



TESIS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL

**“Caracterización Dinámica de Estabilizados
Suelo-Arena-Emulsión”**

Maestrando: Ing. Agustín Azanza

Director: Dra. Ing. Silvia Angelone

Co-director: Dr. Ing. Fernando Martínez

Junio 2020

RESUMEN

Durante mediados del siglo pasado y hasta entrar en los años '90, 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, que sumados al muy buen comportamiento al momento de proyectar estructuras de pavimento, 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 ensayos de laboratorio. Estos se dividen en dos etapas de estudio.

La primera etapa donde se busca llevar a cabo la dosificación del material mediante ensayos convencionales estáticos, presentes en todo campamento de obra. Estos ensayos otorgan resultados que mediante formulaciones empíricas, permiten obtenerlas variables características para estudiar al material.

Mientras que luego, en la segunda etapa, se va a diseñar la mezcla en función de su comportamiento mecánico en base a ensayos dinámicos y/o específicos en laboratorios centrales, para obtener resultados más precisos y poder corroborar los primeros.

Adicionalmente, se va a estudiar la nueva tecnología del asfalto espumado para estabilizaciones de Suelo-Arena (**SAAE: Suelo-Arena-Asfalto Espumado**) y efectuar una comparación con los resultados obtenidos de la emulsión. Englobando un grupo llamado el **Suelo-Arena-Asfalto (SAA)**.

Pero cuando se precisa la evaluación del material según las normas vigentes, el SAA debe posicionarse dentro de un gran grupo que son los **Materiales Estabilizados con Bitúmenes (BSM)**.

Con los resultados que se obtengan más una correcta evaluación impacto-económica, se busca poder justificar el uso de estos estabilizados como bases de pavimentos asfálticos.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Situación Actual	1
1.2.	Fundamentos.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO EN ESTABILIZACIONES.....	4
3.1	Introducción.....	4
3.2	Emulsión Asfáltica	5
3.2.1	Generalidades	5
3.2.2	Componentes de la emulsión asfáltica.....	6
3.2.3	Proceso de Emulsificación	6
3.2.4	Rotura de la Emulsión	7
3.2.5	Clasificación de las emulsiones asfálticas	8
3.2.6	Normativa y Selección de emulsión	10
3.2.7	Contenido óptimo de emulsión asfáltica.....	11
3.2.8	Recaudos a tener en el manejo de emulsión	12
3.3	Asfalto Espumado	14
3.3.1	Introducción	14
3.3.2	Propiedades Asfalto Espumado.....	16
3.3.3	Preparación de Asfalto Espumado.....	19
3.4	Humedad Residual o Relativa.....	20
4	DOSIFICACIÓN DE ESTABILIZADO SUELO ARENA ASFALTO	21
4.1	Antecedentes del Suelo-Arena-Emulsión	21
4.2	Estudio de normativas	23
4.3	Ensayos estáticos para obtención de parámetros c y ϕ	25

4.3.1	Generalidades físicas	25
4.3.2	Ensayo de compresión triaxial en suelos cohesivos sobre probetas no consolidadas no drenadas (Norma IRAM 10529) [27]	26
4.3.3	Ensayo de Resistencia a Compresión Simple.....	28
4.3.4	Resistencia a Tracción Indirecta por Compresión Diametral (Norma ASTM D6931) [28].	28
4.4	Diseño de estabilizado Suelo-Arena-Asfalto mediante caracterización dinámica.....	31
4.4.1	Caracterización del Módulo de Rigidez o Módulo Resiliente.....	31
4.4.1.1	<i>Módulo Resiliente</i>	31
4.4.1.2	<i>Obtención del Módulo Resiliente</i>	33
4.4.1.3	<i>Ensayo de Módulo Resiliente para suelos y materiales agregados</i>	34
4.4.2	Ensayo de Deformación Permanente mediante Equipo de Rueda Cargada.....	35
4.4.2.1	<i>Generalidades del ensayo</i>	35
4.4.2.2	<i>Normativa del ensayo [32]</i>	36
5	EJECUCIÓN DE CAPAS ESTABILIZADAS DE SUELO-ARENA-ASFALTO	37
5.1	Introducción Suelo Arena Emulsión.....	37
5.2	Empleo de métodos convencionales con emulsión asfáltica	39
5.3	Empleo de recicladoras con emulsión asfáltica	40
5.3.1	Tren de reciclado	41
5.3.2	Equipos de compactación.....	43
5.4	El uso de emulsiones Superestables.....	43
5.5	Reciclado con asfalto espumado	43
5.6	Control de compactación in-situ del SAA.....	44
5.7	Comparativa asfalto espumado-emulsión asfáltica.....	45
6	MATERIALES UTILIZADOS.....	46

6.1	Suelo seleccionado	46
6.2	Arena silícea	48
6.3	Emulsión asfáltica	49
6.4	Cemento Asfáltico	50
7	DOSIFICACIÓN MEDIANTE ENSAYOS ESTÁTICOS	54
7.1	Porcentaje Suelo-Arena	54
7.2	Porcentaje óptimo de asfalto	58
7.2.1	Porcentaje óptimo de emulsión para SAE.....	58
7.2.2	Porcentaje óptimo de asfalto espumado para SAAE.....	59
7.3	Pesos específicos de Estabilizados	59
8	ESTABILIZACIONES	61
8.1	Estabilizado Suelo-Arena (SA)	62
8.1.1	Ensayo de Compresión Triaxial o Ensayo Triaxial Estático (STT), según Norma IRAM 10529	62
8.1.2	Ensayo de UCS (Norma VN-E33-67) e ITS (Norma VN-E9-86) sobre estabilizado Suelo-Arena	63
8.1.3	Ensayo de Capilaridad.....	66
8.1.4	Ensayo de Módulo Resiliente.....	67
8.2	Estabilizado Suelo-Arena-Emulsión (SAE)	69
8.2.1	Ensayo Triaxial Estático o Ensayo de Compresión Triaxil (STT), según Norma IRAM 10529	69
8.2.2	Ensayo UCS (Norma VN-E33-67) y Ensayo ITS (Norma VN-E9-86) sobre estabilizado Suelo-Arena-Emulsión.....	71
8.2.3	Ensayo de Capilaridad SAE, según metodología del LEMaC [25].	74
8.2.4	Ensayo de Módulo Resiliente SAE	75
8.2.5	Ensayo de Deformación Mediante Rueda Cargada (WTT), normativa BS EN 12697-22:2003 o IRAM 6850.	81
8.2.5.3.	Cálculo y expresión de resultados	85

8.2.5.4.	Resultados Obtenidos	86
8.2.5.1.	Ensayo con SAE humedecido, normativa BS EN 12697-22:2003 o IRAM 6850.	86
8.3	Estabilizado Suelo-Arena-Asfalto Espumado (SAAE)	87
8.3.1	Ensayo Triaxial Estático de Compresión Triaxil (STT), según Norma IRAM 10529 [27].	87
8.3.2	Ensayo UCS (Norma VN-E33-67) y Ensayo ITS (Norma VN-E9-86) sobre estabilizado Suelo-Arena-Asfalto Espumado.....	90
8.3.3	Ensayo de Capilaridad SAAE	92
8.3.4	Ensayo de Módulo Resiliente SAAE	93
9	ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGÚN ENSAYOS	97
9.1	Ensayo de Compactación de Suelos y de Valor Soporte Relativo [5] ...	98
9.2	Ensayo de Compresión Triaxial o Prueba Triaxial, STT. Según normativa IRAM 10529 [27]	98
9.3	Ensayo de Resistencia a Compresión Simple (UCS) y Resistencia a Tracción indirecta por Compresión Diametral (ITS).....	100
9.4	Desviaciones de STT y UCS-ITS.....	103
9.5	Ensayo Triaxial Dinámico	104
10	DISEÑO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE COSTOS	109
10.1	Diseño estructural.....	109
10.1.1	Diseño Estructural para SAE y SAAE sometidos a curados según normativa TG-2 [23]	110
10.1.2	Diseño Estructural para SAE y SAAE en condiciones de humedad óptima	113
10.1.3	Diseño Estructural para base de Estabilizado Granual Cementado (Santa Fe)	116
10.2	Análisis de costos.....	119
11	CONCLUSIONES	120
12	AGRADECIMIENTOS.....	120
13	BIBLIOGRAFÍA	123

ANEXO I ENSAYOS..... 129

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa Hídrico de la Provincia de Santa Fe (Argentina) [2].....	2
Figura 3.1. Molécula de emulsionante (izda.) y glóbulo de asfalto emulsificado (dcha.) [3]	6
Figura 3.2. Rompimiento de Emulsión Asfáltica [3].....	7
Figura 3.3. Glóbulos de asfalto emulsificados (A - emulsión aniónica. B- emulsión catiónica) [3]	9
Figura 3.4. Contenido óptimo de fluidos totales [3]	12
Figura 3.5. Inyección de aire y agua [6]	15
Figura 3.6. Representación del aumento de volumen durante la espumación [7].....	16
Figura 3.7. Propiedades empíricas del asfalto espumado [7].....	17
Figura 3.8. Relación entre propiedades del asfalto espumado [7].....	18
Figura 3.9. Procedimiento para producir asfalto espumado [9]	20
Figura 4.1. Triaxial Estático perteneciente al laboratorio vial del IMAE	27
Figura 4.2. Circulo de Mohr para suelos.	29
Figura 4.3. Distribución de esfuerzos teóricos sobre planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta [28]	30
Figura 4.4. Definición de Módulo Resiliente (M_r).....	32
Figura 4.5. Ensayo triaxial dinámico para medida del módulo resiliente en suelos y materiales granulares	35
Figura 4.6. Equipo de ensayo Wheel Tracking laboratorio vial IMAE (Argentina) [32].	36
Figura 5.1. Rotor fresador-mezclador de un equipo para reciclado “in situ” [8]	41
Figura 5.2. Tren de reciclado [8]	42
Figura 5.3. Perfilado del material ya mezclado con el estabilizante.....	42
Figura 5.4. Típico tren reciclador con mezclador de lechada y camión de asfalto [8] ...	43
Figura 5.5. Detalle de inyección de asfalto caliente en proceso de reciclado [7]	44
Figura 5.6. Control de compactación mediante método de la arena.....	45

Figura 6.1 Gráfico vida media y relación de expansión en función de agua agregada [34].....	52
Figura 6.2 Preparación de asfalto espumado en Laboratorio Vial del IMAE.....	53
Figura 7.1 Ensayo de Tamizado de Suelos [5].....	56
Figura 7.2. Probetas de Suelo-Arena conformadas según Ensayo de Compactación de Suelos [5].....	57
Figura 7.3. Ensayo de Valor Soporte Relativo, Laboratorio Vial IMAE [5].....	60
Figura 8.1. Probeta de SA luego de ser sometida al Ensayo Triaxial Estático.....	62
Figura 8.2. Ensayo UCS desarrollado en el Laboratorio Vial del IMAE.....	64
Figura 8.3. Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta desarrollado en el Laboratorio Vial del IMAE.....	65
Figura 8.4. Gráfico de criterios de falla sobre SA (Hr=40%), UCS-ITS (rojo) y STT (amarillo).....	66
Figura 8.5. Probetas de SAE antes (izq.) y después del curado (der) impuesto por el TG-2 [23].....	69
Figura 8.6. Gráfico de criterios de falla sobre SAE curado durante 72 hs a temperatura ambiente.....	72
Figura 8.7. Gráfico de criterios de falla sobre SAE curado durante 168 hs a temperatura ambiente	73
Figura 8.8. Gráfico de criterios de falla sobre SAE curado durante 72 hs a 40°C	74
Figura 8.9. Gráfico de criterios de falla sobre SAE curado durante 24 hs a 25°C en condiciones húmedas.....	74
Figura 8.10. Ensayo de Capilaridad para probetas de SAE.....	75
Figura 8.11. Probeta de SAE curada según Condición 4.....	77
Figura 8.12. Módulo Resiliente en condiciones húmedas para SAE (Mr2) y SA (Mr1).....	78
Figura 8.13. Módulo Resiliente en condiciones húmedas para SAE y SA, según tensiones determinadas.....	78
Figura 8.14. Módulo Resiliente para SAE en Condición 2 (Mr3).....	79
Figura 8.15. Módulo Resiliente para SAE en Condición 2 (Mr3) y Condición 3 (Mr4)..	80
Figura 8.16. Módulo Resiliente para SAE en Condición 1 (Mr2) y Condición 4 (Mr5)..	80

Figura 8.17. Módulo Resiliente para SA y SAE, según determinadas tensiones.....	81
Figura 8.18. Ensayo de Rueda Cargada sobre probeta SAE.....	82
Figura 8.19. Compactación de probeta de SAE, para ensayo WTT.....	82
Figura 8.20. Gráficas de Profundidad de Huella vs. Número de Ciclos.....	84
Figura 8.21. Probeta de SAE luego de ser sometida al Ensayo de Rueda Cargada...84	
Figura 8.22. Probeta de SAE sometida al Ensayo de Capilaridad (izq.) y al Ensayo de Rueda Cargada luego (der.).....	87
Figura 8.23. Probetas para pruebas triaxiales de SAE (izq.) y SAAE (der.).....	89
Figura 8.24. Probetas de SAAE sometidas a STT.....	90
Figura 8.25. Probetas ensayadas a UCS (izq.) y a ITS (der.).....	90
Figura 8.26. Gráfico de criterios de falla sobre SAAE curado durante 72 hs a 40°C...91	
Figura 8.27. Ensayo de Capilaridad sobre probetas de SAAE (Tabla 8.15) y SA (Tabla 8.3).....	93
Figura 8.28. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizaciones curadas en CH durante 24 hs.....	95
Figura 8.29. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizaciones curadas en CH durante 24 hs, para tensiones determinadas.....	95
Figura 8.30. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizados SAE y SAAE, curados según TG-2 [23].....	96
Figura 8.31. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizados SAAE para Condición de curado 5 y 7.....	96
Figura 8.32. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre todos los estabilizados, para tensiones determinadas.....	97
Figura 9.1. Angulo de Fricción obtenido en STT para todas las estabilizaciones.....	98
Figura 9.2. Cohesión obtenida en STT para todas las estabilizaciones.....	99
Figura 9.3. Resultados de ensayos UCS e ITS para todas las estabilizaciones.....	102
Figura 9.4. Línea de falla según criterio Mohr Coulomb para todas las estabilizaciones.....	103
Figura 9.5. Módulos Resilientes de SA, SAE y SAAE para todos los curados.....	105
Figura 9.6. Módulos Resilientes de SA, SAE y SAAE para condiciones de humedad residual igual al 100% o mayores.....	105

Figura 9.7. Módulos Resilientes para estabilizado SAE en Condición de curado 2 y 3.....	106
Figura 9.8. Módulos Resilientes de SA y SAAE para Condición de curado 2 y 6.....	106
Figura 9.9. Módulos Resilientes de SAE para Condición de curado 1 y 4.....	107
Figura 9.10. Módulos Resilientes de SA y SAAE para Condición de curado 2 y 5....	107
Figura 9.11. Módulos Resilientes de SAAE para Condición de curado 5 y 7.....	108
Figura 10.1. Paquete estructural SAA.....	110
Figura 10.2. Análisis de Vida para SAA como Sub Base Granular.....	111
Figura 10.3. Resultados del Análisis Estructural para SAA como Sub Base Granular.....	112
Figura 10.4. Casos resueltos del Análisis Estructural SAA como Sub Base Granular.....	113
Figura 10.5. Análisis de Vida para SAE con humedad óptima.....	115
Figura 10.6. Resultados del análisis estructural para SAE con humedad óptima.....	115
Figura 10.7. Casos resueltos para estabilizado SAE con humedad óptima.....	116
Figura 10.8. Relación modular según Barker para estabilizados con y sin cemento [35].....	117
Figura 10.9. Análisis de Vida para pavimento con Base Granular cementada.....	117
Figura 10.10. Resultados del Análisis Estructural de la Base Granular cementada...	118
Figura 10.11. Gráfica comparativa de costos.....	120

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Usos recomendados de las emulsiones catiónicas convencionales en construcciones viales [4].....	11
Tabla 4.1. Resumen de ensayos	24
Tabla 4.2. Valores recomendados de parámetros obtenidos de triaxiales estáticos [23].	27
Tabla 4.3. Valores recomendados para la resistencia a tracción indirecta (kPa) [23].	28
Tabla 5.1. Asfalto Espumado vs Emulsión Asfáltica.....	46
Tabla 6.1. Clasificación de Suelos	47
Tabla 6.2. Módulo de Fineza de arena.....	48
Tabla 6.3. Características de la Emulsión Asfáltica.....	50
Tabla 6.4. Características del Cemento Asfáltico.....	52
Tabla 6.5. Límites mínimos de AE y valores obtenidos [34].....	52
Tabla 6.6. Características del asfalto espumado obtenido.....	53
Tabla 7.1. Cálculo de proporción Suelo-Arena.....	55
Tabla 7.2. Resultados del Ensayo de Compactación de Suelos [5].....	57
Tabla 7.3. Cálculo de fluidos I.....	58
Tabla 7.4. Cálculo de fluidos II.....	58
Tabla 7.5. Contenido de asfalto espumado típico relativo a granulometría del agregado [8].....	59
Tabla 7.6. Resultados de Ensayos de Compactación de Suelo y de Valor Soporte Relativo [5].....	61
Tabla 8.1. Resultados de Ensayo de Compresión Triaxial sobre Suelo-Arena (Norma IRAM 10529).....	63
Tabla 8.2. Resultados de ensayo UCS (Norma VN-E33-67) e ITS (Norma VN-E9-86) sobre el estabilizado SA.....	65
Tabla 8.3. Resultados de ensayo de capilaridad sobre el estabilizado SA, metodología del LEMaC [25].....	67
Tabla 8.4. Resultados del Ensayo de Módulo Resiliente.....	68

Tabla 8.5. Resultados de Ensayo de Compresión Triaxial sobre SAE (Norma IRAM 10529).....	70
Tabla 8.6. Clasificación del BSM en función a parámetros obtenidos, según TG-2 [23]	71
Tabla 8.7. Resultados de Ensayo UCS (Norma VN-E33-67) y Ensayo ITS (Norma VN-E9-86).....	71
Tabla 8.8. Clasificación de BSM en función a la ITS, según TG-2 [23].....	74
Tabla 8.9. Resultados de Ensayo de Capilaridad sobre SAE, según normativa LEMac [25].....	75
Tabla 8.10. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizado SAE para distintas condiciones de curado.....	76
Tabla 8.11. Datos probeta de SAE para ensayo WTT.....	83
Tabla 8.12. Resultados obtenidos de ensayo WTT.....	85
Tabla 8.13. Resultados obtenidos de Ensayo de Compresión Triaxial sobre SAAE (Norma IRAM 10529).....	89
Tabla 8.14. Resultados obtenidos de ensayos UCS (Norma VN-E33-67) e ITS (Norma VN-E9-86).....	91
Tabla 8.15. Resultados de Ensayo de Capilaridad sobre SAAE, según metodología del LEMaC [25].....	92
Tabla 8.16. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizado SAAE para todas las condiciones de curado.....	94
Tabla 9.1. Resultados de Ensayos de Compactación de Suelo y de Valor Soporte Relativo.....	98
Tabla 9.2. Resultados de Ensayo de Compresión Triaxial para todas las estabilizaciones (IRAM 10529).....	98
Tabla 9.3. Resultados de ensayos UCS (norma VN-E33-67) e ITS (Norma VN-E9-86) para todas las estabilizaciones.....	101
Tabla 9.4. Comparación de ambos métodos para obtención de parámetros del estabilizado.....	104
Tabla 10.1 Coeficientes de regresión en función de la nueva ecuación constitutiva para el SAE (Mr en MPa).....	114
Tabla 10.2. Resultados de Análisis de Vida para varios espesores de Base Granular cementada.....	118
Tabla 10.3. Costos de estabilizaciones en Septiembre de 2019.....	119

Tabla 10.4. Comparativa de costos de estabilizaciones con valores de 2018.....120

INDICE DE NOMENCLATURA

BSM: Materiales Estabilizados con Asfalto (*Bitumen Stabilized Materials*)

SA: Estabilizado de Suelo-Arena

SAA: Estabilizado de Suelo-Arena-Asfalto

SAE: Estabilizado de Suelo-Arena-Emulsión

AE: Asfalto Espumado

SAAE: Estabilizado de Suelo-Arena-Asfalto Espumado

UCS: Resistencia a Compresión Simple (*Uniaxial Compressive Strenght*)

ITS: Resistencia a Tracción Indirecta (*Indirect Tensile Strenght*)

VSR: Ensayo de Valor Soporte Relativo

STT: Ensayo Triaxial Estático o Simple (*Simple Triaxial Test*)

Mr: Módulo Resiliente

CH: Curado en Cámara Húmeda a 25°C

Hr: Humedad Relativa o Residual

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Actual

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 pavimento, 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 [1].

1.2. Fundamentos

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 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, 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 [2].

A su vez dicha provincia tiene como gran beneficio de poseer en toda su margen Este, el Rio Paraná (Figura 1.1). Este último, es lugar de emplazamiento de diversas areneras en todas sus costas que extraen el material del lecho del rio y lo proveen para construcciones de todo tipo, de forma rápida y sencilla.

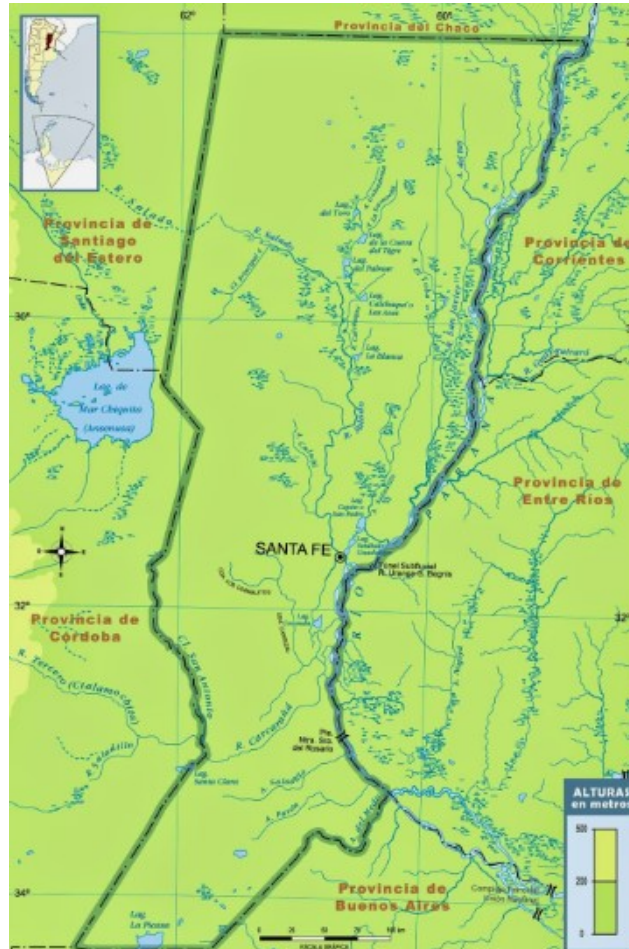


Figura 1.1. Mapa Hídrico de la Provincia de Santa Fe (Argentina) [2]

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 se encuentran 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 concebidos 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. Sumado a que, la escoria ha dejado de ser una alternativa rentable en la provincia, debido a su gran demanda, es factible estudiar otros tipos de estabilización.

- 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. Históricamente, se encuentran publicaciones de estudios realizados sobre el SAE en dos etapas marcadas. En una primera instancia entre 1946 y 1952 y luego entre 1966 y 1968 en pleno auge de su uso en obra. Trabajos aislados desarrollados en los años 1980, 1990 y 2000 son los últimos que se registran en la provincia, ya con fines de fomentar nuevamente su uso, que se iba a ir perdiendo por diversas razones.

2 OBJETIVOS

A partir de los fundamentos enunciados, el objetivo principal planteado es el de promover un proceso de optimización y re implementación del SAE como base y sub-base de pavimentos flexibles en la provincia de Santa Fe. En adición se va a desarrollar el estudio de la misma estabilización con asfalto espumado (SAAE), ubicando a estas mezclas dentro de la estabilización SAA (Suelo-Arena-Asfalto), y englobando, según normativas internacionales que se nombrarán más adelante, en BSM (Bitumen Stabilized Materials).

Para afrontar este trabajo se divide el problema en cuatro etapas de estudio que se dictan a continuación:

1. Definir un esquema básico para el proyecto y dosificación de este tipo de estabilizados, mediante ensayos simples. Estudiando las ventajas que trae el empleo de la nueva emulsión Catiónica Superestable y del asfalto espumado. Se estudiará cual es el curado necesario que necesitan las probetas previo a los ensayos, y se determinará cuál es la condición de contenido de humedad adecuado para su caracterización dinámica.
2. Diseño de la mezcla mediante la caracterización dinámica. En esta etapa, se propone la necesidad de determinar los parámetros válidos para una correcta caracterización de los estabilizados Suelo-Arena-Asfalto.
3. Como tercer punto, mencionar las nuevas tecnologías de ejecución de capas especiales que optimizan recursos y mano de obra. Los métodos convencionales acarreaban grandes desventajas económicas, medioambientales y en lo que respecta a la seguridad en carreteras.
4. Finalmente, todo proyecto o posible mejora en la construcción de cualquier obra en sí, debe estar acompañado de un estudio económico que justifique la misma.

3 COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO EN ESTABILIZACIONES

3.1 Introducción

El Suelo-Arena-Asfalto, conforma un sistema formado por tres componentes de diferente naturaleza: uno mayormente friccional, como la arena, otro mayormente cohesivo, como el suelo y un ligante de características bituminosas (asfalto: emulsión asfáltica, asfalto espumado). 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 se tendría un material mayormente friccional como la arena, al que le incorporamos el asfalto. En este caso, este último 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 mayormente cohesivo como un suelo, que es muy susceptible a los cambios de humedad. La incorporación del ligante bituminoso (emulsión asfáltica, asfalto espumado) generaría resultados diferentes a los mencionados para Arena-Asfalto. De hecho este permitiría preservar la cohesión que el suelo posee en estado seco o de baja humedad frente a la presencia del agua. De alguna forma se puede decir que el Asfalto estaría impermeabilizando al suelo.

Finalmente, la incorporación de asfalto 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 (fricción, cohesión viscoelástica y preservación, o permanencia, de la cohesión del suelo) estarían conviviendo entre sí. Cuál de ellas preponderará respecto a la otra dependerá exclusivamente de la relación volumétrica entre los componentes. De esta forma, cuando el volumen de suelo sea inferior al volumen de vacíos de la arena compactada, el comportamiento del estabilizado se acercará más al de una Arena-Asfalto, 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-Asfalto. 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 [2].

En definitiva, la adición de asfalto a la mezcla de suelo y arena, no solo aporta a ésta de una impermeabilidad, sino que también generaría un notable incremento en la capacidad portante.

3.2 Emulsión Asfáltica

3.2.1 Generalidades

La emulsión asfáltica es una dispersión estable de pequeños glóbulos de asfalto (cemento asfáltico) en agua. Como el asfalto y el agua son inmiscibles, por medio de un agente emulsificante se logra la mezcla estable y coexistencia de estos dos componentes. El emulsificante está compuesto por moléculas ambivalentes, formadas por una cabeza iónica polar, químicamente compatible con el agua, y una cadena hidrocarbonada apolar, químicamente compatible con el asfalto (Figura 3.1) [3].

3.2.2 Componentes de la emulsión asfáltica

Los componentes básicos de la emulsión son:

- **Cemento Asfáltico o Asfalto:** Es el principal componente de la emulsión asfáltica y constituye entre un 55% y un 70% de la misma. Es necesario que el cemento asfáltico cumpla con unas determinadas características físico-químicas y reológicas, además de ser compatible con el agente emulsificante para así producir una emulsión estable. El mismo puede estar o no modificado previamente.
- **El Agua:** Humedece la mezcla de materiales componentes del estabilizado (Suelo-Arena) y disuelve la parte polar del emulsificante, permitiendo que este se adhiera a aquellos; modera las reacciones químicas. Estos factores permiten la producción de una emulsión satisfactoria. Además el agua debe ser pura y libre de materias extrañas que podrían desestabilizar la emulsión.
- **El Emulsificante:** Cuantitativamente es el menor componente, pero es considerado un elemento esencial, ya que su función principal es de estabilizar y evitar la coalescencia (unión de los glóbulos de cemento asfáltico). El emulsificante permite el rompimiento oportuno de la emulsión y cambia la tensión superficial en el área de contacto con los agregados minerales.

Algunos tipos de emulsiones incluyen además aceites fluidificantes en su composición, lo que permite mantener la fluidez del asfalto durante cierto tiempo después de haberse eliminado el agua de la emulsión.



Figura 3.1. Molécula de emulsificante (izda.) y glóbulo de asfalto emulsificado (dcha.) [3]

3.2.3 Proceso de Emulsificación

El proceso de emulsificación consiste en separar mecánicamente el asfalto caliente en diminutos glóbulos, los cuales son dispersados en agua tratada con una pequeña

cantidad de agente emulsivo. Por lo tanto, el sistema queda constituido por el agua como fase continua y las micrométricas gotas de asfalto como fase dispersa.

La separación mecánica del asfalto en estos pequeñísimos glóbulos de tamaño coloidal se logra mediante el uso de molinos coloidales. Como ya se ha indicado, el emulsificante define el tipo de emulsión: las aniónicas con cargas del glóbulo negativo y las catiónicas, positivo.

Los emulsificantes catiónicos y aniónicos son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado; su parte apolar, hidrocarbonada lineal o cíclica, es soluble en el asfalto. Los emulsificantes aniónicos tienen grupos polares ácidos que se encuentran saponificados y los catiónicos grupos polares amínicos o derivados de estos: en ambos casos su parte polar es soluble en el agua e hidrófila.

Estos productos son los que, producida la emulsión, se sitúan en su mayor parte en la "interfase". Su parte apolar orgánica se dirige hacia el asfalto y su parte polar inorgánica hacia el agua. Con estos emulsionantes iónicos, los glóbulos adquieren cargas eléctricas del mismo signo, repeliéndose entre ellos y manteniendo estable la emulsión. El tipo de emulsificante influye sobre su comportamiento de acuerdo con su tipo y concentración, en presencia de una superficie mineral.

3.2.4 Rotura de la Emulsión

La idea del funcionamiento de las emulsiones al entrar en contacto con los agregados minerales radica en que, primero se adhieren los glóbulos de asfalto a la superficie pétreo, dado que existe afinidad entre ambos, ya sea por carga eléctrica de signo opuesto y/o por otro tipo de atracción.

Así, pasado un tiempo determinado, las emulsiones depositan sobre esa superficie una película de cemento asfáltico. Este fenómeno se conoce como rotura (Figura 3.2). Previamente, la emulsión pasa por un intervalo en que se incrementa su porcentaje de agua, ya que cada vez quedan menos partículas de asfalto dispersas.



Figura 3.2. Rompimiento de Emulsión Asfáltica [3]

Finalmente, una vez producida la rotura de la emulsión y evaporada o eliminada el agua, el asfalto adquiere nuevamente su consistencia original debido a que los glóbulos dispersos se vuelven a unir en la película que recubre los agregados pétreos, quedando en condiciones de actuar como cementante de éstos.

3.2.5 Clasificación de las emulsiones asfálticas

De acuerdo con el tipo de emulsificante usado, se obtienen dos clases principales de emulsiones asfálticas

- Las emulsiones aniónicas, son aquellas en que la polaridad del emulsionante es de carga negativa (estos suelen ser sales sódicas o potásicas de ácidos orgánicos de cadena compleja) y por tanto los glóbulos de asfalto en estas emulsiones son atraídos por el ánodo (electrodo positivo). Las emulsiones aniónicas son ideales para su uso con agregados calizos, que presentan carga superficial positiva (Figura 3.3-A). El mecanismo de rotura de estas emulsiones se basa en la evaporación del agua, por lo que resulta muy dependiente de las condiciones climáticas o del contenido de humedad del agregado mineral.
- Las emulsiones catiónicas, son aquellas en que la polaridad del emulsionante es de carga positiva (suelen ser productos de reacción de ácidos inorgánicos fuertes, como el ácido clorhídrico, con aminas grasas. Los glóbulos del asfalto descargan en el cátodo (electrodo negativo). Funcionan bien con agregados silíceos, con carga superficial predominantemente negativa, aunque en general presentan buena adhesividad con cualquier tipo de agregado mineral (Figura 3.3-B). Su mecanismo de rotura es complejo, dependiendo más de la concentración y la propia naturaleza del emulsificante por lo que se puede regular de forma muy precisa, con ventaja sobre las emulsiones aniónicas (de hecho, los aditivos reguladores de la rotura empleados en ocasiones con las emulsiones catiónicas son realmente productos de similar naturaleza a la de sus emulsionantes). Por este motivo y por su mayor versatilidad frente a agregados de todas clases, es el tipo de emulsión asfáltica que más se utiliza actualmente.

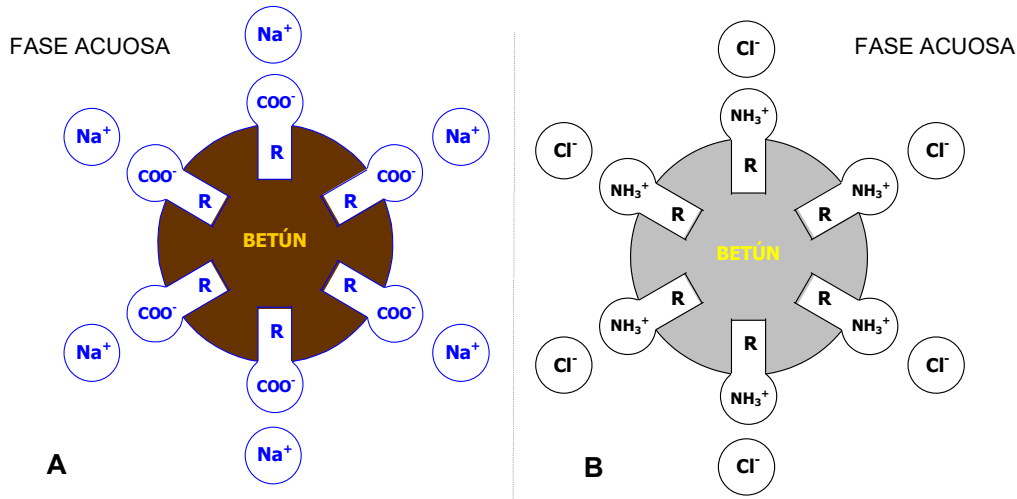


Figura 3.3. Glóbulos de asfalto emulsificados (A - emulsión aniónica. B- emulsión catiónica) [3]

De acuerdo a la estabilidad de las emulsiones asfálticas pueden clasificarse en emulsiones de rompimiento (separación de las dos fases) [3]:

- Rápido
- Medio
- Lento

Las emulsiones de rompimiento RÁPIDO tienen poca o ninguna capacidad para mezclarse con agregados, se emplean normalmente para riegos de adherencia y tratamientos superficiales en general. Están formuladas para reaccionar rápidamente con el agregado y revertir al estado del asfalto.

En riegos de adherencia entre capas bituminosas, no interesa que se produzcan infiltraciones de la emulsión, que darían lugar a un enriquecimiento excesivo del contenido de cemento asfáltico en la capa inferior y por tanto a posibles deformaciones plásticas. Aquí es donde se utilizan emulsiones de rotura rápida.

Las emulsiones de rompimiento MEDIO son designadas para ser mezcladas con agregados, porque NO rompen al instante de entrar en contacto con ellos. Además estas emulsiones contienen aceites fluidificantes. Estas cualidades permiten que la mezcla sea manejable por un período de tiempo determinado. Se utilizan para mezclas fabricadas "in-situ" o mezclas fabricadas en plantas estabilizadoras y para estabilización "in-situ". También sobre mezclas de graduación abierta con fines de bacheo, renivelaciones y reciclados. La resistencia está dada por la "trabazón"

(rozamiento interno) entre las partículas del agregado, requiriéndose de espesores mayores de película de ligante para proporcionar una durabilidad adecuada.

Las emulsiones de rompimiento LENTO se diseñan para mezclarse con agregados finos, se utilizan comúnmente para carpetas asfálticas en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas. Designadas para máxima estabilidad de mezclado. Estas emulsiones tienen tiempos más largos de manejabilidad para garantizar un buen mezclado con materiales densamente graduados.

También se usan en riegos de imprimación, las emulsiones deben tener una rotura más lenta (estas incorporan un aceite fluidificante para un mayor escurrimiento), altas viscosidades de la emulsión son muy importantes, ya que interesa que el cemento asfáltico de la emulsión no quede solo en la superficie, sino que penetre hasta una cierta profundidad para dar mejor embebido al pétreo, contribuyendo a la adherencia (mayor espesor de película sobre la superficie del pétreo), tanto del propio material como con la capa bituminosa superior.

Se utilizan principalmente para estabilizaciones y reciclados. Todas las emulsiones de rompimiento lento tienen baja viscosidad la cual todavía puede ser disminuida diluyendo la emulsión con agua. Cuando estas emulsiones son diluidas pueden ser utilizadas para riegos de liga, riegos negros y demás [3].

La emulsión SUPERESTABLE está clasificada como dentro del grupo de las LENTAS, pero presenta un mayor tiempo de rotura que las propias lentas lo que le permite alcanzar una excelente trabajabilidad.

3.2.6 Normativa y Selección de emulsión

Las características de las emulsiones están normalizadas en la Norma IRAM 6691 "Emulsiones Catiónicas Convencionales" (2002) tanto en lo que respecta a los porcentajes de residuo, grado de penetración y tiempo de corte, trayendo grandes ventajas a la hora de su empleo. Es importante destacar esta última normativa, debido a que los estudios realizados anteriormente sobre estabilizados SAE no contaban con el apoyo de la misma.

Para orientar sobre el uso y las aplicaciones más frecuentes y recomendadas se brinda la Tabla 3.1 de la empresa YPF S.A [4]:

Tabla 3.1. Usos recomendados de las emulsiones catiónicas convencionales en construcciones viales [4]

APLICACIONES	ROTURA RÁPIDA			ROTURA MEDIA		ROTURA LENTA	SUPERESTABLE	IMPRIMACIÓN
	EBCR-0	EBCR-1	EBCR-2	EBCM-1	EBCM-2	EBCL	EBCS	EBCI
Riegos de liga, de curado	A	P						
Tratamientos superficiales	P	A	A	P				
Mezclas en frío abiertas				A	A			
Mezclas en frío almacenables para bacheo				P	A			
Mezclas densas en frío						P	A	
Riegos antipolvo						P	A	
Estabilizaciones de suelos, Gravaemulsión						P	A	
Lechadas asfálticas convencionales						A	A	
Riegos de imprimación								A

Referencias:

A Aconsejable, P Posible

De la Tabla 3.1 se puede identificar aquella emulsión que mejor se comporte con las estabilizaciones de suelos. Las siglas usadas corresponden a: E (Emulsión), B (Bituminosa), C (Catiónica), S (Superestable), o simplemente EBCS que sería una Emulsión bituminosa superestable. La EBCS es la emulsión aconsejable para el material en estudio.

3.2.7 Contenido óptimo de emulsión asfáltica

Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas, el contenido total de fluido es utilizado en vez del Contenido de Humedad al momento de definir la relación humedad/densidad del estabilizado. La densidad máxima se alcanza con el Contenido Óptimo de Fluido Total, que es la combinación del agua de compactación y emulsión asfáltica en la mezcla. Antes de romper, la emulsión asfáltica es un fluido con una viscosidad ligeramente mayor que la del agua. Tanto los componentes del agua como del asfalto de una emulsión actúan como un lubricante para ayudar a la compactación, por lo que ambos deben ser considerados como un solo fluido.

La Dirección Nacional de Vialidad en su manual de Normas de Ensayo, norma VN-E5-93 "Compactación de Suelos", detalla el procedimiento a seguir para estudiar las variaciones del peso unitario de un suelo en función de los contenidos de humedad, cuando se lo somete a un determinado esfuerzo de compactación [5].

Es por eso, que se va a regir de dicho ensayo para obtener el contenido de emulsión necesaria a adicionar a la mezcla Suelo-Arena para lograr la máxima compactación. Se detalla a continuación en la Figura 3.4 como deben estudiarse los fluidos del estabilizado para su dosificación.

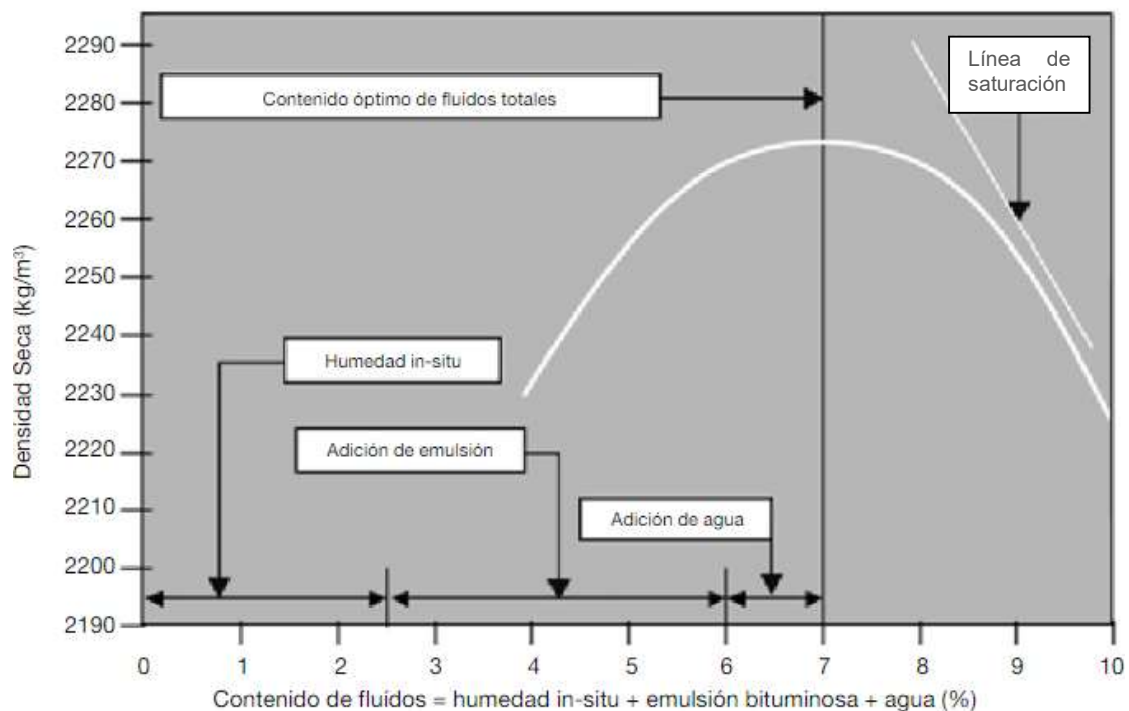


Figura 3.4. Contenido óptimo de fluidos totales [3]

3.2.8 Recaudos a tener en el manejo de emulsión

Las emulsiones asfálticas poseen propiedades que condicionan las características de las mismas y su comportamiento. Entre las principales están las siguientes [3]:

3.2.8.1 Estabilidad en almacenamiento

Todas las emulsiones asfálticas modifican en mayor o menor grado sus propiedades durante el manejo y almacenamiento. Una emulsión puede almacenarse durante

varios meses sin producirse ningún deterioro y sin necesidad de calentarla para utilizarla. Sin embargo es normal que para almacenamientos prolongados se presenten los siguientes fenómenos:

- Formación de natas y sedimentos: Durante el almacenamiento en obra pueden surgir dos fenómenos que se acentúan con el tiempo. La nata, que es una película que se forma en la superficie de la emulsión por el contacto del asfalto con el aire. Para evitar este fenómeno es aconsejable utilizar tanques de almacenamiento de pequeña área y verticales. Así mismo la sedimentación consiste en un ligero aumento de la concentración del asfalto (cemento asfáltico) a medida que vamos descendiendo hacia la parte inferior del tanque de almacenamiento. Este fenómeno se presenta por efecto de la gravedad, al decantarse los glóbulos de asfalto. Es reversible con la utilización de un mezclador, el cual hace que la emulsión recobre su uniformidad en la concentración de asfalto.
- Formación de espuma: Los emulsificantes por su naturaleza química forman espuma, por lo que se debe tener cuidado de no incluir aire en el momento del mezclado o la agitación. Es recomendable transportarlas emulsiones por medio de carro tanques provistos de sistemas de tabiques que dividan el interior. El llenado de estos tanques debe realizarse con una manguera flexible que se encuentre prolongada hasta unos 10 o 20 cm del fondo del tanque.

3.2.8.2 Adhesividad

La adhesividad de una emulsión depende del tipo y cantidad de emulgente, de la naturaleza del material bituminoso (tipo y origen del asfalto de procedencia), de los aditivos incorporados al cemento asfáltico, del pH de la emulsión en donde los valores cercanos a 7 proveen una buena adherencia pero estabilidades menores, de su velocidad de rotura, y naturalmente, de la mineralogía del material pétreo con el que se mezcla la emulsión.

3.2.8.3 Viscosidad

Esta propiedad depende directamente de la concentración de la emulsión (contenido de asfalto residual). Valores por encima del 65% de asfalto residual incrementan rápidamente este parámetro. La viscosidad también varía con el tipo y cantidad de emulgente y la granulometría de la emulsión. Las emulsiones asfálticas con glóbulos

de tamaño uniforme son más viscosas que con tamaños bien graduados. La granulometría depende del tipo de cemento asfáltico y de los fluidificantes del mismo, cuando están presentes.

3.3 Asfalto Espumado

3.3.1 Introducción

El asfalto espumado (AE) es una técnica relativamente nueva en su uso que permite producir mezclas asfálticas de un modo muy diferente a los sistemas tradicionales. Las mezclas producidas con asfalto espumado tienen un comportamiento estructural similar a una mezcla tradicional, pero difieren en su estructura interna. Las mezclas con asfalto espumado presentan ventajas especiales frente a mezclas tradicionales entre estas las más importantes son las del tipo energéticas y ambientales.

Desde el punto de vista constructivo, el empleo de nuevas técnicas y equipos de construcción especialmente desarrollados para este tipo de aplicación, le confiere ventajas adicionales en comparación a otro tipo de técnicas constructivas; específicamente admite mayor tolerancia en la especificación de agregados y los procesos constructivos pueden ser de muy alto rendimiento. El asfalto espumado puede ser usado como un agente estabilizador con una variedad de materiales que van desde gravas chancadas de buena calidad hasta suelos marginales con plasticidad relativamente alta y también en materiales asfálticos reciclados. Las mezclas con asfalto espumado pueden ser confeccionadas tanto en terreno como en una planta central.

El asfalto espumado (también conocido como asfalto celular), se logra mediante un proceso, en el cual se inyecta una pequeña cantidad de agua fría (1 a 2% del peso del asfalto) y aire comprimido a una masa de asfalto caliente (160° C - 180° C), como se observa en la Figura 3.5.

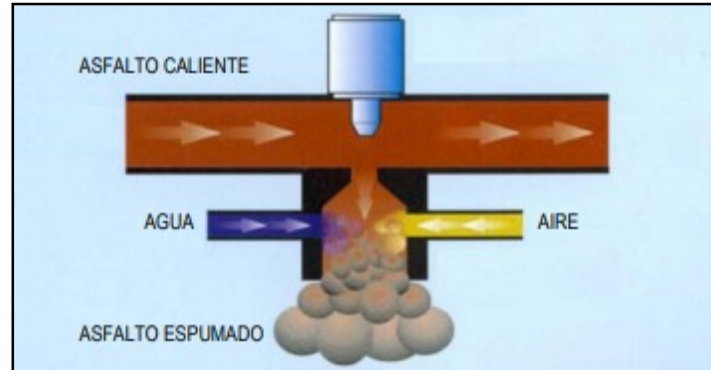


Figura 3.5. Inyección de aire y agua [6]

El proceso de expansión se puede explicar de la siguiente manera: en el momento que las gotas de agua fría toman contacto con el asfalto (cemento asfáltico) caliente, se produce un intercambio de energía entre el asfalto y las gotas de agua, lo que eleva la temperatura del agua hasta los 100 °C, esta transferencia energética genera en forma instantánea vapor y una expansión explosiva del asfalto. Las burbujas de vapor son forzadas a introducirse en el asfalto dentro de la cámara de expansión.

Debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua, las burbujas pueden mantener el equilibrio por pocos segundos (10-30 segundos). Este proceso ocurre para una gran cantidad de burbujas. A medida que la espuma se enfría a temperatura ambiente, el vapor en las burbujas se condensa causando el colapso y la desintegración de la espuma. La desintegración de la burbuja (o colapso de la espuma) produce miles de gotitas de asfalto las cuales al unirse recuperan su volumen inicial sin alterar significativamente las propiedades reológicas originales del asfalto.

Para la producción de mezclas con AE, el agregado debe ser incorporado mientras el asfalto se encuentre en estado de espuma. Al desintegrarse la burbuja en presencia del agregado, las gotitas de asfalto se aglutinan con las partículas más finas (especialmente con aquellas fracciones menores a 0.075 mm), produciendo una mezcla asfalto agregado fino, proceso que se denomina dispersión del asfalto. Esto resulta en una pasta de filler y asfalto que actúa como un mortero entre las partículas gruesas. El proceso de dispersión es considerado por muchos autores como fundamental para la obtención de las propiedades mecánicas de las mezclas con asfalto espumado [6].

3.3.2 Propiedades Asfalto Espumado

Las propiedades empíricas más importantes del AE que se estudian en la actualidad son:

- **Razón de expansión (Ex):** Es una medida de viscosidad de la espuma e influye en que tan bien se dispersaría el asfalto en la mezcla. La Razón de Expansión está definida como la relación entre el máximo volumen logrado en el estado de espuma y el volumen del asfalto sin espumar (Figura 3.6).

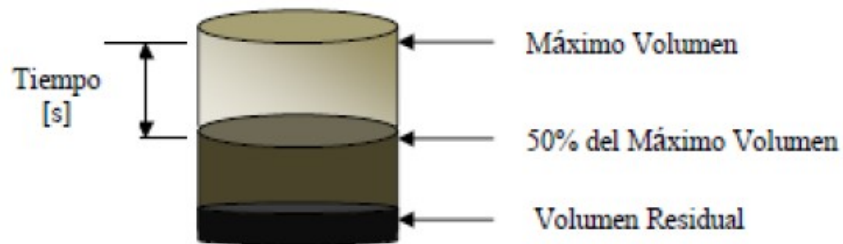


Figura 3.6. Representación del aumento de volumen durante la espumación [7]

- **Vida media ($\tau_{1/2}$):** Es el tiempo, en segundos, que tarda el AE en reducir su volumen a la mitad del volumen expandido. La vida media es un indicador de la estabilidad de la espuma y entrega una idea del tiempo disponible para mezclar el asfalto espumado con los agregados antes de que colapse la espuma.

Se ejemplifica a continuación (Figura 3.7) como se relacionan ambas propiedades.

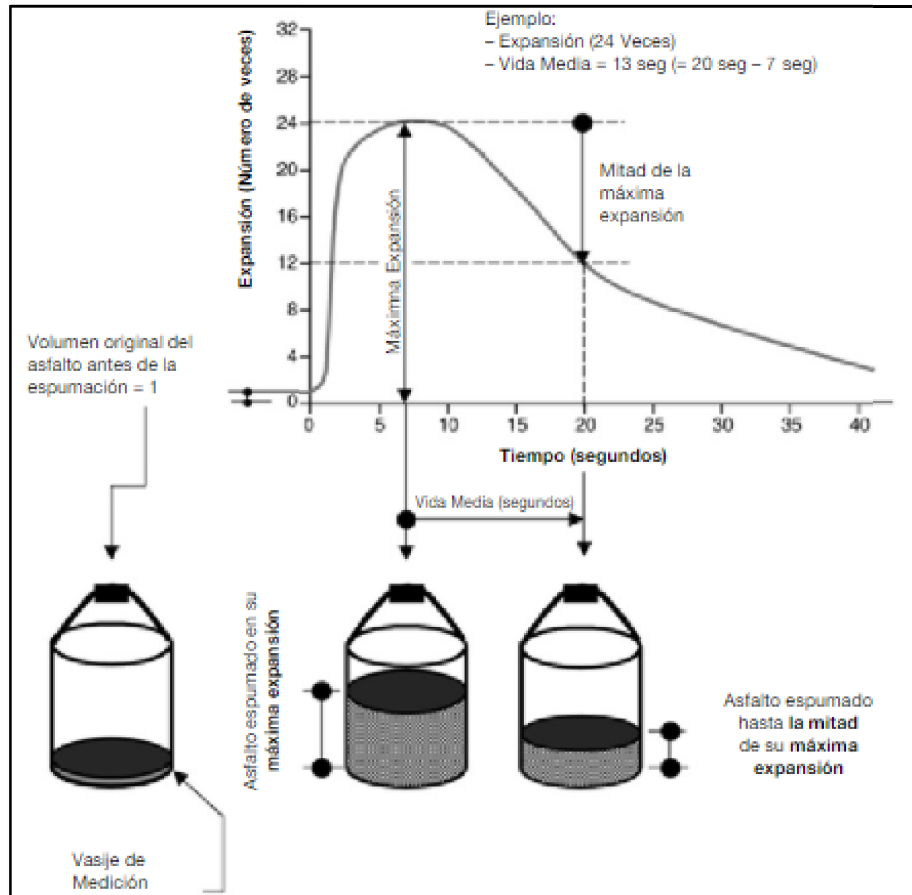


Figura 3.7. Propiedades empíricas del asfalto espumado [7]

A mayores temperaturas de espumado y mayor cantidad de agua se incrementa la Razón de Expansión pero a su vez disminuye la Vida Media, sin embargo el mejor espumado es generalmente considerado como aquel que optimiza tanto la Razón de Expansión como la Vida Media.

Para llevar a cabo dicha optimización es necesario graficar ambas propiedades en un mismo gráfico (Figura 3.8), para distintas cantidades de agua y temperaturas. En general no existen especificaciones estándar para optimizar estas propiedades, pero es recomendable aumentar levemente el valor óptimo de la Vida Media, a partir del punto de intersección, aún en desmedro de la Razón de Expansión.

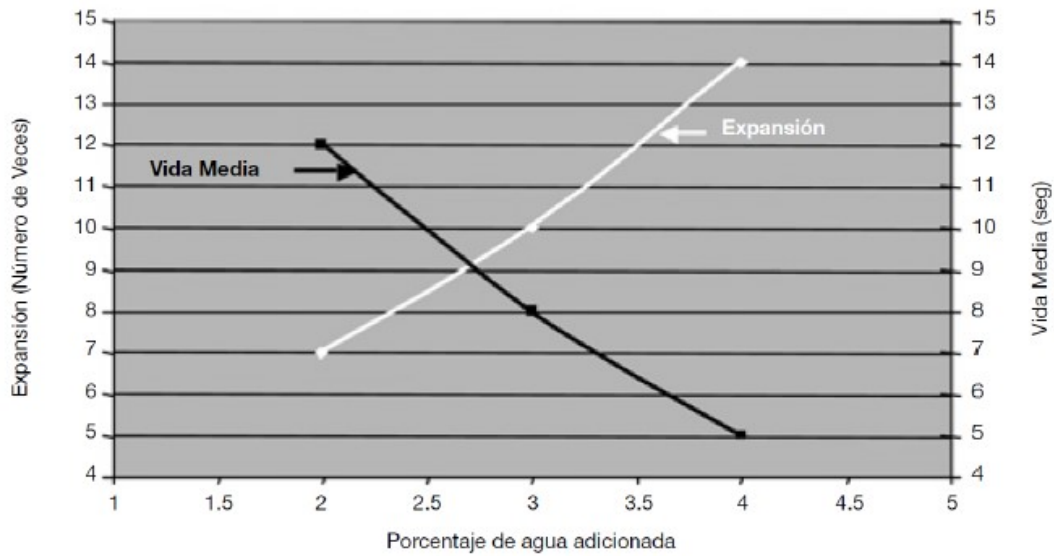


Figura 3.8. Relación entre propiedades del asfalto espumado [7]

La razón de expansión y la vida-media del asfalto espumado está afectado por:

- **Adición de agua:** aumentar la cantidad de agua inyectada al asfalto aumenta efectivamente el volumen de espuma producido por un factor multiplicador de 1500. Así, aumentar la cantidad de agua añadida aumenta el tamaño de las burbujas creadas, causando que aumente la tasa de expansión. Sin embargo, el aumentar el tamaño individual de las burbujas reduce el espesor de la película del asfalto que las rodea, haciéndolas menos estables y resultando en una reducción de la vida media. Por ello, la razón de expansión y la vida media están relacionadas de forma inversa a la cantidad de agua que es añadida.
- **Tipo de asfalto:** los asfaltos más rígidos son generalmente evitados ya que producen una espuma de peor calidad, generando una dispersión más pobre. En función de recopilación de datos, un asfalto 70/100 o CA10 es el que más se adapta a las estabilizaciones con asfalto espumado.
- **Temperatura de Asfalto:** la viscosidad del asfalto goza de una relación inversa con la temperatura; a medida que la temperatura aumenta, la viscosidad se reduce. Lógicamente, mientras más baja es la viscosidad, mayor es el tamaño de la burbuja que se formará cuando el agua cambie de estado en el proceso de

espumado. Debido a que este proceso saca energía del asfalto, la temperatura antes del espumar debe exceder los 160 °C para obtener un producto satisfactorio.

- Presión de asfalto y de agua: el asfalto y el agua son inyectados en la cámara de expansión a través de pequeñas aberturas. El aumentar la presión en las tuberías de suministro causa que el flujo que pasa a través de estas aberturas se disperse (atomice). Mientras más pequeñas son las partículas individuales, mayor es el área de contacto disponible, mejorando así la uniformidad de la espuma.
- Aditivos: existen muchos productos en el mercado que van a afectar las propiedades espumantes del asfalto, tanto negativa (agentes anti-espumantes) como positivamente (espumantes). Usualmente, los espumantes son sólo requeridos cuando el asfalto ha sido tratado con un agente anti espumante (normalmente durante el proceso de refinado). La mayoría de los espumantes son añadidos al asfalto antes de calentar a las temperaturas de aplicación y tienden a ser sensibles a la temperatura, siendo su vida efectiva bastante corta. Para obtener los beneficios de añadir un espumante, el asfalto debe ser utilizado dentro pocas horas. Sin embargo, estos productos son generalmente caros y se consideran sólo como un último recurso para mejorar las propiedades de un asfalto difícil de espumar [6].

3.3.3 Preparación de Asfalto Espumado

Para la preparación del asfalto espumado en laboratorio, el manual Wirtgen [8] provee una serie de equipos costosos pertenecientes a esta empresa, por lo tanto es casi impracticable de realizar una experiencia de mezclas asfálticas con asfalto espumado en laboratorio sino se dispone del equipo especial. Pero el Ing. Jorge Páramo, profesor de la Maestría en Ingeniería Vial de la UNR, docente jubilado de la FCEIA y consultor independiente, realizó un estudio detallado sobre una metodología de preparación de asfalto espumado en laboratorio con accesorios que se pueden disponer habitualmente, apoyándose en estudios de la Universidad de Michigan [9].

Dicho proceso consta sencillamente en inyectar agua al asfalto caliente mediante una jeringa a presión, para luego mezclarlo con una varilla y crear el efecto de la espuma.

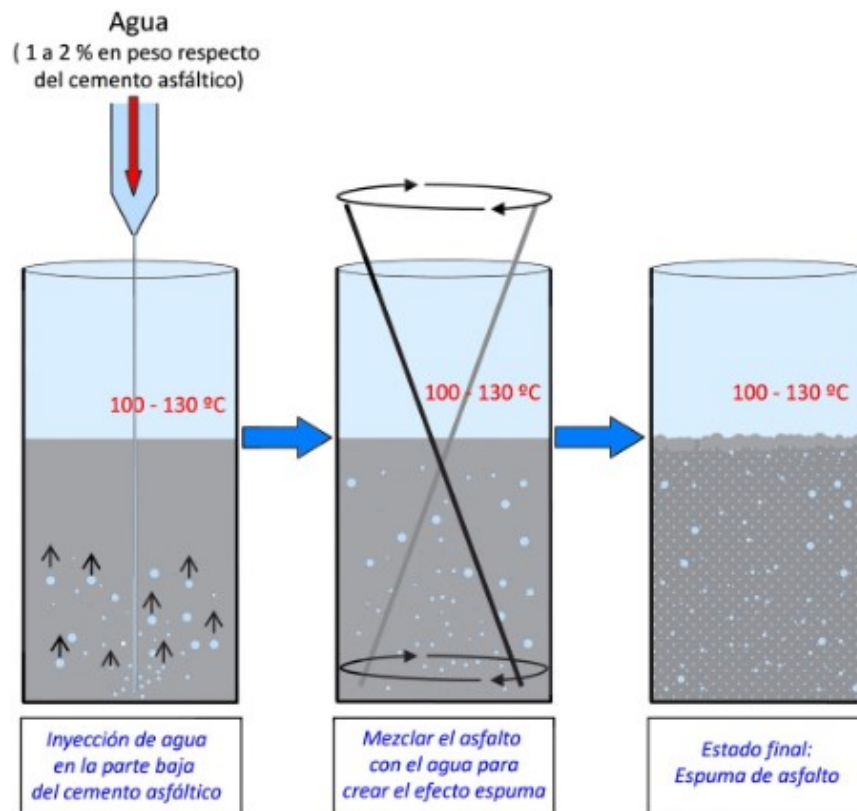


Figura 3.9. Procedimiento para producir asfalto espumado [9]

Una vez realizado el AE, se lleva a cabo la mezcla con el agregado, y el moldeo de probetas.

Para el caso de estabilizados SAA (SAE y SAAE) las probetas se confeccionan mediante el ensayo de "Compactación de Suelos" del Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad (Norma VN-E5-93) [5], o comúnmente conocido como Ensayo Proctor. En caso de estabilizar áridos gruesos, se deberá moldear mediante el compactador rotatorio tipo "Superpave" conforme con normativa AASHTO T312/Superpave y normativa EN 12697-31 "Superpave Procedure" [9].

3.4 Humedad Residual o Relativa

En este punto, el cual hace referencia a la adición del betún a la mezcla de suelo arena, con un porcentaje de modo tal de obtener la mayor densidad seca posible según el ensayo de compactación de suelos, se debe agregar el concepto de Humedad Residual o Relativa.

Según trabajos anteriores realizados sobre SAE, se observa que el mismo tiene diversos comportamientos en función de la humedad que posee remanente, es decir la humedad que posee luego de su curado. Trabajando como material cohesivo para humedades del orden del 60% de la humedad óptima y como un material friccional para aquellas del orden del 25% [10].

Se define entonces 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. Este parámetro va a ser muy importante a la hora de llevar a cabo la caracterización de la mezcla.

Por lo tanto, 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 que tipo de curado se va a proponer y seleccionar un procedimiento de diseño de los estabilizados.

4 DOSIFICACIÓN DE ESTABILIZADO SUELO ARENA ASFALTO

4.1 Antecedentes del Suelo-Arena-Emulsión

Como se menciona en los fundamentos de este trabajo, el SAE es un material que ha desarrollado su estudio a lo largo de varias etapas.

En los primeros años, el objeto de estudio era solamente el Suelo-Emulsión, buscando siempre aquellos más arenosos y empleando las nuevas emulsiones que aparecían en el mercado. Estos estudios fueron desarrollados por el Ing. Rambelli (1946) [11], el Ing. De La Puente (1950) [12], y la Dirección G. de Vialidad de Santa Fe (1952) [13].

Luego, en una segunda etapa de estudios, comienza a implementarse la arena dentro del estabilizado y el estudio mecánico del mismo mediante el ensayo CBR principalmente para evaluar su capacidad portante. Lo que orienta a pensar que se observaba un comportamiento propio de los suelos o materiales granulares no tratados. Varios fueron los autores de diversos trabajos sobre esta temática en esta etapa, por ejemplo, Marini [14], Musurana [15], Olmedo [16], Wiens [17], Moreau [18] y Dorfman [19] todos estos en el año 1966, que sumado a Añon Suarez [20] en 1968 finalizan el segundo ciclo de estudio del estabilizado SAE.

Basándose en estas dos etapas de estudio, entre los años 1960 y 1988, la Dirección Provincial de Vialidad de Santa Fe, llevó a cabo la ejecución de casi 900 km de Suelo-Arena-Emulsión, con el material oficiando generalmente de base de pavimentos flexibles y eventualmente de subbase. En un 70% de los casos, el SAE fue recubierto con tratamientos bituminosos superficiales, preponderadamente triples, en un 20% con carpetas de arena asfalto y el 10% restante con concretos asfálticos, la mayoría de ellos en caliente. La emulsión asfáltica utilizada, en las primeras épocas (hasta 1978), fue del tipo Aniónica lenta y posteriormente Catiónica Superestable. El dosaje típico fue de 70% de Arena natural (generalmente con procedencia del Río Paraná) y 30% de suelo seleccionado, con un 6% o 7% de emulsión en peso respecto al 100% de áridos [2].

Luego de esta época dorada, las estabilizaciones con emulsión comienzan progresivamente a desaparecer. Si bien las respuestas no son tan sencillas de precisar, podría mencionarse que el factor principal que condujo a la progresiva desaparición de este material del ámbito vial santafesino, fue una creciente reticencia constructiva por parte de las empresas. Esta situación estaba relacionada principalmente con las pérdidas de humedad, especialmente previas a la compactación, lo que de alguna manera introducía un factor de incertidumbre en el plan de obra muy difícil de controlar. También, aunque con menos incidencia, el advenimiento de la escoria como material comercial de uso vial con precios competitivos a mediados de la década del 80, cooperó para el definitivo olvido del SAE [2].

Estudios aislados posteriores, fundamentalmente aquellos amparados en la teoría de la elasticidad, con métodos más modernos de diseños de pavimentos, buscaron evitar la extinción del SAE. Ejemplo de estos fueron las investigaciones desarrolladas por el Ing. Montiel (1980) [21] y el Ing. Poncino (1990) [10].

Una vez en desuso el estabilizado los Ings. Ermaccora e Hillar (2000) [2], comenzaron esta nueva etapa de estudios para la re-implementación del SAE en la Provincia de Santa Fe. Esto último más lo realizado por el Ing. Poncino, son los puntos principales de partida de este trabajo.

4.2 Estudio de normativas

En cuanto a la reglamentación de la mezcla, históricamente normativas como el PG-3 (Española), hacían referencia a suelos estabilizados con productos bituminosos describiendo sus materiales, la composición de la mezcla, su ejecución en las obras, tolerancias, limitaciones y más. Hoy en día ese apartado no figura más en dicho reglamento (desde 2004).

Pero el mismo establecía: “Un suelo estabilizado con un producto bituminoso es la mezcla óptima, convenientemente compactada, de suelo, agua, ligante bituminoso y eventualmente adiciones, cuyo fin es mejorar las características resistentes del suelo, disminuyendo su capacidad de absorción de agua y/o aumentando su cohesión, por efecto de la incorporación del ligante bituminoso”. Se deberá determinar la estabilidad con el aparato Hubbard-Field, según Norma NLT-160/73, y el entumecimiento según norma NLT-163/72.” [22]

Una manera de estudiar todo el proceso anterior, es mediante el manual sudafricano TG-2 [23], que explica claramente las nuevas técnicas de ejecución de una mezcla estabilizada con materiales asfálticos. A pesar de que la estabilización se da con gravas y materiales no finos, este reglamento en un buen punto de partida para la aplicación del Asfalto en la mezcla de Suelo-Arena.

El manual Australiano “Austroads” [24], también estudia las estabilizaciones con Asfalto pero solo de asfaltos espumados, dando por hecho de que las estabilizaciones con emulsión han dejado de usarse hace tiempo.

Un tercer manual que abarca los estudios de estas estabilizaciones es el manual de Wirtgen Alemania [8], el cual se puede aprovechar su contenido para englobar una correcta caracterización de la mezcla de Suelo-Arena-Asfalto.

En resumen, se identificaron tres reglamentos que estudian y analizan el SAA, los mismos se adjuntan a continuación en la Tabla 4.1

Tabla 4.1. Resumen de ensayos

Reglamento	Ensayo	Normativa	Curado	Análisis de resultados
TG-2 (Sudáfrica) [23]	Resistencia a Tracción Indirecta por Compresión Diametral, ITS. (En apartado 4.3.4)	ASTM D6931-07 o VN-E9-86	3 días a 40°C	Con ITS se determina BSM1; BSM2; BSM3; No Apto (Tabla 4.3)
	Compresión Triaxial. (En apartado 4.3.2)	Tex-117-E o IRAM 10529	3 días a 40°C	Con c y ϕ se determina BSM1; BSM2; BSM3(Tabla 4.2)
Austroroads (Australia) [24]	Ensayo de Módulo Resiliente, MR. (En apartado 4.4.1.3)	AGPT/T-305 o AASHTO T 307-99	Módulo Resiliente: • 3hs a 25°C • 3 días a 40°C	Mínimos para carpeta de rodadura: • 500 MPa 3hs a 25°C • 2500 MPa 3 días a 40°C
Manual Wirtgen (Alemania) [8]	Resistencia a Tracción Indirecta por Compresión Diametral, ITS. (En apartado 4.3.4)	ASTM D6931-07 o VN-E9-86	3 días a 40°C	ITS mínima de 150 kPa
	Resistencia a Compresión Simple, UCS. (En apartado 4.3.3)	ASTM D2166 - 06 o VN-E33-67	3 días a 40°C	UCS mínima de 700 kPa

De los ensayos anteriores, se observa que en los tres manuales, se coincide que el tiempo de curado óptimo para el estudio de la mezcla van a ser 3 días a 40°C. De todas formas, para ensayos con mezcla fría (SAE) debido a la sencillez en la preparación de la mezcla y conformación de la probeta de ensayo, van a considerarse otros tiempos y temperaturas de curado para observar el comportamiento de la mezcla. Para el caso de mezclas tibias (SAAE), van a seleccionarse los tiempos de curado y ensayos óptimos debido principalmente a la dificultad y peligrosidad de la preparación de la mezcla de modo casero.

En resumen, de la Tabla 4.1, para el caso de estabilizaciones con emulsión (SAE) van a utilizarse distintas combinaciones de curados de 3 y 7 días; temperaturas de 25°C y 40°C; y ambientes seco y húmedo para su curado. Pero para el caso de estabilizaciones con asfalto espumado (SAAE), solo se van a seleccionar los ensayos de la Tabla 4.1 aplicando el curado de 3 días a 40°C.

Una vez sumada esta información a ensayos viales mecánicos y físicos, se va a concluir cual es el proceso mas acertado de estudio y si el mismo se comporta como mezcla bituminosa o como suelo. Es fundamental para todos los ensayos determinar la humedad residual de cada probeta, como se explicó con el apartado 3.4.

Los ensayos a adicionar en el estudio del SAA son:

Mecánicos:

- Compactación de Suelos, según norma VN-E5-93 [5]
- Determinación del valor soporte e hinchamiento de suelos, según norma VN-E6-8 [5]
- Deformación permanente mediante rueda cargada, Wheel Tracking Test (WTT), según norma BS EN 12697-22:2003 o IRAM 6850.

Físicos:

- Límite líquido, según norma VN-E2-65 [5]
- Límite plástico, índice de plasticidad, según norma VN-E3-65 [5]
- Clasificación de suelos, según norma VN-E4-84 [5]
- Ensayo de capilaridad de suelos, según metodología del LEMaC [25]

4.3 Ensayos estáticos para obtención de parámetros c y ϕ

4.3.1 Generalidades 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 construcción, es un material muy heterogéneo. 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 su comportamiento frente a sollicitaciones externas.

Las propiedades físicas se determinan mediante ensayos de identificación y estado efectuados en el laboratorio, con objeto de determinar ciertos parámetros, entre los cuales los de mayor interés son granulometría y los límites de Atterberg (Límite Líquido y Plástico), Clasificación de suelos.

Para realizar la verificación física del suelo, rigen las especificaciones indicadas en la Sección C.I: "Disposiciones generales para la ejecución y reparación de bases no bituminosas" del Pliego de Especificaciones Técnicas Generales, de la Dirección

Nacional de Vialidad [26]. Como también las Especificaciones Técnicas Particulares “Yacimientos de suelos” y “Exceso de humedad de suelos” del Pliego mencionado, con las modificaciones y exigencias que se indican a continuación.

“Se utilizará Suelo Seleccionado tipo A-4, la calidad del suelo a usar deberá responder a las características físicas siguientes:

- Límite líquido $\leq 30\%$.
- Índice plástico $\leq 10\%$
- Hinchamiento $\leq 1\%$
- No deberá contener materia orgánica alguna.

Para el caso de la arena, su verificación física es simplemente mediante el módulo de fineza indicado también en la Sección C.I: “Disposiciones generales para la ejecución y reparación de bases no bituminosas” del Pliego de Especificaciones Técnicas Generales, de la Dirección Nacional de Vialidad. “Se utilizará una arena cuyo Módulo de Fineza sea igual o superior a 1,80” [26].

Las propiedades mecánicas de los materiales, se estudian mediante ensayos de laboratorio para determinar sus características de resistencia y de deformabilidad (Resistencia a Compresión Simple, Resistencia a la Tracción Indirecta y Ensayo Triaxial Estático).

Una vez efectuada la caracterización física y mecánica del material se procede a realizar la dosificación del estabilizado.

4.3.2 Ensayo de compresión triaxial en suelos cohesivos sobre probetas no consolidadas no drenadas (Norma IRAM 10529) [27]

El ensayo de Compresión Triaxial más comúnmente conocido como Ensayo Triaxial Estático o Simple (STT), es un método desarrollado para laboratorios de suelo, con el fin de obtener valores de cohesión y ángulo de fricción del material que se ensaya de acuerdo a la teoría de Mohr-Coulomb, con el aparato de carga axial según se observa en Figura 4.1. Este procedimiento permite obtener de forma directa los Módulos estáticos tanto tangentes o secantes del material. La cohesión, el ángulo de fricción y el módulo tangente son usados para la clasificación del material en estudio.



Figura 4.1. Triaxial Estático perteneciente al laboratorio vial del IMAE

Para el caso en estudio estos ensayos permiten la medición de la susceptibilidad de las bases estabilizadas de mezclas bituminosas, mayores valores de cohesión y de ángulo de fricción hacen referencia a materiales más resistentes. El manual sudafricano TG-2, en base a los datos anteriores, divide en tres niveles a la base estabilizada con material bituminoso BSM1, BSM2, BSM3 según Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores recomendados de parámetros obtenidos de triaxiales estáticos [23].

Test or Indicator	BSM1	BSM2	BSM3
Cohesion (kPa)	> 250	100 to 250	50 to 100
Friction Angle (°)	> 40	30 to 40	< 30

Este último ensayo, brinda con gran precisión los parámetros del estabilizado SAA, aunque el equipamiento para efectuar dicho ensayo es costoso y solo se encuentra a disposición en laboratorios centrales de investigación. Por ende, es de gran importancia, encontrar la forma de caracterizar el estabilizado en cuestión, con ensayos más comunes localizados en todo campamento de obra. Dejando a modo de verificación de estos ensayos, el Ensayo Triaxial Estático desarrollado en este apartado.

Los ensayos mecánicos más simples o comunes de obra para estudiar el comportamiento del estabilizado SAA son:

- Ensayo de Resistencia a Compresión Simple [5].
- Resistencia Indirecta por Compresión Diametral [28]

4.3.3 Ensayo de Resistencia a Compresión Simple

El ensayo a compresión simple (UCS: Uniaxial Compressive Strength), se realiza con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último de un suelo cohesivo a la compresión no confinada.

El ensayo de Resistencia a la Compresión Simple, debe llevarse a cabo, siguiendo la normativa VN E33-67 “Ensayo de compresión de probetas compactadas de suelo-cal y suelo-cemento”, del reglamento vigente de la Dirección Nacional de Vialidad Argentina [5].

Para el caso de la normativa que hace referencia a la estabilización con Asfalto, el manual de Wirtgen Alemania otorga una UCS mínima para un curado de 3 días a 40°C de 700 kPa, se va a verificar que la mezcla cruce dicho umbral para poder dar como apto su estudio.

4.3.4 Resistencia a Tracción Indirecta por Compresión Diametral (Norma ASTM D6931) [28].

Para el caso de la normativa, existen dos reglamentos que estudian la resistencia a tracción indirecta para mezclas estabilizadas con materiales bituminosos. El primero es el ya mencionado Manual Wirtgen, el mismo otorga un rango de entre 150 kPa y 450 kPa para estabilizaciones de suelos. Como es un rango demasiado amplio para poder caracterizar la mezcla, se va a utilizar la segunda normativa que estudia esta técnica, el TG-2 según Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Valores recomendados para la resistencia a tracción indirecta (kPa) [23].

Test	Specimen diameter	BSM1	BSM2	BSM3
ITS dry	100 mm	> 225	175 to 225	125 to 175

El ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta (ITS: Indirect Tensile Strength), debe llevarse a cabo, siguiendo la normativa Norma ASTM D6931 “Standard Test Method for Indirect Tensile Strength of Bituminous Mixtures” [28], la cual puede adaptarse a la norma VN-E9-86 [5] “Ensayo de estabilidad y fluencia por el método Marshall”,

mediante la adición de una barra superior que simule la carga puntual y diametral sobre la probeta.

Es muy importante la realización de este ensayo (ITS), debido a que junto con los valores del ensayo de UCS se pueden trazar los Círculos de Mohr y la recta de falla tangente a los mismos, para la obtención de los parámetros c cohesión (ordenada de la intersección de la recta de falla) y ϕ (pendiente de la recta de falla) según se observa en la Figura 4.2.

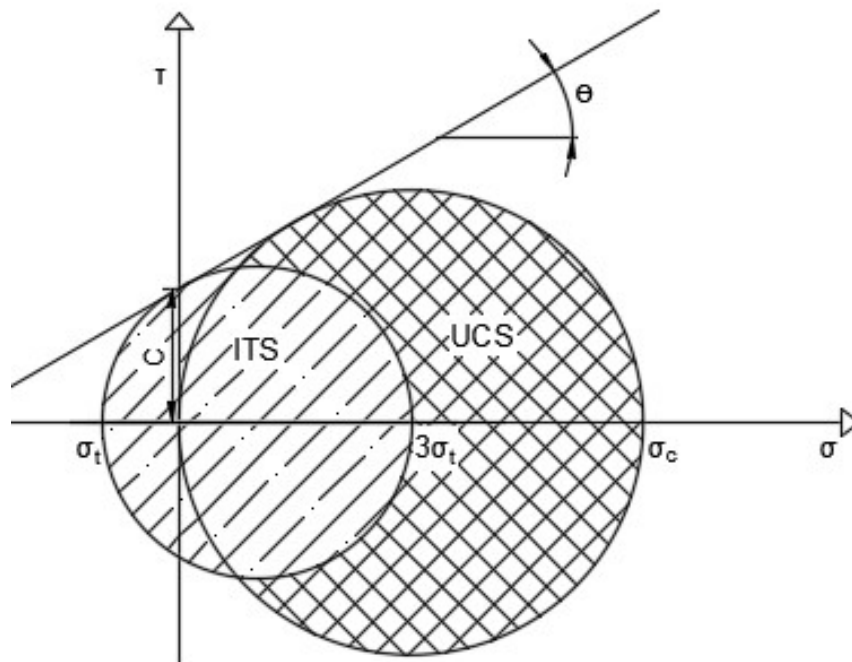


Figura 4.2. Circulo de Mohr para suelos.

En primer lugar, 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 las tensiones teóricas para una carga concentrada a lo largo de los ejes horizontales y verticales se muestran en la Figura 4.3.

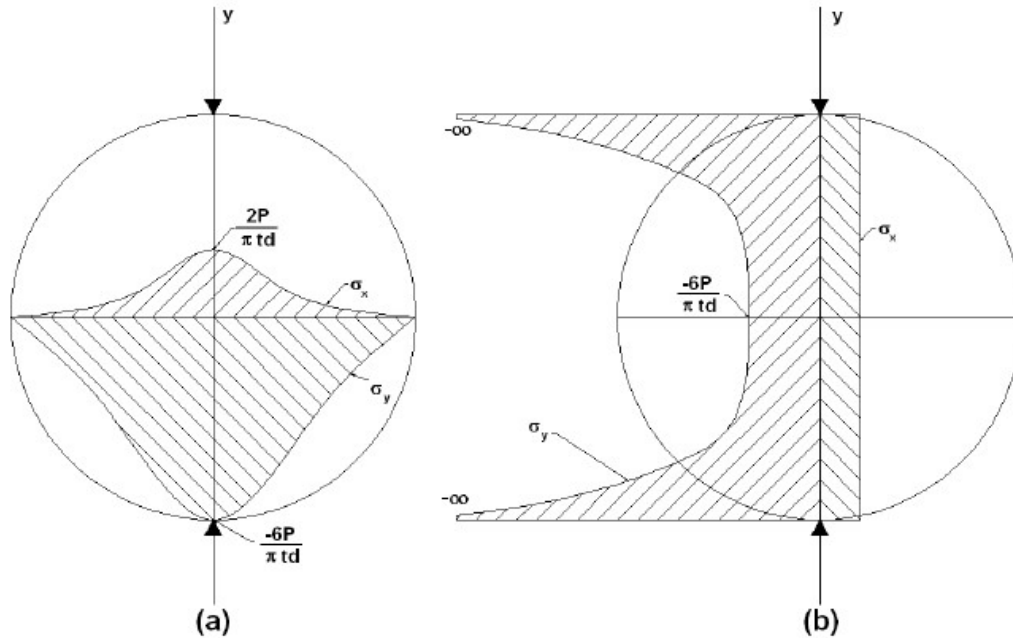


Figura 4.3. Distribución de esfuerzos teóricos sobre planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta [28]

En la distribución de tensiones en el diámetro horizontal (a), se puede observar que en el centro de la probeta el esfuerzo de compresión vertical es 3 veces superior al de tracción horizontal.

Para el caso del 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 tracción horizontal generada [29].

Se adopta por ende, que la tensión de compresión es 3 veces superior que la propia de tracción a la cual se somete la probeta en el ensayo.

La tensión de Tracción viene dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot P_{max}}{\pi \cdot d \cdot r} \quad (1)$$

Siendo:

σ_t : Tensión máxima de tracción del material.

P_{max}: la carga máxima de rotura del ensayo.

d: el diámetro de la probeta.

r: el radio de la probeta.

Con estos ensayos es posible trazar la recta tangente que determina los parámetros anteriores de acuerdo a la teoría de Mohr-Coulomb, verificando luego lo obtenido con el Ensayo Triaxial Estático (STT), para dar por válido el estudio estático del estabilizado SAA.

4.4 Diseño de estabilizado Suelo-Arena-Asfalto mediante caracterización dinámica.

4.4.1 Caracterización del Módulo de Rigidez o Módulo Resiliente

La evaluación del comportamiento mecánico de los materiales no tratados se realiza a través del módulo resiliente, el cual es dependiente del estado de tensiones actuantes, y con leyes de falla generalmente asociadas a la acumulación de deformaciones permanentes. En cambio, los materiales fuertemente ligados poseen una rigidez intrínseca y fallas casi siempre relacionadas con la fisuración por fatiga y el grado de deterioro presente [1].

Los suelos y materiales granulares no tratados se comportan sin una rigidez única, sino dependiente de la rigidez de la capa en la que se apoyan y del estado de tensiones al que están sometidos. Se acepta el módulo resiliente como parámetro suficientemente válido de caracterización del comportamiento elástico no lineal de estos materiales [1].

4.4.1.1 Módulo Resiliente

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 (Figura 4.4) [1]. Esto permite establecer la presunción de que, siempre y cuando la carga axial cíclica no supere la tensión de corte del material, luego de un gran número de repeticiones la única componente de la deformación es elástica ϵ_r .

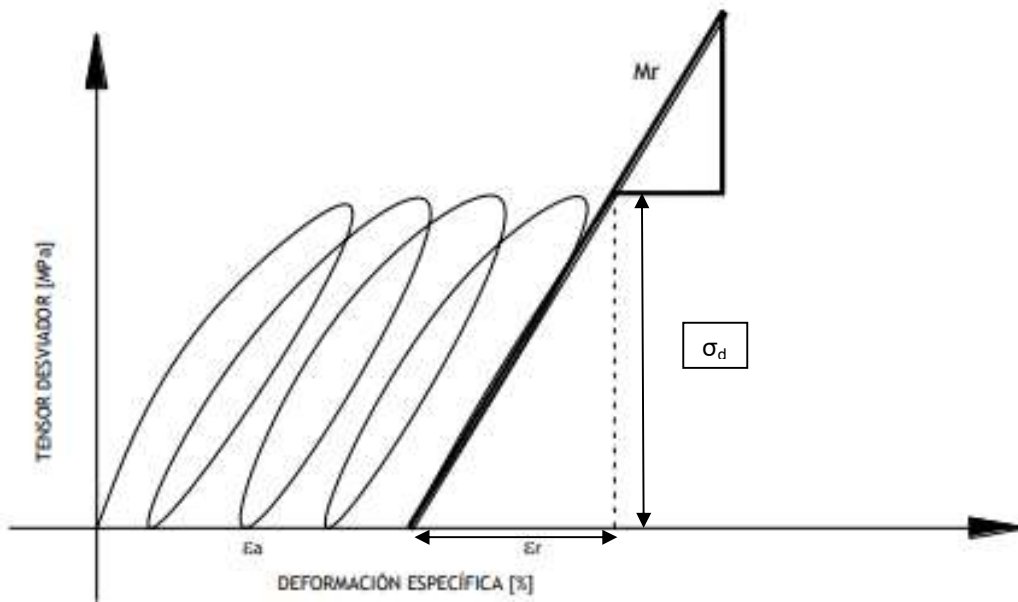


Figura 4.4. Definición de Módulo Resiliente (M_r)

El valor del módulo representa esa relación entre tensiones y deformaciones de los materiales constituyentes del pavimento, simulando condiciones dentro un paquete estructural, y se calcula según Ecuación (2) [30].

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2)$$

σ_d = tensor desviador, en MPa.

ϵ_r = deformación elástica, en %.

El módulo resiliante de las bases, sub-bases y sub-rasantes de suelos es un parámetro fundamental empleado como dato de entrada en 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.

La necesidad de determinar los parámetros válidos para una correcta caracterización del estabilizado Suelo-Arena-Asfalto, vienen dados por los ensayos que someten al

material a condiciones más reales durante su etapa en servicio. En este punto se va a estudiar el diseño de la mezcla, por lo tanto, ésta deberá evaluarse en laboratorio según los siguientes ensayos:

- Ensayo para la determinación del Módulo Resiliente de suelos y materiales agregados (Normativa AASHTO T 307-99) [31].
- Ensayo de Deformación Permanente mediante Equipo de Rueda Cargada (Normativa BS EN 12697-22:2003 o IRAM 6850) [32].

Este último se llevará a cabo a modo de experimentación, y con la finalidad de contemplar la resistencia que posee el SAA a deformarse. En todos los casos, las probetas deben ser compactadas hasta obtener la densidad seca máxima según el ensayo de Compactación de Suelos VN-E5-93 del Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad.

4.4.1.2 Obtención del Módulo Resiliente

A lo largo de los años, muchos investigadores han analizado el comportamiento resiliente y propuesto diferentes modelos para caracterizarlos. De todos ellos, un modelo de ecuación constitutiva a partir de la cual es factible calcular el módulo resiliente, y es el que actualmente se emplea en mayor medida, presenta la siguiente forma:

$$Mr/Pa = A. (\tau_{oct}/Pa + 1)^B. \left(\frac{\Theta}{Pa}\right)^C \quad (3)$$

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.

Pa= Presión atmosférica (0.10 MPa)

La constante A tiene siempre un valor considerable y es susceptible al comportamiento de la mezcla en función del contenido de humedad.

En los materiales tratados con ligantes, bituminosos o hidráulicos, las constantes B y C toman valores irrelevantes, con lo que el módulo pasa a ser independiente del nivel de tensiones de trabajo y es denominado, en consecuencia, módulo dinámico [5].

Habida cuenta de la inquietud enunciada en los fundamentos sobre el conocimiento del real comportamiento mecánico de los estabilizados Suelo-Arena-Asfalto y la necesidad de encuadrar al mismo en alguno de los dos modelos descritos, LIGADO O NO LIGADO se plantea la siguiente consideración: En caso de que las constantes B y C tengan valores insignificantes, el estabilizado se asemeja a un material LIGADO. Por lo contrario, si los valores de las mismas son significativos, el estabilizado se aproxima a un material NO LIGADO.

4.4.1.3 Ensayo de Módulo Resiliente para suelos y materiales agregados

Este ensayo tiene como finalidad investigar el comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia al esfuerzo cortante de un espécimen cilíndrico de suelo o material no ligado, sometido a esfuerzos axiales cíclicos.

Se va a desarrollar según la normativa AASHTO T 307-99 y con el equipamiento perteneciente al laboratorio Vial del IMAE de la Universidad Nacional de Rosario.

El ensayo consiste en la aplicación de una serie de cargas cíclicas en una cámara triaxial a un espécimen de material, y en la medición de las deformaciones producidas por dichos esfuerzos (Figura 4.5). La cámara de confinamiento está estipulada para proveer las condiciones de entorno de la muestra mediante la presión de aire, que es el fluido de confinamiento utilizado durante el ensayo.

Con esta metodología se obtendrán los valores de Módulo Resiliente, junto con las constantes A, B y C para caracterizar correctamente este material.

Para este estudio se aplican los tiempos, temperaturas y ambientes de curados variables para la estabilización con emulsión; mientras que se fija el curado de 3 días a 40°C cuando se da uso al asfalto espumado y se analiza su comportamiento resiliente.



Figura 4.5. Ensayo triaxial dinámico para medida del módulo resiliente en suelos y materiales granulares

El valor del M_r determinado de este procedimiento es una medida del módulo elástico reconociendo un comportamiento no lineal a partir de su modelización mediante ecuaciones constitutivas. Éstas son utilizadas luego para analizar estructuralmente al pavimento.

4.4.2 *Ensayo de Deformación Permanente mediante Equipo de Rueda Cargada*

Con respecto a la caracterización de la deformación permanente de los materiales en estudio, si bien se puede llevar a cabo a través del ensayo triaxial dinámico de acuerdo a la normativa AASHTO T 307-99, en esta investigación se incursiona el análisis de la deformación permanente a través del ensayo de Rueda Cargada a pesar que el mismo no está normalizado para este tipo de materiales.

4.4.2.1 *Generalidades del ensayo*

Es un ensayo de simulación que permite caracterizar las mezclas asfálticas desde el punto de su deformabilidad y su resistencia al ahuellamiento. En este caso se va a

aplicar dicho ensayo para el Suelo-Arena-Asfalto, considerando que aún no se sabe correctamente si el material se comporta como ligado o no ligado. Tanto para estabilizaciones con emulsión y con asfalto espumado, el curado para ambos va a ser de 72 hs a 40°C.

Este ensayo consta de una mesa de apoyo que sostiene una probeta que se desplaza bajo una rueda cargada hacia adelante y hacia atrás, y de un dispositivo que proporciona el control de la velocidad a la que se desplaza dicha mesa, como se observa en la Figura 4.6. La oscilación vertical en el mecanismo de la rueda sometida a la carga debe ser menor que 0,25 mm.

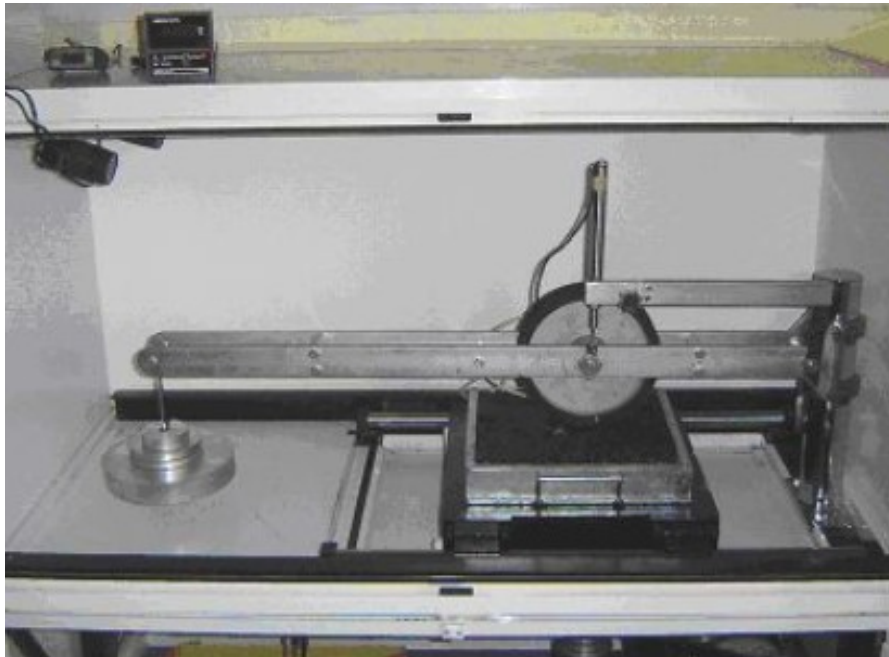


Figura 4.6. Equipo de ensayo Wheel Tracking laboratorio vial IMAE (Argentina) [32]

4.4.2.2 Normativa del ensayo [32]

El ensayo se desarrolla siguiendo el procedimiento normalizado de la Norma BS EN 12697-22:2003: Bituminous Mixtures for Hot Mix Asphalt. Part 22. Wheel Tracking Test de acuerdo al Procedimiento B para probetas pequeñas. La carga aplicada por la rueda es de 698.5 N en un recorrido de 230 mm con una frecuencia de 26 ciclos/min.

Se define como "Ciclo" a dos pasadas de 230 mm de recorrido, una de ida y una de vuelta. Los ensayos se han realizado a la temperatura de 60 °C aplicando 10000 ciclos

(20000 pasadas) luego de 5 ciclos aplicados para acomodamiento y definición de la lectura inicial.

El ensayo culmina con la aplicación de los 10000 ciclos o cuando se alcanza una profundidad de huella H de 20 mm, lo que ocurra en primera instancia.

Con la medición de la profundidad de huella H en función del número de ciclos aplicados, se calculan los siguientes valores:

- Pendiente de ahuellamiento, WTS

$$WTS = \frac{H_{10000} - H_{5000}}{5} \left[\frac{\text{mm}}{10^3 \text{ ciclos}} \right] \quad (4)$$

Donde H_i es la profundidad de la huella para el ciclo i , en mm.

- Profundidad de ahuellamiento proporcional, PR_{aire} :

Es la profundidad de la huella H_i respecto del espesor de la probeta expresada en porcentaje $\pm 0,1\%$, para N ciclos de carga.

$$PR = \frac{H_i}{h} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

Donde h es el espesor de la probeta en mm.

Es fundamental contar con los valores de módulos (ecuaciones constitutivas) y de ahuellamientos (WTS y Pr) en lo que respecta a los ensayos anteriores, ya que son datos que se precisan a la hora de efectuar el diseño estructural. Este último va a ser el encargado de brindar información acerca del comportamiento de la mezcla, en un paquete estructural, para una ruta de tránsito determinado.

5 EJECUCIÓN DE CAPAS ESTABILIZADAS DE SUELO-ARENA-ASFALTO

5.1 Introducción Suelo Arena Emulsión.

Como se ha mencionado anteriormente, en las características del proceso constructivo de este tipo de capas, ha radicado siempre la principal desventaja del Suelo Arena Emulsión.

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. 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 dispone de equipamientos capaces de proveer una mayor energía, como los *Pulvimixers* o las máquinas de una sola pasada. Lo mismo sucede con respecto a las emulsiones, inicialmente de tipo aniónico donde la necesidad de retardar al máximo el corte de las mismas, requiere de la incorporación de fuertes dosis de agua [2].

Actualmente, 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 Superestables, permiten realizar mezclados con humedades que tienden a acercarse cada vez más a la óptima de compactación. De esta forma el aspecto conflictivo del proceso constructivo del SAE, es decir el período de pérdida de humedad entre el mezclado y la compactación, es posible reducirlo 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. Estos equipamientos, utilizados entre otros casos para la estabilización de suelos con cemento, cal o ligantes bituminosos, permiten obtener altas relaciones beneficio-costos, reforzando aún más las bonanzas del material.

Según bibliografías consultadas, por ejemplo PG-3 [22], se prohíben espesores mayores de 15 cm, debiendo dividir la capa estabilizada con material bituminoso en dos. A su vez, el Ing. Jorge Páramo y la Dra. Silva Angelone, en su experiencia y para permitir la correcta evaporación de agua, recomiendan espesores menores de 10 cm, siendo 8cm el valor óptimo. Estas dimensiones han dado siempre buenos resultados en rutas provinciales, a futuro sería correcto poder llevar a cabo tramos de prueba a modo de comprobar que espesor otorga los mejores resultados.

5.2 Empleo de métodos convencionales con emulsión asfáltica

Con referencia al proceso constructivo antiguo, en todos los casos se utilizaba el mezclado en cancha. Este consistía primeramente en un desmenuzamiento del suelo seleccionado, para su posterior encaballetamiento en cancha junto a la arena. Posteriormente se procedía al mezclado de los componentes mediante motoniveladora, el que luego se completaba mediante rastras de discos, *rotomixers* o *pulvimixers*. Luego de ello se procedía a su humectación para la posterior incorporación de la emulsión asfáltica mediante camión regador o bien mediante máquinas de una sola pasada. El mezclado del Suelo-Arena con la emulsión se realizaba originalmente con motoniveladora, pasándose luego al uso de *pulvimixers* y demás, llevándose a cabo en este caso el proceso completo (mezclado de suelo y arena y mezclado con emulsión) en una sola pasada.

En el caso de mezclados con motoniveladora las humedades requeridas eran excesivamente elevadas, cercanas al doble de la óptima de compactación. La utilización de *pulvimixers* permitía reducirlas a un 70% aproximadamente por encima de la óptima de compactación, mientras que con las máquinas de una sola pasada, los valores de humedad requeridos eran del orden de un 40% por encima de la óptima de compactación [2].

Una vez realizada la mezcla, debía lograrse un descenso de la humedad hasta valores del orden de un punto por debajo de la óptima para proceder a la compactación, operación que se realizaba mediante el paso de rastra de discos. Los períodos necesarios para ello eran como mínimo de 2 días, siempre y cuando las condiciones climáticas acompañaran (clima cálido y sin lluvia), pues de lo contrario estos tiempos podían incrementarse sensiblemente. De hecho, esta era la etapa más conflictiva del proceso, debido a que una eventual lluvia sobre el material distribuido y sin compactar, es decir desprotegido, además de perjudicar a la mezcla alargaba aún más los períodos de secado.

La compactación se realizaba con rodillos pata de cabra y rodillos neumáticos, siempre y cuando los espesores fueran superiores a los 0.10m. De lo contrario se utilizaba rodillo neumático exclusivamente. Una vez compactada la capa, debía esperarse una nueva pérdida de humedad, necesaria para que el material adquiriera la estabilidad requerida. El valor usualmente exigido era el de una pérdida del 60% de la óptima de compactación (es decir hasta una humedad residual del 40% de la óptima de compactación), al menos en los primeros 5cm de la capa. Este proceso requería como mínimo de 5 días, dependiendo una vez más, de las características climáticas, aunque en este caso la existencia de lluvias no generaba problemas de importancia a la mezcla compactada [2].

Realizada la compactación y alcanzados los valores de estabilidad, se procedía a una imprimación de la capa, básicamente con el objetivo de protegerla ante provisorios efectos del tránsito, debido a su escasa resistencia a la abrasión.

5.3 Empleo de recicladoras con emulsión asfáltica

Las máquinas de reciclado han evolucionado a través de los años, desde las primeras máquinas modificadas para fresar y estabilizar suelos, hasta las recicladoras especializadas utilizadas hoy en día. Estas recicladoras son especialmente diseñadas para lograr la capacidad de reciclar capas de pavimento de gran espesor en una sola pasada. Las recicladoras modernas tienden a ser máquinas grandes y potentes, las cuales pueden estar montadas sobre orugas o sobre neumáticos de flotación.

El elemento más importante de una máquina recicladora es el rotor fresador-mezclador equipado con un gran número de puntas, especialmente diseñadas para

este proceso. El tambor normalmente rota y pulveriza el material del pavimento existente (Figura 5.1).

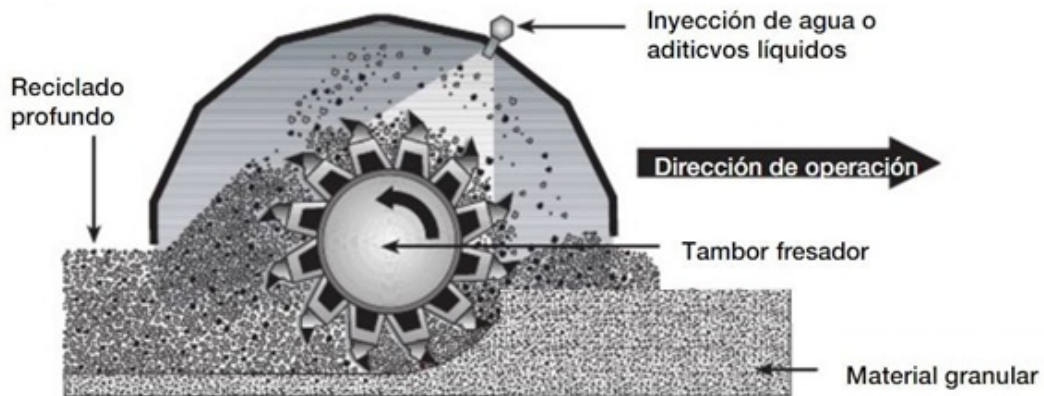


Figura 5.1. Rotor fresador-mezclador de un equipo para reciclado "in situ" [8]

A medida que la máquina avanza con el tambor rotando, el agua de un tanque acoplado a la recicladora se vacía mediante mangueras dentro de la cámara de mezclado. El flujo de agua es medido con precisión mediante un micro procesador controlado por un sistema de bombeo, mientras que el tambor mezcla el agua con el material reciclado para alcanzar el contenido necesario de humedad. De esta forma se acondiciona el material para que los equipos de compactación puedan realizar su tarea de densificación en forma más eficiente [8].

Agentes estabilizadores líquidos, como lechada de cemento/agua o emulsión asfáltica, tanto en forma separada como combinadas, pueden ser introducidos directamente a la cámara de mezclado de una forma similar.

5.3.1 Tren de reciclado

Los trenes de reciclado pueden ser configurados de distinta manera, dependiendo de la aplicación de reciclado y del tipo de agente estabilizador que sea utilizado. En cada caso la máquina recicladora ejerce la tracción en el tren de reciclado, empujando o tirando el equipo que está conectado a la misma mediante barras de empuje o lanzas (Figura 5.2).



Figura 5.2. Tren de reciclado [8]

El material que sale de la recicladora recibe la compactación inicial del rodillo pesado vibratorio para alcanzar una densidad uniforme en todo el material. Posteriormente el material se perfila con una motoniveladora antes de ser finalmente compactado utilizando un compactador neumático y un rodillo vibratorio (Figura 5.3).



Figura 5.3. Perfilado del material ya mezclado con el estabilizante.

Cuando una emulsión se aplica, generalmente se configura un tren de reciclado similar al de la Figura 5.4, formado por un tanque suministrador de emulsión asfáltica empujado delante del mezclador de lechada de cemento asfáltico/agua.

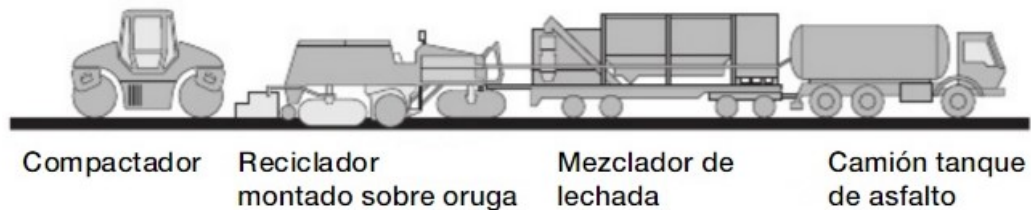


Figura 5.4. Típico tren reciclador con mezclador de lechada y camión de asfalto [8]

5.3.2 Equipos de compactación

Normalmente se utilizan tres rodillos para compactar el material detrás de la recicladora. Primero se posiciona un cilindro vibratorio "pata de cabra", aplicando una compactación de alta amplitud de manera que densifique la parte inferior de la capa reciclada. Una vez alcanzada una compactación uniforme en los dos tercios inferiores de la capa reciclada, se utiliza una moto-niveladora para perfilar y obtener las cotas finales requeridas. A continuación, se debe compactar utilizando un rodillo liso a baja amplitud y alta frecuencia para compactar la porción superior de la nueva capa. Al término del proceso de compactación, se utiliza un rodillo neumático para lograr un acabado superficial liso [33].

5.4 El uso de emulsiones Superestables

A pesar de que diversas empresas petroleras promuevan su uso, no se encuentran registros de estabilizaciones de suelos con emulsiones Catiónicas Superestables. Por ende, su falta de implementación, fomenta a que se efectúen los estudios y verificaciones necesarios, para que se permita llevar a cabo una correcta estabilización, incluso con suelos finos.

5.5 Reciclado con asfalto espumado

El proceso de reciclado con asfalto espumado es similar al descrito para el reciclado en frío. El tren de reciclado es similar al de las estabilizaciones con emulsión pero con la gran diferencia en la cámara de mezclado (Figura 5.5), dado que se debe adicionar agua y asfalto, en vez de emulsión.

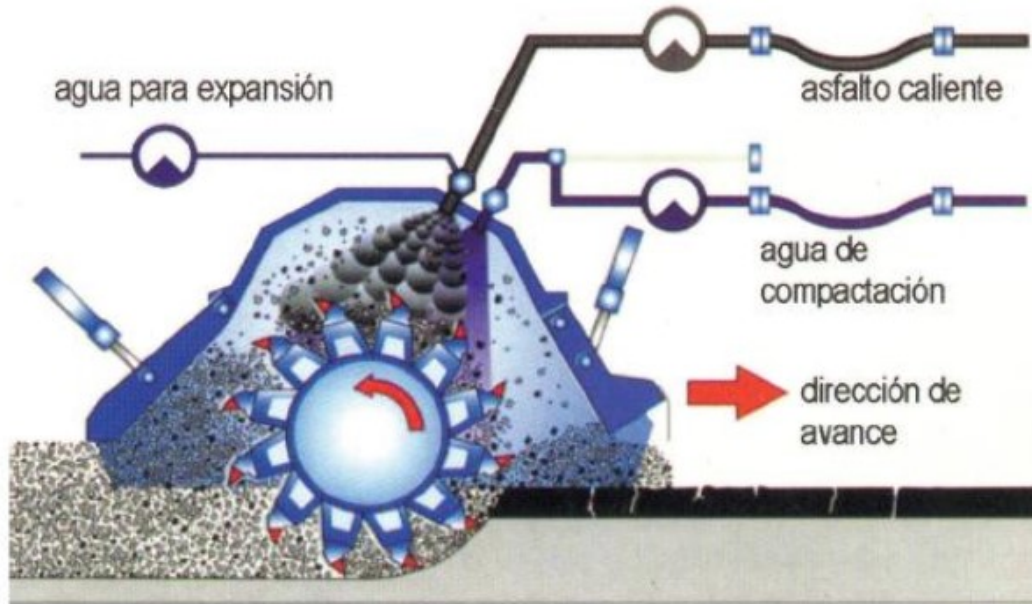


Figura 5.5. Detalle de inyección de asfalto caliente en proceso de reciclado [7]

Se puede adaptar la recicladora para producir el mezclado, pero el equipamiento es muy costoso y solo lo proveen marcas europeas dueñas del mercado. Por esto último se ve de gran importancia separar siempre un trabajo que se debe ejecutar para alto tránsito de uno para un tránsito medio o bajo. Los recursos y tiempos que lleva el reciclado con asfalto espumado son mayores que los propios con emulsión.

Actualmente esta técnica **NO** se utiliza para estabilizaciones de suelos finos en este país, es por eso que mediante este trabajo se busca poder caracterizar correctamente al material y observar su comportamiento, de modo de poder aprovechar las ventajas que traen las estabilizaciones con bitúmenes y poder utilizarlas en Argentina.

Es muy importante considerar el aspecto económico, que junto con los resultados de los ensayos, el diseño estructural y el impacto ambiental; va a permitir definir cuándo es más beneficiosa cada metodología.

5.6 Control de compactación in-situ del SAA

Para verificar el estado in situ del material, se va a efectuar el "Control de compactación por el método de la arena" según norma de ensayo VN-E8-66 [5], del Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad.

Esta norma detalla el procedimiento a seguir para determinar en el terreno el peso unitario de un suelo compactado, corrientemente denominado densidad, y establecer si el grado de compactación logrado cumple con las condiciones previstas (Figura 5.6).



Figura 5.6. Control de compactación mediante método de la arena [33]

5.7 Comparativa asfalto espumado-emulsión asfáltica

En base a la información brindada por el manual Wirtgen [8], el TG-2 [23] y Austroads [24], se confecciona a continuación la Tabla 5.1 que compara las estabilizaciones con asfalto espumado y emulsión asfáltica para agregados gruesos. Se adopta este material debido a que hay una carencia de estudios y aplicaciones de asfalto espumado en estabilizaciones de suelo.

Este puede ser un punto de partida para luego poder realizar una nueva comparación con los resultados que se obtengan del Suelo-Arena.

Tabla 5.1. Asfalto Espumado vs Emulsión Asfáltica

Estabilización con Asfalto Espumado	Estabilización con Emulsión Asfáltica
Excelente recubrimiento del agregado	Gran recubrimiento de agregado, salvo en aquellos muy finos
Poca cantidad de agua, que se evapora durante la compactación del material	Agua dentro de la mezcla, requiere mayor tiempo de curado
Inmediata liberación de tránsito	Liberación de tránsito luego de unas horas
Se precisa calor para realizar la mezcla, no muy conveniente desde el punto de vista ambiental	Mezcla en forma fría, ventajas ambientales
Equipamiento costoso	Equipamiento tradicional
Técnica de reciclado más compleja	Técnica de reciclado sencilla

6 MATERIALES UTILIZADOS

6.1 Suelo seleccionado

Para realizar la verificación del suelo, rigen las especificaciones indicadas en la Sección C.I: “Disposiciones generales para la ejecución y reparación de bases no bituminosas” del Pliego de Especificaciones Técnicas Generales, de la Dirección Nacional de Vialidad [5]. Como también las Especificaciones Técnicas Particulares “Yacimientos de suelos” y “Exceso de humedad de suelos” del Pliego mencionado, con las modificaciones y exigencias que se indican a continuación.

“Se utilizará Suelo Seleccionado tipo A-4 cuya adquisición, extracción, carga, transporte y descarga sea responsabilidad de la Contratista”.

La calidad del suelo a usar deberá responder a las características físicas siguientes:

- Límite líquido $\leq 30\%$.
- Índice plástico $\leq 10\%$.

- Hinchamiento $\leq 1\%$
- No deberá contener materia orgánica alguna.

El suelo se extrajo de un yacimiento destinado a una futura construcción edilicia en Puerto Norte, Rosario.

En la Tabla 6.1 se muestran los resultados de los ensayos realizados sobre el suelo en estudio de acuerdo a la norma AASHTO del año 1993 [31].

Tabla 6.1. Clasificación de Suelos

TIPO DE MATERIAL		Suelo seleccionado		Suelo seleccionado	
Localización		Puerto Norte		Puerto Norte	
CLASIFICACION		A-4 (7)		A-4 (6)	
GRANULOMETRIA	Peso Total:	300		300	
	Tamices Estándar	Gramos	Pasa (%)	Gramos	Pasa (%)
	Nº 4	0		0	
		300	100	300	100
	Nº 10	3.00		2.00	
		297.0	99.0	298.0	99.3
	Nº 40	10.00		7.00	
		287.0	95.7	291.0	97.0
Nº 200	40.0		44.0		
	247.0	82.3	247.0	82.3	
PLASTICIDAD	Ensayo	L. L.	L. P.	L. L.	L. P.
	Nº De Golpes	25		25	
	Pesafiltro Nº	1	2	1	2
	Pf + Sh = a	51.67	42.49	49.14	41.44
	Pf + Ss = b	47.00	40.80	45.13	39.88
	Agua = a - b = c	4.67	1.69	4.01	1.56
	Tara Pesafiltro = d	32.18	33.10	32.18	33.10
	S. S. = b - d = e	14.82	7.70	12.95	6.78
	Limite Líquido % = c/e %	31.51	21.95	30.97	23.01
	Índice Plástico	9.6		8.0	

El hinchamiento se va a medir con la mezcla conformada de Suelo-Arena, según la normativa VN-E6-84 [5].

Concluyendo lo que respecta al suelo seleccionado, el material verifica y es APTO para su uso. Como una simple mejora de este trabajo, se podría utilizar un suelo que las características se encuentren más alejadas de los límites establecidos.

6.2 Arena silícea

Para el caso de la arena silícea a emplear, hay que considerar que la misma se encuentra disponible en todo el margen Este de la provincia de Santa Fe (delimitado por el Río Paraná). Dicho sector se va a ver beneficiado por la reducción de costos de traslados y rápida puesta en obra sin contaminación de la misma por agentes exteriores. Es necesario evaluar, que a medida que nos alejamos de este sector, los costos aumenten notablemente, junto con el daño que se le provoca a una carretera existente, por toda la carga en circulación.

Como bien se ha mencionado, se utilizará arena natural de Río Paraná, con la siguiente característica, exigida en la Sección C-I, del Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad [5] para poder brindar la fricción suficiente en una estabilización.

- Módulo de Fineza $\geq 1,80$. Se obtiene sumando los porcentajes de retenidos acumulados (hasta el Tamiz N°100) para una muestra de material y dividiendo por 100 (Tabla 6.2).

Tabla 6.2.Módulo Fineza de arena

Tamiz N°	Tamaño (mm)	RETENIDO	PASA	PASA	RET.ACUMULADO
		gr.	gr.	%	%
3/4"	19.1	0.0	663.4	100.0	0.0
3/8"	9.52	0.0	663.4	100.0	0.0
4	4.76	0.0	663.4	100.0	0.0
8	2.30	0.0	663.4	100.0	0.0
16	1.19	3.5	659.9	99.5	0.5
30	0.59	68.7	591.2	89.1	10.9
50	0.30	542.8	48.4	7.3	80.0
100	0.149	30.9	17.5	2.6	97.4
Bandeja		8.5			
Total		654.4			
				M.F	1.89

La arena verifica la especificación antes mencionada, siendo APTA para su uso como el agregado aportante de fricción en la estabilización. Aunque también, al igual que el suelo, hay arenas que cumplen con las características físicas establecidas de un modo más holgado. Existen areneras en la zona costera del río que proveen un material de M.F. que ronda valores cercanos a 3.

6.3 Emulsión asfáltica

En este caso, el proveedor de la emulsión superestable es la empresa Petroquímica Panamericana S.A. Este producto cumple con lo especificado en la Norma IRAM 6691 (2002) tanto en lo que respecta a los porcentajes de residuo, grado de penetración y tiempo de corte, trayendo grandes ventajas a la hora de su empleo.

Se destaca que en estudios anteriores con estabilizados SAE, no se contaba con este tipo de emulsiones superestables ni con una normativa que la avale.

Esta emulsión cumple con las características que se detallan en la Tabla 3.1 “Usos recomendados de las emulsiones catiónicas en construcciones viales” de YPF S.A. En la Tabla 6.3 se muestran los resultados de los ensayos efectuados por la empresa proveedora de la misma.

Tabla 6.3. Características de la Emulsión Asfáltica

PRODUCTO: EMULSIÓN ASFÁLTICA CATIONICA SUPERESTABLE					
Características		Unidad	Min.	Max.	IRAM 6691
Viscosidad Saybolt-Furol	25 ° C	s	-	50	6721
	50° C	s	-	-	
Residuo Asfáltico por Destilación		g/100g	60	-	6719
Hidrocarburos Destilados		ml/100 ml	-	-	6719
Contenido de Agua		g/100g	-	40	6719
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 silícea y agua		-	-	-	6.3
Mezcla de lechada asfáltica en clima cálido		-	Debe Cumplir		6.4
Carga de partícula		-	Positiva		6690
Características		Unidad	Min.	Max.	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

Es fundamental, que la emulsión no se encuentre en reposo constante, debido a que como bien se explica en la teoría puede producirse la separación de fases. Se adoptó como una técnica rutinaria, la agitación de la misma diariamente durante algunos segundos.

6.4 Cemento Asfáltico

Para la fabricación de Asfalto Espumado, como se detalla en el apartado 3.3, los asfaltos ideales para efectuar una adecuada espumación son aquellos de penetración 70/100, o sus correspondientes CA10 [24].

Para este caso, se utiliza el asfalto 70/100 de la compañía SHELL S.A, dicho material lo provee en la zona, la empresa C&L Combustibles y Asfaltos. Se detallan a continuación en la Tabla 6.4, las características del mismo.

Tabla 6.4. Características del Cemento Asfáltico

PRODUCTO POR PENETRACION 70-100			
Ensayos	Método	Unidad	Asfalto
clasificación s/IRAM 6604	-	-	Tipo III
Penetración 25°C, 100g, 5s	IRAM 6576	0.1 mm	70-100
Índice de penetración	IRAM 6576	-	-1.5 /+0.5
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

El objetivo de conocer los parámetros espumantes, es determinar el porcentaje de agua, así como también la temperatura óptima del asfalto para producir las mejores propiedades espumantes. El propósito de estas, es obtener una mayor área de contacto y un mejor revestimiento de los agregados a estabilizar.

Las propiedades espumantes para cada tipo de asfalto se determinan mediante dos parámetros: Relación de Expansión (Re) y Vida Media ($\tau_{1/2}$).

Partiendo de los trabajos realizados por García Hernández, del Instituto Mexicano del Transporte [34] se encuentra que asfaltos de similares características tienen diferentes comportamientos, en función del agua que se adiciona para efectuar el espumado.

La Figura 6.1 muestra la forma en cómo se determina el porcentaje de agua óptimo fijando la temperatura en 170°C (recomendada por el autor). En dicho ejemplo se utilizan porcentajes de agua de 2, 3 y 4 por ciento, para obtener la intersección de las curvas de Relación de Expansión y Vida Media. El punto de encuentro de ambas representa el valor óptimo de agua a agregar

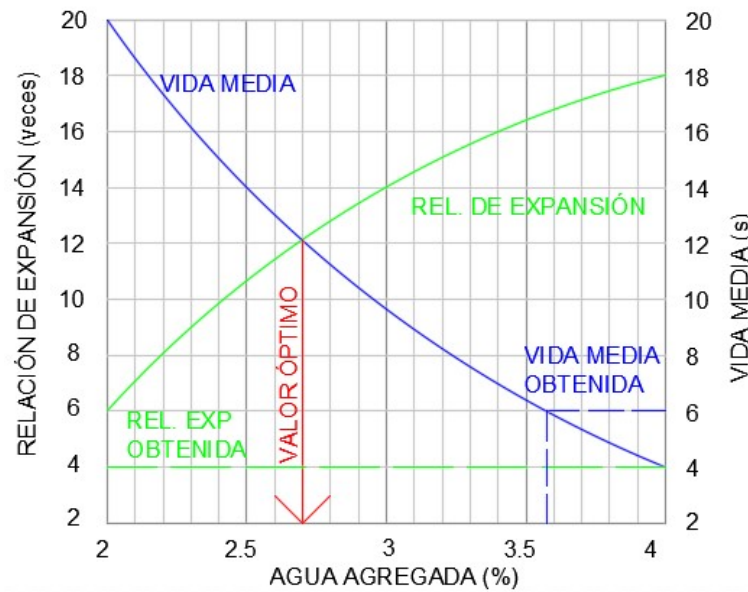


Figura 6.1. Gráfico vida media y relación de expansión en función de agua agregada [34]

La Tabla 6.5 presenta los requerimientos de aceptación y los valores obtenidos para las tres temperaturas. Al igual se observa que a la temperatura de 170°C el asfalto adquiere sus mejores propiedades de espumado con un contenido de agua de 2.7%. Se adoptó dicho porcentaje para este estudio.

Tabla 6.5. Límites mínimos de AE y valores obtenidos [34]

Características del asfalto espumado (Valores mínimos)		Temperatura (°C)	% de agua	Vida Media (s)	Re (Veces)
Temperatura del agregado	>15°C	160	2.7	8.5	9.8
Re (Veces)	8	170	2.7	10.5	12.2
Vida Media (s)	6	180	2.75	8.5	9.5

El espumado, en este caso, se llevó a cabo en laboratorio usando medios rudimentarios de espumaje que consisten en: recipientes caseros, jeringas para inyección del agua y varillas metálicas de mezclado.

Con estos últimos elementos, se van a determinar entonces los valores de Re y $\tau_{1/2}$, mediante diferentes barridos de temperaturas, con la metodología descrita en el apartado 3.3.3, (Figura 6.2).



Figura 6.2. Preparación de asfalto espumado en el Laboratorio Vial del IMAE

Para el asfalto espumado, se analizó el volumen expandido y su consecuente colapso dentro del recipiente conforme transcurre el tiempo. Se calculó el volumen expandido en función de la altura que alcanza máxima el material dentro del recipiente, y se midió el tiempo de Vida Media (Tabla 6.6).

Tabla 6.6. Características del asfalto espumado obtenido

Muestra	Temperatura (°C)	Razón de Expansión (veces)	Vida Media (s)
1	180	3.8	6
2	170	4	7
3	160	3.5	6
4	170	4	7

En la figura 6.1 se graficaron estos valores obtenidos, que se contradicen con lo planteado anteriormente. Por ejemplo, la relación de Expansión no interseca su curva y la Vida Media se relaciona con un valor del 3.6% de agua agregada.

En función a estos resultados, se puede concluir que la metodología de espumación, realizada en el laboratorio con los medios disponibles, no es efectiva. Se obtuvieron 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.

Pero a pesar de no alcanzar los valores requeridos, se va a efectuar de todas formas el estudio del comportamiento del Suelo-Arena, cuando se agrega AE a 170°C con un porcentaje de 2.7% de agua, ya que no se cuenta con los equipos comerciales de espumación apropiados.

7 DOSIFICACIÓN MEDIANTE ENSAYOS ESTÁTICOS

7.1 Porcentaje Suelo-Arena

Para la dosificación de una mezcla de suelo arena se parte de la hipótesis que el suelo va a llevar los vacíos de aire que posee la arena.

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

Los parámetros para comenzar el estudio son la Densidad Seca Máxima y la Humedad Óptima. Éstos se obtienen mediante el Ensayo de Compactación de suelos (Norma VN-E5-93) [5].

Para el suelo seleccionado, según el Ensayo de Compactación de Suelos o Proctor T-180, se obtuvieron los siguientes valores:

- Humedad óptima = 19,50 %
- Densidad Seca Máxima = 16,53 KN/m³

Para la arena silíceas, según el Ensayo de Compactación de Suelos o Proctor T-180, se obtuvieron los siguientes valores:

- Humedad óptima = 3,90%
- Densidad Seca Máxima = 15,93 KN/m³

Una vez que se obtuvieron las densidades secas máximas del suelo y de la arena, para una determinada humedad óptima, se va a calcular la cantidad de suelo que se necesita para llenar los vacíos antes mencionados.

Para este estudio se utilizaron las Propiedades Índices de suelos, con las mismas se debe encontrar la cantidad de suelo que debe ingresar en los vacíos (no ocupados por agua) de la arena. La humedad óptima de la arena nos da pauta de la cantidad de

agua que posee la misma. Se adopta como valor constante para ambos materiales el peso específico de las partículas como $\gamma_s = 26.50 \text{ KN/m}^3$.

La relación de vacíos e , y la porosidad η , se determinaron mediante el uso de los datos anteriores.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} ; \eta = \frac{e}{1+e} \quad (6)$$

Tabla 7.1. Cálculo de proporción Suelo-Arena

SUELO			ARENA		
Parámetros	Valor	Unidad	Parámetros	Valor	Unidad
$\gamma_s =$	26.50	KN/m^3	$\gamma_s =$	26.50	KN/m^3
$\gamma_d \text{ suelo} =$	16.22	KN/m^3	$\gamma_d \text{ arena} =$	15.63	KN/m^3
$\omega \text{ suelo} =$	0.195		$\omega \text{ arena} =$	0.039	
$e \text{ suelo} =$	0.67		$e \text{ arena} =$	0.70	
$\eta \text{ suelo} =$	0.40		$\eta \text{ arena} =$	0.41	Vv

Una vez calculada la porosidad de la arena η , con la ecuación (6), se debe obtener ahora que porcentaje de este volumen ocupe el agua y el aire. Este último deberá ser rellenado por el suelo seleccionado, de modo tan de obtener la máxima compacidad en el estabilizado futuro.

Si se ejemplifica para un Volumen total V_t de 1 m^3 .

$$\gamma_d \text{ arena} = \frac{m_{ss}}{V_t} = 15.63 \text{ KN/m}^3, \text{ implica que } m_{ss} = 15.63 \text{ KN}$$

Sabiendo que, $\omega \text{ arena} = 0.039 = m_w/m_{ss}$; se obtiene $m_w = 0.60 \text{ KN} = 0.06 \text{ tn}$.

Como $m_w = V_w = 0.06$ debido a que la densidad del agua es 1 tn/m^3 ; y $V_v = V_a + V_w$ se obtuvo finalmente

$$\mathbf{V_a = 0.35}$$

Siendo:

- V_v : Volumen de vacíos
- V_a : Volumen de aire
- V_w : Volumen de agua
- m_w : Masa de agua
- m_{ss} : Masa de suelo seco

Este porcentaje, $V_a = 35\%$, va a ser la cantidad de suelo que deberá ocupar los vacíos dejados por la arena. Se adoptó entonces, los porcentajes finales de la mezcla suelo arena de la siguiente forma:

- **Suelo 35%**
- **Arena 65%**

Con estos valores, se realizó en primer lugar el Ensayo de Tamizados de Suelos (Norma VN-E1-65) [5], según se contempla en la Figura 7.1.

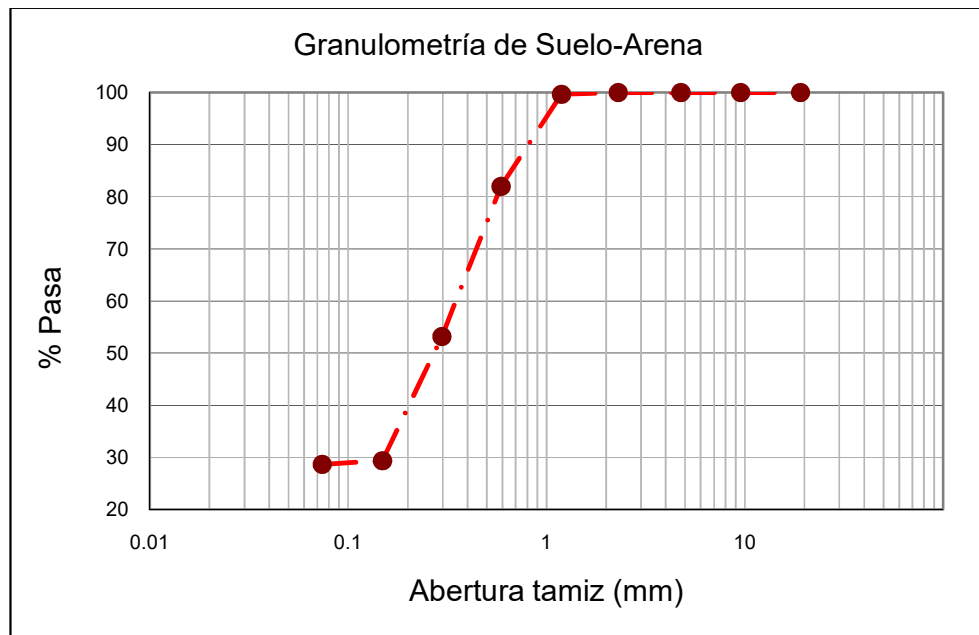


Figura 7.1. Ensayo de Tamizado de Suelos [5]

Con la mezcla de los materiales según las anteriores proporciones, se debe efectuar nuevamente un Ensayo de Compactación de Suelos, que nos permita identificar la humedad óptima del material. Esta última variable va a ser fundamental para la obtención de la cantidad de asfalto a agregar.



Figura 7.2. Probetas de Suelo-Arena conformadas según el Ensayo de Compactación de Suelos [5]

De dicho ensayo se obtuvo la Humedad Óptima y la Densidad Máxima del estabilizado SA (Tabla 7.2) Para este estabilizado, y al igual que cada material separado, corresponde el Ensayo Proctor T-180 conocido como Proctor Modificado.

Tabla 7.2.Resultados del Ensayo de Compactación de Suelos [5]

<i>Humedad óptima =</i>	8.3%
<i>Densidad Máxima =</i>	18.37 KN/m³

Es de gran importancia este último resultado, dado que la humedad óptima obtenida es la que va a regir en todos los estabilizados. Es decir, se va a estudiar a los tres tipos de estabilizados con la misma humedad, de modo tal que la proporción de agua que posea la emulsión o asfalto espumado, reemplace parte del agua a adicionar para lograr la máxima densidad seca de la mezcla Suelo-Arena. Obteniendo finalmente el porcentaje óptimo de betún para cada estabilizado.

7.2 Porcentaje óptimo de asfalto

7.2.1 Porcentaje óptimo de emulsión para SAE

Teniendo como dato, la cantidad de agua que posee la emulsión (Tabla 7.3), la humedad in situ del material y la humedad óptima de compactación (obtenida en el ensayo de Compactación de Suelos de la mezcla Suelo-Arena), se obtuvo el porcentaje óptimo de emulsión para estabilizar la mezcla (Tabla 7.4).

Tabla 7.3. Cálculo de fluidos I

Cantidad de agua en emulsión:	40.00%
Contenido óptimo de fluidos totales	8.30%

A sabiendas que el porcentaje de agua en la emulsión es de 40.00%, y que el contenido de humedad óptimo de la mezcla es de 8.30%, se efectuó una iteración para determinar la humedad del material antes del mezclado con la emulsión, y el porcentaje que se agrega de esta última.

En resumen:

$$\% \text{Fluidos} = \text{Humedad in situ (inicial)} + \% \text{Emulsión} \times 0.40 + \text{Agua}$$

La humedad in situ para ensayos se desprecia debido a que se secan las muestras en laboratorio. En el campo se tiene que considerar, viendo cuánta humedad se debe adicionar o quitar en la mezcla suelo-arena antes de su estabilización con emulsión.

$$\% \text{Emulsión} = (0.083 - \text{Agua}) / 0.40$$

Tabla 7.4. Cálculo de fluidos II

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

Finalmente se determinó el contenido óptimo de emulsión y la cantidad de agua a adicionar para efectuar el mezclado. Vale aclarar que se han consultado en diversos trabajos anteriores, como son los realizados por Ermaccora [2] y Poncino [10], siendo similar el porcentaje de emulsión obtenido.

7.2.2 Porcentaje óptimo de asfalto espumado para SAAE

Para el caso de la estabilización con asfalto espumado, el Manual Wirtgen [8], otorga el porcentaje óptimo a emplear en función de la granulometría obtenida. La mezcla Suelo-Arena, es tamizada por los tamices indicados en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5. Contenido de asfalto espumado típico relativo a granulometría del agregado [8]

Porcentaje que pasa malla: (%)		Porcentaje de asfalto espumado (% en peso sobre el agregado seco)
4.75 mm	0.075 mm	
<50	3.0 - 5.0	2.0 a 2.5
	5.0 - 7.5	2.0 a 3.0
	7.5 - 10.0	2.5 a 3.5
	> 10.0	3.0 a 4.0
>50	3.0 - 5.0	2.0 a 3.0
	5.0 - 7.5	2.5 a 3.5
	7.5 - 10.0	3.0 a 4.0
	>10.0	3.5 a 4.5

Al hacer la granulometría de la mezcla Suelo-Arena, el porcentaje que pasa por la malla 4,75mm es el 89,28%, y el que pasa la malla 0,075mm es el 11,79%. Se hizo uso de la Tabla 7.5 y se adoptó el 4.0% de asfalto espumado en función del peso.

Se utilizó la metodología de adición de preparación de asfalto espumado explicada en el apartado 6.4, pero con la salvedad de que la mezcla Suelo-Arena debe ser preparada con una humedad inferior a la óptima dado que el asfalto espumado va a tener un contenido mínimo de agua en su interior. En otras palabras, como al asfalto se le adiciona un 2.7% de agua de su peso, siendo el mismo un 4.0% del peso de los áridos, la cantidad de agua que debe restarse para la preparación del Suelo-Arena es: $0.027 \times 0.004 = 0.0011 = 0.11\%$; quedando finalmente $8.30\% - 0.11\% = 8.19\%$ como la cantidad de agua a adicionar en el SA.

7.3 Pesos específicos de Estabilizados

Habiendo obtenido el porcentaje óptimo de betún, se moldearon las probetas de modo tal de obtener en los tres estabilizados en estudio la misma humedad, es decir la humedad óptima que se obtuvo del Suelo-Arena (apartado 7.1). Esta humedad va a ser considerada como el cien por ciento 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.

Una vez que se obtuvieron las proporciones de materiales que van a actuar sobre cada estabilizado, y fijando la humedad como la óptima del Suelo-Arena, se procede a realizar en primer lugar los siguientes ensayos:

- Ensayo de Compactación de Suelos, según norma VN-E5-93 [5].
- Determinación del valor soporte e hinchamiento de suelos, VSR. Según norma VN-E6-8 [5].

El primero de los ensayos se realizó simplemente para la obtención del peso específico de cada uno de los estabilizados, debido a que ya se tienen las proporciones de cada material actuante. Luego se lleva a cabo el ensayo de VSR para dos probetas de cada estabilizado, según se especifica en la anterior normativa (Figura 7.3).



Figura 7.3. Ensayo de Valor Soporte Relativo, Laboratorio Vial IMAE [5]

Las muestras elaboradas mediante estos procedimientos se sumergen en agua durante un periodo mínimo de 96 horas antes de proceder a su ensayo, con el objeto de simular las condiciones de saturación, a las cuales van a estar sometidos los suelos como la sub-rasante de una carretera y, en esta forma, obtener los VSR de los suelos bajo las condiciones más críticas. En el ensayo, y en inmersión, se colocan pesos sobre las muestras con el objeto de simular las cargas, tanto de paso de vehículos como de la estructura del pavimento, a las cuales van a estar sometidos los suelos de la sub-rasante [5].

Junto con el ensayo de Valor Soporte Relativo, se obtuvieron también los pesos específicos de cada estabilizado estudiado (Tabla 7.6), fijando la humedad como la óptima del Suelo-Arena, el 8.30% del peso de los áridos secos.

Tabla 7.6. Resultados de Ensayos de Compactación de Suelo y de Valor Soporte Relativo [5]

Material	Densidad Seca Máxima (KN/m ³)	VSR (%)	Hinchamiento (%)
Suelo-Arena	18.37	10.00	0.47
Suelo-Arena-Emulsión	19.39	35.00	0.00
Suelo-Arena-Asfalto Espumado	20.04	15.00	0.34

Estos hinchamientos son relativamente bajos sobre todo para el SAE, que es nulo, siendo una gran ventaja a considerar, debido a que la emulsión se introduce correctamente dentro de los vacíos dejados por las partículas de suelo y arena.

8 ESTABILIZACIONES

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

- Ensayo de Compresión Triaxial, Ensayo o Prueba Triaxial, STT. Según normativa IRAM 10529 [27]. Ver en apartado 4.3.2.
- Resistencia a Compresión Simple, UCS. Según normativa VN-E33-67 [5]. Ver en apartado 4.3.3.
- Resistencia a Tracción Indirecta por Compresión Diametral, ITS. Según normativa VN-E9-86 [5]. Ver en apartado 4.3.4.
- Ensayo de capilaridad de suelos. Según metodología del LEMaC [25].
- Ensayo de Módulo Resiliente, Mr. Según normativa AGPT/T-305 o AASHTO T307-99. Ver en apartado 4.4.1.3
- Deformación permanente mediante rueda cargada, Wheel Tracking Test (WTT), según norma BS EN 12697-22:2003 o IRAM 6850.

8.1 Estabilizado Suelo-Arena (SA)

8.1.1 Ensayo de Compresión Triaxial o Ensayo Triaxial Estático (STT), según Norma IRAM 10529

Para la obtención de los parámetros c y ϕ , Cohesión y Ángulo de fricción interna respectivamente, se confecciona una probeta de mezcla Suelo-Arena, se deja a temperatura ambiente durante 168Hs (7 Días) para provocar la pérdida de humedad, y se somete a una prueba triaxial (apartado 4.3.2), efectuando un estudio más representativo de las condiciones de servicio del material.

Las dimensiones de cada probeta para este tipo de ensayo son 150 mm de alto y 70 mm de diámetro, siendo el proceso de conformación de la misma mediante un molde metálico y a una densidad prefijada (densidad seca máxima).

Una vez realizada la prueba se observa una clara línea de falla en la probeta del material (Figura 8.1). Esta inclinación es siempre dependiente de los parámetros del material a ensayar (c y ϕ).



Figura 8.1. Probeta de SA luego de ser sometida al Ensayo Triaxial Estático

Mediante la variación del confinamiento y esfuerzo desviador, se obtienen tres círculos de Mohr, que permiten confeccionar una gráfica, y posteriormente el trazado de la línea de falla del material, según se explica en el apartado 4.3.2. Los parámetros finales del estabilizado se adjuntan en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. Resultados de Ensayo de Compresión Triaxial sobre Suelo-Arena (Norma IRAM 10529)

Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Humedad (%)	Densidad Húmeda; γ_h (kN/m³)	Densidad Seca; γ_s (kN/m³)	Grado de Compactación (%)
147	44	0.68	18.414	18.290	99.56

De la tabla anterior, los valores de humedad son medidos mediante pesajes en balanza, junto con la densidad húmeda. La densidad seca se obtiene con la siguiente expresión: $\gamma_s = \gamma_h / (1+w)$. El grado de compactación es fundamental verificarlo, de modo tal de poder corroborar que el material a ensayar se encuentre lo suficientemente confinado, según la normativa de la DNV [5].

8.1.2 Ensayo de UCS (Norma VN-E33-67) e ITS (Norma VN-E9-86) sobre estabilizado Suelo-Arena

En función a lo detallado en los apartados 4.3.3 y 4.3.4, se confeccionan tres probetas para cada uno de los ensayos. Las mismas se materializan mediante el ensayo de compactación de suelos siguiendo la normativa VN E33-67 [5].

Para el ensayo UCS, se utilizan probetas con una relación de altura/diámetro de 2. El diámetro mayormente utilizado es 101.6 mm. La compactación de las probetas se realiza según la normativa VN E19-66, donde se utiliza un pistón de 4.5 kg, a una altura de caída de 30.5 cm, para un total de 5 capas y con 25 golpes por cada una (Figura 8.2).



Figura 8.2. Ensayo UCS desarrollado en el Laboratorio Vial del IMAE

En el caso del ensayo ITS, las dimensiones de altura de probeta son la mitad del ensayo UCS, es por eso que se aprovecha y se moldean 2 muestras de las cuales se obtienen cuatro probetas para efectuar el ensayo. Siguiendo con la misma metodología se promedian los resultados y se descartan aquellos que se alejen en gran medida de la media (Figura 8.3).

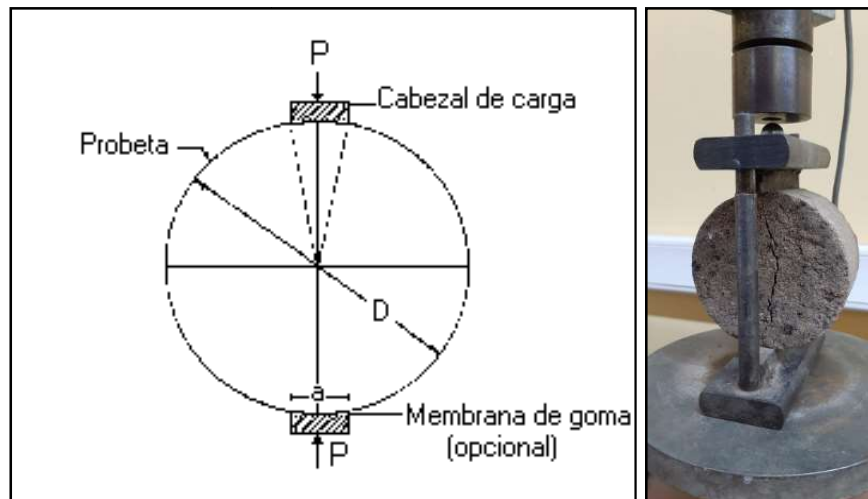


Figura 8.3. Ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta desarrollado en el Laboratorio Vial del IMAE.

El resultado del ensayo es una carga puntual máxima, la cual se convierte en la resistencia a tracción indirecta mediante el uso de la ecuación (7).

$$ITS = (2 \times P) / (\pi \times h \times d) \quad (7)$$

Donde

ITS = Resistencia a la tracción indirecta [kPa]

P = Carga máxima aplicada [kN]

h = Altura promedio de la probeta [m]

d = diámetro de la probeta [m]

Una vez efectuada la carga de estos datos, se confecciona según lo detallado en el apartado 4.3.4 los dos Círculos de Mohr característicos de estos ensayos, para la obtención de los parámetros c y ϕ , que verifiquen lo realizado en el ensayo STT (Tabla 8.2).

Tabla 8.2. Resultados de ensayo UCS (Norma VN-E33-67) e ITS (Norma VN-E9-86) sobre el estabilizado SA.

Ensayo	Comp. (kPa)	Tracc. (kPa)	Humedad (%)	Densidad Húmeda; γ_h (kN/m ³)	Densidad Seca; γ_s (kN/m ³)	Grado de Comp. (%)	Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)
UCS	630	-	3.33	18.950	18.339	99.83	137	43.00
ITS	-	76	3.30	18.945	18.340	99.84		

Para este criterio, los valores de humedad, densidad húmeda, UCS e ITS, de la Tabla 8.2, son promedio de las tres probetas empleadas para cada ensayo. En el ensayo Triaxial Estático (STT) se utiliza solo una probeta, lo cual se descarta este último cálculo (Tabla 8.1, apartado 8.1.1).

Tabla 8.1. Resultados de Ensayo de Compresión Triaxial sobre Suelo-Arena (Norma IRAM 10529)

Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Humedad (%)	Densidad Húmeda; γ_h (kN/m ³)	Densidad Seca; γ_s (kN/m ³)	Grado de Compactación (%)
147	44	0.68	18.414	18.290	99.56

Se grafica a continuación el criterio de falla según ITS y UCS en conjunto con los ensayos triaxiales correspondientes sobre el estabilizado SA.

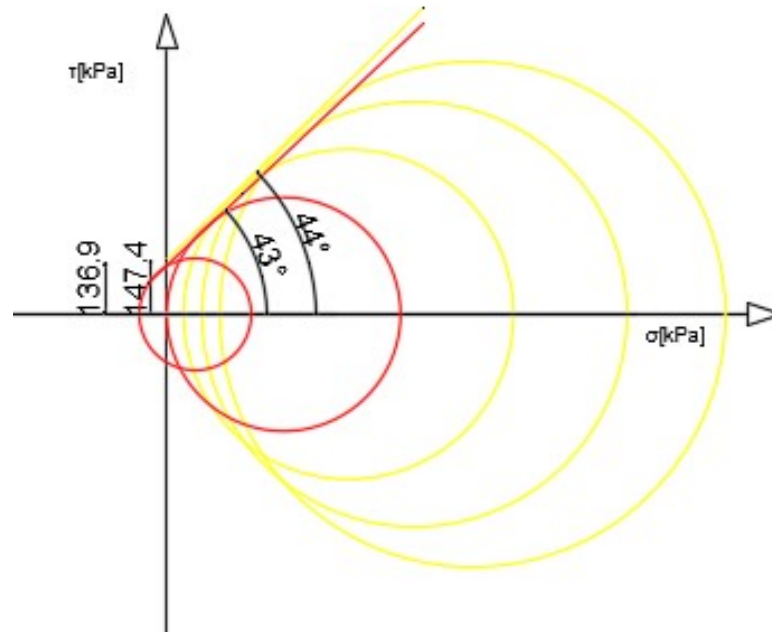


Figura 8.4. Grafico de criterios de falla sobre SA (Hr=40%), UCS-ITS (rojo) y STT (amarillo)

Como conclusión, para este tipo de material con el curado seleccionado, los ensayos otorgan parámetros característicos similares. Es decir, se puede reemplazar el Ensayo Triaxial por la combinación de ITS-UCS, la desviación entre ambos métodos es menor al 8%.

En el Anexo de este trabajo, se encuentran en detalle cada ensayo.

8.1.3 Ensayo de Capilaridad

A pesar de no haber una reglamentación clara acerca de los resultados de los ensayos de capilaridad, es fundamental obtener los porcentajes de humedad absorbidos una vez curado el estabilizado. De modo tal de poder analizar su comportamiento en estructuras de pavimento sometidas a la acción del agua. El laboratorio LEMaC [25], de la UTN, Regional La Plata, plantea una metodología basada en depositar muestras sobre una cama de arena sobresaturada, con un papel que imposibilite la adición de arena en la probeta. Al cabo de siete días utilizando un cobertor, de modo tal de que el agua absorbida no se evapore, se observa la variación de los pesos para la obtención final de los porcentajes de Humedad y Humedad Residual.

Los resultados de dicho ensayo para el estabilizado SA vienen dados por la Tabla 8.3.

Tabla 8.3. Resultados de ensayo de capilaridad sobre el estabilizado Suelo-Arena, metodología del LEMaC [25].

Peso Inicial [kg]	Humedad Inicial (%)	Peso 7 días [kg]	Porcentaje Absorbido (%)	Promedios (%)	Humedad Residual (%)
0.995	0.00	1.089	8.68	8.37	100.87
1.027	0.00	1.120	8.30		
1.060	0.00	1.153	8.07		

El estabilizado recupera su humedad óptima, lo cual implica que es susceptible a la acción del agua. Se debe entonces proceder con los estudios de las estabilizaciones con betún y corroborar si el mismo impermeabiliza o no a los agregados.

8.1.4 Ensayo de Módulo Resiliente

El método consiste en someter un espécimen de suelo a un esfuerzo de confinamiento, combinados con distintos esfuerzos axiales cíclicos, para una frecuencia de 1 Hz (apartado 4.4.1.1)

Con la mezcla Suelo-Arena asfáltica se deben confeccionar probetas de 15cm de altura y 7.2 cm de diámetro, compactadas a densidad prefijada en tres capas, con humedad óptima y densidad seca máxima obtenidas del ensayo de Compactación de Suelos [5].

El ensayo de Módulo Resiliente se desarrolla según la normativa AASHTO T 307-99 y con el equipamiento perteneciente al laboratorio Vial del IMAE de la Universidad Nacional de Rosario. Los detalles del ensayo se explican detalladamente en el apartado 4.4.1.3

Para el caso de estabilizado Suelo-Arena, se moldean 3 probetas en condiciones de humedad óptima, y se desarrolla el ensayo.

Al Módulo Resiliente de la mezcla SA en condiciones húmedas (CH), es decir, probetas moldeadas con humedad óptima y curadas a 25 °C durante 24 hs en una cámara húmeda, se lo llama **Mr1**.

Una vez que se desarrolla el ensayo se obtienen las constantes de regresión correspondientes a la ecuación (3), ya mencionada en el apartado 4.4.1.2.

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

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.

Pa= Presión atmosférica (0.10 MPa)

A, B, C = son constantes experimentales obtenidas por regresión de ecuación (3)

Para el caso del estabilizado Suelo-Arena en condiciones húmedas (CH: probetas moldeadas con humedad óptima y curadas a 25 °C durante 24 Hs en una cámara húmeda), se obtienen los resultados que figuran en la Tabla 8.4.

Tabla 8.4. Resultados del Ensayo de Módulo Resiliente

Mr1 Suelo-Arena CH	
A=	1275
B=	-2.48
C=	0.44
r^2 =	0.65

El valor de r^2 es el coeficiente de determinación. Este se define como la proporción de la varianza total de la variable obtenida por regresión. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable de Mr. Para este estabilizado, se obtiene un valor de coeficiente medianamente bajo, esto puede deberse a la dispersión de la arena en el suelo sin algún cementante que vincule ambas partículas correctamente.

Las gráficas de los módulos que se obtienen se encuentran en el anexo de este trabajo.

8.2 Estabilizado Suelo-Arena-Emulsión (SAE)

8.2.1 Ensayo Triaxial Estático o Ensayo de Compresión Triaxil (STT), según Norma IRAM 10529

El Ensayo Triaxial Estático es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de la resistencia al corte.

El estabilizado SAE, es el principal a estudiar en este trabajo. De modo tal que se plantean distintos tipos de curado para la realización de los ensayos.

Las dimensiones de cada probeta para este tipo de ensayo son 150 mm de alto y 70 mm de diámetro, siendo el proceso de conformación de la misma mediante un molde metálico y a una densidad prefijada (densidad seca máxima).

En un primer lugar, respetando la normativa sudafricana TG-2 [23], el curado de las probetas se va a dar para 72Hs a 40°C (Figura 8.5), con este resultado se puede clasificar al mismo según lo especificado en el anterior reglamento. En adición, se somete al material a curados a temperatura ambiente más representativos de la zona donde se quiere efectuar la aplicación.



Figura 8.5. Probetas de SAE antes (izq.) y después del curado (der) impuesto por el TG-2 [23].

Es fundamental comparar el SAE con el SA de modo de observar la mejora que provee el uso de emulsión, por eso se adopta un curado de 168 hs a temperatura ambiente. También se utiliza la misma temperatura pero para 72 hs, es decir, un mismo tiempo que en la normativa TG-2 pero con una variación de la temperatura. Finalmente, se desarrolla un curado de 24 hs en una cámara húmeda, de modo tal de estudiar el estabilizado en condiciones de Humedad Relativa igual al 100%.

Para cada uno de estos tipos de curado se efectúan el Ensayo Triaxial Estático (STT), que permite la obtención de los parámetros característicos del mismo, según se explica en el apartado 4.3.2 (Tabla 8.5).

Tabla 8.5. Resultados de Ensayo de Compresión Triaxial sobre SAE (Norma IRAM 10529)

Curado	Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Humedad (%)	Densidad Húmeda; γ_h (kN/m ³)	Densidad Seca; γ_s (kN/m ³)	Grado de Compactación (%)
72 hs Amb	238	25	3.10	19.800	19.205	99.04
168 hs Amb	301	22	1.20	19.506	19.274	99.40
72 hs 40°C	333	20	0.20	19.384	19.346	99.77
24 hs Cámara Húmedo	46	26	8.22	20.961	19.369	99.89

Se observa que la pérdida de humedad por los secados es ampliamente favorable, el estabilizado en condición húmeda, tiene muy bajos valores de cohesión. Al darse la pérdida de agua dentro del mismo, el ángulo de fricción del material se mantiene dentro de un rango entre 20° y 26° y aumenta la cohesión. Los valores alcanzados por la cohesión, en probetas con curados secos, ascienden hasta un 700%, en relación con las probetas curadas de modo húmedo.

Valores de humedad cercanos a cero otorgan la máxima resistencia, éstos se logran efectuando el curado planteado por la reglamentación TG-2. Esta última permite efectuar una clasificación del material en función a sus parámetros (Tabla 8.6).

Tabla 8.6. Clasificación de BSM en función a parámetros obtenidos, según TG-2 [23].

Test or Indicator	BSM1	BSM2	BSM3
Cohesion (kPa)	> 250	100 to 250	50 to 100
Friction Angle (°)	> 40	30 to 40	< 30

El estabilizado SAE, para condiciones de humedad óptima se caracteriza por encontrarse dentro de las BSM3, que son las bases menos resistentes. Pero para el caso de los curados a temperatura ambiente y a 40°C este mejora notablemente su cohesión alcanzando el de una base BSM1, aunque el ángulo de fricción se mantiene dentro de los rangos de la BSM3, permaneciendo también en este grupo (se deben cumplir las dos condiciones para que sea un BSM1).

El manual no especifica, que hacer en estos casos, es por eso que se procede con el resto de los ensayos, para posicionar luego al material dentro del grupo en el que mejor se adapte.

8.2.2 Ensayo UCS (Norma VN-E33-67) y Ensayo ITS (Norma VN-E9-86) sobre estabilizado Suelo-Arena-Emulsión

Mediante los curados especificados en el apartado anterior, se procede a realizar los ensayos UCS e ITS del mismo modo que en el Suelo-Arena. Para obtener luego los parámetros que verifiquen lo realizado en el ensayo triaxial, en función a lo detallado en los apartados 4.3.3 y 4.3.4 (Tabla 8.7).

Tabla 8.7. Resultados de Ensayo UCS (Norma VN-E33-67) y Ensayo ITS (Norma VN-E9-86).

Ensayo	Curado	Comp. (kPa)	Tracc. (kPa)	Hum. (%)	Densidad Húmeda; y _h (kN/m ³)	Densidad Seca; y _s (kN/m ³)	Grado de Comp. (%)	Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)
UCS	72 hs Amb	790		5.10	20.201	19.221	99.13	252	25
ITS			145	5.08	20.180	19.204	99.04		
UCS	168 hs Amb	1010		3.90	20.085	19.331	99.69	332	23
ITS			190	3.83	20.075	19.334	99.71		
UCS	72 hs 40°C	1180		2.20	20.117	19.683	101.51	380	24
ITS			218	2.15	20.101	19.678	101.48		
UCS	Húmedo	150		8.20	21.006	19.414	100.13	47	26
ITS			27	8.19	20.995	19.406	100.08		

Para el caso de la Resistencia a Compresión Simple (UCS), se observa una variación en función de la Humedad del material. Probetas con Humedades Relativas del orden del 25%, las cuales se obtienen mediante el curado de 72 hs a 40°C, son las que mejor se comportan. El manual Wirtgen [8] para estabilizaciones bituminosas, exige un mínimo de UCS de 700 kPa para dicho curado, con gran amplitud todas las probetas verifican este límite impuesto.

A continuación, en las Figuras 8.6, 8.7, 8.8 y 8.9, se grafican los círculos de Mohr obtenidos mediante el criterio de falla UCS-ITS (color rojo) y los propios de los ensayos triaxiales estáticos (color amarillo). Posteriormente se trazan las rectas tangentes a los mismos, las pendientes se corresponden con el ángulo de fricción, mientras que la intersección con el eje vertical a la cohesión.

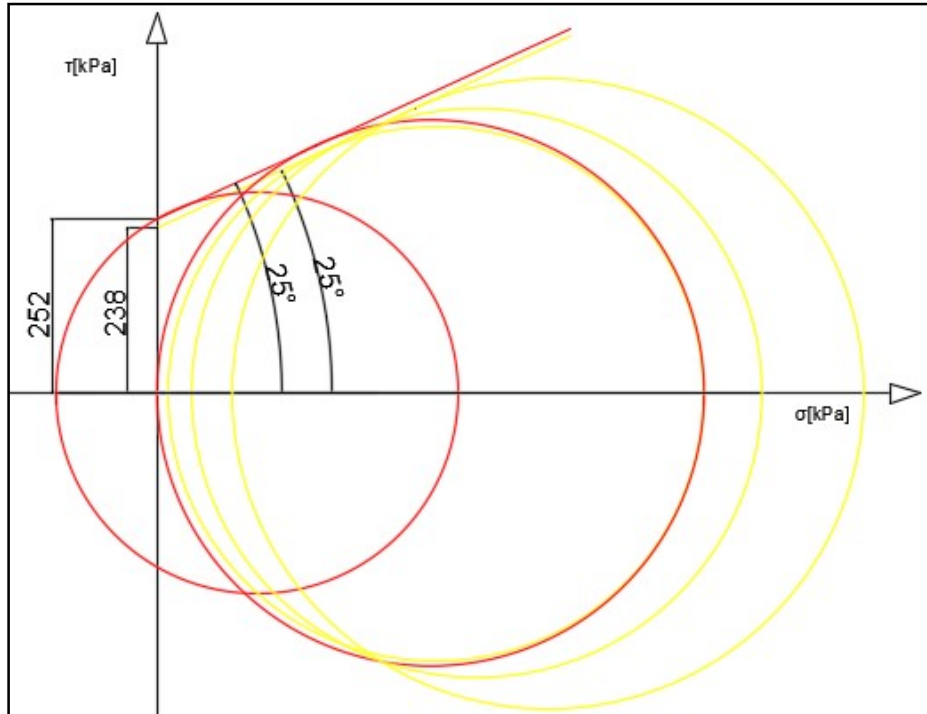


Figura 8.6. Gráfico de criterios de falla sobre SAE curado durante 72 hs a temperatura ambiente.

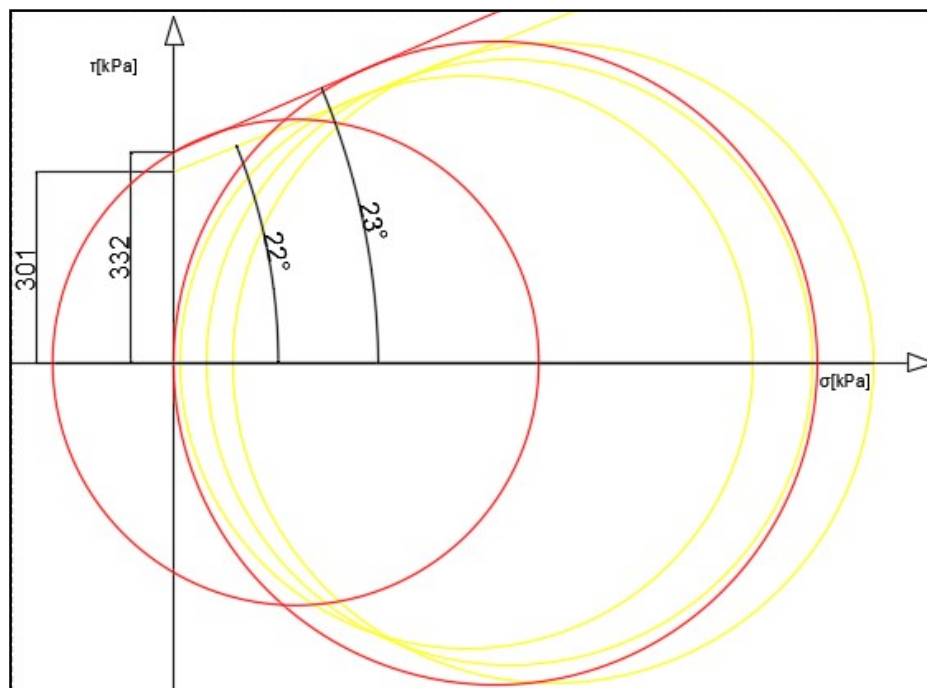


Figura 8.7. Gráfico de criterios de falla sobre SAE curado durante 168 hs a temperatura ambiente.

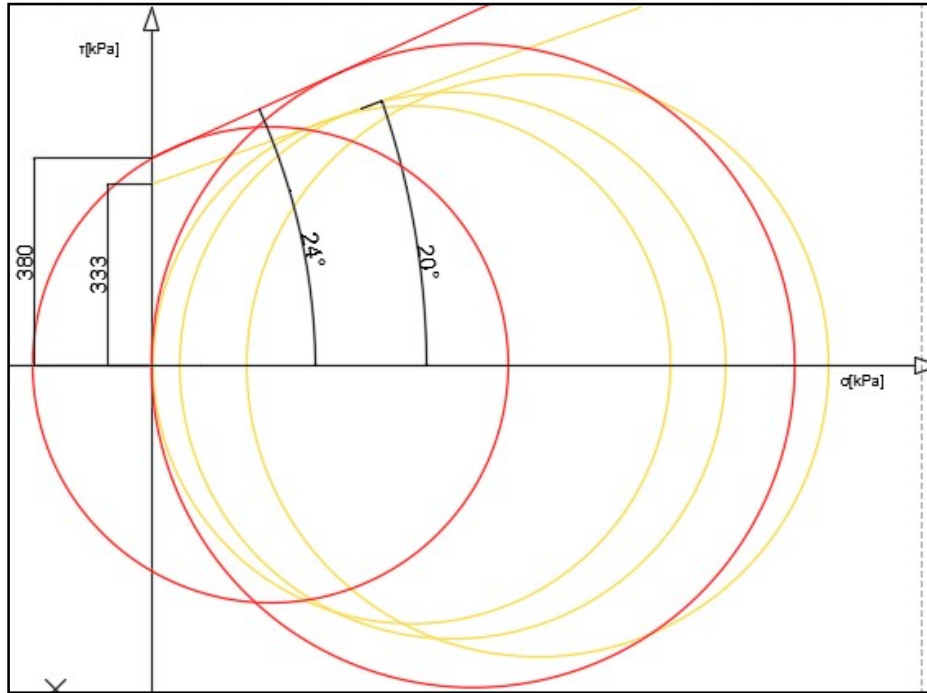


Figura 8.8. Gráfico de criterios de falla sobre SAE curado durante 72 hs a 40°C.

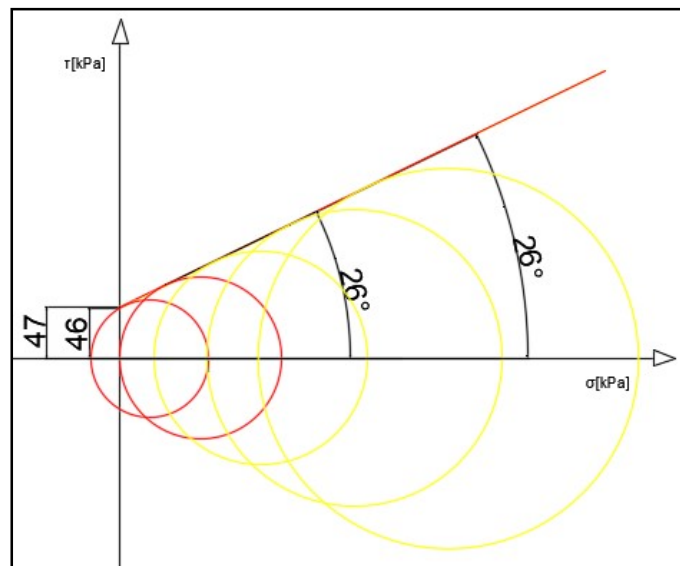


Figura 8.9. Gráfico de criterios de falla sobre SAE curado durante 24 hs a 25°C en condiciones húmedas.

El SAE en condiciones húmedas, o de Humedad Residual igual al 100%, otorga una escasa resistencia. Es fundamental evitar este estado y estudiar la capacidad de absorción de agua una vez efectuado el curado. Viendo también como se va a

manejar la pérdida de agua in situ, para permitir seguir con la construcción de las capas superiores del paquete estructural.

Por otro lado, la resistencia a tracción indirecta ITS, es estudiada por el manual TG-2 [23] según la Tabla 8.8.

Tabla 8.8. Clasificación de BSM en función a la ITS, según TG-2 [23].

Test	Specimen diameter	BSM1	BSM2	BSM3
ITS dry	100 mm	> 225	175 to 225	125 to 175

El estabilizado SAE según su resistencia a tracción por compresión diametral, se posiciona en la BSM2.

En conclusión puede afirmarse, para el estabilizado SAE, que Humedades Residuales de entre 25% (curado 72 hs a 40°C) y 60% (curado 72 hs a temperatura ambiente) aproximadamente, el material se comporta como una base BSM2 y finalmente si la Humedad es mayor se está en presencia de una BSM3.

8.2.3 Ensayo de Capilaridad SAE, según metodología del LEMaC [25].

Se repite el mismo proceso que en 8.1.3, para el caso del estabilizado SAE sometido a un curado de 72Hs a 40°C, de modo tal de reducir su humedad hasta que sea nula (Tabla 8.9).

Tabla 8.9. Resultados de Ensayo de Capilaridad sobre SAE, según normativa del LEMaC [25].

Peso Inicial [kg]	Humedad Inicial (%)	Peso 7 días [kg]	Porcentaje Absorbido (%)	Promedios	Humedad Residual
1.118	0.00	1.159	3.51	3.65%	43.98%
1.119	0.00	1.172	4.46		
1.119	0.00	1.153	2.98		



Figura 8.10. Ensayo de Capilaridad para probetas de SAE.

El estabilizado SAE tiene como gran ventaja en comparación al SA, 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 8.10. Esto es una gran ventaja, y se observa la gran impermeabilización que produce la emulsión al introducirse en la mezcla Suelo-Arena.

8.2.4 Ensayo de Módulo Resiliente SAE

Al caracterizar el estabilizado SAE de manera dinámica, visto que la humedad va a tener una gran influencia, se fijan cuatro situaciones críticas.

- Condición 1: humedad óptima (habiendo aguardado 24 hs en una cámara húmeda a 25°C; Hr=99%).
- Condición 2: curado de 72 hs a 40°C (Hr=0%), según la especificación del TG-2 [23].
- Condición 3: curado de 24 hs a temperatura ambiente y luego en horno hasta lograr una pérdida del 40% de la humedad óptima (Hr=60%).
- Condición 4: probeta sumergida en agua durante 24 hs luego de ser moldeada (Hr=129%).

El procedimiento del ensayo, al igual que el SA, se detalla en el apartado 4.4.3.1.

La primera condición hace referencia al comportamiento del material, inmediatamente después de que la capa haya sido colocada. Se moldean un total de tres probetas a densidad prefijada, según la normativa AASHTO T 307-99. Luego se procede con el curado mencionado, se ensayan las probetas y se estudia la mejora que aporta la emulsión en condiciones húmedas a la mezcla Suelo-Arena. Para efectuar una

comparación final con otros estabilizados y tiempos de curado, este módulo se lo denomina **Mr2**.

En segundo lugar, se adopta un curado de 72 Hs. A 40°C según el Manual TG-2 [23]. Es probable que las muestras pierdan en casi su totalidad la humedad. A pesar de que este curado no se adapte a condiciones reales en la práctica, es importante efectuar una caracterización regida por un manual como es el TG-2 en este caso.

El ensayo de módulo resiliente es un ensayo NO destructivo, entonces se aprovecha la probeta recién ensayada a su humedad óptima y se la somete a un secado de 72Hs a 40°C, según las especificaciones ya mencionadas del TG-2. Una vez efectuado este curado, se vuelve a ensayar la probeta para observar su nuevo comportamiento, se adopta **Mr3** como denominación para este curado.

Luego de haberse ensayado con las condiciones anteriores, y dado que la absorción capilar de las probetas no alcanza los rangos de altura del LDVT del equipamiento, se vuelven a efectuar nuevos moldeos.

Se confeccionan, en primer lugar, tres probetas para una condición de Humedad Residual del 60%, esta condición se relaciona directamente con el curado de 72 Hs a temperatura ambiente en probetas moldeadas según Proctor. Es decir, se busca una pérdida de humedad del 40% de la humedad óptima, para una probeta triaxial, y poder relacionarla así, con el curado en 3 días antes mencionado. A efectos de comparación, se llama a este módulo resiliente como **Mr4**.

Como última condición, se desarrolla una prueba para una sola probeta. La misma consiste, en sumergir en agua durante 24 Hs al material para luego ensayarlo. Luego de este lapso de tiempo, se contempla que la humedad asciende a un 10.73% ($H_r=129\%$), pero la probeta se encuentra en perfectas condiciones para evaluar su módulo, denominado para este caso como **Mr5** (Figura 8.11).



Figura 8.11. Probeta de SAE curada según Condición 4.

Los resultados de las constantes de regresión A, B y C, para todas las condiciones antes mencionadas, se obtienen con la ecuación (3) y se presentan en la Tabla 8.10.

Tabla 8.10. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizado SAE para distintas condiciones de curado.

Constantes	Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 4
	Mr2 SAE en CH	Mr3 SAE 72 Hs a 40°C	Mr4 SAE con 60% Hr	Mr5 SAE Sum. 24 Hs
A=	1674	5640	8033	2387
B=	-2.26	7.56	4.43	-4.38
C=	0.50	-0.25	-0.33	0.91
r2=	0.93	0.94	0.57	0.94

Las gráficas de valores de módulos obtenidos para todas las condiciones de curado, del estabilizado SAE, se encuentran en el anexo de este trabajo.

A modo de conclusión de los ensayos efectuados por el SAE, se observa en primer lugar que existe una leve mejora en condiciones húmedas con el estabilizado SA ($Mr1 < Mr2$), la emulsión aporta una cohesión al estabilizado llevando a mejorar su resistencia levemente. En las Figuras 8.12 y 8.13, se puede apreciar dicha mejora, utilizando el Mr1, del Suelo-Arena, como comparación. **Vale considerar, para todas las graficas de Mr, que las distintas curvas de un mismo estabilizado representan a un mayor o menor grado de confinamiento sobre una misma probeta.**

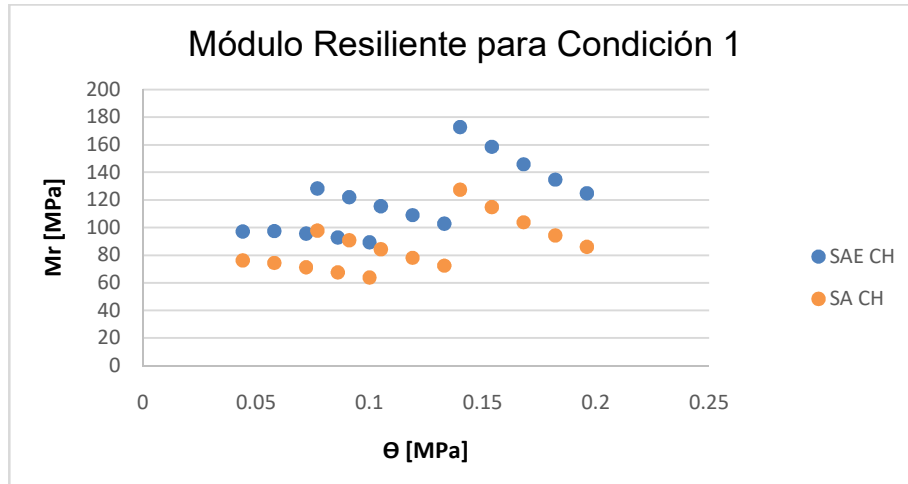


Figura 8.12. Módulo Resiliente en condiciones húmedas para SAE (Mr2) y SA (Mr1).

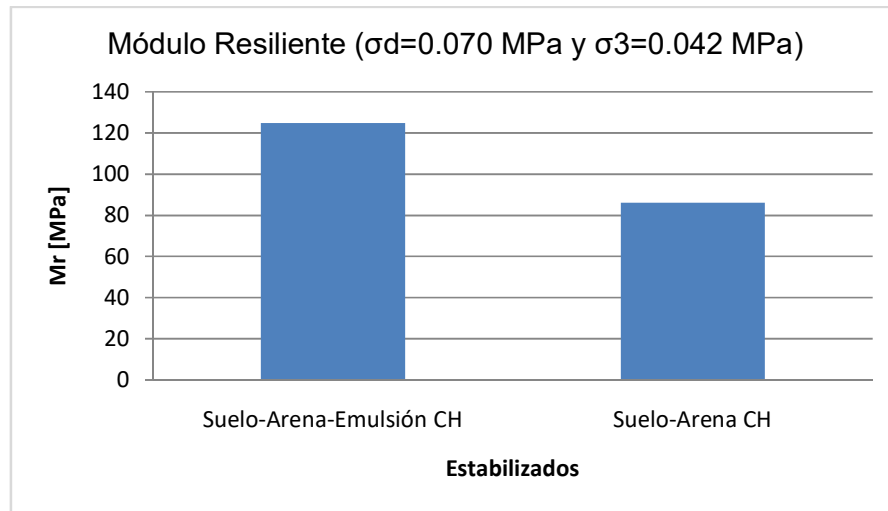


Figura 8.13. Módulo Resiliente en condiciones húmedas para SAE y SA, según tensiones determinadas.

El módulo calculado para el curado según el TG-2 (Mr3), es en el que se aprecia un comportamiento diferente; con valores que aumentan en función de los estados de tensiones entre 1000 MPa y 4000 MPa, tal como se observa en la Figura 8.14.

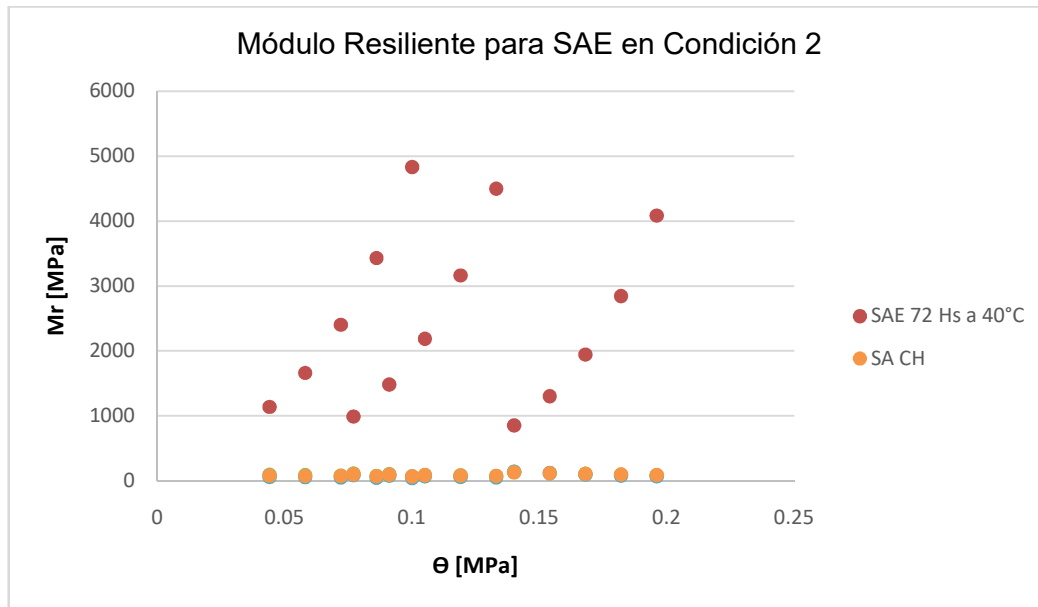


Figura 8.14. Módulo Resiliente para SAE en Condición 2 (Mr3)

Este módulo es ampliamente mayor que los primeros dos, es la mejor condición del estabilizado. Pero esta condición es para una humedad de valores casi nulos que dependiendo de las condiciones climáticas la podría alcanzar al cabo de varios meses. 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). Es por eso que, para el diseño estructural con este curado, van a descartarse módulos elevados. En este estabilizado es aceptable desde un punto de vista conservador que el rango de Mr para esta condición de curado oscila entre 500 MPa y 1500 MPa. Este dato va a ser un valor de entrada para el Diseño Estructural.

En la tercer Condición de curado, se aprecian módulos que oscilan entre 1000 MPa y 3000 MPa (Figura 8.15). Este resultado refleja que el estabilizado puede trabajar correctamente con un 60% de Humedad Residual, y no solamente con valores bajos. Este se asemeja más a la condición real del comportamiento del estabilizado en obra, y verifica la adopción de valores de entre 500 MPa y 1500 MPa como datos de entrada para el Diseño Estructural.

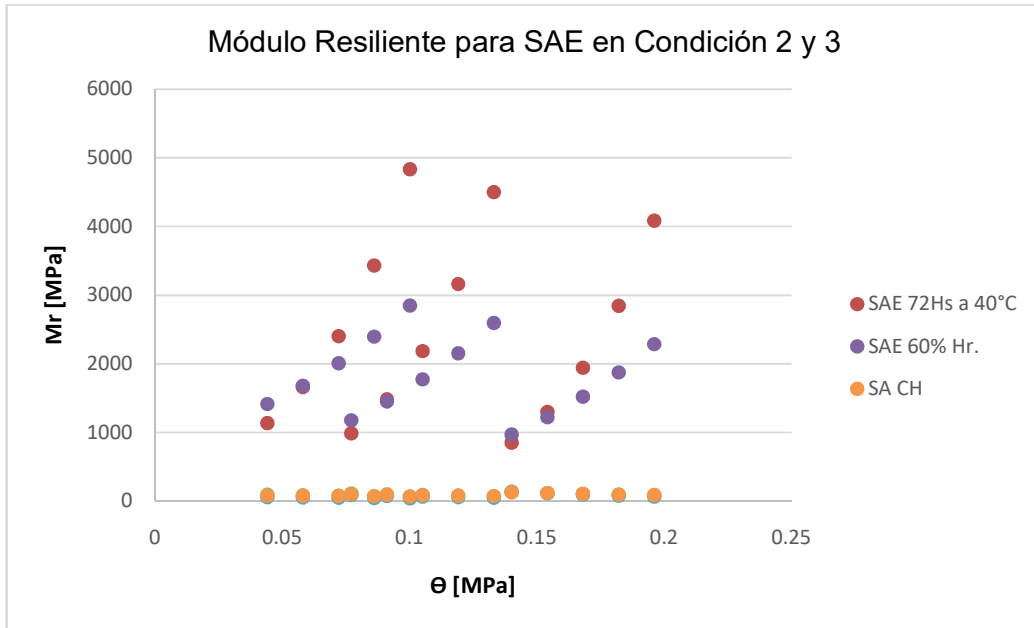


Figura 8.15. Módulo Resiliente para SAE en Condición 2 (Mr3) y Condición 3 (Mr4).

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), según se observa en la Figura 8.16.

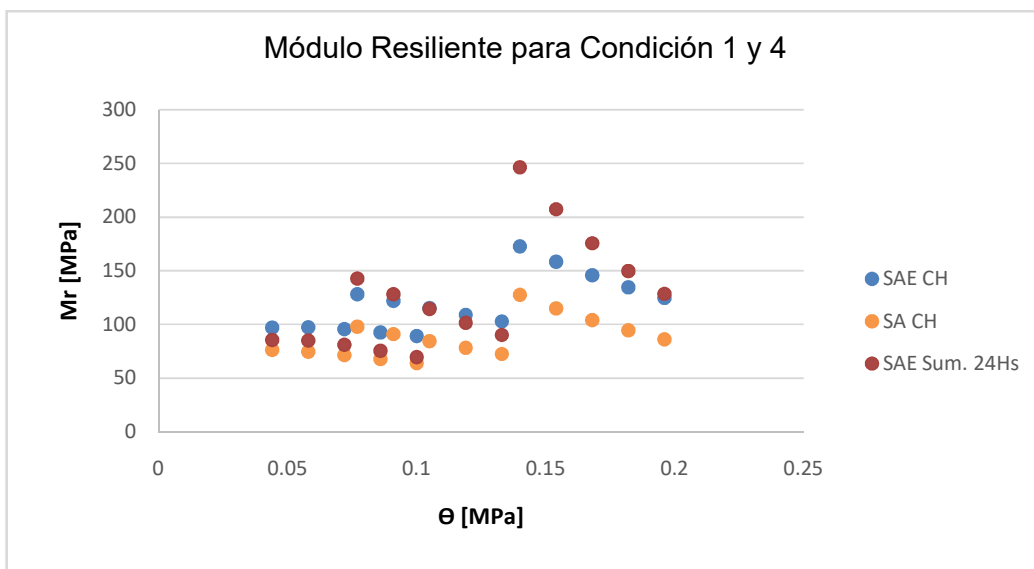


Figura 8.16. Módulo Resiliente para SAE en Condición 1 (Mr2) y Condición 4 (Mr5).

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.

En la Figura 8.17, se contempla el gran aumento del Módulo Resiliente para la Condición 2 y 3 en comparación de las condiciones restantes.

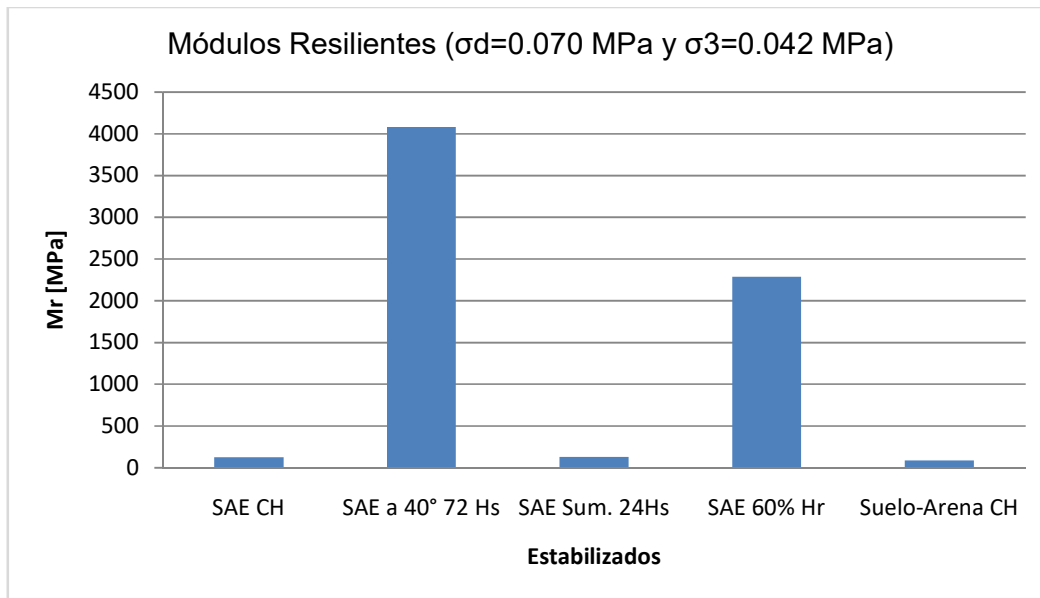


Figura 8.17. Módulo Resiliente para SA y SAE, según determinadas tensiones.

8.2.5 Ensayo de Deformación Mediante Rueda Cargada (WTT), normativa BS EN 12697-22:2003 o IRAM 6850.

Luego de realizar los ensayos anteriores, se pudo apreciar que las probetas de SAE, para bajas humedades, brindaban valores de módulos similares a las mezclas asfálticas. A modo de experiencia, se efectúa el Ensayo de Rueda Cargada, de gran aplicación en capas de rodadura de pavimentos flexibles en la Provincia de Santa Fe.

Como no hay una norma para este material (SAE), el ensayo se desarrolla siguiendo el procedimiento normalizado de la Norma BS EN 12697-22:2003: Bituminous Mixtures for Hot Mix Asphalt. Part 22 o IRAM 6850. Wheel Tracking Test de acuerdo al Procedimiento B para probetas pequeñas. La carga aplicada por la rueda es de 698.5 N en un recorrido de 230 mm con una frecuencia de 26 ciclos/min [32].

8.2.5.1. Mezcla analizada

Se efectúa entonces el análisis para el Suelo-Arena-Emulsión, con las proporciones ya mencionadas en el apartado 6.1 y 6.2 (Figura 8.18).



Figura 8.18. Ensayo de Rueda Cargada sobre probeta de SAE

Se prepara una probeta identificada como P1, mediante un compactador de rodillo de laboratorio, según Figura 8.19.



Figura 8.19. Compactación de probeta de SAE, para ensayo WTT.

Las características de la probeta de SAE se adjuntan en la Tabla 8.11. El curado de ésta es el mismo que en la Condición 2, sometiendo la probeta durante 72 hs a una temperatura de 40°C, según el manual TG-2 [23].

Tabla 8.11. Datos probeta de SAE para ensayo WTT

Identificación de la probeta :P1
Observaciones: Probeta SAE
Densidad: 2.10 Kg/dm ³
Grado de compactación: 100 %
Humedad Residual: 0 %
Espesor (mm): 50 mm

8.2.5.2. *Evaluación de la profundidad de la huella*

La evolución de la profundidad de huella H (mm) en función del número de ciclos aplicados N se presenta en las Figura 8.20 para la probeta ensayada.

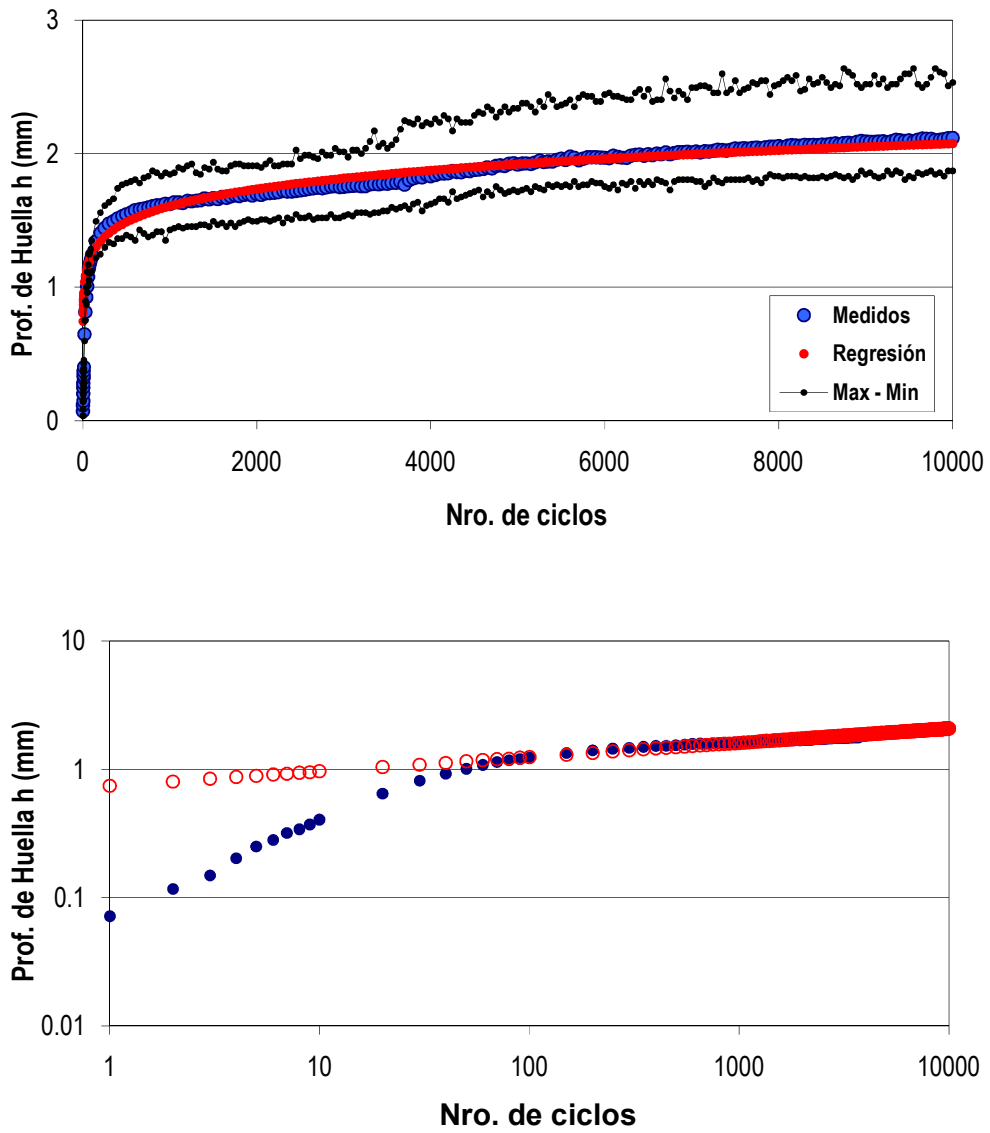


Figura 8.20. Gráficas de Profundidad de Huella vs. Numero de Ciclos.

Se contempla que el material prácticamente no sufre de ahuellamientos, verificando su elevada resistencia en condiciones secas (Figura 8.21).



Figura 8.21. Probeta de SAE luego de ser sometida al Ensayo de Rueda Cargada

8.2.5.3. Cálculo y expresión de resultados

Con la medición de la profundidad de huella H en función del número de ciclos aplicados, se calculan los siguientes valores:

- Pendiente de ahuellamiento, WTS

$$WTS = \frac{H_{10000} - H_{5000}}{5} \left[\frac{\text{mm}}{10^3 \text{ ciclos}} \right] \quad (4)$$

Donde H_i es la profundidad de la huella para el ciclo i , en mm.

- Profundidad de ahuellamiento proporcional, PR_{aire} :

Es la profundidad de la huella H_i respecto del espesor de la probeta expresada en porcentaje $\pm 0,1\%$, para N ciclos de carga.

$$PR = \frac{H_i}{h} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

Donde h es el espesor de la probeta en mm.

8.2.5.4. Resultados Obtenidos

Con los valores presentados en las figuras y las expresiones para la interpretación de éstos, se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 8.12.

Tabla 8.12. Resultados obtenidos de ensayo WTT

h 1000 (mm) =	1.61
h 1500 (mm) =	1.68
h 5000 (mm) =	1.92
h 10000 (mm) =	2.08
Veloc. Def. 45 - 60 min (mm/10³ ciclos) =	0.136
Veloc. Def. 1000 - 1500 (mm/10³ ciclos) =	0.148
Veloc. Def. 1000 - 5000 (mm/10³ ciclos) =	0.079
Veloc. Def. 5000 - 10000 (mm/10³ ciclos) =	0.031
Espesor probeta (mm) =	50
P_R 5000 (%) =	3.8%
P_R 10000 (%) =	4.2%

En este punto, los resultados obtenidos fueron ampliamente favorables, no mostró tener susceptibilidad al ahuellamiento para el material curado.

8.2.5.1. Ensayo con SAE humedecido, normativa BS EN 12697-22:2003 o IRAM 6850.

A modo de prueba, y para analizar el comportamiento de la probeta de SAE en condiciones hídricas adversas, se la somete al Ensayo de Capilaridad para luego volver a repetir el Ensayo de Rueda Cargada (Figura 8.22).

Antes de comenzar el ensayo se mide la humedad residual, en este caso vuelve a verificar lo realizado en el ensayo de capilaridad, la humedad residual asciende a 45.92%.



Figura 8.22. Probeta de SAE sometida al Ensayo de Capilaridad (izq.) y al Ensayo de Rueda Cargada luego (der.)

A partir del ciclo 200 (casi 10 minutos de comenzado el ensayo), la superficie de la probeta se empieza a desprender progresivamente, posibilitando que la rueda descienda en gran medida. Se decide interrumpir el mismo por temor a que este desprendimiento produzca alguna rotura en la maquinaria.

Debido al poco tiempo de duración del ensayo, no se logran recabar los datos suficientes para el análisis de los resultados.

Concluyendo, el material SAE, no debe usarse como capa de rodadura. Debido a que, a pesar de su gran comportamiento con Hr iguales a cero, cuando la misma asciende a casi el 50% el material se deteriora en gran medida. Se debe continuar su estudio como una Base para un pavimento, justificando esta afirmación con los valores obtenidos de los ensayos de Módulo Resilientes (apartado 8.2.4) y a los ensayos STT, ITS y UCS (apartados 8.2.1 y 8.2.2).

Se van a utilizar para el Diseño Estructural la Condición 1 (Hr= 100%) inmediatamente después de la compactación en obra, y para la Condición 3 (Hr=60%) condiciones reales en servicio. Para ambos casos se adopta el mismo rango de módulo (500 MPa – 1500 MPa).

8.3 Estabilizado Suelo-Arena-Asfalto Espumado (SAAE)

8.3.1 Ensayo Triaxial Estático de Compresión Triaxil (STT), según Norma IRAM 10529 [27].

Como última estabilización se encuentra el estabilizado SAAE, para el estudio del mismo rigen las mismas normas que para el estabilizado SAE, el reglamento TG-2

[23]. La gran desventaja de este estabilizado es que es de difícil manipulación en laboratorio, debido a que se trabajan a altas temperaturas. Lo ideal es contar con el equipamiento necesario, pero al no contar con el mismo por ser costoso se opta por su estudio con elementos convencionales de laboratorio.

El espumado, en este caso, se lleva a cabo en laboratorio usando medios rudimentarios de espumaje que consisten en: recipientes caseros, jeringas para inyección del agua y varillas metálicas de mezclado (apartado 6.4).

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.

Pero a pesar de no alcanzar los valores requeridos, se va a efectuar de todas formas el estudio del comportamiento del Suelo-Arena, cuando se agrega AE (asfalto espumado) a 170°C con un porcentaje de 2.7% de agua. Poniendo en evidencia este aspecto a través de los ensayos de caracterización y su comparación con el SAE.

El mezclado se efectúa al igual que el SAE, de forma manual, pero con el factor tiempo en juego, debido a que a medida que el asfalto se va enfriando se hace más difícil poder mezclarlo correctamente. Esta es una gran desventaja que tiene el SAAE en relación al SAE que permite su mezclado sin la necesidad de adicionar calor.

Por ejemplo, denota en todos los casos que en las probetas de SAE la emulsión se distribuye uniformemente, homogeneizando en gran medida la probeta. Caso contrario es el SAAE, pues al no poder obtener las propiedades de espumación deseadas mediante los métodos caseros, la distribución del asfalto espumado es escasa en comparación con la primera (Figura 8.23).



Figura 8.23. Probetas para pruebas triaxiales de SAE (izq.) y SAAE (der.)

Se comienza con las pruebas triaxiales (STT) al igual que en los anteriores casos, y se calculan los parámetros del estabilizado SAAE (Tabla 8.13).

Tabla 8.13. Resultados obtenidos de Ensayo de Compresión Triaxial sobre SAAE (Norma IRAM 10529).

Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Humedad (%)	Densidad Húmeda; γ_h (kN/m ³)	Densidad Seca; γ_s (kN/m ³)	Grado de Compactación
369	24	0.38	19.921	19.846	99.03

Se observan valores de cohesión aun mayores que en el caso del SAE, esto se puede deber sencillamente a la acción cohesiva de la arcilla en el estabilizado al tener una humedad muy baja. Es decir, al no poseer la misma homogeneidad en la distribución del betún el SAAE que el SAE, las partículas de arcilla encuentran mayores puntos de contacto. Estos contactos se fortalecen en ausencia de agua, y son débiles en caso contrario (Figura 8.24).



Figura 8.24. Probetas de SAAE sometidas a STT

Para la caracterización del SAAE ocurre lo mismo que en el SAE, quedando una BSM1 si se considera la cohesión y una BSM3 si se considera el ángulo de fricción (Tabla 8.6). Pero como no cumple con ambos requisitos, termina siendo finalmente una BSM3.

8.3.2 Ensayo UCS (Norma VN-E33-67) y Ensayo ITS (Norma VN-E9-86) sobre estabilizado Suelo-Arena-Asfalto Espumado

Se estudia, para el mismo curado que el caso anterior (72 hs a 40°C), su comportamiento a los ensayos ITS y UCS (Figura 8.25), al igual que los estabilizados anteriores y se verifican luego, con los parámetros obtenidos en el STT.



Figura 8.25. Probetas ensayadas a UCS (izq.) y a ITS (der.)

Las probetas de SAE son más homogéneas, esta característica, va a brindar una mayor impermeabilidad en comparación a una probeta de SAAE la cual posee de modo más heterogéneo y visible los sectores con betún.

Tabla 8.14. Resultados obtenidos de ensayos UCS (Norma VN-E33-67) e ITS (Norma VN-E9-86).

Ensayo	Comp. (kPa)	Tracc. (kPa)	Humedad (%)	Densidad Húmeda; γ_h (kN/m ³)	Densidad Seca; γ_s (kN/m ³)	Grado de Comp.	Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)
UCS	1230	-	1.19	20.260	20.022	99.91%	400.05	22.00
ITS	-	227	1.15	20.200	19.970	99.65%		

Los parámetros que se obtienen de los círculos de Mohr de estos ensayos se corresponden con los del STT, dando finalmente por válido al estudio de estos estabilizados de ambas formas.

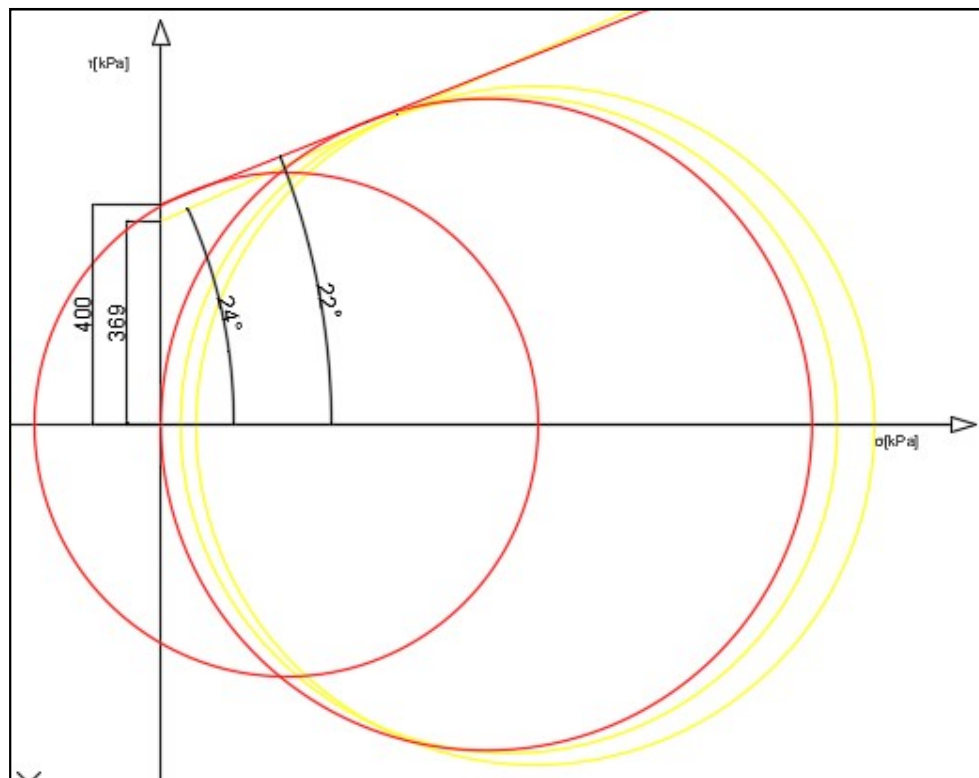


Figura 8.26. Grafico de criterios de falla sobre SAAE curado durante 72 hs a 40°C.

Al igual que en el SAE, la utilización de asfalto espumado según la ITS coloca al estabilizado en la columna perteneciente a las BSM1 (Tabla 8.8).

8.3.3 Ensayo de Capilaridad SAAE

Se moldearon cuatro probetas para estudiar la capilaridad o capacidad de absorción del agua por parte del SAAE, curadas a 40°C en un período de 72 hs (Tabla 8.15). Se descarta una probeta que mediante el manipuleo se fisura, dando como válidas a tres de ellas.

Tabla 8.15. Resultados de Ensayo de Capilaridad sobre SAAE, según metodología del LEMaC [25].

Peso Inicial [kg]	Humedad Inicial (%)	Peso 7 días [kg]	Porcentaje Absorbido	Promedios	Humedad Residual
1.107	0.38%	1.197	7.90%	8.53%	102.77%
1.150	0.36%	1.258	8.95%		
1.142	0.40%	1.246	8.75%		

En primer lugar, cabe recalcar que el curado de 72Hs a 40°C, no seca del todo a las probetas del SAAE, esto puede darse debido a que la gran heterogeneidad en la distribución del asfalto en el Suelo-Arena puede retener agua en los sectores donde las formaciones de betún son mayores. Esto último es una pequeña desventaja del material en comparación con el SAE, debido a que lo ideal es que los valores de Humedad Residual sean los menores posibles.

Para los tres casos la Humedad Residual se recupera e incluso aumenta llegando a valores de casi 103% (Figura 8.27). Debiéndose esto, principalmente a que al no poder introducir correctamente el asfalto espumado en el estabilizado (baja razón de expansión y vida media lograda en laboratorio), el betún no logra ocupar los vacíos necesarios para impermeabilizar el estabilizado.



Figura 8.27. Ensayo de Capilaridad sobre probetas de SAAE (Tabla 8.15) y SA (Tabla 8.3).

Esta recuperación va a implicar una caída en lo que respecta a la capacidad del material. Es por eso que se debe estudiar el Módulo Resiliente del SAAE para sus tres etapas más características (humedad óptima, seco y luego de acción capilar).

8.3.4 Ensayo de Módulo Resiliente SAAE

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

- Condición 5: humedad óptima (habiendo aguardado 24 hs en una cámara húmeda a 25°C; Hr=100%).
- Condición 6: curado de 72 hs a 40°C (Hr= 5%), según la especificación del TG-2 [23].
- Condición 7: con las probetas de la Condición 6, una vez ensayadas, se las somete al ensayo de capilaridad durante 7 días, y se vuelve a evaluar su módulo (Hr=103%).

El procedimiento del ensayo, al igual que el SA, se detalla en el apartado 4.4.3.1.

En primer lugar se va a ensayar al material en condiciones húmedas, es decir para una Humedad Residual igual al 100%, del mismo modo que el SAE, se moldean tres

probetas y se las deja por 24 hs en una cámara húmeda. A este módulo se lo denomina **Mr6**.

Luego se someten las tres probetas a secados de 72Hs a 40°C igual que el SAE, se evalúa el módulo y se obtiene **Mr7**.

Al igual que los valores de Mr obtenidos en condiciones de curado de 72Hs a 40°C para el SAE, el SAAE otorga valores que oscilan entre 1000 MPa y 4000 MPa. Se va a aplicar el mismo criterio para este caso, con un análisis para valores cercanos a 1000 MPa a la hora de efectuar el diseño estructural de pavimentos.

Finalmente el último módulo es el obtenido luego de que las probetas se sometan 7 días a capilaridad. En este caso, como se menciona anteriormente las probetas recuperan su Humedad Residual e incluso la superan, alcanzando valores del 102% aproximadamente. El módulo resiliente obtenido con estas probetas se denomina **Mr8**.

Los resultados de las constantes de regresión A, B y C, para todas las condiciones antes mencionadas, se obtienen con la ecuación (3) y se presentan en la Tabla 8.16.

Tabla 8.16. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizado SAAE para todas las condiciones de curado.

Constantes	Condición 5	Condición 6	Condición 7
	Mr6 SAAE en CH	Mr7 SAAE 72 Hs a 40°C	Mr8 SAAE Capilaridad
A=	1405	9605	1415
B=	-2.69	4.76	-4.64
C=	0.32	-0.03	0.78
r2=	0.71	0.92	0.82

Si se representan las condiciones húmedas de cada estabilizado (Figura 8.28), se puede apreciar que la adición del AE aporta una mejora pero leve con respecto a la producida por la emulsión (Figura 8.29). Esto se debe, como bien se menciona anteriormente, a que el AE no logra introducirse correctamente en el Suelo-Arena a diferencia de la emulsión.

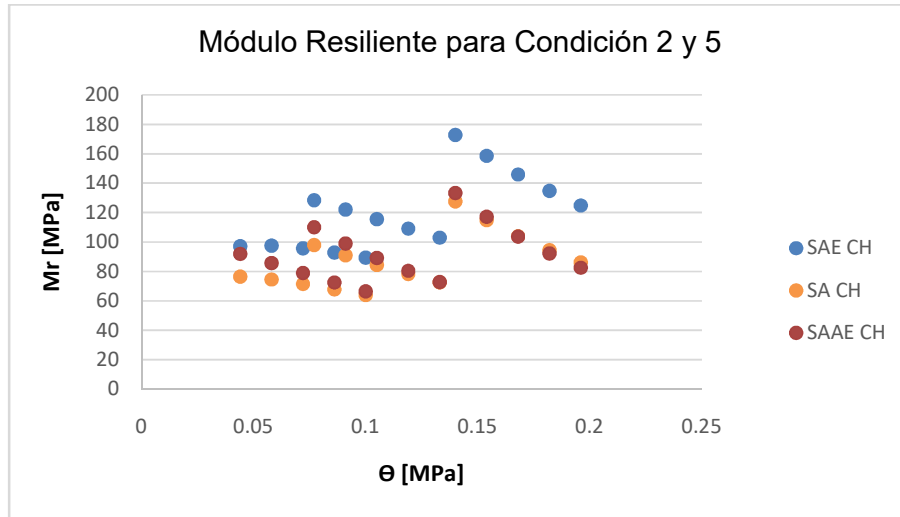


Figura 8.28. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizaciones curadas en CH durante 24 Hs

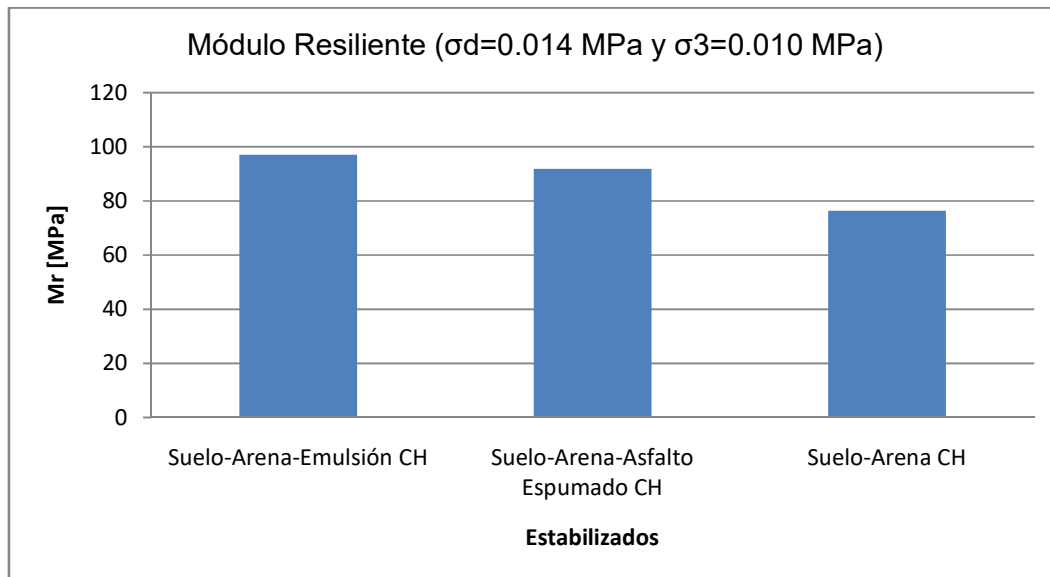


Figura 8.29. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizaciones curadas en CH durante 24 hs, para tensiones determinadas.

Para la Condición 6, los valores de Mr7 se encuentran en un rango de 1000 MPa y 4000 MPa (Figura 8.30), similar a lo ocurrido con el SAE para la misma condición de curado (Mr3).

Del mismo modo que el SAE, para el diseño estructural con este curado, van a descartarse módulos elevados. En este estabilizado es aceptable desde un punto de

vista conservador que el rango de Mr para esta condición de curado oscila entre 500 MPa y 1500 MPa. Este dato va a ser un valor de entrada para el Diseño Estructural.

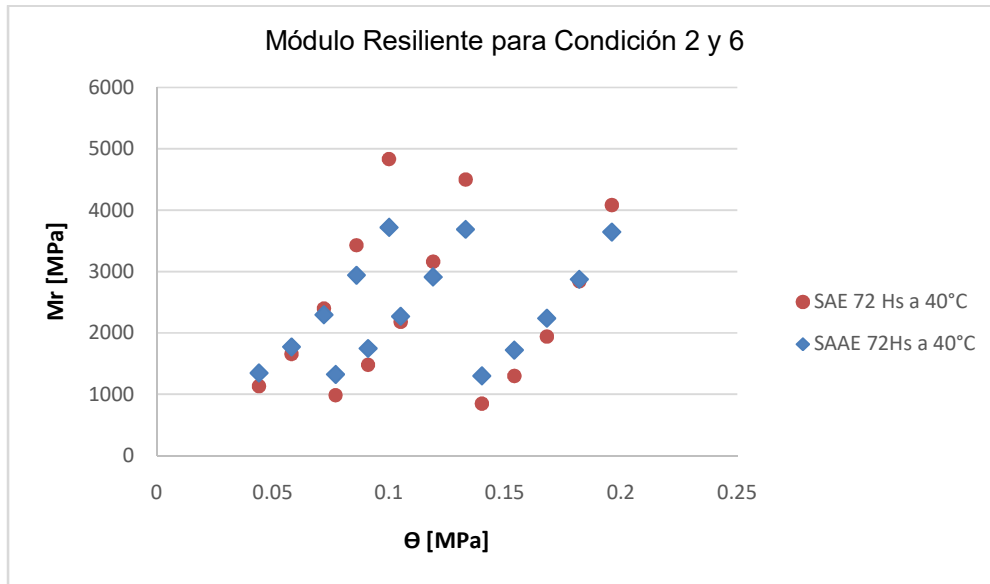


Figura 8.30. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizados SAE y SAAE, curados según TG-2 [23]

Finalmente se estudia el estabilizado SAAE, luego de haberse efectuado el ensayo de capilaridad de suelos (Tabla 8.15), donde este recupera más del 100% del valor de su humedad óptima (partiendo de un valor nulo). En la Figura 8.31, se aprecia cómo se reduce notoriamente el Mr del estabilizado SAAE, siendo incluso inferior que el SA.

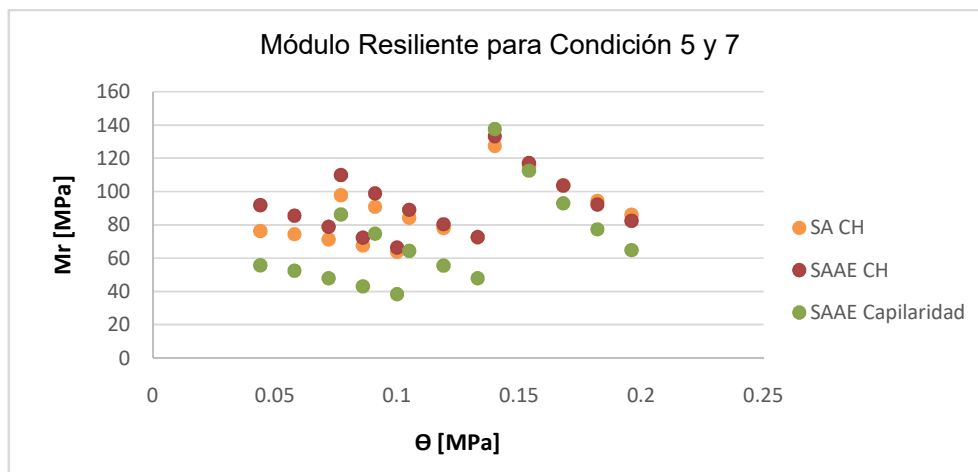


Figura 8.31. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre estabilizados SAAE para Condición de curado 5 y 7.

A continuación, para todas las estabilizaciones y curados estudiados, se confecciona la Figura 8.32 (para determinadas tensiones).

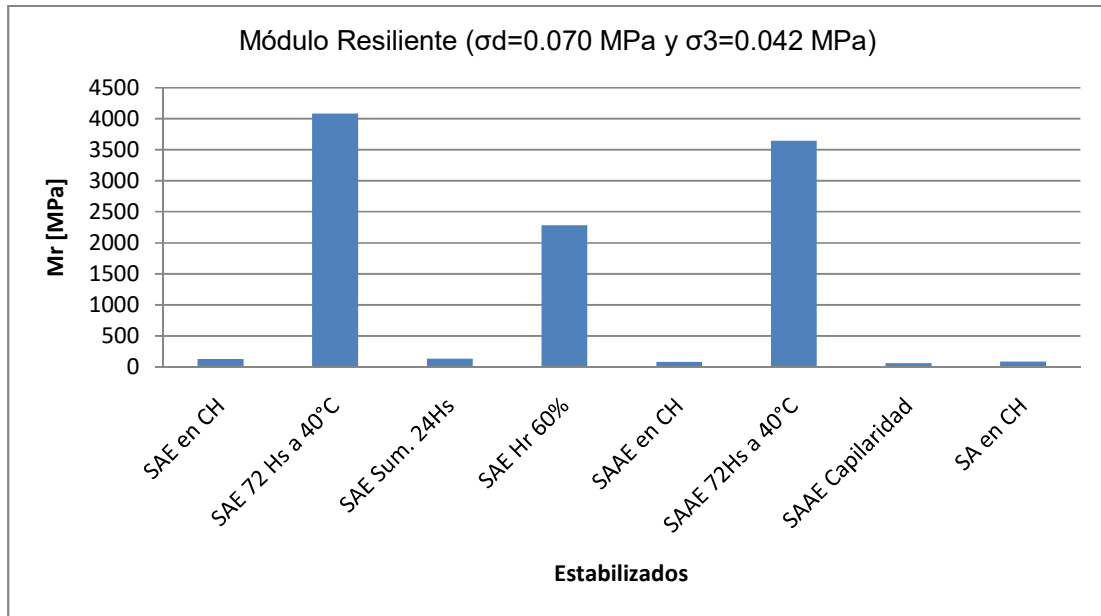


Figura 8.32. Resultados de Ensayo de Módulo Resiliente sobre todos los estabilizados, para tensiones determinadas.

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

9 ANALISIS DE RESULTADOS SEGÚN ENSAYOS

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

- Suelo-Arena
- Suelo-Arena-Emulsión
- Suelo-Arena-Asfalto Espumado

Los ensayos se enumeran según se fueron realizando en este trabajo:

9.1 Ensayo de Compactación de Suelos y de Valor Soporte Relativo [5]

Los resultados de referencia de este apartado, para todas las estabilizaciones, se adjuntan en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1. Resultados de Ensayos de Compactación de Suelo y de Valor Soporte Relativo

Material	Densidad Seca Máxima (KN/m3)	Humedad Óptima (%)	VSR (%)	Hinchamiento (%)
Suelo-Arena	18.37	8.30	10.00	0.47
Suelo-Arena-Emulsión	19.39	8.30	35.00	0.00
Suelo-Arena-Asfalto Espumado	20.04	8.30	15.00	0.34

Estos hinchamientos son relativamente bajos sobre todo para el SAE, que es nulo, siendo una gran ventaja a considerar, debido a que la emulsión se introduce correctamente dentro de los vacíos dejados por las partículas de suelo y arena. Del mismo modo, que su VSR es mayor que el de los restantes.

9.2 Ensayo de Compresión Triaxial o Prueba Triaxial, STT. Según normativa IRAM 10529 [27]

Se resume en la Tabla 9.2 lo obtenido mediante el ensayo STT para todas las estabilizaciones.

Tabla 9.2. Resultados de Ensayo de Compresión Triaxial para todas las estabilizaciones (IRAM 10529).

Material	Curado	Ensayo Triaxial		Humedad (%)	Humedad Residual (%)	Densidad Húmeda; y _h (kN/m ³)	Densidad Seca; y _s (kN/m ³)	Grado de Comp. (%)
		Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)					
Suelo Arena Emulsión	72 hs Amb	238	25	3.10	37.35%	19.800	19.205	99.04
	168 hs Amb	301	22	1.20	14.46%	19.506	19.274	99.40
	72 Hs 40°C	333	20	0.20	2.41%	19.384	19.346	99.77
	CH	46	26	8.22	99.04%	20.961	19.369	99.89
Suelo Arena	168 Hs Amb	147	44	0.68	8.19%	18.414	18.290	99.56
Suelo Arena Asfalto Espumado	72 hs 40°C	369	24	0.38	4.58%	19.921	19.846	99.03

Se logra apreciar que los estabilizados poseen la misma fricción independientemente del tipo de curado y de la humedad, salvo el Suelo-Arena (Figura 9.1).

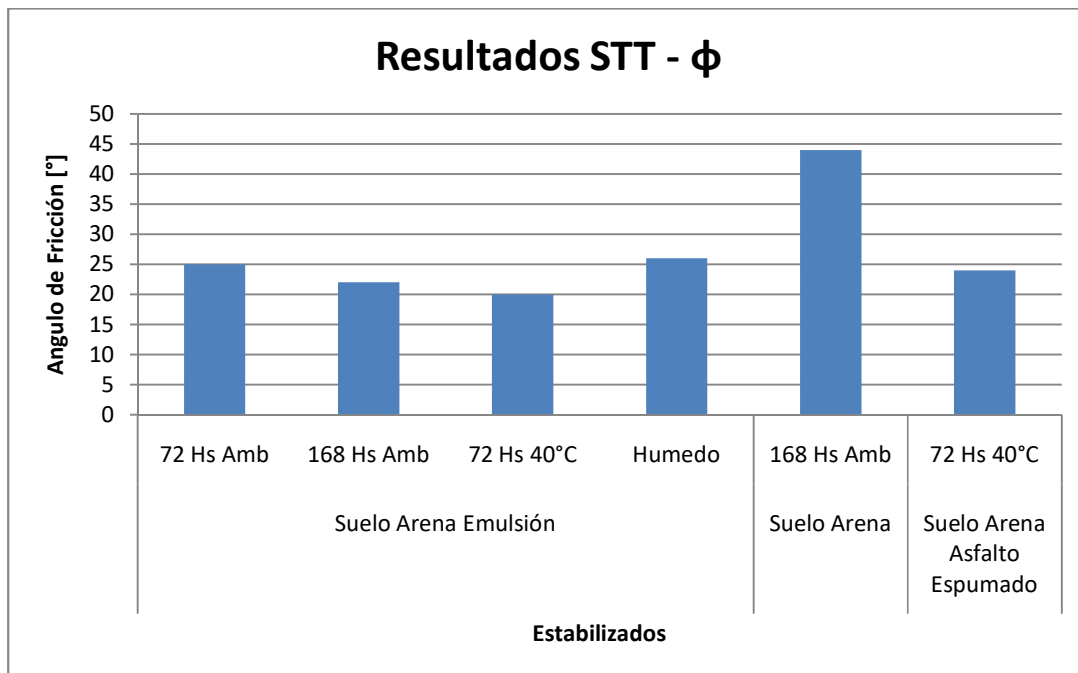


Figura 9.1. Gráfica de ángulo de fricción obtenido en STT para todas las estabilizaciones

La gran diferencia y el principal factor para que estas estabilizaciones otorguen buenos resultados es la cohesión (Figura 9.2). Este último parámetro depende exclusivamente de la humedad, obteniendo valores que rondan los 350 kPa para el caso de humedades residuales cercanas a cero.

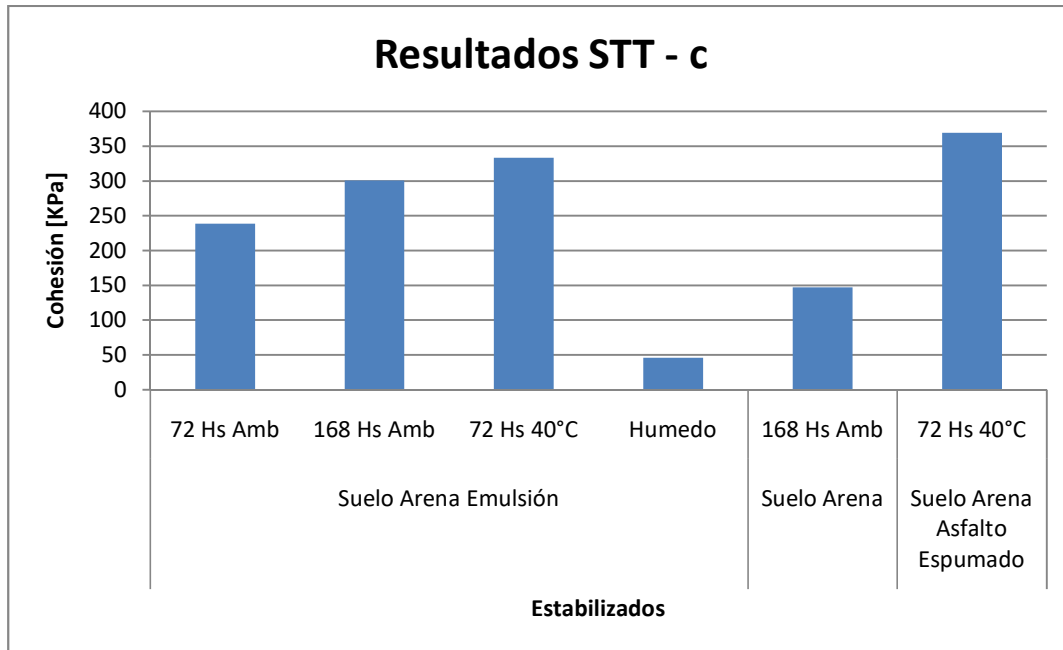


Figura 9.2. Cohesión obtenida en STT para todas las estabilizaciones.

9.3 Ensayo de Resistencia a Compresión Simple (UCS) y Resistencia a Tracción indirecta por Compresión Diametral (ITS).

A modo de resumen, se confecciona la Tabla 9.3 con los resultados de estos ensayos para cada tipo de estabilizado.

Tabla 9.3. Resultados de ensayos UCS (Norma VN-E33-67) e ITS (Norma VN-E9-86) para todas las estabilizaciones.

Material	Curado	RCS	ITS	Humedad (%)	Humedad Residual (%)	Densidad Húmeda; y _h (kN/m ³)	Densidad Seca; y _s (kN/m ³)	Grado de Comp. (%)	Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)
		Compresión (kPa)	Tracción (kPa)							
Suelo Arena Emulsión	72 hs Amb.	790	145	5.10	61.45	20.201	19.221	99.13	252	25
	168 hs Amb.	1010	191	3.90	46.99	20.085	19.331	99.69	332	23
	72 hs 40°C	1180	218	2.20	26.51	20.117	19.683	101.51	380	24
	CH	150	27	8.20	98.80	21.006	19.414	100.13	47	26
Suelo Arena	168 hs Amb.	630	76	3.33	40.12	18.950	18.339	99.83	137	43
Suelo Arena Asfalto Espumado	72 hs 40°C	1230	227	1.19	14.34	20.260	20.022	99.91	400	22

Las resistencias de los estabilizados vienen dadas generalmente por el aporte de la cohesión como principal factor.

En lo que respecta a las normativas vigentes que rigen estos estabilizados, las UCS verifican los valores mínimos establecidos por el Manual Wirtgen [8]. Según el TG-2 [23], en función de su ITS, para el curado establecido de 72 hs a 40°C, el estabilizado SAA es una BSM1.

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 (Figura 9.3). Esto se ve explicado sencillamente por el accionar de la arcilla, aportando una mayor cohesión cuando se encuentra en su estado seco (Figura 9.4). Aunque hay que considerar la vulnerabilidad que tiene el mismo estabilizado a la acción del agua, según lo obtenido en los ensayos de capilaridad.

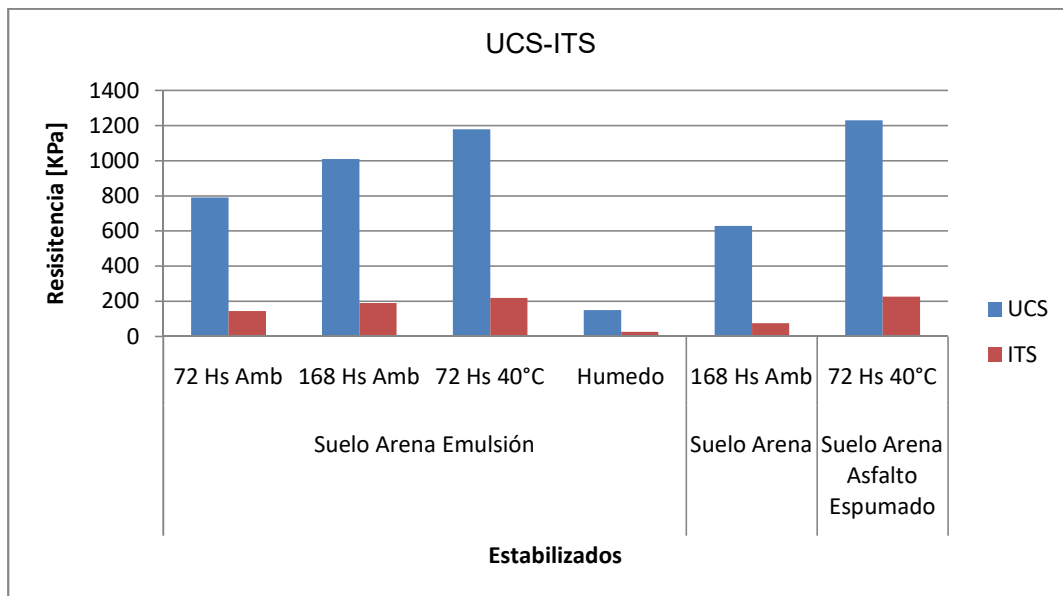


Figura 9.3. Resultados de ensayos UCS e ITS para todas las estabilizaciones.

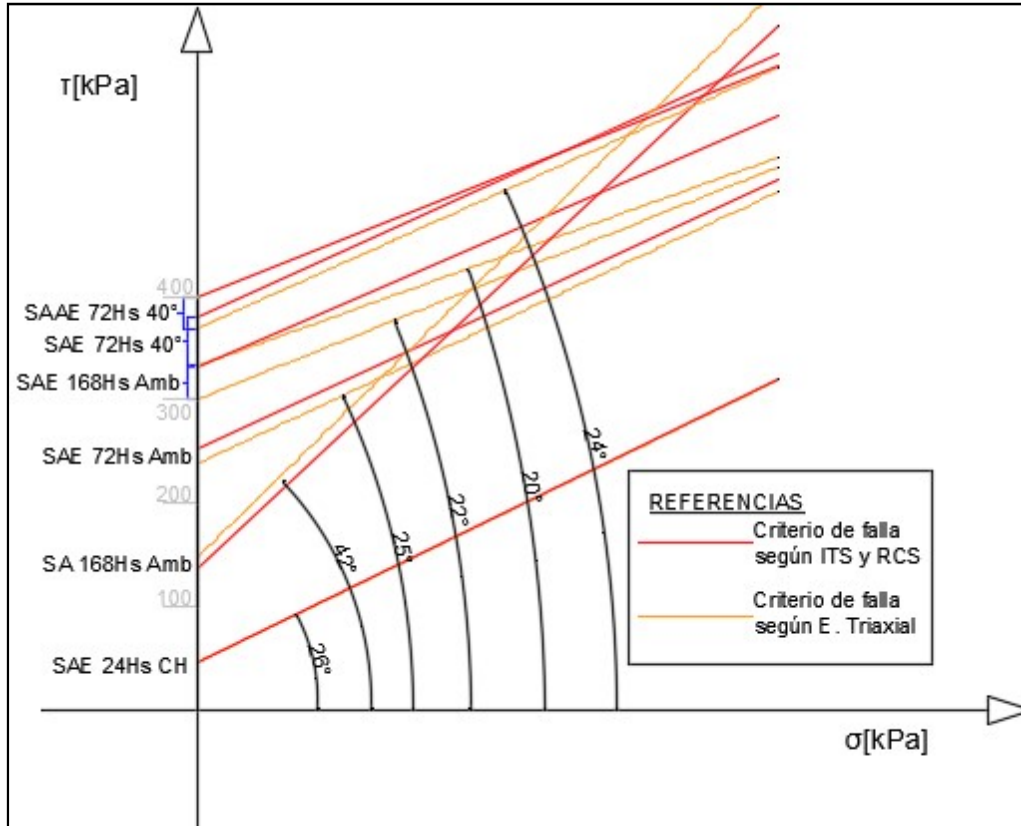


Figura 9.4. Línea de falla según criterio Mohr Coulomb para todas las estabilizaciones.

En la Figura 9.4, que resume los ensayos efectuados sobre las tres estabilizaciones, se observa claramente como el ángulo de fricción para estabilizaciones con betún se mantiene sin importar la humedad. El factor que determina la capacidad del estabilizado es la cohesión, siendo mayor para curados en ambientes secos y menor para los húmedos.

9.4 Desviaciones de STT y UCS-ITS

A modo de verificación de los dos caminos utilizados para la obtención de parámetros de corte c y ϕ , se confecciona la Tabla 9.4 en función de cada estabilizado, donde se contemplan las desviaciones y/o errores.

Tabla 9.4. Comparación de ambos métodos para obtención de parámetros del estabilizado

Material	Curado	UCS - ITS		STT		ERROR	
		Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Cohesión c (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Desviación Cohesión c (%)	Desviación Ángulo de Fricción (%)
Suelo Arena Emulsión	72 hs Amb	252	25.00	238	25	5.91	0.00
	168 hs Amb	332	23.00	301	22	10.34	4.55
	72 hs 40°C	380	24.00	333	20	14.09	20.00
	CH	47	26.00	46	26	1.62	0.00
Suelo Arena	168 hs Amb	137	43.00	147	44	7.61	2.33
Suelo Arena Asfalto Espumado	72 hs 40°C	400	22.00	369	24	8.40	9.09

En todos los casos los valores de desviaciones y/o errores se encuentran en el orden del 10%, con algunos que sobrepasan y otros que se encuentran por debajo. Dándose como válida esta metodología de estudio verificando las teorías planteadas anteriormente.

9.5 Ensayo Triaxial Dinámico

Para el caso de los curados según el manual TG-2, se observa una gran similitud en ambos comportamientos (Figura 9.5). Pero la gran diferencia de ambos lo hacen las probetas luego de realizarse el ensayo de capilaridad.

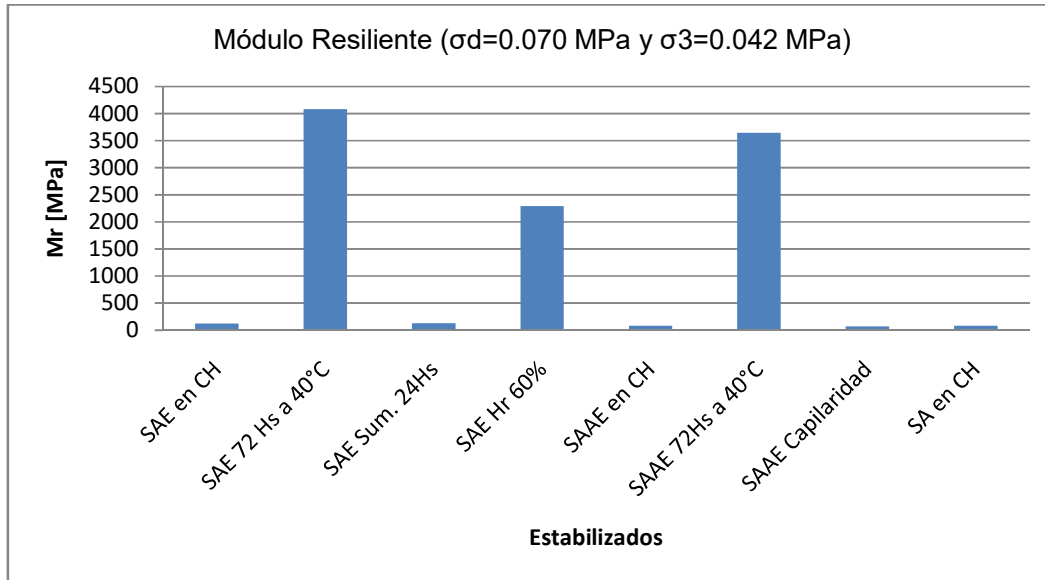


Figura 9.5. Módulos Resilientes de SA, SAE y SAAE para todos los curados

Se destaca como punto a considerar que el SAE tiene una gran respuesta incluso luego de haber sumergido la probeta durante 24 Hs (Figura 9.6). Como también la gran que tiene la humedad en el Módulo Resiliente de los estabilizados en estudio, según Figuras 9.7, 9.8, 9.9, 9.10, 9.11.

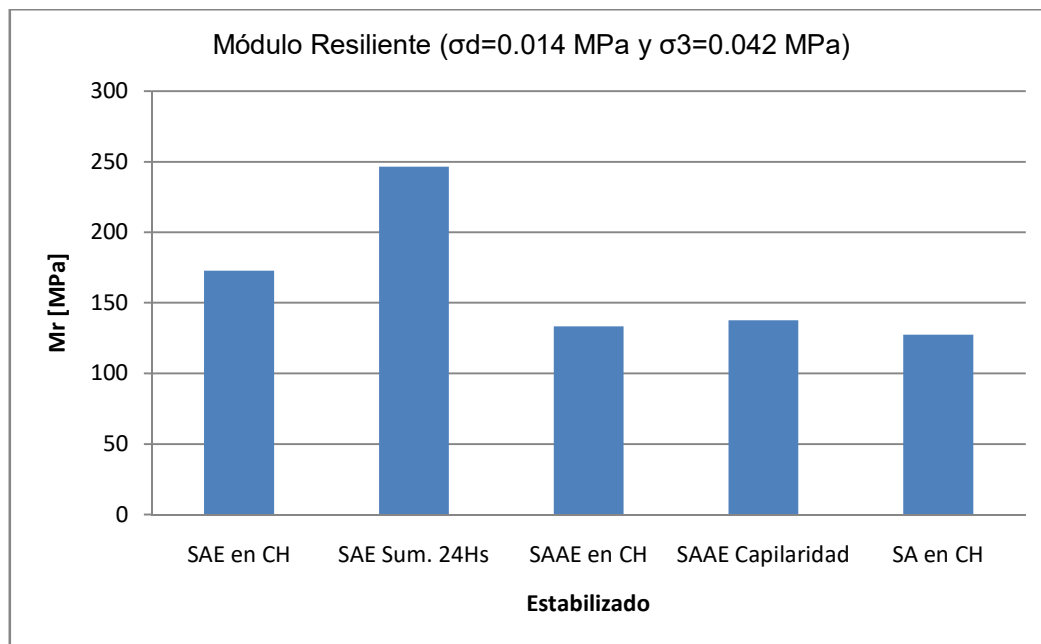


Figura 9.6. Módulos Resilientes de SA, SAE y SAAE para condiciones de humedad residual igual al 100% o mayores.

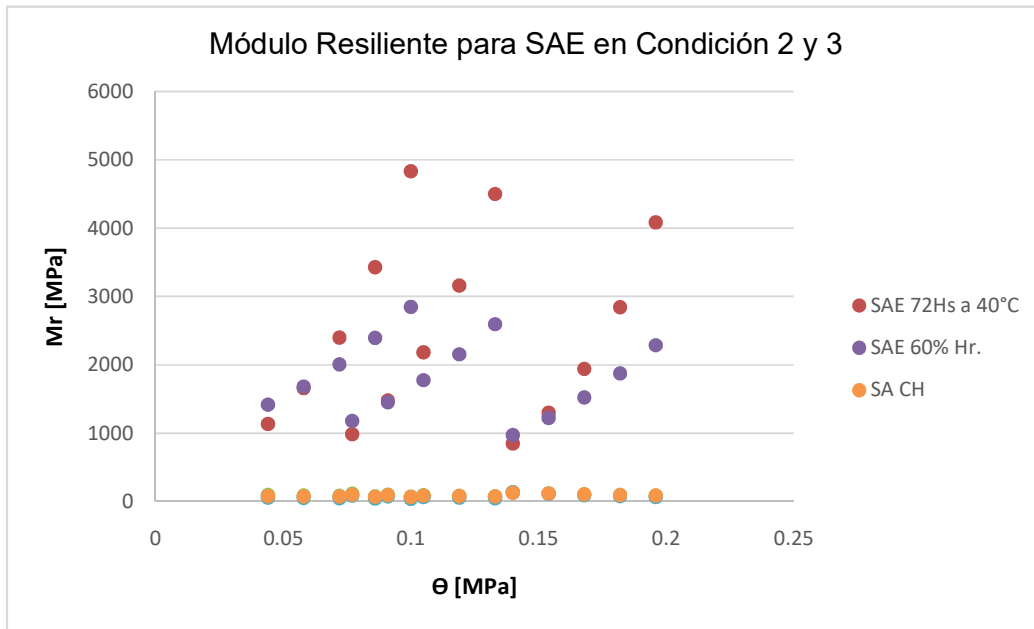


Figura 9.7. Módulos Resilientes para estabilizado SAE en Condición de curado 2 y 3.

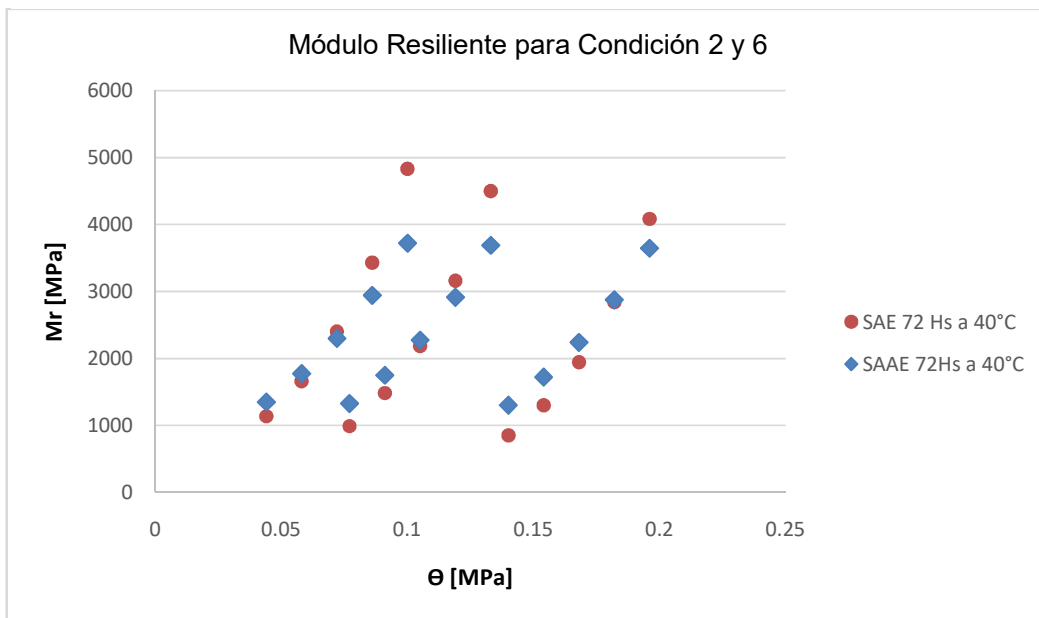


Figura 9.8. Módulos Resilientes de SA y SAAE para Condición de curado 2 y 6.

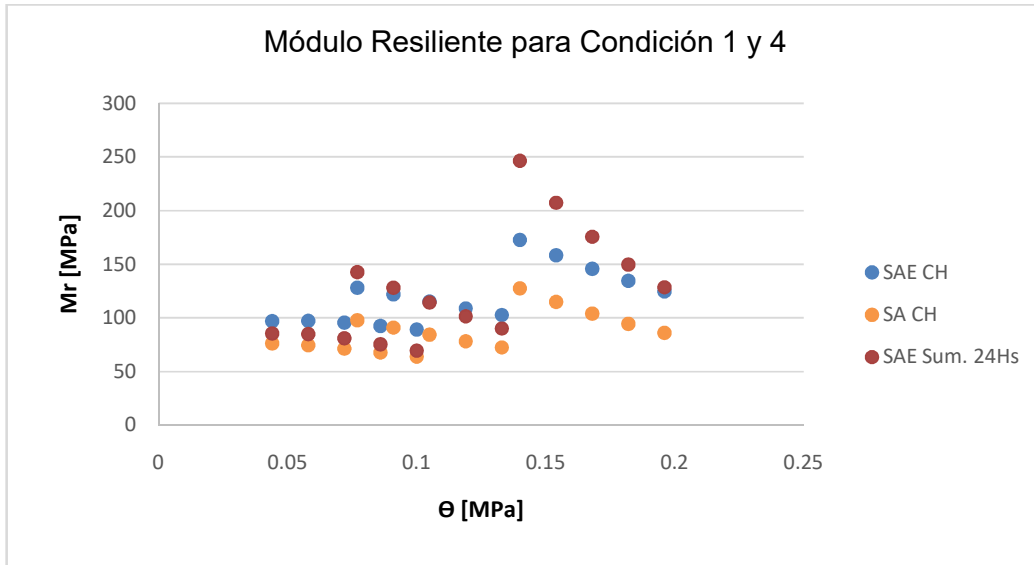


Figura 9.9. Módulos Resilientes de SAE para Condición de curado 1 y 4.

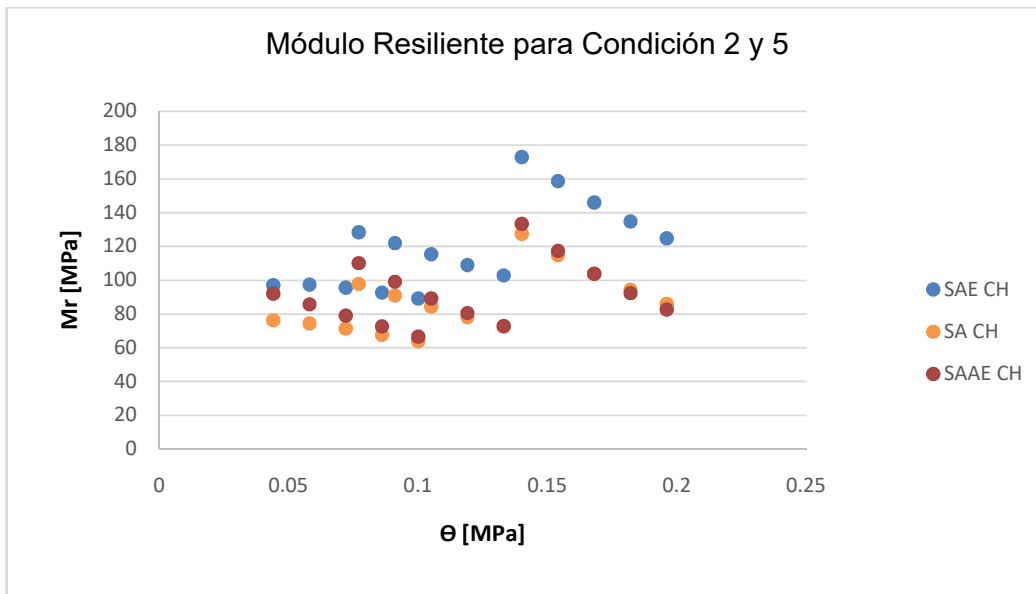


Figura 9.10. Módulos Resilientes de SA y SAAE para Condición de curado 2 y 5.

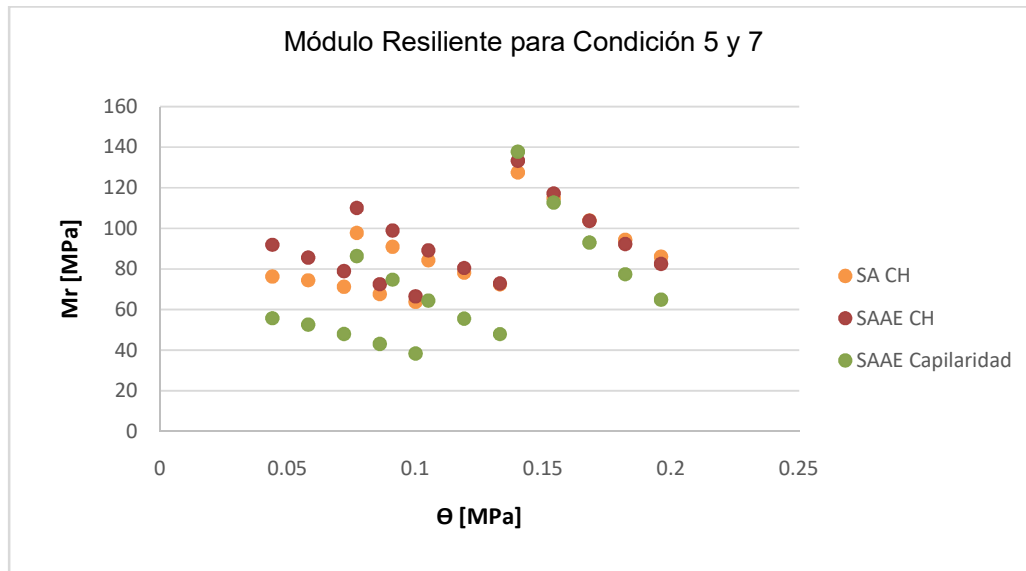


Figura 9.11. Módulos Resilientes de SAAE para Condición de curado 5 y 7.

Es factible afirmar que el Suelo-Arena-Asfalto 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, dado que todas las experiencias consultadas indican que las humedades encontradas en las capas de SAE, en obras que se encontraban ya en su condición de equilibrio, con una Humedad Residual menor al 60%.

Dado que la rigidez es función principal del contenido de humedad, el proyectista se verá tentado, en este caso, de exigir condiciones máximas de secado del material. Resulta válido recordar, dado que el contenido de humedad con el que trabajará la estructura proviene del proceso constructivo, que la factibilidad de lograr un pretendido secado dependerá de muchos factores, entre los que conviene destacar:

- Las condiciones ambientales de trabajo.
- Las características del suelo y la emulsión utilizadas.
- El proceso constructivo, fundamentalmente el tipo de mezclado.
- Del espesor de la capa de SAE.

Una vez definida la tipología del material, para que el diseño estructural a través de un programa de cálculo mecanicista 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.

10 DISEÑO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS DE COSTOS

10.1 Diseño estructural

Con los datos que se obtienen de las caracterizaciones de los estabilizados, se va a proceder 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 “BackViDe” (normativa AASHTO 1993) [31], brindado por la cátedra de Diseño Estructural de Pavimentos, perteneciente a la Maestría en Ingeniería Vial de la Universidad Nacional de Rosario. Un método de diseño mecanicista basado en la teoría lineal elástica, con éste se va a poder predecir la vida útil de la carretera en función de cada base utilizada.

Este método utiliza un modelo matemático para determinar las tensiones y deformaciones que son generadas dentro de la estructura del pavimento cuando una carga es aplicada. La ubicación donde son evaluadas esas tensiones y deformaciones es impuesta por la condición de falla del material en las distintas capas. Los módulos se basan en la teoría de que la distribución de la carga depende del espesor y la rigidez de las capas de pavimento.

En este punto se va a obtener la mejor combinación para rutas de mediano y bajo tránsito, de bases convencionales y de aquellas bases con asfalto (SAE y SAAE).

El análisis se va a dividir en tres etapas. En una primera, se va a estudiar el comportamiento del estabilizado SAE y SAAE en condiciones de humedades residuales menores a 60%, con módulos obtenidos en el apartado 8.2. La segunda etapa, se analiza 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 de la provincia de Santa Fe donde se enmarca este estudio.

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.

En definitiva, el paquete estructural va a estar conformado según la Figura 10.1.

Paquete Estructural	Espesor
Concreto Asfáltico	0,05 m
Base Suelo-Arena-Asfalto	Variable
Sub Base Suelo A4	0,20 m
Subrasante $M_r = 40$ MPa	

Figura 10.1. Paquete estructural SAA.

10.1.1 Diseño Estructural para SAE y SAAE sometidos a curados según normativa TG-2 [23]

En este primer análisis, se cuenta con el dato de que el M_r del SAA debe oscilar en valores cercanos a 1000 MPa (límite inferior de valores obtenidos en el ensayo de Módulo Resiliente; Figuras 8.12, 8.13 y 8.25), adoptando para la carga de datos un rango variable de módulos desde 500 MPa a 1500 MPa.

De trabajos efectuados por el Dr. Ing. Oscar Giovanon, docente en la Maestría en Ingeniería Vial e investigador del IMAE [35], se cuenta con las ecuaciones constitutivas de suelos seleccionados de tipo A4 (ecuación 8). Estos pueden emplearse correctamente como sub base de dicho estabilizado.

$$M_r = A.(\sigma_d)^B. (\Theta)^C \quad (8)$$

Donde:

M_r = módulo resiliente, en MPa.

σ_d = tensión desviadora, 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 para ecuación (8).

Por sobre la capa en estudio, y al hacer siempre referencia a caminos secundarios, se va colocar una carpeta asfáltica de 5 cm, de módulo mayor a 2000 MPa teniendo en cuenta las temperaturas de trabajo en la zona de estudio.

De este análisis se debe obtener el espesor óptimo para el estabilizado SAA, de modo tal de utilizar en el próximo paso las ecuaciones constitutivas válidas del mismo (condiciones de humedad relativa cercanas a 100%), y dicho espesor para contemplar resultados.

Se procede con la carga de datos como se observa en la Figura 10.2. Al no tener conocimiento del comportamiento del estabilizado SAA, se lo va a asignar en primer lugar como una Sub Base Granular para poder luego efectuar correctamente una comparación con una base granular cementada de uso regular en rutas y autopistas de la Provincia de Santa Fe. El criterio de falla adoptado para la capa en estudio es el ahuellamiento.

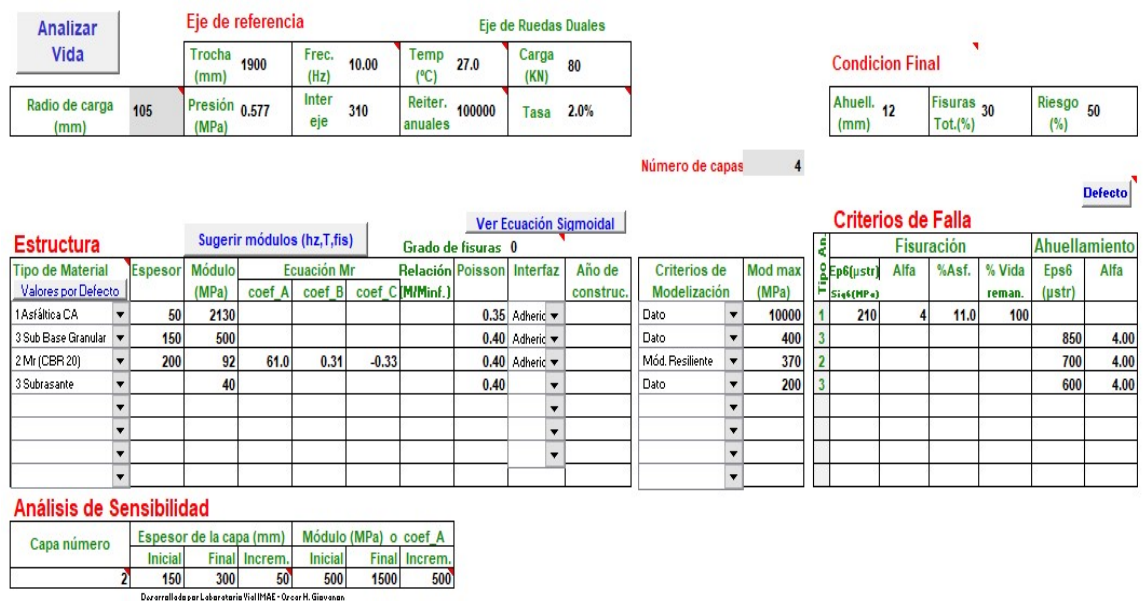


Figura 10.2. Análisis de Vida para SAA como Sub Base Granular.

Como el camino es secundario, se adopta un valor de 100.000 reiteraciones anuales, siendo las variables de este análisis el espesor del SAA (entre 15cm y 30cm) y su módulo (entre 500 MPa y 1500 MPa). Con estas variables, se procede a analizar la vida del paquete estructural (Figura 10.3), sin el empleo del escalonamiento.

Eje de Referencia carga del eje 80 KN 100000 ejes/año tasa 2%

radio de carga (mm)	105	presión (MPa)	0.577	inter eje (mm)	310
---------------------	-----	---------------	-------	----------------	-----

Estructura Analizada

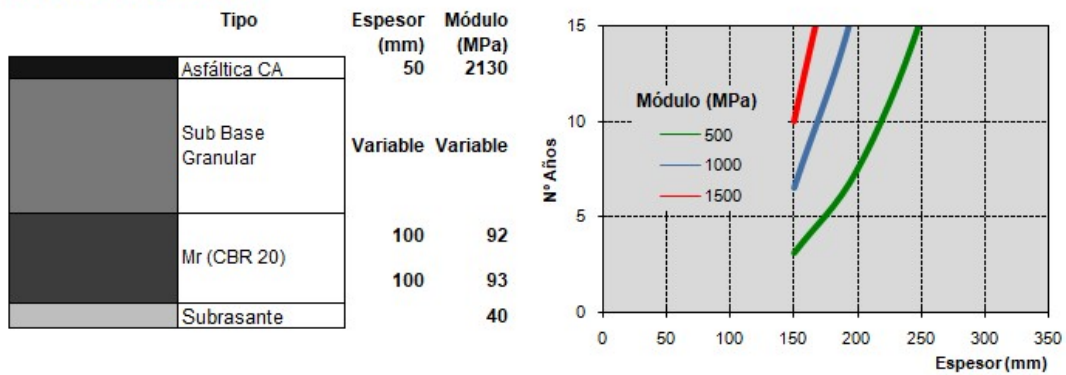


Figura 10.3. Resultados del Análisis Estructural para SAA como Sub Base Granular

En la gráfica representada en la Figura 10.3, se aprecia que espesores de 20 cm o más permiten obtener un camino que durante 10 o más años no requiera alguna intervención o mejora. De un modo más preciso, en la Figura 10.4, se va a identificar cual es la capa que primero falla dentro del paquete.

Casos Resueltos						N adm Fisuración	Nadm Ahuellamiento	
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	50	2130	-156		22 081 230		
2	NoLig	150	500				576	4 842 302
3	Mr	100	78				939	324 399
3	Mr	100	71				787	862 457
4	NoLig	0	40				872	317 394
.								
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	50	2130	-141		32 594 160		
2	NoLig	200	500				620	10 102 690
3	Mr	100	79				756	903 383
3	Mr	100	74				605	2 507 368
4	NoLig	0	40				689	799 129
.								
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	50	2130	-138		35 672 140		
2	NoLig	250	500				623	9 939 325
3	Mr	100	80				612	2 295 504
3	Mr	100	78				478	6 477 893
4	NoLig	0	40				562	1 778 179
.								
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	50	2130	-139		34 661 580		
2	NoLig	300	500				627	9 641 713
3	Mr	100	83				499	5 411 799
3	Mr	100	83				386	15 110 120
4	NoLig	0	40				469	3 592 457

Figura 10.4. Casos resueltos del Análisis Estructural para SAA como Sub Base Granular.

Se puede observar, que la falla del paquete viene dada por ahuellamiento del suelo A4 o de la subrasante. Esta apreciación es debido a que el Nadm de dichas capas son menores que el resto. En función a estos resultados, como espesor tentativo de la capa SAA, puede adoptarse 20 cm. Con dicha dimensión se garantizan Nadm que oscilan las 1.000.000 reiteraciones, implicando una vida en servicio del pavimento de 10 años.

10.1.2 Diseño Estructural para SAE y SAAE en condiciones de humedad óptima

Para este caso, se dan como válidas las ecuaciones constitutivas obtenidas, esto es debido a que los valores para los estabilizados SAA son similares en condiciones de humedad residual cercanas al 100%.

Como material representativo, se utiliza la mezcla del SAE en condiciones de curado durante 24Hs en cámara húmeda. Este estabilizado, en dicha condición, posee mejores propiedades mecánicas, debido a la correcta introducción de la emulsión en la

mezcla Suelo-Arena. De este último, se utilizarán las constantes de regresión obtenidas en la ecuación (3), con la salvedad de que se deben recalcular debido a que la ecuación constitutiva del programa BackViDe (Figura 10.5) difiere de la utilizada en los cálculos de este trabajo.

$$M_r = A \cdot (\Theta)^B \cdot (\tau_{oct})^C \quad (9)$$

Donde:

M_r = módulo resiliente, en MPa.

σ_d = esfuerzo cortante octaédrico, en MPa.

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

τ_{oct} = tensión octaédrica, en MPa.

A, B, C = son constantes experimentales obtenidas por regresión para ecuación (9).

En la Tabla 10.1, se calculan nuevamente por regresión las constantes buscadas para el estabilizado SAE. De la ecuación (3) se debe despejar la Presión Atmosférica y la sumatoria del 1, para efectuar nuevamente la regresión. Los valores de B y C se van a invertir debido a que, en la nueva ecuación (9), actúa B sobre Θ y C sobre τ .

$$M_r/P_a = A \cdot (\tau_{oct}/P_a + 1)^B \cdot \left(\frac{\Theta}{P_a}\right)^C \quad (3)$$

Tabla 10.1. Coeficientes de regresión en función de la nueva ecuación constitutiva para el SAE (M_r en MPa)

	Ec. Constitutiva (3)	Ec. Constitutiva Backvide (9)
A=	1674	103
B=	-2.26	0.49
C=	0.50	-0.30

Con estos valores, se procede a cargar la capa de SAE en función de su ecuación constitutiva (9). En este caso se vuelve a alternar su espesor para estudiar el material nuevamente, según la condición de humedad óptima.

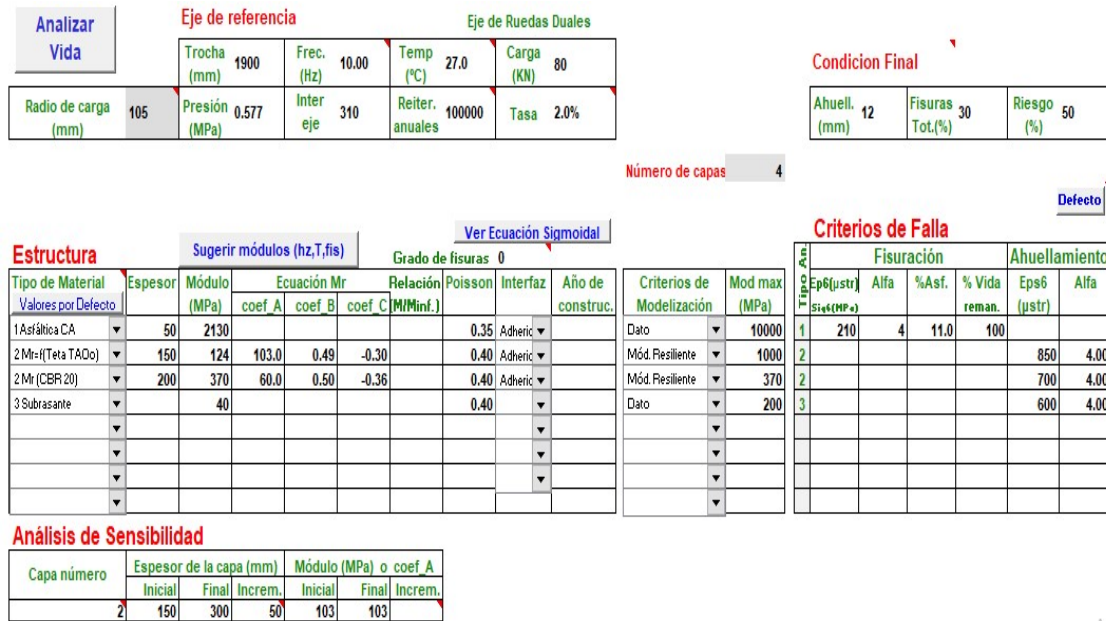


Figura 10.5. Análisis de Vida para SAE con humedad óptima.

Si siguiendo con la misma metodología que el caso anterior, se obtienen los resultados de la vida en años del estabilizado SAA en condiciones húmedas (Figura 10.6).

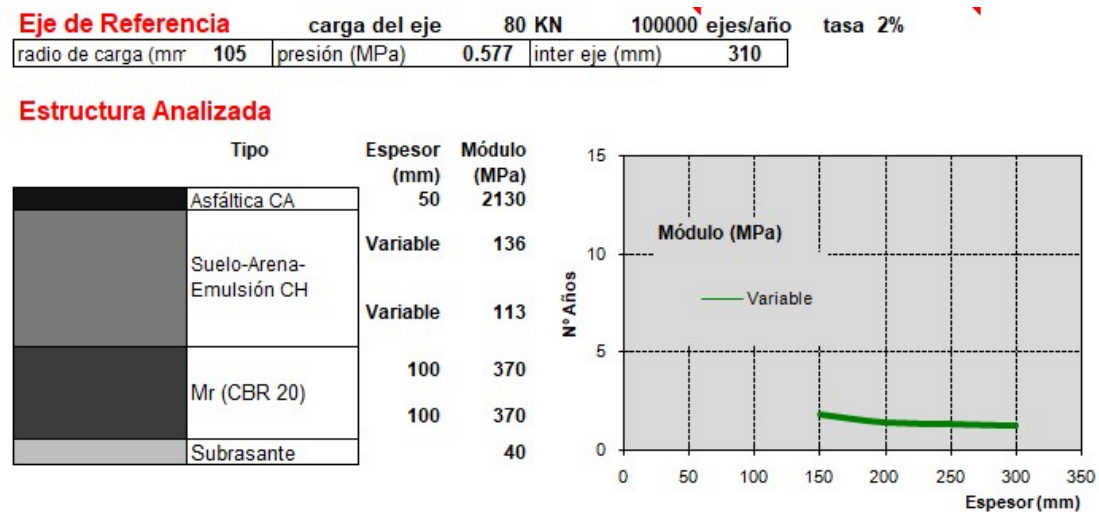


Figura 10.6. Resultados del análisis estructural para SAE con humedad óptima

Se puede apreciar que el material no es apto para una base en condiciones de Hr cercanas al 100%, a pesar que se aumente el espesor, el resultado en años de vida del pavimento no superan los 3.

Como detalle particular, al ser tan bajo el módulo del SAE en condiciones húmedas, se aprecia como aumenta el módulo de la Sub Base de Suelo A4 (CBR 20), cuando se analiza su vida, debiendo soportar una mayor carga que en el ejemplo del apartado 10.1.1.

La Figura 10.7 muestra la cantidad de reiteraciones, éstas en la capa de SAA apenas superan los 100.000 es decir que pasado un año ya hay que efectuar intervenciones. Esto sirve para afirmar que el material no debe trabajar con humedades cercanas a la óptima, debiendo aguardar a su curado antes de solicitarlo.

Casos Resueltos						N adm Fisuración	Nadm Ahuellamiento	
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	50	2130	-436		352 557		
2	Mr	150	154				1670	181 913
3	Mr	100	370				318	30 135 550
3	Mr	100	370				454	8 432 560
4	NoLig	0	40				817	423 470
.								
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	50	2130	-489		225 985		
2	Mr	100	142				1776	140 431
2	Mr	100	127				1142	384 095
3	Mr	100	370				278	58 441 880
3	Mr	100	370				404	13 483 560
4	NoLig	0	40				731	659 877
.								
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	50	2130	-508		193 765		
2	Mr	125	138				1809	129 956
2	Mr	125	120				1021	430 622
3	Mr	100	370				245	97 726 940
3	Mr	100	370				355	22 470 250
4	NoLig	0	40				645	1 080 608
.								
Capa	Tipo	Espesor	Módulo	Et[ust]	Tensión	Nadm.	Ez[ust]	Nadm.
1	Asf	50	2130	-520		176 265		
2	Mr	150	136				1833	123 150
2	Mr	150	113				1035	495 569

Figura 10.7. Casos resueltos para estabilizado SAE con humedad óptima

Para efectuar la comparación con el estabilizado típico utilizado en la Provincia de Santa Fe, se utiliza el diseño del apartado 10.1.1. (SAA con humedades residuales inferiores al 60%).

10.1.3 Diseño Estructural para base de Estabilizado Granular Cementado (Santa Fe)

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. Para esta base, el criterio es asignarle un método efectivo obtenido como función del módulo asignado a la capa inferior y acotado a un máximo de 700 MPa [35]. Este método consiste en ir cargando en el programa los espesores y las relaciones que se observan en la Figura 10.8.

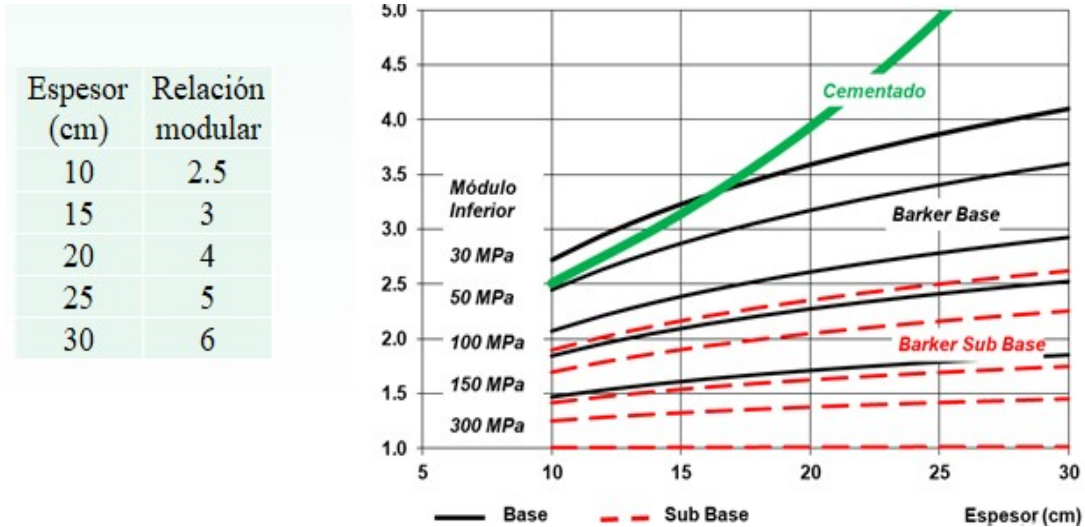


Figura 10.8. Relación modular según Barker para estabilizados con y sin cemento [35]

Con esta relación, se procede con la carga de valores para el análisis de la vida útil del pavimento (Figura 10.9). Este proceso debe realizarse para todos los espesores y relaciones que figuran en la tabla anterior.

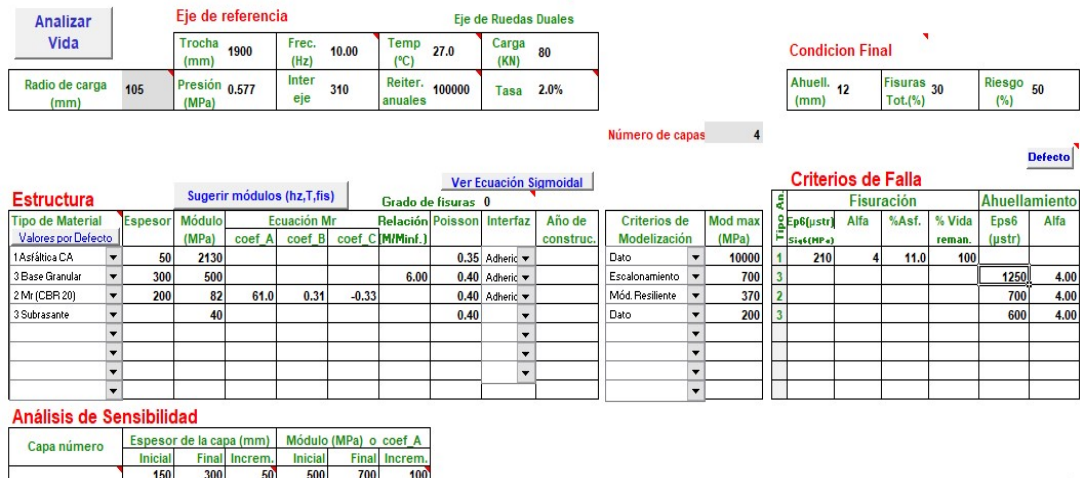


Figura 10.9. Análisis de Vida para pavimento con Base Granular cementada

Con los resultados de los análisis de vida para cada relación y espesor (Tabla 10.2), se confecciona la gráfica en función de los años de servicio. La curva representada en la Figura 10.10, es el resultado de los múltiples análisis de vida, para la variación de los espesores en función de la relación modular explicada.

Tabla 10.2. Resultados de Análisis de Vida para varios espesores de Base Granular cementada

Espesor (mm)	150	200	250	300
Nadm	107301	386387	1270338	3530568

Eje de Referencia carga del eje 80 KN 100000 ejes/año tasa 2%
 radio de carga (mm) 105 presión (MPa) 0.577 inter eje (mm) 310

Estructura Analizada

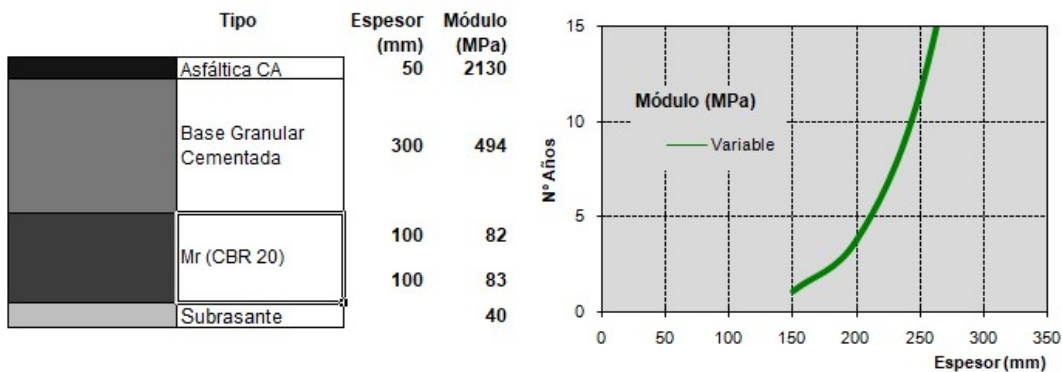


Figura 10.10. Resultados del Análisis Estructural de la base granular cementada

Los resultados obtenidos son similares a los del estabilizado SAA con humedades residuales bajas. Se da como válida la comparación, para continuar con el análisis económico de estas dos capas.

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 SAA 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.

10.2 Análisis de costos

Con referencia a los costos del material, se debe realizar una evaluación comparativa entre el costo de una estructura construida con base de Suelo-Arena-Asfalto y el de una base típica de un estabilizado granular cementado apoyado en un suelo mejorado con cal.

Es fundamental para su aplicación no solo la ventaja medioambiental sino también la económica. Para ello, una vez verificado el comportamiento entre ambas estructuras, arribando a una durabilidad similar o mayor por parte del estabilizado SAA, se debe hacer una comparativa económica que permita que el material pueda emplearse sin ningún tipo de inconveniente

Los costos de cada estabilización, incluyendo materiales y mano de obra, a fecha de Septiembre de 2019 fueron brindados por el Ing. Leonardo Giangreco de la empresa EDECA S.A. (Tabla 10.3).

Tabla 10.3. Costos de estabilizaciones en Septiembre de 2019.

DESIGNACIÓN DE LAS OBRAS	Un	PRECIOS UNITARIOS
ITEM N° 1 Estabilizado Suelo Arena Emulsión: 65% Arena, 35% Suelo, 6% Emulsión. Proctor 1.939	m3	\$ 6 746.39
ITEM N° 2 Estabilizado Suelo Arena Asfalto Espumado: 65% Arena, 35% Suelo, 4% Asfalto. Proctor 2.004	m3	\$ 6 460.56
ITEM N° 3 Estabilizado Granular con cemento: 45% Piedra, 40% Suelo, 15% Arena, 5% Cemento. Proctor 2.100	m3	\$ 5 620.09
ITEM N° 4 Suelo Cal: 95% Suelo, 5% Cal. Proctor 1.600	m3	\$ 2 193.08

También se precisa, debido a las grandes variaciones de la economía a nivel local, una comparativa con otros años, por ejemplo 2018 (Tabla 10.4).

Tabla 10.4. Comparativa de costos de estabilizaciones con valores de 2018

Material	\$/m3 jul-2018	\$/m3 sep-2019
SAE	1858.87	6746.39
SAAE	1780.53	6460.56
Estabilizado Granular	2240.75	5620.09
Suelo-Cal	875.29	2193.08

La comparativa económica no es favorable, pero esto se debe principalmente a la crisis económica que acarrea el país en el último año. Se observa que en 2018 el estabilizado SAA era un material rentable, a comparación de los estabilizados granulares con cemento (Figura 10.11).

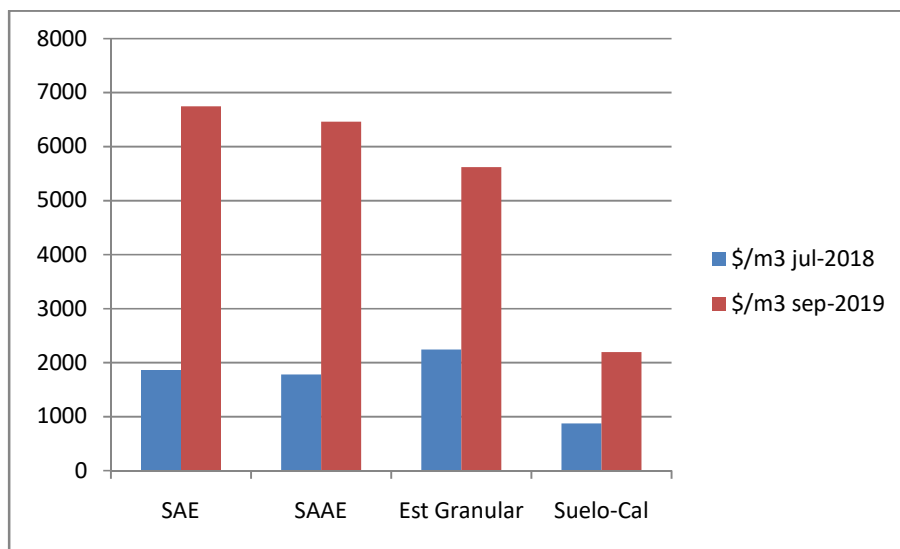


Figura 10.11. Gráfica comparativa de costos

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.

11 CONCLUSIONES

Luego del estudio llevado a cabo y en función del objetivo general de "Promover un proceso de optimización y re implementación del SAE como base y sub-base de pavimentos flexibles en la provincia de Santa Fe", se puede concluir que:

El diseño del estabilizado Suelo-Arena-Emulsión se basa en los resultados del ensayo del ensayo Triaxial Estático (STT) y en el comportamiento resiliente del mismo a través del ensayo Triaxial Dinámico.

En primer lugar, en lo que respecta a la metodología de ensayos para su dosificación del SAE que se apoya en los parámetros de corte “c”, cohesión, y “ ϕ ”, ángulo de fricción interna, se logra verificar la equivalencia entre resultados obtenidos a través del ensayo Triaxial Estático (STT) y el uso conjunto de los resultados de los ensayos Compresión simple (UCS) y la resistencia a 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 respetar, 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 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 $H_r=60\%$), aunque es difícil de darse en obra; y el curado de 72 hs (3 días) a temperatura ambiente promedio de 25°C, que es el que mejor se adapta y el que es **recomendado** para el estabilizado SAE en la zona de la Provincia de Santa Fe.

En segundo lugar, durante el estudio del diseño de la mezcla mediante caracterización dinámica, se observan tres comportamientos marcados en función del Módulo Resiliente (M_r) del material (adoptado como parámetro válido para su evaluación dinámica). Para humedades residuales del 100% (humedad óptima), el Suelo-Arena-Emulsión 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 SAE 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. 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). Verificando de este modo el curado recomendado en el párrafo anterior.

En cuanto a su Diseño Estructural, el material puede reemplazar sin inconvenientes al estabilizado granular cementado utilizado comúnmente en la provincia de Santa Fe. Para iguales espesores y cargas de tránsito se obtuvieron vidas en servicio similares.

En tercer lugar, el gran avance en tecnologías para la ejecución de capas estabilizadas, favorece el empleo de emulsiones. Es el caso del uso de equipos de reciclado, y sistemas avanzados de inyección de emulsión. A su vez, 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 (emulsión Catiónica Superestable), favorecen la re implementación del SAE como base de pavimentos flexibles.

En cuarto lugar, a pesar de que el SAE, hoy en día, no logra verificar los costos comparativos, es necesario efectuar estudios económicos periódicos. Dado que el costo de este material oscila en función del costo del asfalto, pudiendo variar notablemente de un año a otro, como se observó en 2018 y 2019.

Por estas razones, el estabilizado Suelo-Arena-Emulsión, es un material que puede traer grandes mejoras a futuro, tanto económicas como medioambientales no solamente para la provincia de Santa Fe, sino también para la República Argentina.

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 lo 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.

12 AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a la Dra. Ing. Silvia Angelone por su gran apoyo y seguimiento de este trabajo, estando siempre a predisposición e interviniendo correctamente cuando era necesario.

A todas las personas del Laboratorio Vial del IMAE. Dr. Ing. Fernando Martínez, Dr. Ing. Oscar Giovagnon, Dra. Ing. Marta Pagola, Mter. Ing. Marina C. Cassaux, Ing.

Ricardo Andreoni, Sr. Sebastián Andreoni, Sr. Luis Zorzutti, Srta. Florencia Cassani, por toda la ayuda y tiempo brindado para la realización de este trabajo.

Al Ing. Jorge Páramo por asesorarme acerca de las tecnologías del asfalto espumado.

Al Ing. Leonardo Giangreco, jefe de oficina técnica de EDECA S.A, por brindarme los costos actualizados de materiales y ejecución.

Al Sr. Víctor Giménez del laboratorio Vial de EDECA S.A. por su colaboración con alguno de los ensayos.

A mis colegas, Ing. Iván Jüül e Ing. Sebastián Fernández, por la continua dedicación en nuestro emprendimiento como consultores de ingeniería civil (AJF Ingeniería), brindándome el tiempo suficiente para llevar a cabo esta tesis.

A mi familia, Marcelo Azanza, Carolina Rovere y Joaquín Azanza por su eterno apoyo en todas mis decisiones.

Sin todos los mencionados esto no podría haber sido posible, GRACIAS TOTALES.

13 BIBLIOGRAFÍA

[1] CASSAN, ANGELONE, MARTÍNEZ (2005). "Características mecánicas de estabilizados con ligantes hidráulicos para el diseño de pavimentos". XIV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. ISBN N° 987-98988-1-8. Buenos Aires.

[2] ERMACCORA, HILLAR 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>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019.

[3] NAVARRETE – QUINTERO (2011). "Estabilización de suelos con el uso de emulsiones asfálticas catiónicas de rotura lenta. Caso de estudio vía Las Mercedes – Puerto Nuevo, Provincia de Santo Domingo De Los Tsachilas". Trabajo de titulación Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica Del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Escuela de Civil. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/396910723/Estabilizacionconemulsionesasfalticas>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019.

- [4] YPF S.A. (2015). "Emulsiones asfálticas de rotura lenta y superestable". Disponible en: <https://www.ypf.com/productosyservicios/Descargas/Emulsiones-de-Rotura-Lenta-y-Superestables.pdf>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019.
- [5] DIRECCIÓN NACIONAL DE VIALIDAD (2017). "Normas de Ensayo". Disponible en: <http://www1.fm.utn.edu.ar/labvial/Normas%20de%20Ensayo.pdf>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019.
- [6] THENOUX Z. – JAMET (2008). "Tecnología del asfalto espumado y diseño de mezcla". Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Chile. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/370544978/Diseno-de-Mezcla-Asfaltica-Tibia-Mediante-La-Metodologia-Marshall-Utilizando-Asfalto-Espumado>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019
- [7] MARTUCCI (2018). "Reciclado de pavimentos in situ utilizando la técnica de asfalto espumado". Trabajo de Formación, Maestría en Ingeniería Vial. Escuela de Posgrado y Educación Continua. Universidad Nacional de Rosario.
- [8] WIRTGEN GROUP (2018). "Manual de reciclaje en Frío". Disponible en: <http://www.wirtgen.de/es/gama-de-productos/estabilizadoras-de-suelos-y-recicladoras-frio/recicladoras-frio/>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019
- [9] YOU, GOH, DAI (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_37252_5_7.pdf. Fecha consultada: 13 de Septiembre de 2019
- [10] PONCINO (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>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019
- [11] RAMBELLI (1946). "Emulsiones superestables y su empleo en la estabilización de suelos". Disponible en: <http://www.e-asfalto.com/trabcpa/ligantes/emulsiones.htm>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[12] DE LA PUENTE (1950). "Algunas propiedades físicas y mecánicas de la mezcla suelo arcilloso-arenoso emulsión asfáltica". Disponible en: <http://www.e-asfalto.com/trabcpa/basesub.htm>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[13] DIRECCION G. DE VIALIDAD – SANTA FE (1952). "Comunicación de los trabajos en la ejecución sobre estabilización de materiales finos con emulsiones asfálticas". Disponible en: <http://www.e-asfalto.com/trabcpa/basesub.htm>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[14] MARINI (1966). "Construcción de suelo-arena-emulsión, usando máquina estabilizadora de una sola pasada. Ruta Provincial N°13 – Tramo Las Rosas, km 40.8 Provincia de Santa Fe. XIV Reunión del Asfalto. Disponible en: <http://www.aacarreteras.org.ar/2019/index.php>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[15] MUSURANA Y OTROS (1966). "Mezclas Suelo Arena Emulsión Asfáltica". XIV Reunión Anual del Asfalto. Disponible en: <http://www.aacarreteras.org.ar/2019/index.php>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[16] OLMEDO (1966). "Organización y movimiento de equipos para estabilizados de suelo-arena-emulsión". XIV Reunión Anual del Asfalto. Disponible en: <http://www.aacarreteras.org.ar/2019/index.php>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[17] WIENS (1966). "Suelo emulsión". XIV Reunión Anual del Asfalto. Disponible en: <http://www.aacarreteras.org.ar/2019/index.php>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[18] MOREAU Y OTROS (1966). "Teoría de las mezclas tipo suelo-emulsión". XIV Reunión Anual del Asfalto. Disponible en: <http://www.aacarreteras.org.ar/2019/index.php>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[19] DORFMAN (1966). "Teoría y práctica de la estabilidad de suelos con emulsiones asfálticas". XIV Reunión Anual del Asfalto. Disponible en: <http://www.aacarreteras.org.ar/2019/index.php>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[20] AÑON (1968). "Construcción de bases bituminosas empleando arcillas inorgánicas de mediana plasticidad. Base de arena-suelo-cal-emulsión. XV Reunión Anual del Asfalto. Disponible en: <http://www.aacarreteras.org.ar/2019/index.php>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[21] MONTIEL (1980). "Primeras experiencias de obra sobre bases de suelo-arena-emulsión en Catamarca. XXII Reunión Anual del Asfalto. Disponible en: <http://www.aacarreteras.org.ar/2019/index.php>. Fecha consultada: 17 de Septiembre de 2019.

[22] CARRETEROS (1976). "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes". PG-3- Artículo 511 (Suprimido) Disponible en: http://www.carreteros.org/normativa/pg3/articulos/5/ii/a_511sup.htm – Ministerio de Fomento – Madrid, España. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[23] ASPHALT ACADEMY (2009). "Technical Guideline: Asfalto Stabilized Materials". TG-2-Second edition-Pretoria, South Africa. Disponible en: <http://www.asphaltacademy.co.za/events/categories/publications/tg2-Asfalto-stabilised-materials/>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[24] AUSTRROADS (2019). "Guide to Pavement Technology Part 1". Disponible en: <https://austroads.com.au/publications/pavement/agpt-set>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[25] LEMaC U.T.N (2003). "Estabilizantes Iónicos de Suelos para la Construcción". Jornadas SAM/CONAMET/SIMPOSIO. Centro de Investigaciones Viales, UTN, La Plata. Disponible en: https://lemac.frp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/12/2003_Estabilizantes-Ionicos-de-Suelos_SAM-CONAMET.pdf. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[26] DIRECCIÓN NACIONAL DE VIALIDAD (1998). "Pliego de Especificaciones Técnicas Generales". Publicación 101/102. Ministerio de Transporte – Presidencia de la Nación - 1° Distrito Buenos Aires. Sección C-I; C-II; C-III; C-IV. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/dnv_petg_1998_0.pdf. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[27] NORMA ARGENTINA IRAM 10529 (1985). "Método de ensayo de compresión triaxial en suelos cohesivos sobre probetas no consolidadas ni drenadas". Disponible en: <http://www.iram.org.ar/>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2018). "Normas ASTM D". Disponible en: <https://www.astm.org/>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[29] VILLAR (1995). "El ensayo de Tracción Indirecta". Universidad Politécnica de Catalunya, España. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/55872-8.pdf?sequence=8&isAllowed=y>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[30] BRIZUELA, ALDERETE, RIVERA (2004). "Procedimiento de moldeo para suelos granulares complementario a la Norma AASHTO T-307 para el ensayo de Módulo Resiliente de suelos viales". LEMaC, Centro de investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata. Disponible en: <http://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/123456789/2523/Procedimiento%20de%20moldeo%20para%20suelos%20granulares%20complementario%20a%20la%20norma%20AASHTO%20T%20%20307%20para%20el%20ensayo%20de%20m%C3%B3dulo%20resiliente%20de%20suelos%20viales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[31] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1993). "Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials AASHTO DESIGNATION T 307-99". Disponible en: <https://www.transportation.org/>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[32] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2003). "Norma BS EN 12697-22:2003: Bituminous Mixtures for Hot Mix Asphalt. Part 22. Wheel Tracking Test". Disponible en: <https://standards.globalspec.com/std/1023897/en-12697-22>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[33] PINO (2010). "Reciclado de Pavimentos en carreteras y su aplicación en Cuba". EMPROY. Villa Clara (Cuba). Disponible en: <https://es.scribd.com/document/260399545/Reciclado-Pavimentos-Carreteras-Aplicacion-Cuba>. Fecha consultada: 11 de Agosto de 2019

[34] HERNANDEZ, ALAMILLA, CAMPOS (2018). “Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado”. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica N° 519. Sanfandila, Qro 2017.

[35] GIOVANON (2019). “Caracterización Mecánica de Materiales”. Curso “Diseño Estructural de Pavimentos” perteneciente a la Maestría en Ingeniería Vial de la Universidad Nacional de Rosario. Disponible en: <https://www.fceia.unr.edu.ar/laboratoriovial/>. Fecha consultada: 21 de Enero de 2020.

ANEXO I ENSAYOS

Ensayo de Compactación de Suelos (Norma VN-E5-93) [5]

El Ensayo de Compactación de Suelos o comúnmente conocido como Ensayo Proctor es un ensayo que relaciona el peso específico seco que se obtiene con un determinado material, cuando se le aplica una energía de compactación previamente establecida, en función de la humedad con la que se prepara la muestra inicialmente (Figura 14.1).



Figura 14.1. Ensayo de Compactación de Suelos.

El ensayo se realiza varias veces utilizando humedades de partida distintas, y los resultados se llevan a un gráfico, que relaciona el peso específico seco γ_d , con la humedad w , con la que se ha preparado la muestra. La curva de compactación muestra un valor máximo del peso específico, que se conoce como densidad Proctor, al cual le corresponde un valor de la humedad inicial en la muestra, que se conoce como humedad óptima.

En la curva, se pueden distinguir dos zonas a un lado y otro de la densidad Proctor, que se conocen como rama seca y rama húmeda, por corresponder a humedades por debajo o por encima de la humedad óptima.

A modo de ejemplificar dicha curva, se adjunta a continuación la desarrollada para el estabilizado Suelo-Arena (Figura 14.2).

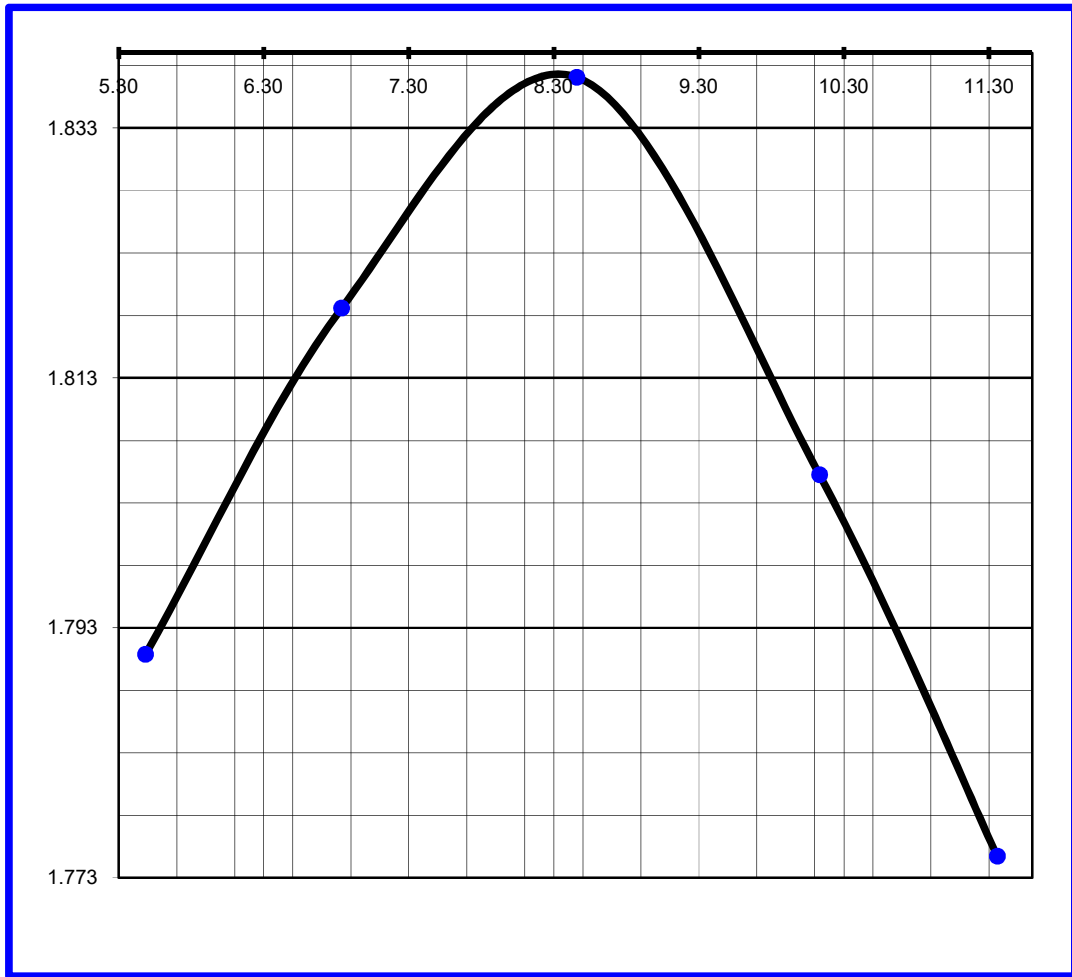


Figura 14.2. Ensayo de Compactación de Suelos

Esta permite obtener el valor de la humedad óptima a considerar como humedad residual 100% (Tabla 14.1).

Tabla 14.1. Resultados Ensayo de Compactación de Suelos para estabilizado SA [5].

<i>Humedad óptima =</i>	8.3%
<i>Densidad Máxima =</i>	18.37 KN/m3

Una vez que se fija dicha humedad, se obtienen las densidades secas máximas correspondientes al resto de los estabilizados en estudio (Tabla 14.2).

Tabla 14.2. Resultados de Ensayos de Compactación de Suelos [5].

Material	Densidad Seca Máxima (KN/m3)	Humedad óptima (%)
Suelo-Arena	18.37	8.30
Suelo-Arena-Emulsión	19.39	8.30
Suelo-Arena-Asfalto Espumado	20.04	8.30

Ensayo de Valor Soporte de Suelos (Norma VN-E6-8) [5]

El Ensayo de Valor Soporte de Suelos o VSR consiste en determinar un índice de la resistencia a esfuerzo cortante del terreno, conocido como Índice VSR, a partir del cual y mediante unas curvas obtenidas experimentalmente, se puede determinar el espesor de la capa de material [5].

El Valor Soporte Relativo de un suelo (V.S.R) es una medida relativa de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de humedad y densidad controladas.

El VSR se obtiene de la relación de la carga unitaria necesaria para lograr cierta profundidad de penetración de un pistón (con sección circular y superficie de 19.35 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra de material triturado.

$$\text{VSR (\%)} = (\text{carga unitaria del ensayo} / \text{carga unitaria patrón}) \times 100$$

Los ensayos de VSR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para un suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación Proctor estándar o modificada del experimento.

Para determinar el VSR o la resistencia a la penetración que presenta la hincada del pistón (utilizado en el ensayo), se procede de la siguiente forma:

Si los VSR para 2.54 mm y 5.08 mm de penetración son semejantes, se recomienda usar en los cálculos, el CBR correspondiente a 5.08 mm.

Si el VSR correspondiente a 5.08 mm es muy superior al VSR correspondiente al 2.54 mm deberá repetirse el ensayo.

Todos los suelos, tanto finos como gruesos o sus mezclas, se compactan a diferentes contenidos de humedad tanto arriba como bajo de su humedad óptima.

Las muestras elaboradas mediante estos procedimientos se sumergen en agua durante un periodo mínimo de 96 horas antes de proceder a su ensayo, con el objeto de simular las condiciones de saturación, a las cuales podrían estar sometidos los suelos como la sub-rasante de una carretera y, en esta forma, obtener los VSR de los suelos bajo las condiciones más críticas. En el ensayo, y en inmersión, se colocan pesos sobre las muestras con el objeto de simular las cargas, tanto de paso de vehículos como de la estructura del pavimento, a las cuales van a estar sometidos los suelos de la sub-rasante.

Tal como se describe en párrafos anteriores la compactación siempre debiera lograr alcanzar la máxima densidad posible bajo las condiciones de terreno. Usualmente se especifica la densidad mínima como un porcentaje de la densidad AASHTO modificada, entre 98% y 102% para bases estabilizadas con asfalto. A veces se permite aceptar un gradiente de densidad a través del espesor de compactación. Esto significa que la densidad en la parte superior de la capa puede ser mayor que la de la parte inferior. Cuando se especifica de este modo, es normal incluir una desviación máxima de 2% para la densidad medida en el tercio inferior de la capa. Así, si la densidad promedio especificada es un 100%, la densidad en la parte inferior de la capa debe ser mayor que 98%.

Se adjunta a continuación todos los ensayos de Valor Soporte que se realizaron en el Laboratorio Vial del IMAE (Tablas 14.3, 14.4 y 14.5).

Tabla 14.3. Ensayo de Valor Soporte Relativo sobre estabilizado Suelo-Arena [5]

G	Molde N°	Peso de M+S+A	Peso del Molde	Peso de S+A	Volumen del Molde	Densidad Húmeda	Humedad (b)	Densidad Seca (1)	Altura Probeta	LECTURAS				Hinch %
										1° Día	2° Día	3° Día	4° Día	
56	4	12598	8250	4348	2149	2.023	8.3	1.868	117	0.00	0.00	0.00	0.55	0.47

PENETRACION mm.		0.635	1.27	1.905	2.54	5.08	7.62	10.16	12.70	VALOR	
STANDARD kg/cm²					70	105	133	161	183	SOPORTE	
G56	LECTURA DIAL	2	3	4	7	12	16	18	21		
	CARGA TOTAL	33	42	67	117	200	258	300	350		
	Carga total 19,35 cm²	1.72	2.15	3.45	6.03	10.3	13.4	15.51	18.1		
	%STANDARD	2	2	3	9	10	10	10	10	9	10

Tabla 14.4. Ensayo de Valor Soporte Relativo sobre estabilizado Suelo-Arena-Asfalto Espumado [5]

G	Molde N°	Peso de M+S+A	Peso del Molde	Peso de S+A	Volumen del Molde	Densidad Húmeda	Humedad (b)	Densidad Seca (1)	Altura Probeta	LECTURAS				Hinch %
										1° Día	2° Día	3° Día	4° Día	
56	4	11963	7460	4503	2149	2.095	8.3	1.935	117	0.00	0.00	0.00	0.40	0.34

PENETRACION mm.		0.635	1.27	1.905	2.54	5.08	7.62	10.16	12.70	VALOR	
STANDARD KG/cm²					70	105	133	161	183	SOPORTE	
G56	LECTURA DIAL	3	6	8	10	18	25	31	34		
	CARGA TOTAL	50	100	133	167	300	417	517	567		
	Carga total 19,35 cm²	2.58	5.17	6.89	8.61	15.5	21.5	26.71	29.3		
	%STANDARD	3	5	7	12	15	16	17	16	12	15

Tabla 14.5. Ensayo de Valor Soporte Relativo sobre estabilizado Suelo-Arena-Emulsión [5]

G	Molde N°	Peso de M+S+A	Peso del Molde	Peso de S+A	Volumen del Molde	Densidad Húmeda	Humedad (b)	Densidad Seca (1)	Altura Probeta	LECTURAS				Hinch %
										1° Día	2° Día	3° Día	4° Día	
56	3	8769	4250	4519	2149	2.103	8.3	1.942	117	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

PENETRACION mm.		0.635	1.27	1.905	2.54	5.08	7.62	10.16	12.70	VALOR	
STANDARD KG/cm²					70	105	133	161	183	SOPORTE	
G56	LECTURA DIAL	38	65	156	198	298	380	421	435		
	CARGA TOTAL	90	154	370	469	706	901	998	1031		
	Carga total 19,35 cm²	4.65	7.96	19.11	24.25	36.5	46.5	51.56	53.3		
	%STANDARD	5	8	19	35	35	35	32	29	35	35

Ensayo de Resistencia a Compresión Simple, UCS (Norma VN-E33-67) [5]

El ensayo a compresión simple, se realiza con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último de un suelo cohesivo a la compresión no confinada. Esto se da mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación y utilizando una muestra de suelo inalterada tallada en forma de cilindro, generalmente con una

relación alto/diámetro igual a 2. Esta prueba tiene la ventaja de ser de fácil realización y de exigir equipo relativamente sencillo, en comparación con las pruebas triaxiales. En este trabajo el ensayo se realizará sobre probetas de suelo compactadas en el laboratorio.

El ensayo de Resistencia a la Compresión Simple, debe llevarse a cabo, siguiendo la normativa VN E33-67 del reglamento vigente de la Dirección Nacional de Vialidad Argentina. Se utilizan probetas con una relación de altura/diámetro de 2. El diámetro mayormente utilizado es 101.6 mm. La compactación de las probetas se realiza según la normativa VN E19-66, donde se utiliza un pistón de 4.5 kg, a una altura de caída de 30.5 cm, para un total de 5 capas y con 25 golpes por cada una.

La velocidad de descenso del cabezal superior debe mantenerse de modo que la presión aumente a razón de $1.4 \pm 0.7 \text{ kg/cm}^2$ por segundo, dependiendo de la resistencia de la probeta. Se debe tomar nota de la carga total en el momento de la rotura con la aproximación de 0.7 kg. (Dirección Nacional de Vialidad, 1998).

Se adjuntan a continuación todos los ensayos de Resistencia a la Compresión Simple que se desarrollaron en el Laboratorio Vial del IMAE (Tabla 14.6).

Tabla 14.6. Ensayo de RCS para todos los estabilizados [5]

Estabilizado	Suelo-Arena 168hs Amb.			Suelo-Arena-Emulsión 72hs Amb.			Suelo-Arena-Emulsión 168hs Amb.			Suelo-Arena-Emulsión Húmedo			Suelo-Arena-Emulsión 72hs 40°			Suelo-Arena-Asfalto Espumado 72hs 40°		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Probeta N°																		
Humedad de compactación	8.3	8.3	8.3	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	8.3	8.3	8.3
Densidad Húmeda (kN/m3)	19.07	18.83	18.74	19.80	19.63	19.58	19.98	19.65	19.76	19.87	19.85	19.84	20.40	20.08	19.98	20.51	20.56	20.08
Densidad ensayo (kN/m3)	18.37	18.37	18.37	19.14	19.10	18.96	19.11	18.86	18.90	19.85	19.83	19.80	19.21	18.86	18.90	20.04	20.04	20.04
Humedad durante el ensayo	0.038	0.025	0.020	0.049	0.055	0.050	0.037	0.041	0.037	0.082	0.082	0.081	0.021	0.018	0.026	0.025	0.026	0.020
Lectura	36	29	39	33	45	45	50	52	55	20	20	17	60	64	61	60	65	65
Factor del ARO	16.13	16.13	16.13	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	6.83	6.83	6.83	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67	16.67
Carga rotura a 7 días (kg)	581	468	629	542	750	750	834	867	917	137	137	116	1 000	1 067	1 017	1 000	1 084	1 084
Diámetro Probeta (cm.)	10.15	10.10	10.13	10.18	10.18	10.16	10.18	10.17	10.20	10.19	10.18	10.15	10.19	10.23	10.20	10.16	10.15	10.12
Altura Probeta (cm.)	11.71	11.76	11.65	11.71	11.58	11.58	11.69	11.62	11.74	11.67	11.62	11.75	11.66	11.64	11.70	11.50	11.50	11.54
Relación Diámetro/Altura	1.15	1.16	1.15	1.15	1.14	1.14	1.15	1.14	1.15	1.15	1.14	1.16	1.14	1.14	1.15	1.13	1.13	1.14
Superficie (cm2)	80.91	80.12	80.60	81.39	81.39	81.07	81.39	81.23	81.71	81.55	81.39	80.91	81.55	82.19	81.71	81.07	80.91	80.44
Presión de rotura (kPa)	720	580	780	670	920	930	1020	1070	1120	170	170	140	1230	1300	1240	1230	1340	1350
Corrección por relación altura/diám.	0.910	0.910	0.910	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940
Presión de rotura corregida (kPa)	650	530	710	630	870	870	960	1000	1050	160	160	130	1150	1220	1170	1160	1260	1270
Promedio (kPa)	631.5			787.3			1006.8			150.0			1180.9			1228.2		

Ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta por Compresión Diametral, ITS (Norma VN-E9-86) [5]

El ensayo de resistencia a tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que soporta una mezcla antes de romper.

Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura.

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

La probeta es cargada a compresión según un plano diametral vertical de la misma. Para poder cargar la probeta de este modo, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Como parte de este dispositivo, y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, existen dos elementos encargados de evitar la rotura local de la probeta durante el ensayo.

Se utilizan unas placas de apoyo, con radio de curvatura igual al radio nominal de la probeta, para que la distribución de tensiones no se altere significativamente y para que los cálculos del módulo de elasticidad y la relación de Poisson se faciliten manteniendo constante el ancho de carga, en lugar de tener un ancho de carga variable durante el ensayo, lo que ocurriría con una placa de carga plana.

Se adjuntan a continuación los ensayos de Resistencia a la Tracción Indirecta que se llevaron a cabo en el Laboratorio Vial del IMAE (Tabla 14.7).

Tabla 14.7. Ensayo de ITS para todos los estabilizados [5]

Estabilizado	Suelo-Arena-Emulsión 72hs Amb.			Suelo-Arena-Emulsión 168hs Amb.			Suelo-Arena-Emulsión 72hs 40°C			Suelo-Arena-Emulsión Húmedo			Suelo-Arena 168hs Amb.			Suelo-Arena-Asfalto Espumado 72hs 40°C		
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Probeta N°																		
Peso (kg)	0.955	1.001	0.922	0.950	0.969	0.899	0.901	0.895	0.902	1.001	1.003	0.994	1.001	1.003	0.994	1.001	1.003	0.994
Humedad durante ensayo	0.051	0.051	0.051	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.039	0.082	0.082	0.082	0.033	0.033	0.033	0.019	0.019	0.019
Altura Probeta (cm)	5.90	5.70	5.54	5.73	6.08	5.86	5.65	6.07	5.80	5.70	5.80	6.00	5.75	5.85	6.10	5.60	5.40	6.30
Diámetro Probeta (cm.)	10.20	10.20	10.20	10.30	10.29	10.38	10.20	10.18	10.23	10.20	10.20	10.20	10.20	10.23	10.12	10.10	10.13	10.11
Máxima Deformación	1.02	1.02	1.03	1.16	1.27	1.19	1.40	1.31	1.26	1.01	1.01	1.02	0.98	0.95	0.85	1.31	1.48	1.83
Máxima Carga	130.00	133.00	135.00	167.00	191.00	189.00	215.00	194.00	203.00	29.00	25.00	22.00	80.00	72.00	63.00	229.00	204.00	187.00
ITS (kPa)	137.52	145.63	152.09	180.14	194.35	197.81	237.50	199.87	217.81	31.75	26.90	22.89	86.84	76.59	64.97	257.75	237.41	186.91
Promedio (kPa)	145.08			190.77			218.39			27.18			76.13			227.36		

Ensayo de Compresión Triaxial o Ensayo Triaxial Estático, STT (Norma IRAM 10529) [23].

La prueba de ensayo triaxial es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de la resistencia al corte.

En un ensayo triaxial, un espécimen cilíndrico de suelo es revestido con una membrana de látex dentro de una cámara a presión. La parte superior e inferior de la muestra tiene discos porosos, los cuales se conectan al sistema de drenaje para saturar o drenar el espécimen. En estas pruebas se pueden variar las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales sobre el espécimen de suelo, efectuando mediciones sobre sus características mecánicas en forma completa. Los especímenes usualmente están sujetos a presiones laterales de un líquido, generalmente agua.

El agua de la cámara puede adquirir cualquier presión deseada por la acción de un compresor comunicado con ella. La carga axial se transmite al espécimen por medio de un vástago que atraviesa la parte superior de la cámara.

La presión que se ejerce con el agua que llena la cámara es hidrostática y produce por lo tanto, esfuerzos principales sobre el espécimen, iguales en todas las direcciones, tanto lateral como axialmente. En las bases del espécimen actuará además de la presión del agua, el efecto transmitido por el vástago de la cámara desde el exterior.

Es usual llamar σ_1 , σ_2 y σ_3 a los esfuerzos principales mayor, intermedio y mínimo, respectivamente. En una prueba de compresión, la presión axial siempre es el esfuerzo principal mayor, σ_1 ; los esfuerzos intermedios y menor son iguales ($\sigma_2 = \sigma_3$) y son iguales a la presión lateral.

Se adjunta a continuación todos los ensayos triaxiales realizados en el Laboratorio Vial del IMAE, graficando los valores del tensor desviador versus la deformación unitaria de cada probeta (Figuras 14.3, 14.4, 14.5, 14.6, 14.7 y 14.8).

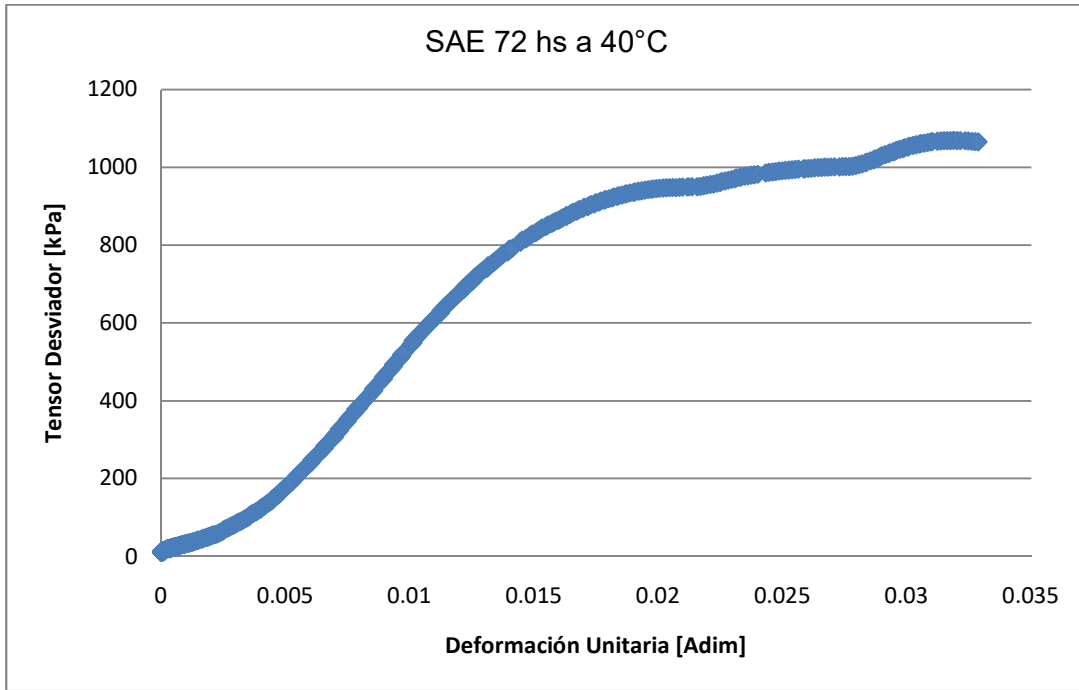


Figura 14.3. STT sobre SAE curado a 40°C durante 72hs [5]

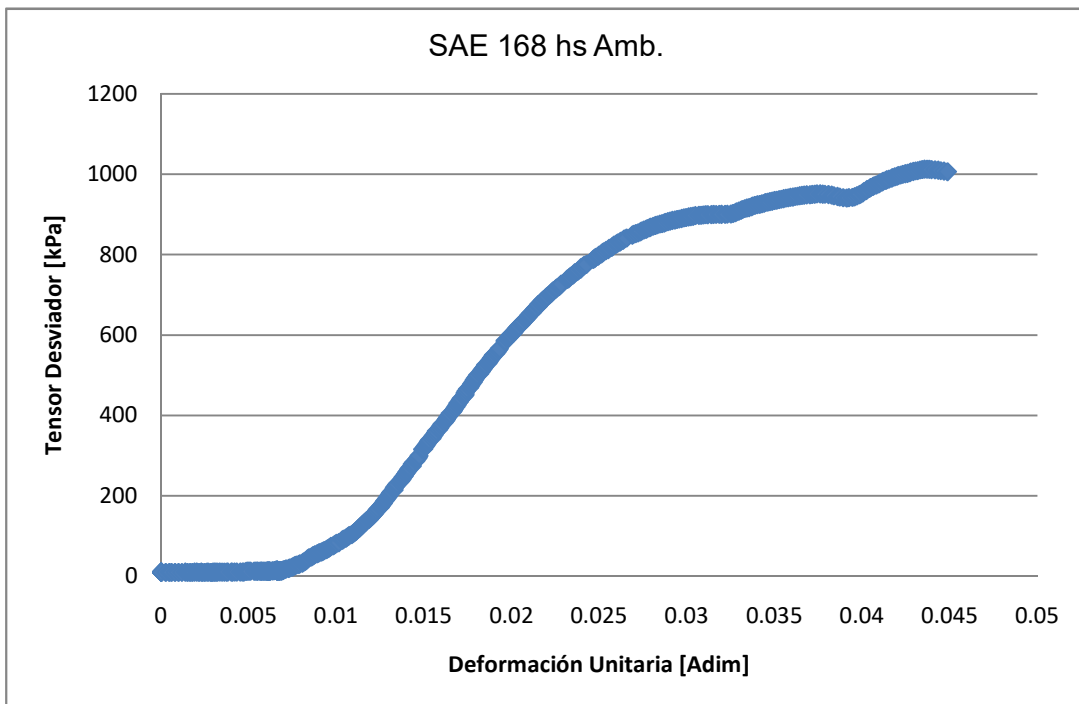


Figura 14.4. STT sobre SAE curado a temperatura ambiente durante 168 hs [5]

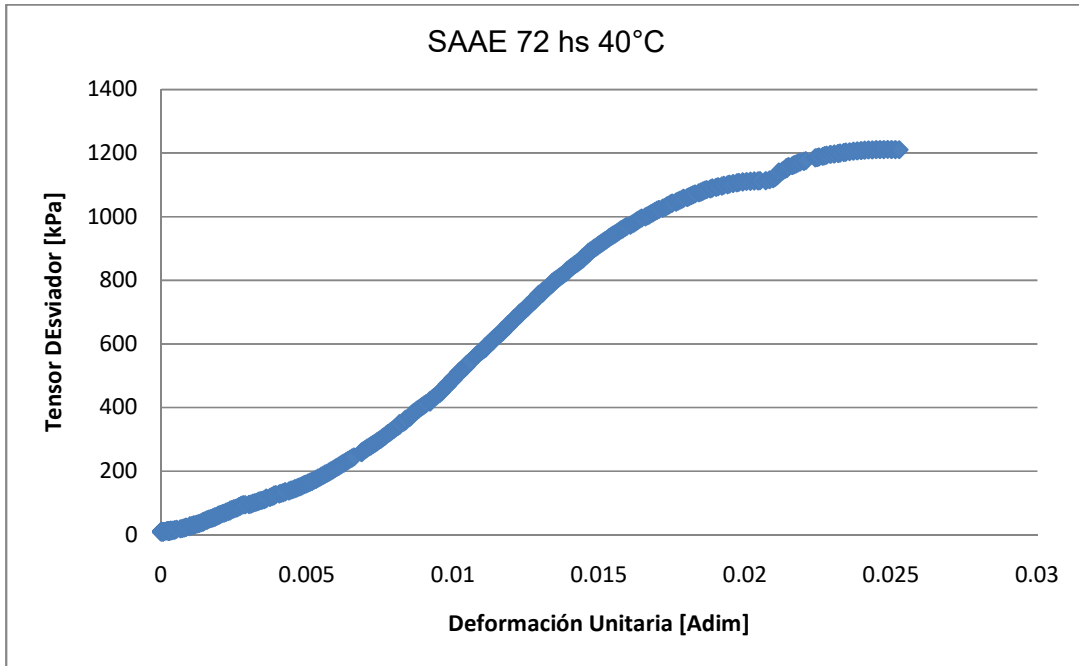


Figura 14.5. STT sobre SAAE curado a 40°C durante 72 hs [5]

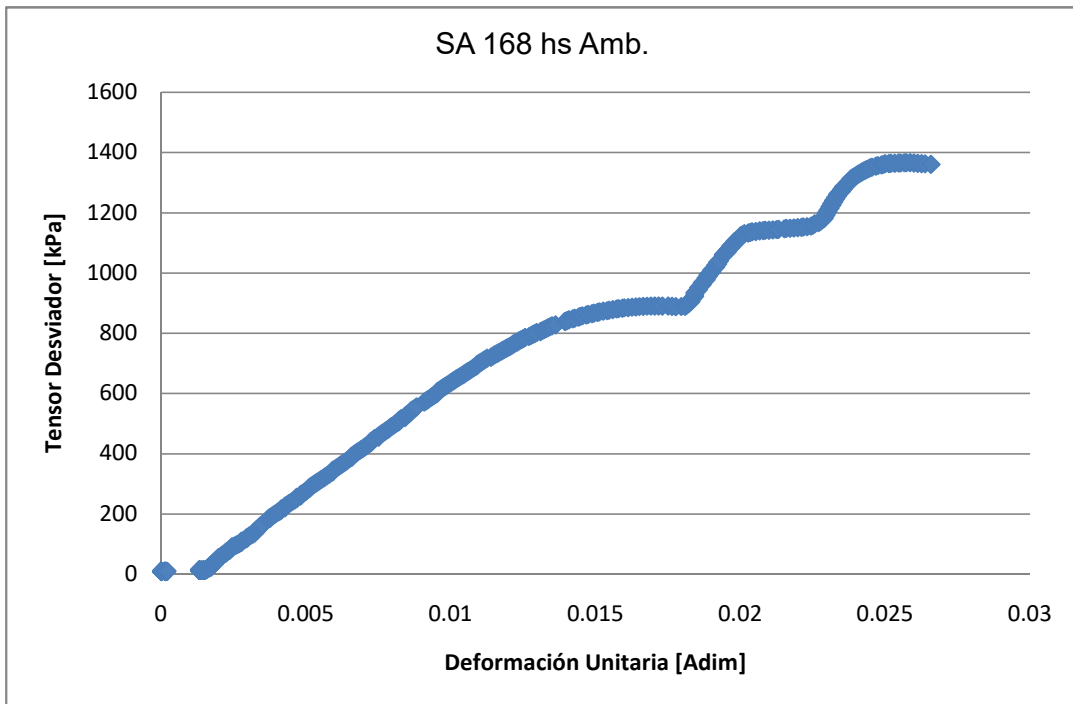


Figura 14.6. STT sobre SA curado a temperatura ambiente durante 168 hs [5]

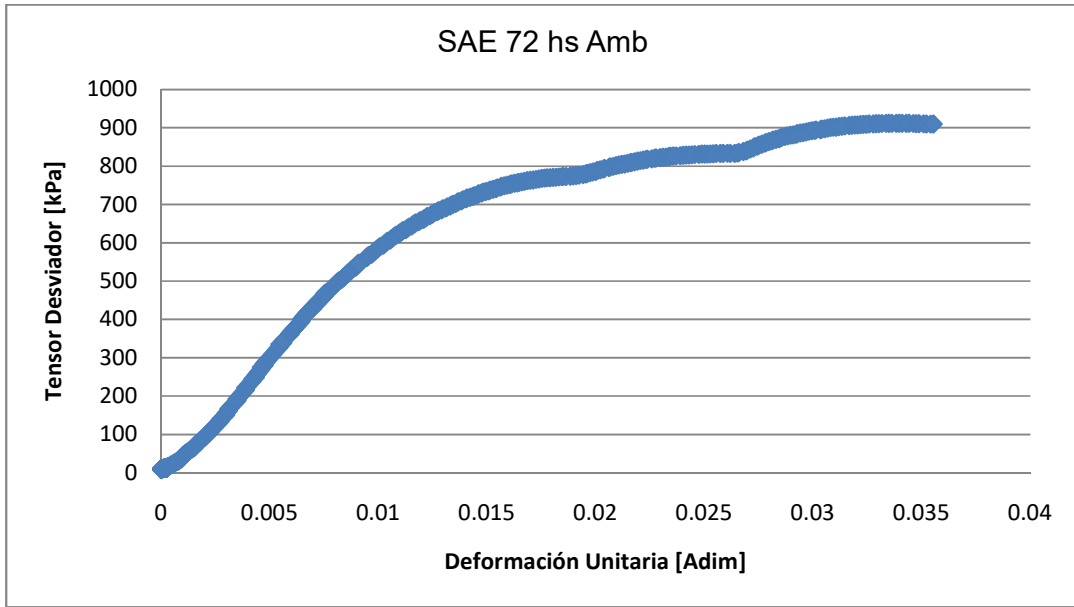


Figura 14.7. STT sobre SAE curado a temperatura ambiente durante 72 hs [5]

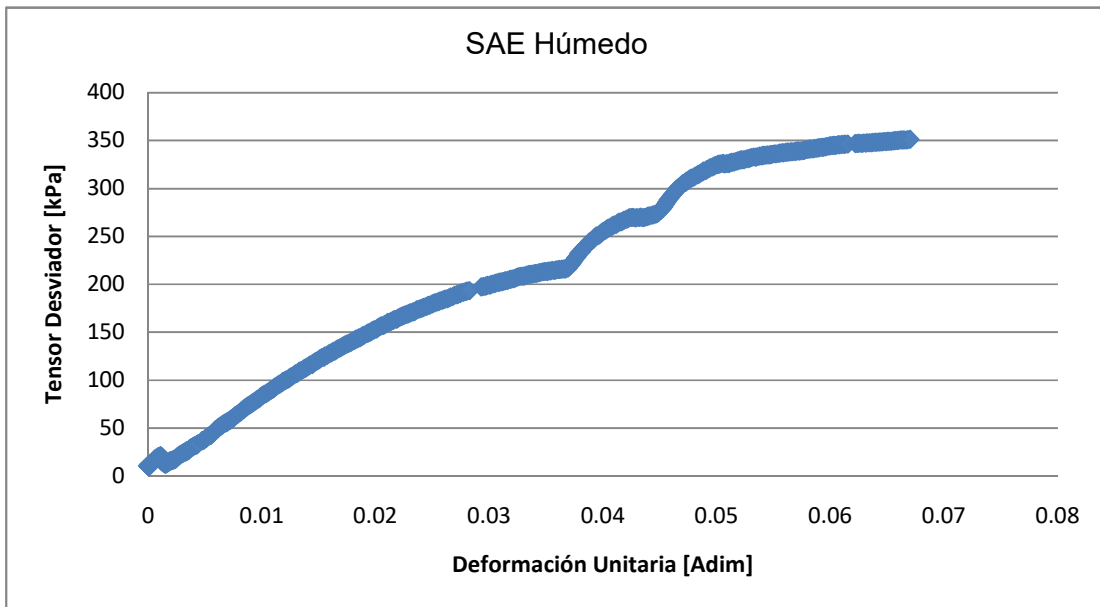


Figura 14.8. STT sobre SAE curado en cámara húmeda durante 24 hs [5]