

Caracterización dinámica de estabilizados suelo-arena-bitumen

Dynamic Characterization of Stabilized Soil-Sand-Bitumen

Agustín Azanza^{1*}, Fernando Martínez², Luis Zorzutti³, Silvia Angelone⁴

Resumen

Ante la necesidad de diseñar bases estabilizadas con materiales locales que eviten el aumento de transporte y cargas por las carreteras se analiza el uso de estabilizados del tipo Suelo-Arena-Bitumen (SAB).

En el presente trabajo se caracteriza el comportamiento mecánico de dos tipos de estabilizados: Suelo-Arena-Emulsión (SAE) y Suelo-Arena-Asfalto Espumado (SAAE). Se investigan los procesos de diseño de las mezclas, en particular diversos tipos de curado con el objetivo de encontrar el que mejor se adapte a su vida de servicio, y la caracterización dinámica de los mismos a través de su Módulo Resiliente.

Se realiza una evaluación comparativa estructural con estabilizados granulares y un análisis de costes con el fin de justificar su uso como material de base de pavimentos.

Palabras clave: emulsión, asfalto espumado, estabilizados, módulo resiliente, bitumen, suelo, arena.

Abstract

Given the need to design stabilized bases with local materials that avoid the increase in transport and loads on the roads, the use of stabilized Soil-Sand-Bitumen (SAB) is analyzed.

In the present work the mechanical behavior of two types of SAB is characterized: Soil-Sand-Emulsion (SAE), and Soil-Sand-Foamed Asphalt (SAAE). The design processes of the mixtures are examined, in particular various types of curing with the purpose of finding the one that best suits in life service, and the dynamic characterization of the same through its Resilient Module.

A structural comparative evaluation is carried out with granular stabilized, and then a cost analysis in order to justify its use as pavement base material.

Keywords: emulsion, foamed asphalt, stabilized, bitumen, resilient module, soil, sand.

1. INTRODUCCIÓN

El litoral argentino es una zona que tiene la particularidad de poseer subrasantes de baja capacidad portante con predominio de suelos limo arcillosos (A-6 o A-7 de acuerdo a la clasificación AASHTO). Es por eso que es necesario recurrir continuamente a estabilizaciones de suelos de diversos tipos. Las más utilizadas son con cal, cemento y/o agregados pétreos. El uso de este tipo de agregados, se ve limitado, debido a la gran demanda, su poca oferta y al elevado costo del transporte. Las canteras de emplazamiento de dicho material, son ajenas a la zona en estudio, encontrándose a más de 300 km de distancia.

Es por eso que se encara el estudio de las estabilizaciones de los suelos con asfalto o productos bituminosos, buscando optimizar al máximo los recursos que posee este territorio.

En base a un artículo previo sobre el estudio de Suelo-Arena-Emulsión (SAE) de Azanza y Angelone [1] que

plantea el promover el uso de este tipo de estabilizados es que se amplía esta investigación también a Suelo-Arena-Asfalto Espumado (SAAE). Este tipo de estabilizados plantea aprovechar las propiedades cohesivas de los suelos finos, la fricción de las arenas y la estabilidad que le da el bitumen al no permitir el acceso del agua que disminuiría la resistencia del suelo-arena. El bitumen no impermeabiliza la mezcla solo reduce la cantidad de agua que ingresa por los poros de la mezcla.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente artículo es la adopción de protocolos de dosificación, control en obra y caracterización dinámica de mezclas de Suelo-Arena-Bitumen o BSM (Bitumen Stabilized Materials por su designación en inglés), como base y/o sub-base de pavimentos flexibles, abarcando tanto a emulsiones como asfalto espumado, Suelo-Arena-Emulsión (SAE) y Suelo-Arena-Asfalto Espumado (SAAE) [2].

Para afrontar este trabajo se divide el problema en cuatro etapas de estudio:

1. Definir un esquema básico para el diseño y dosificación de este tipo de estabilizados, mediante ensayos simples y estudiando las ventajas que trae el empleo de emulsiones catiónicas superestables de última generación y del asfalto espumado. Se es-

* Autor de contacto: agusazanza@hotmail.com

¹ Ingeniero de proyectos de caminos, en Bernard Gruppe ZT, Hall in Tirol 6060, Austria.

² Dr. Ing. Civil. Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario (Argentina).

³ Técnico en Equipos e instalaciones electromecánicas.

⁴ Dra. Ing. Civil. Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario (Argentina).

tudia cual es el curado requerido de las probetas previo a los ensayos, y se determinará el contenido de humedad adecuado para su caracterización dinámica.

2. Diseñar de la mezcla mediante la caracterización dinámica.
3. Realizar el diseño estructural mecanicista de un pavimento empleando estos materiales y verificando espesores.
4. Realizar un estudio económico.

3. CONCEPTO FUNDAMENTAL

Se destaca que la humedad residual o relativa del estabilizado implica un comportamiento mecánico disitinto del mismo, dado que el tipo de curado influye en el mismo tal como se menciona Poncino *et al.* [3], estableciendo humedades residuales del orden 60 % para suelos cohesivo y 25 % en suelos friccionales.

Por lo tanto, se define **humedad residual o relativa**, como aquella humedad que posee el estabilizado luego del lapso de tiempo destinado a su curado, se obtiene como un porcentaje de la humedad óptima [2].

El comportamiento mecánico de los estabilizados va a depender fuertemente del contenido de humedad residual y, por ende, de las condiciones de curado que se seleccionen para el estudio y/o caracterización del mismo.

Consecuentemente, es importante establecer en la presente investigación qué tipo de curado se va a proponer y seleccionar un procedimiento de diseño y control *in situ* de los estabilizados.

4. DISEÑO DE SUELO-ARENA-BITUMEN

El diseño de este tipo de estabilizados BSM consta de dos partes de una dosificación y de una caracterización dinámica de los mismos para poder definir el porcentaje de cada uno de los materiales intervinientes.

Para la dosificación de una mezcla de suelo arena se parte de la hipótesis que el suelo va a llenar los vacíos de aire que posee la arenay que el bitumen va a impedir el ingreso de agua a los poros manteniendo el contenido de humedad bajo.

Experimentalmente, se deben obtener los parámetros de cada material y, mediante el uso de las propiedades índices de suelos, encontrar dicha proporción.

Para este estudio se ha considerado un suelo seleccionado del tipo A-4 de la región y una arena silíceas del río Paraná, cuyas principales propiedades se detallan en las tablas 1 y 2 (los resultados de la mezcla suelo-arena).

Tabla 1. Clasificación de Suelos

Suelo seleccionado	Arena	
Clasificación	A-4 (6)	A-3
Límite Líquido	30.97	-
Límite Plástico	23.01	-
Índice de Plasticidad	8.00	-
Módulo de Fineza	-	1.89

Tabla 2. Mezcla Suelo-Arena

Material	%	Compactación (*)	ω_{op} (%)	$\rho_{secamax}$ (g/cm ³)
Suelo	35	T-99	19.50	1.653
Arena	65	T-180	3.90	1.593
Suelo-Arena	100	T-99	8.30	1.837

(*) Norma AASHTO T 99-01 YT 180-01 [4]

La humedad óptima del suelo va a ser fundamental para la obtención de la cantidad de asfalto a agregar.

Se van a estudiar tres estabilizados:

- Suelo-Arena (SA)
- Suelo-Arena-Emulsión (SAE)
- Suelo-Arena-Asfalto Espumado (SAAE)

Se utiliza una emulsión catiónica superestable cuyas características se detallan en la tabla 3, y un cemento asfáltico 70/100, tabla 4.

Tabla 3. Características de la emulsión asfáltica (Petroquímica Panamericana SA)

PRODUCTO: EMULSIÓN ASFÁLTICA CATIÓNICA SUPERESTABLE					
Características	Unidad	Mín.	Máx.	IRAM 6691	
Viscosidad Saybolt-Furol	25 ° C	s	-	50	6721
	50 ° C	s	-	-	
Residuo Asfáltico por Destilación	g/100g	60	-	6719	
Hydrocarburos Destilados	ml/100 ml	-	-	6719	
Contenido de Agua	g/100g	-	40	6719	
A asentamiento	g/100g	-	5	6719	
Residuo sobre tamiz	g/100g	-	0.1	6717 y 6.1	
Recubrimiento y resistencia al agua	-	-	-	6679	
Mezcla con cemento	g/100g	-	2	6718	
Mezcla con arena silíceas y agua	-	-	-	6.3	
Mezcla de lechada asfáltica en clima cálido	-	Debe Cumplir		6.4	
Carga de partícula	-	Positiva		6690	
Características	Unidad	Mín.	Máx.	IRAM	
Penetración del residuo	0.1 mm	45	60	6576	
		65	100		
Ductilidad	cm	80	-	6579	
Solubilidad en 1,1,1 - tricloro etano	g/100g	95	-	6585 y 6.2	
Ensayo de Oliensis	-	Negativo		6594	

Tabla 4. Características del cemento asfáltico (C&L Combustibles y Asfaltos SA)

PRODUCTO POR PENETRACIÓN 70-100			
Ensayos	Método	Unidad	Bitumen
clasificación s/IRAM 6604	-	-	Tipo III
Penetración 25 °C, 100g, 5s	IRAM 6576	0.1 mm	70-100
Índice de penetración	IRAM 6576	-	-3
Ductilidad, 25 °C 5 cm/min	IRAM 6579	cm	>100
Densidad relativa a 25/ 25 °C	IRAM 6586	-	>0.99
Punto de inflamación, COC	IRAM 6555	°C	>230
Solubilidad en tricloroetano	IRAM 6585 y 6.3	%	>99
Ensayos tras película delgada (RTFOT)	-	-	-
Pérdida por calentamiento, 163 °C, 5h	IRAM 6582 Y 6.2	%	<0.8
Penetración retenida, 25 °C	IRAM 6576 y 6.2	%	>50
Ductilidad, 25 °C, 5cm/min	IRAM 6579	cm	>75
Ensayo de Oliensis	IRAM 6594	-	Negativo

Con el porcentaje de agua en la emulsión (40 %), el contenido de humedad óptimo de la mezcla (8.30 %) y la humedad inicial de la mezcla se calcula el porcentaje de agua a agregar usando las ecuaciones (1) y (2), y en la tabla 5 se indican los resultados. Los mismo son del mismo orden que los usados en otros trabajos previos considerados como referencia [3, 5].

$$F = \omega_{\text{inicial}} + E \times Ae + A \quad [1]$$

$$E = (\omega_{\text{op}} - A) / Ae \quad [2]$$

Donde:

F: Porcentaje total de fluidos

ω_{op} : Humedad óptima del suelo-arena (%)

ω_{inicial} : Humedad inicial (%)

E: Porcentaje de la emulsión (%)

Ae: Porcentaje de agua en la emulsión (%)

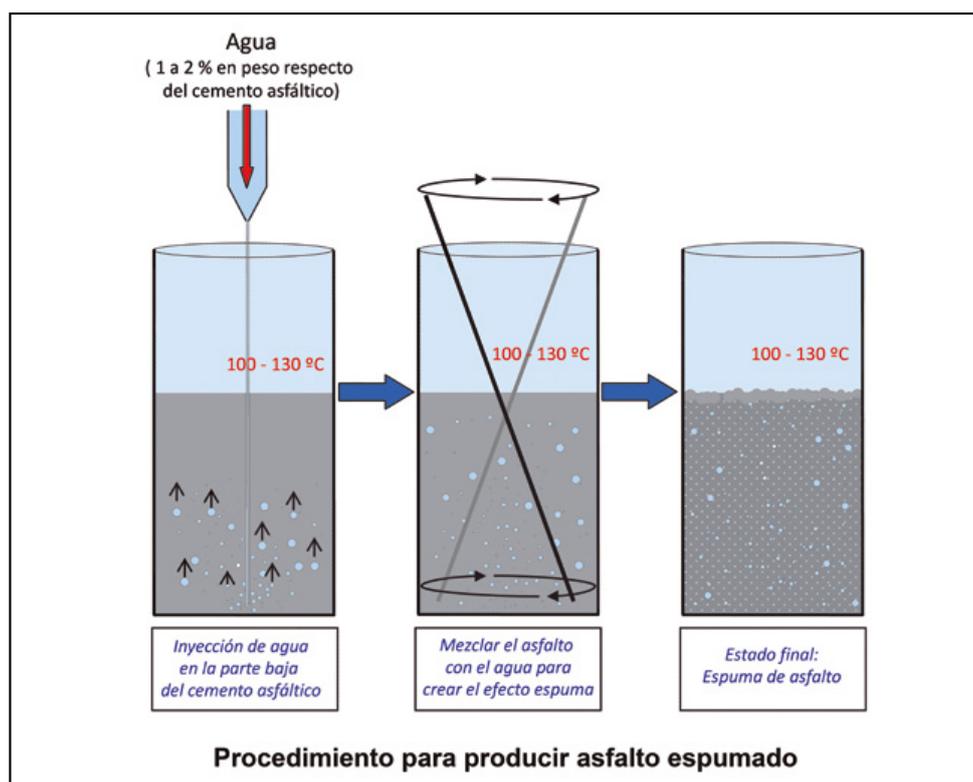
A: Porcentaje de agua a agregar (%)

Tabla 5. Porcentaje óptimo de emulsión

Cantidad de agua a agregar:	5.90%
% Emulsión	6.00%

Para el caso de la estabilización con asfalto espumado (AE), el *Manual Wirtgen* [6], indica el porcentaje óptimo de emplear en función de la granulometría de la mezcla, siendo el porcentaje óptimo de asfalto espumado correspondiente de 4.00 %. Se emplea el mismo asfalto base de la emulsión.

Para la preparación del asfalto espumado en laboratorio, es necesario disponer de equipos especiales de espumado y, al no disponer del mismo se llevó a cabo un espumado en forma “manual” con una metodología propuesta en la Universidad de Michigan [7] utilizando accesorios disponibles en cualquier laboratorio. El mismo se detalla en la figura 1. La razón de expansión lograda fue de 4 veces, muy por debajo de la que se obtiene con el equipo de espumado del orden de las 10 veces. Lo cual provoca dificultades en la homogeneización del asfalto dentro del Suelo-Arena.

**Figura 1.** Procedimiento para producir asfalto espumado [6].

Las probetas de los estabilizados BSM (SAE y SAAE) se confeccionan mediante el ensayo de “Compactación de Suelos” del Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad (Norma VN-E5-93) [4]. En caso de estabilizados granulares, se moldea mediante el compactador giratorio conforme con normativa AASHTO T312 y/o normativa EN 12697-31 “Superpave Procedure” [8].

Habiendo obtenido el porcentaje óptimo de betún, se moldean las probetas para obtener en los tres estabilizados en estudio la misma humedad, es decir, la humedad óptima que se obtuvo del Suelo-Arena (8.30 %).

Esta humedad va a ser considerada como el 100 % de la humedad residual. A partir de ello se van a referenciar los distintos tipos de curado a este valor, para obtener así las variaciones en el comportamiento del material (tabla 6) [2].

Tabla 6. Resultados de ensayos de Compactación de Suelos y Valor Soporte [3]

Material	$\rho_{secamax}$ (g/cm ³)	CBR (%)
Suelo-Arena (SA)	1.837	10.00
Suelo-Arena-Emulsión (SAE)	1.939	35.00
Suelo-Arena-Asfalto Espumado (SAAE)	2.004	15.00

5. ESTABILIZACIONES Y ENSAYOS

Para cada estabilizado se llevarán a cabo los ensayos y las normativas que se enumeran a continuación:

- Ensayo de Compresión Triaxial, **STT**. Según normativa IRAM 10529 [8].
- Resistencia a Compresión Simple, **UCS**. Según normativa VN-E33-67 [4].
- Resistencia a Tracción Indirecta por Compresión Diametral, **ITS**. Según normativa VN-E9-86 [4].
- Ensayo de **Capilaridad** de suelos. Según metodología del LEMaC [10].
- Ensayo de Módulo Resiliente, **Mr**. Según normativa AGPT/T-305 o AASHTO T307-99 [11].

El ensayo de compresión triaxial, más comúnmente conocido como **ensayo triaxial estático o simple (STT)**, es un método desarrollado para obtener los parámetros de corte: cohesión y ángulo de fricción del material que se ensaya de acuerdo a la teoría de falla de Mohr-Coulomb.

Si particularmente en laboratorios de obra no se dispone de un equipo triaxial, los parámetros de corte también pueden ser determinados a partir de los ensayos UCS e ITS. En la figura 2 se indica el procedimiento.

Este razonamiento tiene como fundamento principal que, con el valor de la **UCS**, se puede trazar uno de los dos círculos (considerando presión σ_3 de confinamiento como cero), partiendo del origen hasta la tensión de rotura por compresión simple σ_1 . En cambio, para el ensayo de **ITS** con una carga concentrada en el plano vertical, las tensiones teóricas a lo largo de los ejes horizontal y vertical resultan como se muestran en la figura 3.

Para el diámetro vertical, en la zona central de la probeta, se produce un estado biaxial de tensiones, donde la tensión vertical de compresión es 3 veces superior a la de

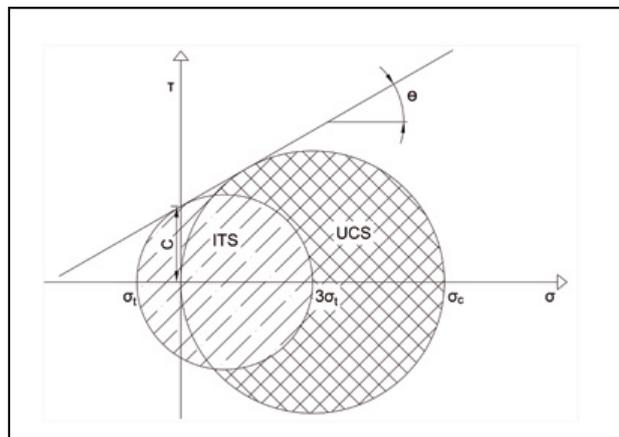


Figura 2. Circulo de Mohr para suelos.

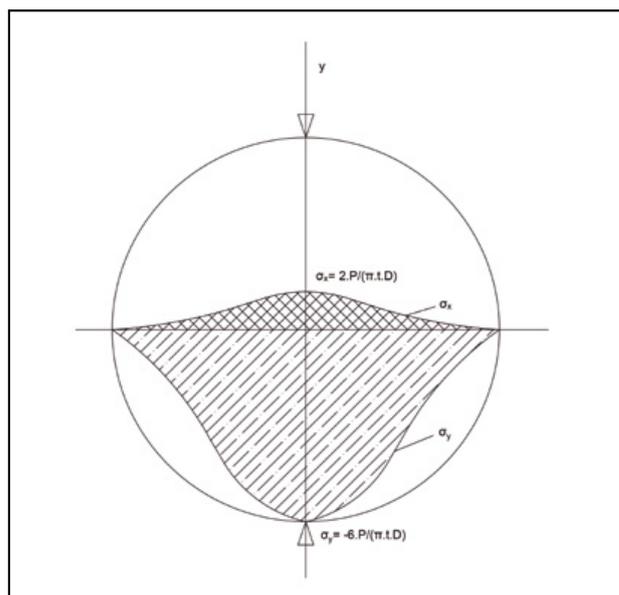


Figura 3. Distribución de esfuerzos teóricos sobre planos diametral y vertical para el ensayo de resistencia a tracción indirecta [12].

tracción horizontal generada [12]. Se adopta por ende que la tensión de compresión es tres veces superior que la propia de tracción a la cual se somete la probeta en el ensayo.

Para el ensayo de **capilaridad**, que no está normalizado, se aplica la metodología propuesta por el laboratorio LEMaC [10], para determinar los porcentajes de humedad absorbidos una vez curado el estabilizado y poder analizar su comportamiento en estructuras de pavimento sometidas a la acción del agua.

El **ensayo de módulo resiliente** con el equipo triaxial dinámico tiene como finalidad caracterizar en forma dinámica suelos o materiales no ligados, habiéndose utilizado el procedimiento de la normativa AASHTO T307-99 (figura 4). El valor del Mr determinado con este procedimiento permite reconocer el comportamiento no lineal a partir de su modelización mediante la ecuación constitutiva (3) y aplicarlas luego para analizar estructuralmente al pavimento en los métodos mecanicistas de diseño.

$$Mr/Pa = A \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^B \cdot \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^C \quad [3]$$

Donde:

Mr = módulo resiliente, en MPa.

τ_{oct} = tensión octaédrica, en MPa.

θ = primer invariante de tensiones (sumatoria de tensiones principales: $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) en MPa.

A, B, C = son constantes experimentales obtenidas por regresión.

P_a = Presión atmosférica (0.10 MPa).



Figura 4. Ensayo triaxial dinámico para medida del módulo resistente en suelos y materiales granulares (Laboratorio IMAE, Rosario, Argentina) [1].

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este punto se hace un análisis comparativo de los resultados de los distintos ensayos realizados para los estabilizados:

- Suelo-Arena (SA)
- Suelo-Arena-Emulsión (SAE)
- Suelo-Arena-Asfalto Espumado (SAAE)

Las condiciones de curado de cada estabilizado son las que se contemplan en la tabla 7. Se encuentran tres situaciones o métodos de curados bien claros. En primer lugar, el curado a temperatura ambiente que se lleva a cabo en un laboratorio de ambiente seco y temperatura variable entre los 22 y 25 °C (Amb). El segundo corresponde a un curado a 40 °C, para lo que se da uso al horno de secado de suelos. Finalmente se utiliza la cámara húmeda (CH), que mediante una serie de aspesores de agua mantiene una humedad ambiente superior al 98 % y con una temperatura de 25 °C.

Tabla 7. Estabilizaciones, curados y humedades

Material	Curado	Humedad (%)	Humedad Residual (%)
Suelo Arena Emulsión	72 Hs Amb	5.10%	61.45%
	168 Hs Amb	3.90%	46.99%
	72 Hs 40 °C	2.20%	26.51%
	CH	8.20%	98.80%
Suelo Arena	168 Hs Amb	3.33%	40.12%
Suelo Arena Asfalto Espumado	72 Hs 40 °C	1.19%	14.34%

Las figuras 5 y 6 muestran los resultados de los parámetros de corte para los distintos estabilizados y condiciones de curado obtenidos mediante el ensayo STT.

Los estabilizados poseen un ángulo de fricción interna ϕ entre 20° y 25° independientemente del tipo de curado y de la humedad, salvo el Suelo-Arena que tiene un ϕ igual a 44°. Para la cohesión se observa una notoria diferencia, implicando que las resistencias al corte de los estabilizados disminuye con el aumento del contenido de humedad.

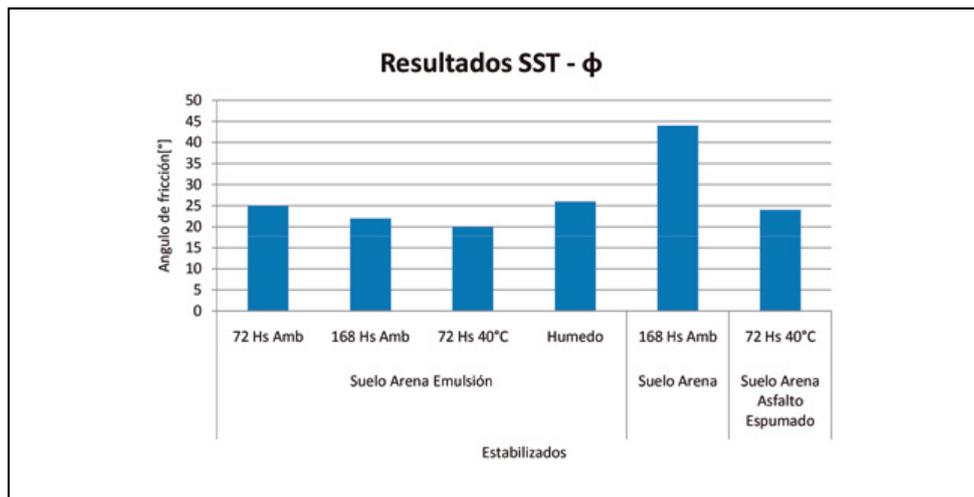


Figura 5. Ángulo de fricción obtenido en STT para todas las estabilizaciones.

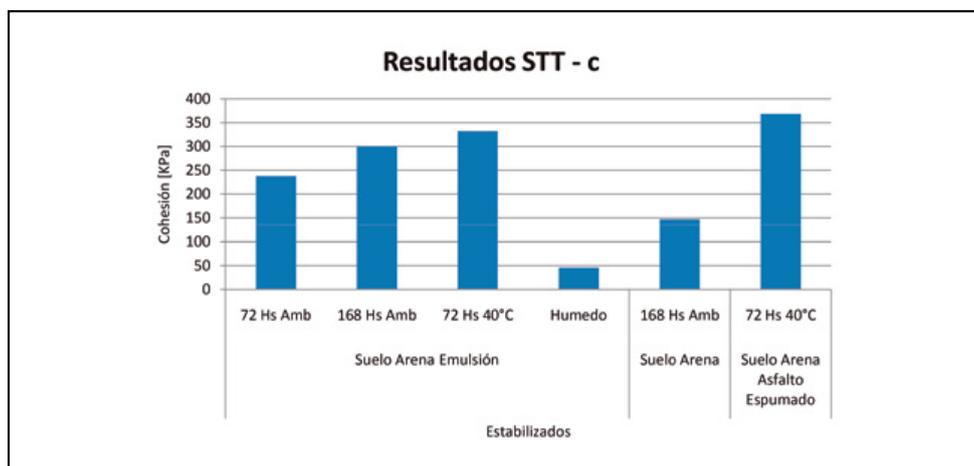


Figura 6. Cohesión obtenida en STT para todas las estabilizaciones.

De acuerdo a los valores de la tabla 8 Para un curado de 72 hs a 40 °C del TG2 [13], estos estabilizados calificarían como BMS3. Lo que significa que este material es un suelo tipo grava-arena estabilizado con un alto contenido de bitumen.

En lo que respecta, a la UCS verifican los valores mínimos establecidos por el Manual Wirtgen (700kPa para una probeta de 150 mm de diámetro) [6].

Según el TG-2 [13], en función de su ITS (tabla 8), para el curado establecido de 72 hs a 40 °C, el estabilizado SAB cumple holgadamente la condición BSM3.

Para todos los ensayos estáticos, cuando la probeta se la somete a un secado a 40 °C se observa una mayor resistencia del SAAE comparada con el SAE. Esto se justifica por el accionar de la arcilla, aportando una mayor cohesión cuando se encuentra en su estado seco (figura 7). Pero la metodología de espumación no es efectiva debido a que se obtienen valores de Razón de Expansión de aproximadamente un tercio de los óptimos. Como también valores de Vida Media bajos, implicando poco tiempo para que el asfalto se introduzca correctamente en el Suelo-Arena, y garantice una buena distribución del mismo dentro de la probeta.

Tabla 8. Clasificación de BSM en función a la ITS, según TG-2 [13]

Test	Specimen diameter	BSM1	BSM2	BSM3
ITS dry	100 mm	> 225	175 to 225	125 to 175
Cohesion (kPa)	70 mm	> 250	100 to 250	50 to 100
Friction Angle (°)	70 mm	>40	30 to 40	<30

En la figura 8 se comparan las líneas de falla de Mohr Coulomb obtenidas mediante el ensayo triaxial y la combinación de los ensayos UCS e ITS. De su comparación resulta que en todos los casos los valores de desviaciones y/o errores entre ambos procedimientos son del orden del 10 %. Por lo tanto, esta metodología es válida, verificando las teorías planteadas anteriormente y permitiendo su determinación en cualquier laboratorio de obra.

Se analizan también los resultados del ensayo de capilaridad. El procedimiento consiste en preparar tres probetas de cada material, curadas a 40 °C durante 72 hs con humedad residual igual a cero, y apoyarlas sobre una capa de arena saturada durante 7 días y tapadas. Diariamente se registra el incremento de la humedad (incremento de la masa de las probetas húmedas). En función de la humedad final se obtiene la Humedad Residual del estabilizado (tabla 9).

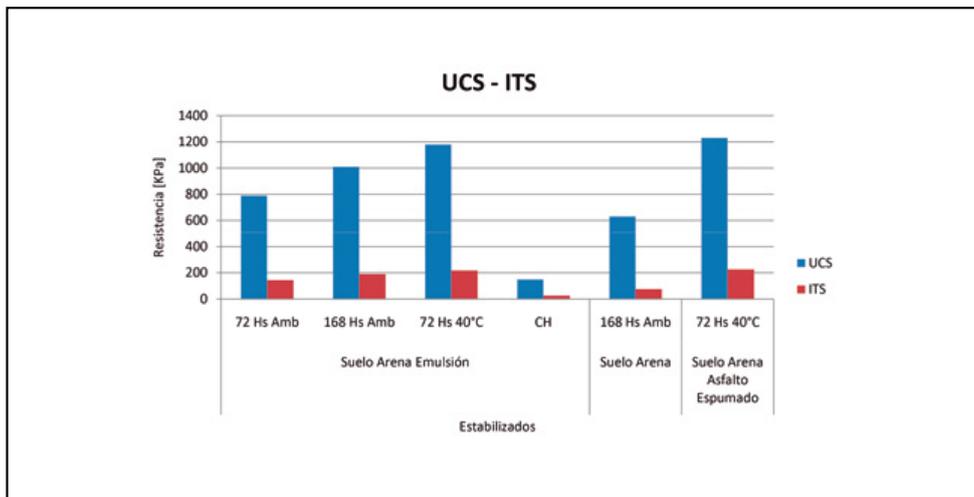


Figura 7. Ángulo de fricción obtenido en STT para todas las estabilizaciones.

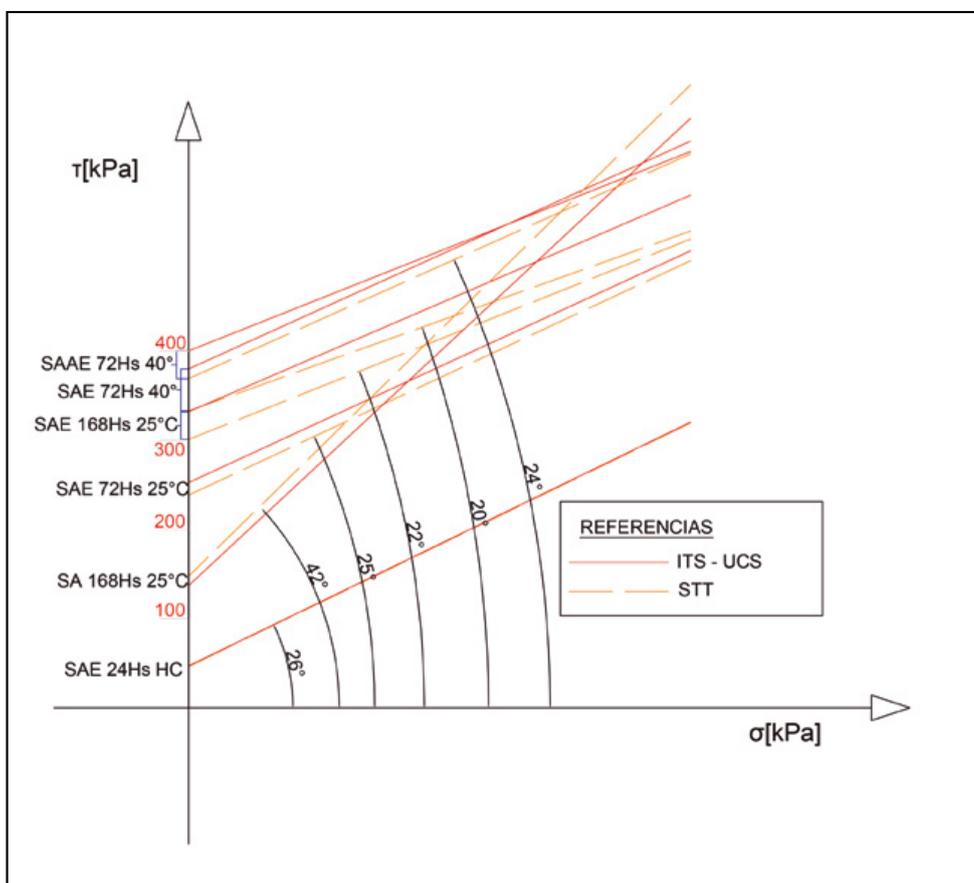


Figura 8. Línea de falla según criterio Mohr Coulomb para todas las estabilizaciones.

Tabla 9. Ensayo de capilaridad y humedades residuales

Material	Hr inicial	Hr final
SAE	0.00%	43.98%
SA	0.00%	100.87%
SAAE	4.50%	102.77%

Esta recuperación del SAAE va a implicar una caída en lo que respecta a la capacidad del material y se debe, como se dijo anteriormente, a que el asfalto no estaba homogéneamente distribuido dentro de la probeta.

Por otro lado, el estabilizado SAE tiene como gran ventaja que no recupera del todo su humedad, es más, el mismo en presencia de agua adquiere casi un 44 % de su

humedad residual y solo parte de la probeta se humedece tal como se observa en la figura 9. Esto es una ventaja, y se



Figura 9. Ensayo de capilaridad para probetas de SAE.

observa la impermeabilización que produce la emulsión al introducirse en la mezcla Suelo-Arena.

Al caracterizar el estabilizado SAE de manera dinámica mediante el **ensayo de módulo resiliente**, se moldea un total de tres probetas a densidad prefijada. Y dado que la humedad va a tener influencia, se fijan cuatro situaciones de estudio (tabla 10), siendo la condición de base o patrón el estabilizado SA con probetas moldeadas con su humedad óptima y curadas a 25 °C durante 24 hs en cámara húmeda (Mr1). Las restantes condiciones resultan:

Tabla 10. Condiciones de curado para ensayos de Mr de SAE

SAE		
Condición curado	Hr	Descripción
1 (Mr2)	99%	24 hs en cámara húmeda a 25 °C
2 (Mr3)	0%	72 hs a 40 °C [13]
3 (Mr4)	60%	24 hs a temperatura ambiente mas secado hasta lograr una pérdida del 40 % de la humedad óptima
4 (Mr5)	129%	Probeta sumergida en agua 24 hs luego de ser moldeada

Al caracterizar el estabilizado SAAE de manera dinámica, visto que la humedad va a tener una gran influencia, se fijan tres situaciones críticas (tabla 11).

Tabla 11. Condiciones de curado para ensayos de Mr de SAAE

SAAE		
Condición curado	Hr	Descripción
5 (Mr6)	100%	24 hs en cámara húmeda a 25 °C
6 (Mr7)	0%	72 hs a 40 °C [13]
7 (Mr8)	103%	Probetas ensayadas con condición 6 y luego sometidas al ensayo de capilaridad

En la tabla 12 se resumen los parámetros correspondientes a las ecuaciones constitutivas (ecuación 3) para todos los materiales examinados y las distintas condiciones de curado.

Se observa que los Mr dependen del tipo de curado, contenido residual de la humedad y el estado tensional. En las figuras 11 y 12 se muestran, para un estado de tensiones determinado, los valores de Mr.

El SA tiene un comportamiento de los suelos que poseen c y ϕ distinto de cero. El Mr disminuye con el tensor desviador y tiene un leve aumento con el primer invariante de tensiones.

Se debe destacar un cambio del comportamiento tensional cuando está húmedo o “seco”. En general, con

Tabla 12. Resultados de ensayos de módulo resiliente

	Mr1 (SA)	Mr2 (SAE)	Mr3 (SAE)	Mr4 (SAE)	Mr5 (SAE)	Mr6 (SAAE)	Mr7 (SAAE)	Mr8 (SAAE)
A	1275	1674	5640	8033	2387	1405	9605	1415
B	-2.48	-2.26	7.56	4.43	-4.38	-2.69	4.76	-4.64
C	0.44	0.50	-0.25	-0.33	0.91	0.32	-0.03	0.78
r2	0.65	0.93	0.94	0.57	0.94	0.71	0.92	0.82
$\sigma_d = 0.014$ MPa y $\sigma_3 = 0.042$ Mpa	127.51	172.80	849.21	968.34	246.56	133.30	1300.85	137.68
$\sigma_d = 0.070$ MPa y $\sigma_3 = 0.042$ Mpa	86.08	124.74	4083.01	2286.15	128.55	82.50	3644.30	64.92



Figura 10. Probetas de SAE antes (izq.) y después del curado (dcha.) impuesto por el TG-2 [13].

valores mayores los SAE y SAAE poseen la misma tendencia que el SA cuando las humedades residuales son altas. Pero cuando están secas (Hr= 0) la tendencia cambia los Mr, que aumentan significativamente en función del primer invariante de tensiones (θ).

Para el caso de los curados durante 72 hs a 40 °C (TG-2), se observa una gran similitud en ambos comportamientos. Pero la diferencia de ambos es producida por las probetas en condiciones cercanas a la humedad óptima (figura 12).

Para la condición 6, los valores de Mr7 se encuentran en un rango de 1000 MPa y 4000 MPa, similar a lo ocurrido con el SAE para la misma condición de curado 2 (Mr3).

Pero estas condiciones son para una humedad de valores casi nulos que no alcanzaría *in situ*. Además, si alcanza muy bajos contenidos de humedad es muy probable que la rigidez del material ante la aplicación de cargas provoquen la fisuración del mismo y, por lo tanto, un deterioro del módulo resiliente (disminución del mismo). Es por eso que, para el diseño estructural con este curado, van a descartarse módulos elevados. **En este estabilizado es aceptable medir el Mr para una condición de curado más conservadora correspondiente a una Hr 0 60 %.** El rango de Mr para esta condición de curado oscila entre 500 MPa y 1500 MPa (condición 3–Mr4). Este dato va a ser un valor de entrada para el diseño estructural de pavimentos.

A modo de experiencia, con la probeta sumergida en agua durante 24 hs (condición 4), se obtienen valores de módulo (Mr5), similares a la primera condición (Mr2), pero mayores que los brindados por el Suelo-Arena (Mr1).

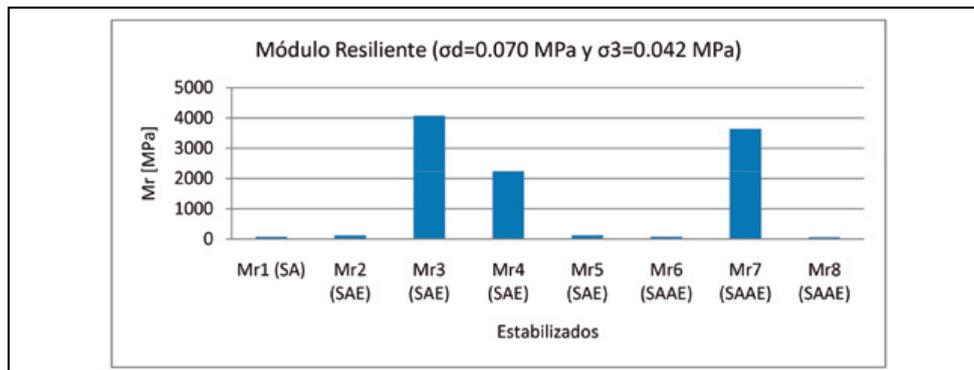


Figura 11. Módulos resilientes de SA, SAE y SAAE para todos los curados.

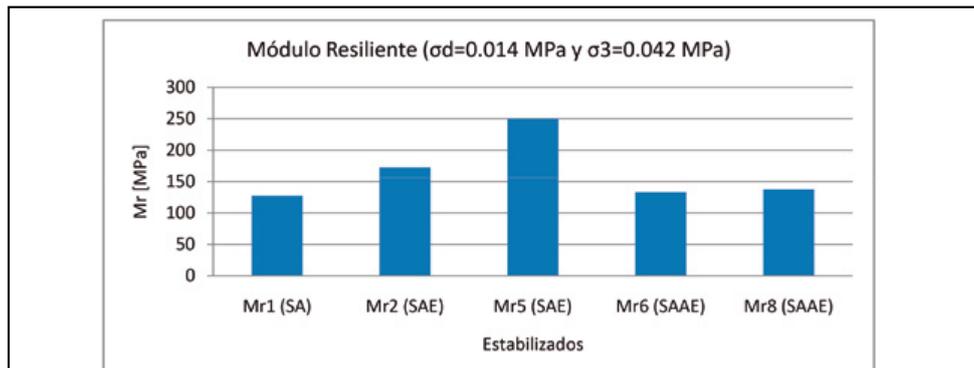


Figura 12. Módulos resilientes de SA, SAE y SAAE para condiciones húmedas.

Para las condiciones de curado 2 y 5, se comparan los módulos del SAE, SAAE y SA en condiciones húmedas, pudiendo apreciar la mejora que produce una buena dispersión del bitumen en la mezcla de los áridos en forma homogénea.

Finalmente se estudia el estabilizado SAAE, luego de haberse efectuado el ensayo de capilaridad de suelos, donde éste recupera más del 100 % del valor de su humedad óptima (partiendo de un valor nulo). En este caso, se reduce notoriamente el Mr del estabilizado SAAE, siendo incluso inferior que el SA para algunas tensiones.

A modo de conclusión para el SAAE, se menciona que, al haberse utilizado elementos rudimentarios para realizar la espumación del asfalto, el betún no logra penetrar correctamente en la mezcla.

En resumen, y como conclusión de los ensayos realizados sobre el Suelo-Arena-Emulsión, se aprecia una clara mejora en la adición del betún al estabilizado. Pero es fundamental que haya una reducción al menos del 40 % de la humedad óptima para que el estabilizado trabaje correctamente en un pavimento.

Es factible afirmar que el Suelo-Arena-Bitumen trabaja como un **suelo cohesivo** para humedades cercanas a la óptima de compactación. A medida que ésta disminuye progresivamente, se comporta como un **granular no tratado**, como se aprecia en los ensayos para una Humedad Residual del 60 %; y como material **ligado** con humedades cercanas a cero. Esta delimitación así determinada podrá tener modificaciones en función, fundamentalmente, del tipo de suelo a utilizar; no obstante, en todas las experiencias consultadas, las Humedades Residuales de las capas SAE encontradas en obra eran menores al 60 % [5].

7. DISEÑO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE COSTES

Con los datos que se obtienen de las caracterizaciones de los estabilizados, se procede a realizar el “Diseño Estructural de Pavimentos”, para poder apreciar su comportamiento en el paquete estructural de una ruta, según una carga de tránsito establecida.

Se estudia este comportamiento mediante el programa de Diseño Mecanicista “BackViDe” [14], de la Universidad Nacional de Rosario.

El análisis se va a dividir en tres etapas. En una primera, se va a estudiar el comportamiento del estabilizado SAE y SAAE (SAB) en condiciones de humedades residuales próximas al 60 %, con módulos obtenidos en el apartado anterior. En la segunda, se analizan los estabilizados en condiciones adversas de humedades cercanas a la óptima o humedades residuales de valores aproximados a 100 %. Finalmente, a modo de comparación, se va a estudiar el comportamiento de una base granular cementada, de uso habitual en rutas provinciales y nacionales del litoral argentino.

Para el análisis estructural se va a adoptar el siguiente paquete estructural, donde la única capa que va a cambiar sus propiedades es la correspondiente a la base (figura 13).

Paquete Estructural	Espesor
Concreto Asfáltico	0,05 m
Base Suelo-Arena-Bitumen	Variable
Sub Base Suelo A-4	0,20 m
Subrasante Mr = 40 MPa	

Figura 13. Paquete estructural SAB.

En el primer análisis, se usa la ecuación constitutiva (ecuación 3) para el Mr del SAB. Se estudia un rango variable de módulos desde 500 MPa a 1500 MPa.

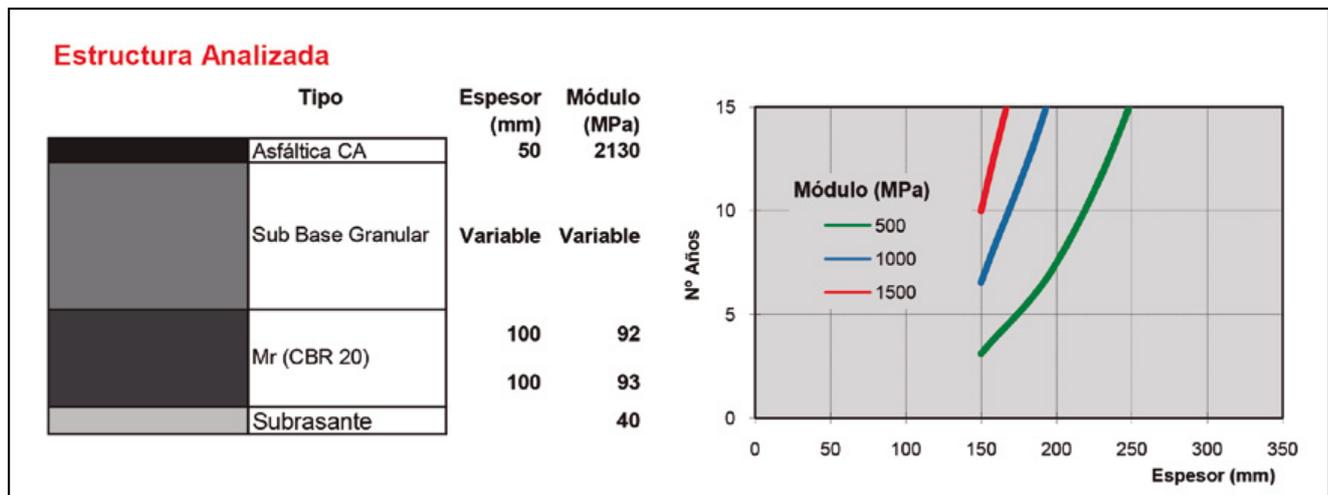


Figura 14. Resultados del análisis estructural para SAB como sub-base granular.

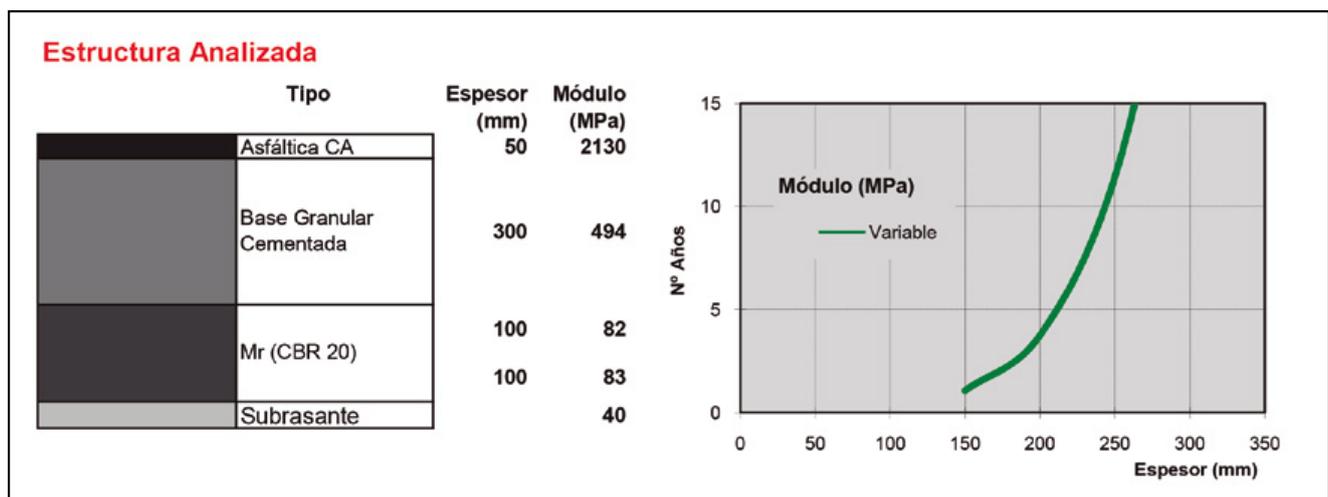


Figura 15. Resultados del análisis estructural de la base granular cementada.

En la gráfica representada en la figura 14, se aprecia que con espesores de 22 cm se alcanza una vida de servicio de 10 años.

En el segundo análisis se efectúa el mismo cálculo, pero con las condiciones de humedad residual cercanas al 100 %. En este caso, la vida útil para el mismo espesor de 22 cm no alcanza los 2 años de duración. De modo tal que se descartan definitivamente los curados que conserven en mayor medida la humedad del estabilizado.

Finalmente, con el fin de comparar los resultados obtenidos hasta el momento, se analiza el mismo paquete estructural con una base de uso tradicional actualmente en la provincia de Santa Fe, como lo es el estabilizado granular cementado (figura 15). Para esta base, el criterio es asignarle un módulo efectivo obtenido como función del módulo asignado a la capa inferior y acotado a un máximo de 700 MPa.

Los resultados obtenidos (figura 15) son similares a los del estabilizado SAB con humedades residuales bajas. Se da como válida la comparación, para continuar con el análisis económico de estas dos capas, siendo necesaria una capa de 20 cm de espesor para una vida útil de 10 años.

Es fundamental también hacer hincapié en que la falla de este último paquete estructural va a estar dada por la fisuración del estabilizado granular cementado. Esta

fisuración se va a propagar seguramente hacia capas superiores, trayendo consigo grandes desventajas en la carpeta de rodadura.

Por otro lado, la falla del SAB se da por ahuellamiento de la subrasante. Este estabilizado acompaña la deformación del paquete estructural, reduciendo la propagación de fisuras que sucede seguramente en el caso anterior siempre y cuando la Hr no tienda a cero.

Es fundamental para su aplicación no solo la ventaja medioambiental sino también la económica. Es decir, se debe realizar una evaluación comparativa entre el costo de una estructura construida con base de Suelo-Arena-Bitumen y el de una base típica de un estabilizado granular cementado apoyado en un suelo estabilizado con cal.

También se precisa, debido a las grandes variaciones de la economía a nivel local, una comparativa con otros años, por ejemplo 2018 (tabla 12). Se adopta como 100 % el costo del Estabilizado Granular al objeto de efectuar la comparación en porcentajes con el resto de los estabilizados.

La comparativa económica no es favorable, pero esto se debe principalmente a la crisis económica que atraviesa el país en el último año. Se observa que en 2018 el estabilizado SAB era un material rentable, en comparación con los estabilizados granulares con cemento.

Tabla 13. Comparativa de costes de estabilizaciones con valores de 2018 y 2019

Material	Espesor	€/m ³	%	€/m ³	%
	(cm)	jul-2018		sep-2019	
SAE	22	37.2	83	67.5	120
SAAE	22	35.6	79	61.6	115
Estabilizado Granular	25	44.8	100	52.6	100
Suelo-Cal	20	17.5	39	21.9	39

El producto obtenido es de gran calidad en función de los estudios realizados, pero se debe aguardar a condiciones económicas más favorables del país para proceder a su aplicación.

8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Luego del estudio llevado a cabo y en función del objetivo general de adoptar protocolos de dosificación, control en obra y caracterización dinámica de mezclas de Suelo-Arena-Bitumen, como base y sub-base de pavimentos flexibles, se puede concluir lo siguiente.

El diseño del estabilizado Suelo-Arena-Bitumen se basa en los parámetros de corte “c” y “φ”, y en el comportamiento resiliente del mismo a través del ensayo triaxial dinámico.

Para la determinación de los parámetros de corte, se determinan a través del ensayo triaxial Estático (STT) o el uso conjunto de los resultados de los ensayos compresión simple (UCS) y la tracción indirecta por compresión diametral (ITS). Estos son ensayos más comunes y simples, tienen la ventaja fundamental de encontrarse en todo campamento de obra y no tener la necesidad de enviarlos a laboratorios centrales o externos.

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta es el curado de las probetas en el diseño de la mezcla. Las condiciones de curado que otorgaron mejores resultados, fueron las que provocaron una pérdida de humedad de entre un 40 % y 60 % de la humedad óptima. Entre ellas se destaca el curado de 24 hs a temperatura ambiente y luego el secado en horno (hasta obtener una Hr=60 %) en obra; y el curado de 72 hs (3 días) a temperatura ambiente promedio de 25 °C.

En segundo lugar, durante el estudio del diseño de la mezcla mediante caracterización dinámica, se observan tres comportamientos marcados en función del módulo resiliente (Mr) del material (adoptado como parámetro válido para su evaluación dinámica).

Para humedades residuales del 100 % (humedad óptima), el Suelo-Arena-Bitumen trabaja como un **suelo cohesivo**, siendo la condición más desfavorable. En humedades residuales de entre 40 y 60 %, se aprecia un comportamiento similar al de un material **granular no tratado**. Por último, con humedades inferiores, el SAB actúa como material **ligado**. Este último módulo es ampliamente mayor que los primeros dos, pero esta condición es para una humedad de valores casi nulos que, dependiendo de las condiciones climáticas, se podrían alcanzar al cabo de varios meses o nunca. Además, si alcanzara este estado es muy probable que la

rigidez del material ante la aplicación de cargas provoquen la fisuración del mismo y, por lo tanto, un deterioro del módulo resiliente (disminución del mismo). Se verifica así el curado recomendado en el párrafo anterior.

En tercer lugar, en cuanto a su diseño estructural, el material puede reemplazar sin inconvenientes al estabilizado granular cementado utilizado comúnmente en el litoral argentino. Para iguales espesores y cargas de tránsito se obtuvieron vidas en servicio similares.

En cuarto lugar, a pesar de que el SAB, hoy en día, no logra verificar los costes comparativos, es necesario efectuar estudios económicos periódicos. El coste de este material oscila en función del coste del asfalto, pudiendo variar notablemente de un año a otro, como se observó en 2019 en el estudio realizado.

Por estas razones, el estabilizado Suelo-Arena-Bitumen es un material que puede traer grandes mejoras en el futuro, tanto económicas como medioambientales.

Respecto a la construcción de las capas de SAB, se recomienda hacer en capas aproximadas de 10 cm de espesor (dos capas en una base), para lograr la evaporación del agua. En cuanto a la compactación a usar, rodillos tipo “pata de cabra”, liso o aplanadora y neumático, con el fin de lograr una compactación homogénea en todo su espesor.

Para estudios futuros se recomienda volver a estudiar detenidamente el estabilizado Suelo-Arena-Asfalto Espumado debido a que la metodología de preparación desarrollada en laboratorio no alcanza los valores de Vida Media y Razón de Expansión necesarios y, por tanto, no se logra una buena distribución del asfalto en el Suelo-Arena. Mediante el uso de la maquinaria apropiada para espumar el asfalto correctamente es probable que estos valores puedan mejorarse.

9. REFERENCIAS

- [1]Azanza, A., y Angelone, S. (2020). Estabilizados de suelo arena y emulsión. *Ingeniería Civil*, n° 195, pp. 46-55.
- [2]Azanza, A. (2020). *Caracterización Dinámica de Estabilizados Suelo Arena Emulsión*. Tesis de Maestría en Ingeniería Vial. Santa Fe (Argentina): Escuela de Posgrado y Educación Continua. Universidad Nacional de Rosario.
- [3]Poncino, H., et al. (1990). Suelo Arena Emulsión. *XVI Reunión del Asfalto. Comisión Permanente del Asfalto. Buenos Aires (Argentina)*. <http://imae.fceia.unr.edu.ar/eventos/detalle/63/laboratorio-vial>
- [4]Dirección Nacional de Vialidad (2017). *Normas de Ensayos*. Buenos Aires (Argentina): DNV. <http://www1.frm.utn.edu.ar/labvial/Normas%20de%20Ensayo.pdf>
- [5]Ermaccora, E., Hillar, P., et al. (2000). *Estabilizados de suelo arena y emulsión en la provincia de Santa Fe*. Santa Fe (Argentina): Dirección Provincial de Vialidad. <https://es.scribd.com/document/216880680/Suelo-Arena-Emulsion>.
- [6]Wirtgen (2018). *Manual de reciclaje en Frío*. <http://www.wirtgen.de/es/gama-de-productos/estabilizadoras-de-suelos-y-recicladoras-frio/recicladoras-frio/>
- [7]You, Z., Goh, S.W., y Dai, Q. (2011). *Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt*. Houghton (MI/EE UU): Department of Civil and Environmental Engineering. Michigan Technological University. https://www.michigan.gov/documents/mdot/MDOT_Research_Report_RC1556_372525_7.pdf

[8] AENOR (2020). UNE-EN 12697-31:2020. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 31: Preparación de la muestra mediante compactador giratorio*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0063147>.

[9] NORMA ARGENTINA IRAM 10529 (1985). *Método de ensayo de compresión triaxial en suelos cohesivos sobre probetas no consolidadas ni drenadas*.

[10] LEMaC U.T.N (2003). *Estabilizantes Iónicos de Suelos para la Construcción. Jornadas SAM/CONAMET/SIMPOSIO. Centro de Investigaciones Viales, UTN, La Plata*. https://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/12/2003_Estabilizantes-Ionicos-de-Suelos_SAM-CONAMET.pdf

[11] American Association of State Highway and Transportation Officials (2003). *Determining the Resilient Modulus of Soils*

and Aggregate Materials (AASHTO DESIGNATION T307-99). Washington, DC: AASHTO.

[12] Garrote Villar, E. (2006). *El ensayo de tracción indirecta. En Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas*. Tesis inédita. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/55872-8.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

[13] Asphalt Academy (2009). *Technical Guideline: Bitumen Stabilized Materials*. TG-2 (2nd ed.). Pretoria (Sudáfrica).

<http://www.asphaltacademy.co.za/events/categories/publications/tg2-bitumen-stabilised-materials/>

[14] Giovanon, P. (2013). *Modelo mecanicista empírico para análisis de pavimentos flexibles*. *Asfalto y Pavimentación*, 3(9): pp. 25-37. https://asefma.es/wp-content/uploads/2014/02/asfalto_09.pdf