más brevemente el módulo dinámico de las mismas, es una de las que presenta mayor interés por su significación en los procesos de diseño estructural de los pavimentos flexibles. El módulo dinámico de las mezclas asfálticas determina la distribución de tensiones y deformaciones en todas las capas componentes de la estructura vial y se vincula estrechamente con la valoración del deterioro por fatiga y acumulación de deformaciones permanentes.

El módulo dinámico ha sido propuesto como el ensayo simple de valoración del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas aplicable en la dosificación, el control de

calidad y el análisis de la influencia de distintos factores de formulación para este tipo de materiales.

Los métodos de diseño en la *Guía AASHTO 2002 para el Diseño de Estructuras de Pavimentos Nuevas y Rehabilitadas*, están basados en principios en los cuales la respuesta del pavimento debe tomar en cuenta propiedades fundamentales de los materiales de las distintas capas componentes. Entre ellas, la propiedad más importante es el módulo dinámico de las mezclas asfálticas. Esta propiedad representa las características de rigidez del material, dependiente de la temperatura y la frecuencia (o el tiempo) de aplicación de las cargas.

Para este caso, el material no se estudió como ligado debido a la complejidad de los ensayos referidos al nivel 2 de mezclas asfálticas. A futuro sería conveniente realizar dicha investigación, y poder así comparar resultados con los materiales no ligados.

### 5. ESTUDIOS A REALIZAR EN LABORATORIOS CENTRALES

Las mezclas elaboradas deberán evaluarse en laboratorio según los siguientes ensayos:

- Ensayo Triaxial Dinámico para obtención de Módulo Resiliente (figura 6).



**Figura 6.** Ensayo triaxial dinámico para medida del módulo resiliente en suelos y materiales granulares.

- Ensayo de Tracción Indirecta por compresión Diametral para la obtención del Módulo Dinámico (figura 7).



**Figura 7.** Equipo para medida del módulo dinámico a compresión diametral de materiales asfálticos.

En este punto utilizamos el nivel 1: se realizan ensayos de laboratorio o *in situ* para determinar las ecuaciones constitutivas del material. Es para tránsito alto, rutas nacionales y autopistas.

En todos los casos, las probetas deben ser compactadas en forma estática y a doble pistón hasta obtener la densidad del Proctor Normal. El curado se realiza siempre a temperatura ambiente hasta alcanzar la humedad residual deseada (humedad a la cual se supone que se encuentra la mezcla a la hora de trabajarse en obra para la conformación de la capa).

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados que se obtengan del Módulo Resiliente y Módulo Dinámico (para los tres niveles de jerarquización), se deberá realizar una comparación para determinar cuáles se asemejan más entre sí. Para el caso del Módulo Dinámico solo se plantean dos niveles, pero dentro del segundo nivel hay varias expresiones que nos permiten su obtención, pudiendo utilizarlas en su totalidad y poseer así una mayor cantidad de resultados.

**En caso de que, los resultados de los distintos niveles de Módulo Resiliente se asemejen más, el material deberá tratarse como NO LIGADO.**

**Por el contrario, si los resultados de los distintos niveles de Módulo Dinámico se asemejan más, el material deberá tratarse como LIGADO.**

**En caso de que se cumpla el primer supuesto, el Módulo Resiliente será el utilizado a la hora de efectuar un diseño estructural; en caso de cumplirse el segundo, se utilizará el Módulo Dinámico.**

Para este caso puntual, a modo de sencillez se optó por evaluar al material como no ligado, efectuando solamente los ensayos correspondientes al módulo resiliente para niveles 2 y 3. Con estos resultados se puede ejemplificar un caso y poder continuar con el estudio de esta mezcla en todos sus puntos.

Los ensayos de nivel 1 de ambos módulos y los de nivel 2 de Módulo Dinámico se efectuarán a futuro en Argentina para poder así estudiar el comportamiento del material con todas las variables posibles.

Una vez definida la tipología del material, para que el diseño estructural a través de un programa de cálculo mecánico sea correcto, es primordial la calidad y representatividad de los datos de ingreso. Es necesario contar con datos de muy buena calidad ya que, cuanto mejores sean éstos, mejor será el diseño proyectado.

En definitiva, es importante destacar el impacto económico que puede generarse a partir de una incorrecta caracterización de los materiales componentes.

## 7. EJECUCIÓN DE CAPAS ESTABILIZADAS

En este sentido, es importante remarcar que gran parte del éxito en la ejecución de un Suelo-Arena-Emulsión radica en las cualidades obtenidas en el mezclado, ya sea previamente del suelo con la arena, como de la mezcla de ambos con la emulsión asfáltica. De esta forma, unos resultados óptimos han de obtenerse siempre y cuando se respeten los siguientes aspectos:

- Realizar un correcto desmenuzamiento del suelo
- Proveer al suelo arena de la suficiente humedad para el mezclado con la emulsión
- Desarrollar una importante energía de mezclado

De hecho, una falta de desmenuzamiento del suelo generará, además de una heterogeneidad en la mezcla suelo arena, la existencia de nódulos de suelo causantes de zonas de debilidad resistente.

Con respecto a la humedad de mezclado, las cantidades de agua necesarias para lograr resultados óptimos están íntimamente relacionadas tanto con la energía de mezclado, como con las características de la emulsión asfáltica. En este sentido, menores energías requieren de una mayor humectación del material, mientras que a su vez el uso de emulsiones catiónicas, con la posibilidad de regular el corte de la emulsión mediante los correspondientes aditivos, permite la reducción de la humedad de mezclado.

De esta forma se fundamentan los importantes porcentajes de humedad necesarios históricamente para el mezclado, que iban desde casi el 100% por encima de la humedad óptima cuando la mezcla se hacía exclusivamente con motoniveladora (con aporte de muy baja energía), reduciéndose a medida que se disponía de equipamientos capaces de proveer una mayor energía, como los *Pulvimixers* o las máquinas de una sola pasada. Lo mismo sucedía con respecto a las emulsiones, inicialmente de tipo aniónico donde la necesidad de retardar al máximo el corte de las

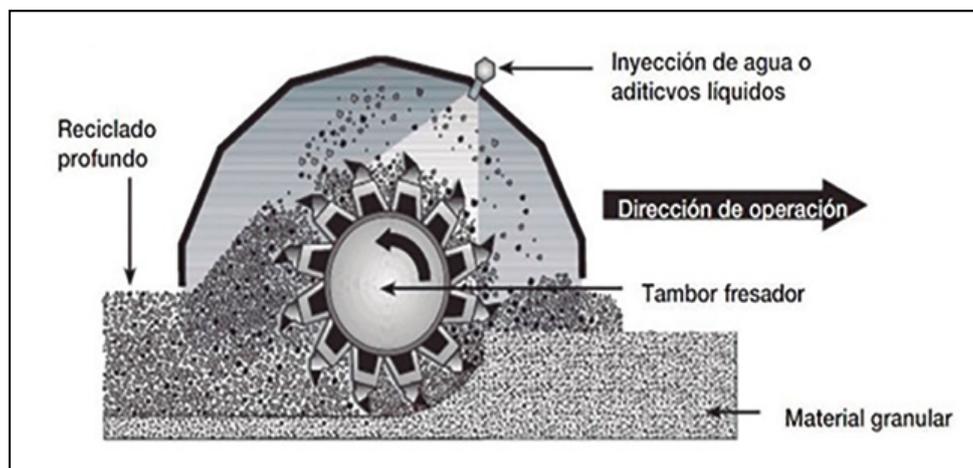


Figura 8. Rotor fresador-mezclador de un equipo para reciclado *in situ*.

mismas, requería de la incorporación de fuertes dosis de agua (Enmaccora, Hillar & otros, 2000).

Hoy por hoy, ambos condicionamientos se ven reducidos en forma importante. Por un lado la utilización de plantas de mezclado continuas con alta energía, sumado a la posibilidad de disponer de emulsiones catiónicas con regulación de corte, permiten realizar mezclados con humedades que tienden a acercarse cada vez más a la óptima de compactación. De ésta forma el aspecto conflictivo del proceso constructivo del suelo-arena-emulsión, es decir el periodo de pérdida de humedad entre el mezclado y la compactación, es posible de ser reducido a su mínima expresión. Con ello, la posibilidad de compactar la capa en un tiempo cercano al de extendido de la misma acerca mucho el proceso constructivo a las tipologías convencionales.

A los conceptos vertidos, ha de sumarse otro aspecto de gran relevancia, consistente en la proliferación en los últimos años de equipos recicladores muy versátiles, capaces de mezclar *in situ* y en una sola pasada, con energías similares a las de una planta moderna y obteniendo resultados de elevada homogeneidad (figura 8).

Estos equipamientos, utilizados entre otros casos para la estabilización de suelos con cemento, cal o ligantes bituminosos (figura 9), permiten obtener altas relaciones beneficio-costos, reforzando aún más las bonanzas del material.



Figura 9. Perfilado del material luego de haberse mezclado con el estabilizante.

## 8. DISEÑO Y ANÁLISIS DE COSTOS

Con referencia a los costos del material, se realiza una evaluación comparativa entre el costo de una estructura construida con base de SAE y el de una base típica de un estabilizado granular cementado.

Se estudiarán ambas mezclas mediante su Módulo Resiliente, debido a que es el único parámetro que se pudo obtener mediante correlaciones empíricas, en este trabajo. Como mejora a futuro, una vez que se obtenga el Módulo Dinámico para nivel 2, está previsto utilizarlo también para el estudio de este apartado.

En primer lugar, se debe hacer un diseño preliminar, de modo tal que permita aproximar ambas bases a materiales con módulos resilientes similares y observar el comportamiento de las mismas.

Se estudia este comportamiento mediante el programa "BackViDe" (normativa AASHTO 2002), brindado por la cátedra de Diseño Estructural de Pavimentos, perteneciente a la Maestría en Ingeniería Vial de la Universidad Nacional de Rosario. Con este se va a poder predecir la vida útil de la carretera en función de cada base utilizada.

El primer análisis es con la base granular, comúnmente utilizada. En la figura 10, se contempla la duración en años del pavimento en función de los espesores de la capa de rodadura y de los módulos propuestos. El diseño estructural se da como válido cuando, se verifica una duración del paquete de 10 años sin intervenciones.

El estabilizado granular verifica las exigencias de duración establecidas, si se lo protege con aproximadamente 15 cm de mezcla asfáltica por encima (cantidad usada en Rutas Provinciales de Santa Fe).

El segundo análisis se lleva a cabo con el estabilizado SAE. Utilizando el resultado del Módulo Resiliente obtenido en el nivel 2; y el mismo paquete y solicitaciones del caso anterior, se procede al estudio de la vida útil.

Para este caso, dependiendo también del módulo y espesor que se le asigne a la carpeta asfáltica, la estructura nos garantiza al menos 7 años sin la existencia de fisuras (figura 11).

A pesar de que los resultados del diseño no son del todo favorables (inferiores a los de un estabilizado granular), se debe tener en cuenta que a futuro se deberían estudiar nuevamente las cantidades de suelo y de arena. Volviendo luego a realizar el ensayo CBR obteniendo

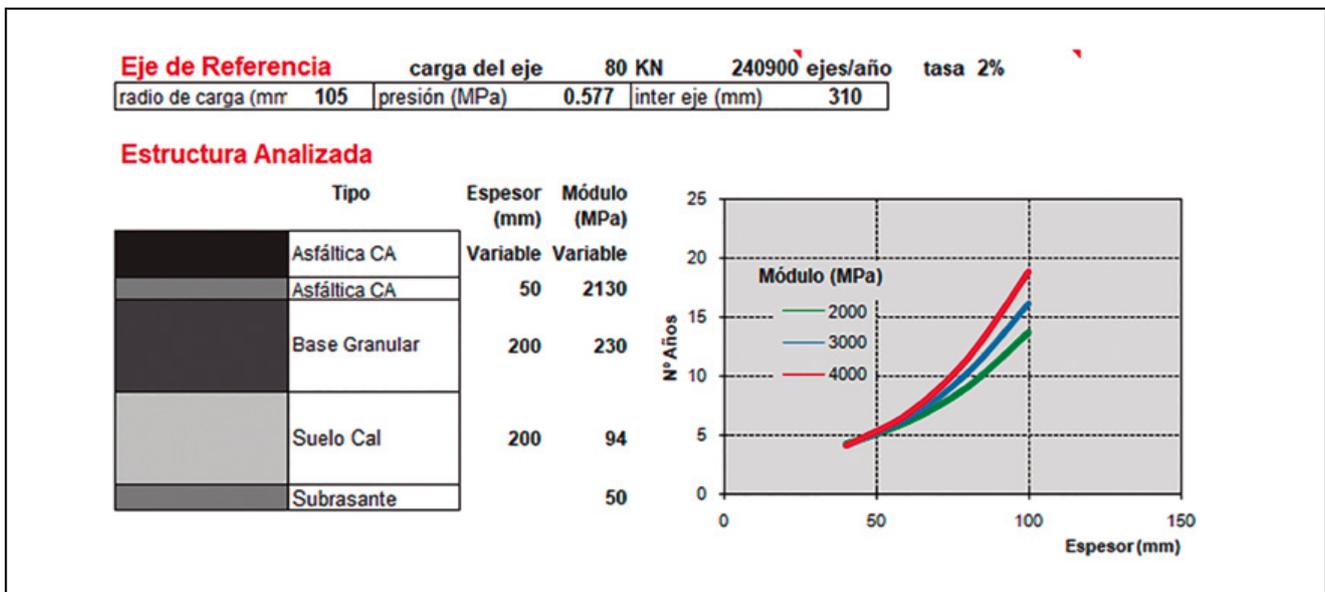


Figura 10. Resultados del Análisis Estructural (Modelo Estabilizado granular).

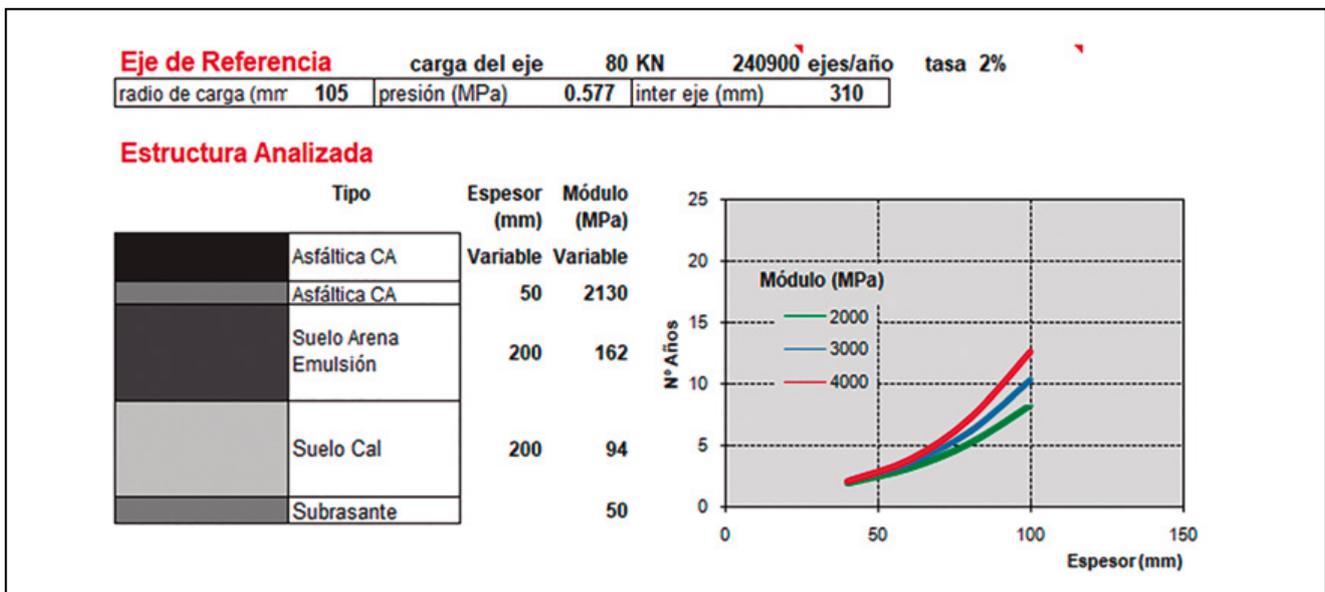


Figura 11. Resultados del Análisis Estructural (Modelo Estabilizado SAE).

valores más cercanos al 50%, que garanticen que el material pueda ser utilizado como base. Estas modificaciones van a mejorar también su vida útil cuando se carguen los datos en el programa. A su vez la variación de porcentajes entre suelo y arena no va a modificar demasiado en los costos. Por tanto, podemos dar como válido este diseño para efectuar una comparación económica y analizar resultados

Los costos para este trabajo se llevaron a cabo en la oficina central de la empresa constructora EDECA S.A. utilizando valores actualizados de mercado y aplicando los rendimientos correspondientes para poder llevar a cabo esta comparación.

Para el caso del SAE, se obtiene un valor unitario, que incluye mano de obra y materiales, de **51.16 €/m<sup>3</sup>**

Por el otro lado, para un estabilizado granular se obtiene un valor unitario de **64.02€/m<sup>3</sup>**

Si comparamos ambos valores se concluye que el costo del SAE es un 20% menor que el de un estabilizado granular cementado convencional.

De estos costos consultados con la bibliografía, más lo analizado anteriormente en laboratorios de obra, laboratorios centrales y nuevas tecnologías para la ejecución de un estabilizado de Suelo-Arena-Emulsión, se puede afirmar que este material puede aprovecharse para uso de bases y sub-bases de firme. Se deben ajustar los porcentajes correspondientes a la arena y suelo como se mencionó anteriormente para llegar a una mejor aproximación.

Esta variación no va a tener mucha influencia en los costos finales de cada estabilizado debido a que los valores unitarios de suelo y arena se asemejan.

### 9. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se puede decir que el material es apto para su uso en base o sub-base, aunque sí hubiese sido conveniente obtener valores de Módulos Resilientes mayores para poder afirmar que el mismo se va a comportar correctamente en la base de un pavimento. Esto se puede lograr aumentando el porcentaje de arena en

la mezcla, o utilizando una con mayor módulo de fineza. De todas formas, los materiales empleados son APTOS según los reglamentos de la Dirección Nacional de Vialidad, y sería cuestión entonces de obtener la correcta cantidad de cada uno y aproximarnos a valores de Módulos Resilientes del orden de los 250 MPa.

Junto con esto, se debe profundizar en su estudio como material ligado mediante los ensayos descritos en los nivel 2, para así poder también concluir su comportamiento.

A pesar de esto, los ensayos anteriores deben corroborarse con los indicados en la segunda etapa (nivel 1) al menos una vez. Estos últimos son los que someten al material a condiciones más reales de comportamiento. Según las bibliografías consultadas los ensayos mencionados fueron los de mayor aproximación.

En caso de que se encuentren mayores similitudes en los distintos niveles de Módulos Resilientes el material deberá tratarse como NO LIGADO. Por el contrario, si las similitudes son provenientes del Módulo Dinámico, el material se comporta como LIGADO. La tipología que de mayor aproximación será la que se va a emplear a la hora de efectuar el diseño estructural.

Por otro lado, se observa que el gran avance en tecnologías para la ejecución de capas estabilizadas es muy favorable para este caso. Se pueden trabajar con humedades menores a las utilizadas en de los métodos convencionales, lo cual reduce los tiempos de curado. Es el caso del uso de equipos de reciclado, y sistemas avanzados de inyección de ligantes. También favorece el empleo de nuevas emulsiones que posibilitan la ejecución de los trabajos sin previa separación de fases en el material bituminoso.

Es fundamental seleccionar cuidadosamente los materiales, y lograr siempre una buena pulverización en el mezclado de modo tal que permita obtener una mezcla homogénea. Suelos con excesiva plasticidad no son favorables para estos trabajos.

Finalmente y cumplimentando con el último objetivo planteado, el Suelo Arena Emulsión reduce los gastos económicos en un 20 % cuando se efectúa su comparación con un estabilizado a base de ligantes hidráulicos, según lo que se observa del análisis. A pesar de que se deba reestructurar el estabilizado SAE para obtener mejores resultados, estos no van a producir gran variación en los costos realizados.

El estabilizado Suelo-Arena-Emulsión, es un material que puede traer grandes mejoras a futuro, tanto económicas como medioambientales. Una forma de mejorar estos estudios es, como bien se ha dicho, volviendo a realizar estos ensayos con distintos porcentajes de suelo-arena. También se puede estudiar el comportamiento no solo con la

humedad óptima, sino observar cómo trabajan los materiales con humedades mayores y menores.

Por más que los materiales sean aptos, quizá se puedan encontrar yacimientos de mejores calidades de modo que se obtengan arenas de mayor módulo de fineza o suelos de tipo A-3 o A-2, que mejorarían notablemente el comportamiento de la mezcla.

## 10. REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (2017). *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials (AASHTO T 307-99)*. Washington, DC: AASHTO

Cassan, R., Angelone, S., y Martínez, F. (2005). Características mecánicas de estabilizados con ligantes hidráulicos para el diseño de pavimentos. *XIV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Buenos Aires*. Disponible en: <http://imae.fceia.unr.edu.ar/eventos/detalle/63/laboratorio-vial>

Ermaccora, E., Hillar, P., y otros (2000). *DPV SANTA FE. Estabilizados de suelo arena y emulsión en la provincia de Santa Fe*. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/216880680/Suelo-Arena-Emulsion>

Poncino, H. (1990). *Suelo Arena Emulsión. XVI Reunión del Asfalto. Comisión Permanente del Asfalto, Buenos Aires*. Disponible en: <http://imae.fceia.unr.edu.ar/eventos/detalle/63/laboratorio-vial>

Quiroz Vargas, W.F. (2017). *Comparación entre la estabilización de suelos con emulsión asfáltica, y la estabilización de suelos con asfalto y diesel para determinar cuál estabilización proporciona mayor densidad aparente y relación de soporte CBR*. Trabajo de titulación Ingeniero Civil. Ambato (Ecuador): Universidad Técnica de Ambato. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/25753/1/Tesis%201133%20-%20Quiroz%20Vargas%20Washington%20Fernando.pdf>

Shell International Petroleum Company (1978-1985). *Shell Pavement Design Manual*. London: Shell. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n31/n31a04.pdf>

Titi, H. (2007). *Evaluation of Resilient Modulus from Basic Soil Properties*. Milwaukee (Wisconsin/EEUU): Department of Transportation and University of Wisconsin. Disponible en: [https://pdfs.semanticscholar.org/92e6/2174276fa230dfba07bd79c4b307985b03a3.pdf?\\_ga=2.187789352.1631995828.1582210406-1405637110.1582210406](https://pdfs.semanticscholar.org/92e6/2174276fa230dfba07bd79c4b307985b03a3.pdf?_ga=2.187789352.1631995828.1582210406-1405637110.1582210406)

You, Z., Goh, S.W., y Dai, Q. (2011). *Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt*. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University. Disponible en: [https://www.michigan.gov/documents/mdot/MDOT\\_Research\\_Report\\_RC1556\\_372525\\_7.pdf](https://www.michigan.gov/documents/mdot/MDOT_Research_Report_RC1556_372525_7.pdf)