

XII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA

INVESTIGACIÓN DE TÉCNICAS DE UTILIZACIÓN DE MATERIALES ALTERNATIVOS PARA OBRAS DE PAVIMENTOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO EN URUGUAY. CASO DE ESTUDIO: ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO DE MATERIALES BASÁLTICOS

Leonardo Behak¹

Resumen: Se presenta un estudio de estabilización con cemento de materiales basálticos del Noroeste del Uruguay. El objetivo es mejorar su capacidad soporte como materiales de bases de pavimentos de bajo volumen de tránsito. Se define la nomenclatura utilizada en Uruguay para identificar los diferentes niveles de alteración de suelos residuales. La investigación se basa en ensayos de compresión inconfiada y en un análisis de factibilidad de uso de la estabilización con cemento en función de la evolución de la capacidad soporte respecto a pavimentos de uso tradicional. Los resultados verifican la posibilidad de utilizar la técnica en pavimentos económicos, en la medida que se apliquen métodos racionales de estudio y diseño. Se comprueba la necesidad de profundizar en el conocimiento respecto a los parámetros resilientes, dada la baja confiabilidad de las correlaciones obtenidas para otras regiones del planeta.

Abstract: The study about cement stabilisation of basaltic materials from the Norwest of Uruguay is presented. The object is to improve it the bearing capacity as base materials of low-volume transit pavement. The nomenclature used in Uruguay to define the different alteration levels of residual soils is defined. The investigation is based in the unconfined compression tests also in the factibility analysis of the cement stabilisation use in function to the bearing capacity evolution in relation to the pavements used traditionally. The results verify the possibility to use this technique in low-volume pavements, according to the rational methods of study and design applied. The need to improve the knowledge in respect to the resilient parameters is proved, since the low reliability of the correlations obtained in other planet regions.

Palabras claves: Estabilización, cemento, pavimentos

INTRODUCCIÓN

El estudio de técnicas adecuadas para el aprovechamiento de materiales locales en obras de pavimentos de bajo volumen de tránsito es una necesidad fundamental para países que, como Uruguay, realizan fuertes inversiones en el mejoramiento y mantenimiento de la red vial existente, la más extensa de Sudamérica con relación a su territorio. Sin embargo, esta necesidad no había sido acompañada hasta épocas recientes, con programas de investigación sistemáticas. La mayoría surgía de iniciativas individuales que trataban sobre temáticas puntuales, no pasando de una etapa de preinvestigación o basadas en métodos de prueba y error básicos sobre pavimentos reales, quedando en general inconclusas y con pocos registros escritos.

Un paso importante fue la concreción de convenios entre la Facultad de Ingeniería y la Dirección Nacional de Vialidad en la década de los 90, particularmente vinculados a las problemáticas planteadas por los materiales basálticos en obras de pavimentación. Siendo los materiales fracturados (nivel diaclasado de las rocas) los tradicionalmente utilizados, con sus problemáticas propias, interesaba investigar las posibilidades de utilización de los materiales basálticos de los niveles más alterados. Particularmente los materiales del desagregado (horizonte C) de relativo bajo poder soporte para capas de base natural, presentaban la potencialidad de uso mediante su mejoramiento con técnicas de estabilización con cemento. La oportunidad de encarar este tipo de solución estaba dada por ser el cemento un producto enteramente nacional, pudiéndose alcanzar buenos materiales a costos relativamente bajos.

Se encaró una investigación relativa a la caracterización del desagregado basáltico como material para capas de base y sub-base de pavimentos económicos y a la medición de la evolución del poder soporte mediante su estabilización con cemento, desarrollada en una primera etapa a nivel de laboratorio. El desarrollo metodológico y los resultados del programa de investigación son los que se resumen en el presente trabajo.

¹ Ingeniero Civil, Asistente del Departamento de Geotécnica del Instituto de Estructuras y Transporte "Prof. Julio Ricaldoni", Facultad de Ingeniería, Universidad de la República Oriental del Uruguay

DEFINICIÓN DE LAS CAPAS DE ALTERACIÓN DE SUELOS RESIDUALES UTILIZADAS EN URUGUAY

Los suelos residuales conforman un perfil de alteración, entendido como la secuencia de distintas capas originarias de una misma roca matriz, que sobreyacen a ésta y que se diferencian entre sí por el grado de meteorización presente en cada una de ellas. Cada capa u horizonte así definido presentará características geotécnicas diferentes, aspecto de singular importancia cuando se trata de las obras viales, sobretudo para la selección y utilización de los materiales que conformarán las distintas capas del pavimento.

La definición de los niveles de alteración existentes en un perfil de subsuelo es una cuestión aun no del todo resuelta, siendo el criterio más comúnmente utilizado el propuesto por Deere y Patton (1971, [1]), basado en criterios pedológicos y que distingue tres horizontes.

Muchos autores han intentado ajustar este criterio a las características geotécnicas de los materiales de cada nivel, en el entendido que la definición de Deere y Patton (op. cit.) no se ajusta totalmente a las necesidades ingenieriles. Entre ellos cabe destacar el debido a Lambe (1991, [2]) quien propone tres zonas para dividir el perfil de un suelo residual. Más próximo, Pastore (1995, [3]) propone una estandarización de terminología para descripción de perfiles de alteración de suelos tropicales.

En Uruguay se conoce un intento de caracterización de perfiles de alteración debido a Goso y Nahoum (1990, [4]), definida en principio para el caso de la Formación Arapey, aunque extensible a otros tipos de suelos residuales. Goso y Nahoum establecen cinco horizontes que se diferencian, fundamentalmente, por el grado de alteración alcanzada y que se definen como sigue:

- Orgánico – Suelo con alto grado de alteración y rico en materia orgánica; correspondiente con el horizonte A.
- Descompuesto – Nivel algo a muy alterado, en el que se han verificado procesos importantes de meteorización química, enriquecido por finos arcillosos que migran desde el horizonte superior. Se corresponde con el horizonte B.
- Desagregado – Nivel donde los materiales se presentan algo alterados y a veces fracturados pero sin haber sufrido procesos de meteorización química significativos. Se podría asimilar al horizonte C.
- Fracturado – Nivel en el que la roca a sufrido procesos incipientes de meteorización física. La resistencia mecánica dependerá en mucho de los planos de debilidad.
- Roca Sana – Nivel de roca que no ha sufrido ningún tipo de meteorización.

El nivel de alteración que importa a este trabajo es el definido como desagregado. Para el caso particular de la Formación Arapey² este nivel corresponde a un basalto algo alterado. Su potencia es variable, no superando el metro para el caso de matriz basáltica vacuolar y llegando a los 3,50 – 4,00 m para matriz de grano medio a grueso. Puede tener escasa a nula presencia en aquellas zonas donde la roca originaria presenta un tamaño de grano fino. Su granulometría es, en general, media a fina, pudiendo presentar fracciones grava fina. Las fracciones finas, son fundamentalmente limosas. El poder soporte es bajo a medio.

Estos materiales podrían conformar subrasantes de mediana a buena calidad. El mayor interés de estudio radicaba en su potencial utilización como material de sub-base y de base de pavimentos de bajo volumen de tránsito. Dependiendo del poder soporte y de la plasticidad podrían ser buenos granulares para las diferentes capa de pavimento; si bien la poca práctica de su uso ha dado resultados relativamente buenos, se carecía de estudios sistemáticos como para afirmar algo sobre su aptitud como material de pavimentos. Este era un objetivo de estudio, además de analizar la evolución del poder soporte mediante la estabilización con cemento. Se establecía como hipótesis de trabajo que los costos de estabilizado podrían llegar al orden de los correspondientes al necesario destape de cantera, para alcanzar materiales de mejor calidad como los fracturados o los sanos o a los costos de transporte de éstos hasta el lugar de colocación.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo general de la investigación era caracterizar los basaltos desagregados desde el punto de vista geotécnico vial con el fin de establecer su calidad como material de sub-base y base de pavimentos de bajo volumen de tránsito. Un objetivo particular era estudiar la evolución de estos parámetros, en especial el poder soporte, al estabilizarlos con cemento portland, con vistas a su utilización como granulares mejorados de sub-base o base.

Hacia la frontera con el fracturado, es posible observar que el desagregado presenta una cohesión aparente tal que los mismos mantienen la forma de clastos. Una vez que se actúa mecánicamente sobre estos clastos y se supera la resistencia debida a la cohesión se produce su “arenización”. Lo mismo sucede cuando los clastos se dejan a la intemperie y se produce el secado, perdiéndose la cohesión aparente. Como resultado, el comportamiento mecánico del material será diferente antes, durante y después del proceso de “arenización”. Lo que interesaba, era poder determinar las condiciones finales del material ya colocado y compactado en el terraplén, así como su posterior evolución una vez liberado a la acción del tránsito y de los agentes meteorizantes.

Por lo tanto, se buscaba evaluar los parámetros geotécnicos en las condiciones finales para establecer efectivamente la aptitud del material para las diferentes capas del pavimento. Esto implicaba realizar ensayos de caracterización reproduciendo lo mejor posible estas condiciones finales, tanto en estado natural como estabilizado.

² Formación geológica de origen basáltico que ocupa la porción noroeste del Uruguay (cuarta parte del territorio nacional) y que conforma una unidad con el basamento basáltico que se extiende en gran parte del sur del Brasil.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Dada la gran extensión de la Formación Arapey, importaba seleccionar en una primera etapa la cantera de estudio. Ello implicó la recorrida de un tramo de 63 km en una de las regiones que más probabilidad de ocurrencia de niveles desagregados basálticos tenía. En él se ejecutaron cateos con pala americana convenientemente distribuidos y se realizaron auscultaciones en los frentes de canteras existentes; con el correspondiente muestreo.

En laboratorio se realizó la caracterización primaria mediante ensayos para la determinación de la composición granulométrica (Norma AASHTO T88-86, [5]) y de los Límites de Atterberg (Norma AASHTO T89-86 y Norma AASHTO T90-86); complementándose la información con la clasificación (Norma AASHTO M145-82; Norma ASTM D2487-85, [6]).

Como resultado de esta etapa, se definió como punto de muestreo particular al estudio a la Cantera Yucutujá. Esta Cantera se ubica en la región noroeste del Uruguay, cerca de la frontera con Brasil, sobre la Ruta Nacional 30 y en las proximidades del arroyo Yucutujá.

Sobre muestras extraídas de la misma se ejecutaron los ensayos de determinación del poder soporte de los desagregados basálticos, en particular estabilizados con cemento. Para ello se ejecutaron ensayos de Compresión Axial Inconfinada (Norma AASHTO T208-70 (1984)) sobre probetas compactadas a diferentes pesos específicos y a humedad óptima del ensayo Proctor Modificado para mezclas de suelo-cemento (Norma AASHTO T134-76) y para diferentes contenidos de cemento, incluyéndose para comparación la situación natural. Se establecieron las leyes de evolución de la resistencia última inconfinada en función del peso específico, base para la determinación de aquél parámetro para cualquier otra condición de compactación. La Foto 1 muestra el equipo utilizado en la investigación.



Foto 1. Triaxial utilizado en la investigación para la ejecución de ensayos de compresión axial inconfinada

La utilización del ensayo de compresión inconfinada para la determinación de parámetros de diseño de pavimentos no contaba con antecedentes en Uruguay. En este campo el CBR es el valor de uso por excelencia en la práctica vial nacional y el ensayo correspondiente es el empleado para todos los casos, inclusive para la utilización de materiales estabilizados; aun a nivel de investigación. En este último sentido cabe mencionar la experiencia desarrollada por Rodríguez et al. (1990, [7]) vinculada a estudios de estabilización con cal de suelos arcillosos para su utilización como materiales de pavimentos económicos y donde el ensayo utilizado para la medición del poder soporte fue el del CBR. Así, la aplicación del ensayo de compresión inconfinada resultaba una experiencia novedosa para el país, constituyéndose de esta forma en un objetivo particular de adecuación a la experiencia internacional. Esta situación obligaba a estudiar las normativas de ensayo existentes y a la adaptación de las mismas al equipamiento existente en nuestro país.

La disponibilidad de prensas de carga de pequeño porte obligó al uso de probetas de 3,81 cm de diámetro y 7,65 cm de altura; bastante menores a las exigidas por la normativa adoptada (del orden de 15 cm de diámetro). Sin embargo dadas las características granulométricas del suelo en estudio (básicamente arenoso) la utilización de probetas de pequeñas dimensiones no afectaría los resultados del ensayo por respetarse las condiciones de escala.

Con los datos de resistencia última inconfinada, se evaluó el Número de ejes equivalentes que podrían soportar al cabo de su vida útil los pavimentos construidos con bases de desagregado basáltico estabilizado con cemento. La factibilidad de uso de este tipo de pavimentos se estableció a partir de un estudio comparativo de costos entre esta solución alternativa y otras soluciones más tradicionales para la región.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Los ensayos de caracterización efectuados sobre las muestras del desagregado basáltico permiten definirlos como gravas o arenas, con un contenido de finos (pasa tamiz #200) menor al 10%, siendo prácticamente no plásticos (NP). Este resultado se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización primaria de muestras del desagregado basáltico de la Formación Arapey

Cateo	Muestra	Resultados de Laboratorio									
		Granulometría					Límites de Atterberg			Clasificación	
		# 4	# 10	# 40	# 200	2 μ m	Wl	Wp	IP	SUCS	AASHTO
BAS3	B	67,5	34,4	20,9	11,1	0,8	X	X	0	SP-SM	A-1-a (0)
	C	31,1	16,5	8,5	3,5	0,3	X	X	0	GW	A-1-a (0)
BAS4*	B	55,7	37,8	21,7	7,4	0,2	X	X	0	SW-SM	A-1-a (0)
BAS6	B	49,5	30,9	23,2	11,7	0,4	29	25	4	GP-GM	A-1-a (0)

*Muestra extraída de la Cantera Yucutujá

La Tabla 2 muestra los resultados de los ensayos Proctor modificado, realizados para determinar las condiciones de compactación (peso específico seco máximo y humedad óptima) para cada porcentaje de cemento adoptado. El ensayo se ejecutó también para la condición natural del desagregado con el fin de verificar la evolución de los parámetros de compactación entre esta situación y la correspondiente a las estabilizaciones.

Tabla 2. Resultados de la compactación Proctor modificado de muestras del desagregado basáltico de la Cantera Yucutujá para diferentes contenidos de cemento

Cemento (% en peso)	Peso Específico Seco Máximo (kN/m^3)	Humedad Óptima (%)
0	20,1	12,0
2	19,9	10,5
5	19,7	11,0
10	19,7	13,5
15	19,7	12,5

Puede observarse que el peso específico seco máximo prácticamente no sufre variación al estabilizarse el material con diferentes porcentajes de cemento. Algo similar sucede para la humedad óptima de compactación, debiéndose la dispersión más al error propio del ensayo que a razones físicas. Estos resultados parecerían afortunados, ya que bastaría con un ensayo de compactación Proctor para una muestra estabilizada en cualquier condición para determinar con gran exactitud los parámetros de compactación. Sin embargo esta afirmación debería ser verificada con un mayor número de ensayos.

El remoldeo de las muestras para ser ensayadas a la compresión inconfínada se realizó mediante utilización del molde y el compactador manual Mini-Harvard. Para cada contenido de cemento, se moldearon entre tres y cuatro probetas compactadas cada una a diferentes pesos específicos y a la humedad óptima del Proctor. Las probetas una vez compactadas se dejaron curar durante 7 días. Las probetas se ensayaron hasta alcanzar la resistencia residual, si bien se tomó como resultado final el de la resistencia pico. La Figura 1 muestra la evolución de la resistencia última inconfínada en función del peso específico seco de compactación para diferentes contenidos de cemento.

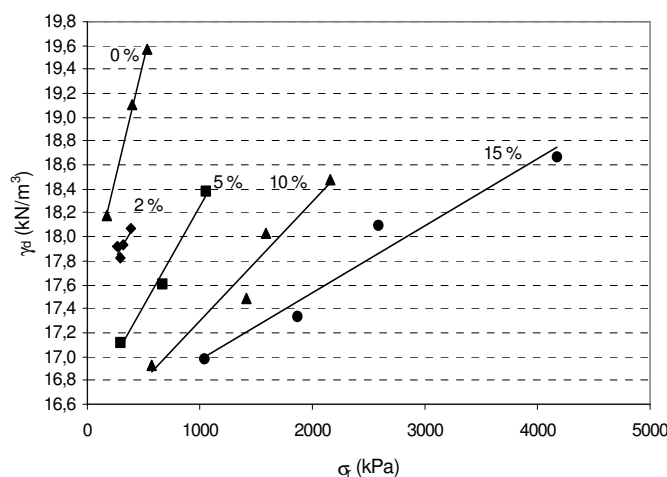


Figura 1. Resistencia última inconfínada en función del peso específico seco de muestras del desagregado de la Cantera Yucutujá estabilizadas con diferentes contenidos de cemento. 7 días de Curado

De ella se observa una buena correlación lineal entre la resistencia última y el peso específico seco para todas las condiciones de estabilización. Aun así, para el caso del estabilizado con un 2% de cemento la correlación fue relativamente baja debido a las dificultades de alcanzar una muestra homogénea durante el mezclado. El resultado no hace más que afirmar la idea de lo poco recomendable que sería realizar mezclas estabilizadas con bajo contenido de cemento, habida las dificultades de conseguir mezclados homogéneos en campo, más allá que desde el punto de vista técnico los mismos mejoren el comportamiento mecánico del material original. La dosificación de proyecto requeriría de ajustes respecto de los valores que proporcionan los ensayos de laboratorio. Estas correcciones sólo pueden tenerse en la medida que se pruebe la performance de pavimentos ejecutados con las soluciones alternativas como las aquí expuestas.

La Figura 2 presenta la evolución de la resistencia última en función del contenido de cemento agregado para diferentes grados de compactación usuales en la práctica vial uruguaya. Se observa en ella una dispersión respecto de la linealidad en el entorno de los valores del 2% debida a la aplicación de la correlación obtenida para el caso. Puede afirmarse que hasta un 15% de cemento la evolución de la resistencia aumenta linealmente con el contenido de cemento y que continuaría aumentado para mayores dosajes. Es de esperar que a partir de un valor de cemento dado la tendencia al aumento se estabilice, llegándose así a un porcentaje óptimo de mayor rendimiento. Sin embargo, agregar un 15% de cemento a un suelo, sobretodo tratándose de una base para pavimento económico, ya de por sí es un valor muy elevado y prácticamente antieconómico, razón por la cual se optó por limitar el estudio a este valor máximo.

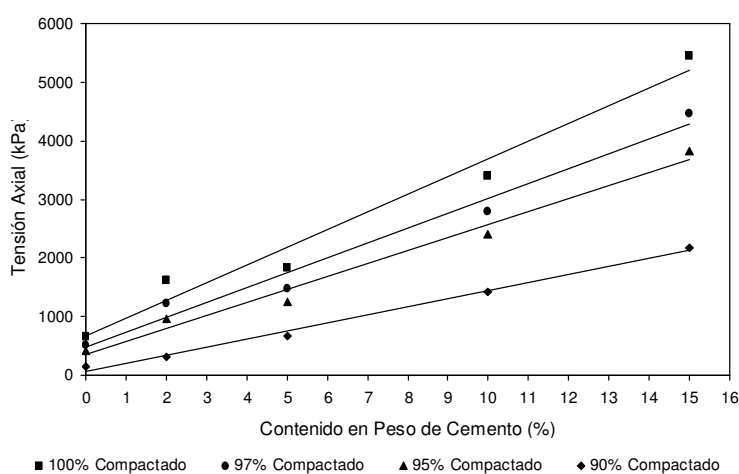


Figura 2. Variación de la Resistencia última con el contenido de cemento del desagregado basáltico de la Cantera Yucutujá para diferentes grados de compactación

EFFECTO DEL USO DE BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO EN EL PODER SOPORTE DE PAVIMENTOS ECONÓMICOS

Para evaluar la conveniencia del empleo de bases de desagregado basáltico estabilizados con cemento en pavimentos de bajo volumen de tránsito, se realizó una discusión sobre el efecto que produciría sobre el poder soporte de un pavimento hipotético la evolución de la resistencia última en función del contenido de cemento. Para ello se determinó el número de ejes equivalentes de 18 kips (W_{18}) para diversas alternativas de pavimentos, utilizando para los cálculos el Método AASHTO 93 (AASHTO, 1993, [8]). Se consideró un paquete estructural básico conformado por:

- Capa de rodadura: tratamiento superficial bituminoso.
- Capa de base: Desagregado basáltico de la Cantera Yucutujá estabilizado con 2%, 5%, 10% y 15% de cemento, compactado al 97% del peso específico seco máximo del Proctor modificado y de espesor variable.
- Capa de Sub-base: Desagregado basáltico natural de la Cantera Yucutujá, compactado al 95% del peso específico seco máximo del Proctor modificado ($CBR = 33\%$) y de espesor variable.
- Subrasante: Descompuesto basáltico de la Cantera Yucutujá, compactado al 90% del peso específico seco máximo del Proctor modificado ($M_R = 7500$ psi).

Para la determinación del Número Estructural (SN) se utilizaron las correlaciones obtenidas en el Estado de Illinois entre la Resistencia última a la compresión inconfiada y el CBR con el módulo resiliente para las capas de base cementada y las capas de sub-base granular respectivamente. Estas correlaciones no tienen porqué corresponderse con los materiales en estudio pero por carecerse de correlaciones locales del tipo, se trabajó con ellas más allá que su uso introdujera una incertidumbre en las conclusiones ha extraerse.

Tomando en cuenta estas consideraciones se procedió al cálculo del Número de ejes Equivalentes de 18 kips en función de los contenidos de cemento y, dentro de cada uno de ellos, en función de los espesores de las capas de base y sub-base. La Figura 3 muestra los resultados de los cálculos del número de ejes equivalentes (W_{18}) para cada contenido de cemento y para el desagregado natural, en función del espesor total de pavimento. De la misma se observa que no

hay aumento significativo de W_{18} con estabilizados de hasta un 2%, lo que se expresa en que la curva correspondiente coinciden plenamente con la de base natural (0%). De ahí en más la estabilización produce un aumento de W_{18} , siendo poco significativo hasta estabilizaciones con 5% y prácticamente despreciable hasta paquetes estructurales de 50 cm. Para estabilizaciones de un 10% el aumento de W_{18} comienza a ser algo significativo para superestructuras mayores a 50 cm y para estabilizaciones de un 15% el aumento de W_{18} comienza a ser significativo para superestructuras mayores a 40 cm, siendo muy significativo a partir de paquetes de 50 cm.

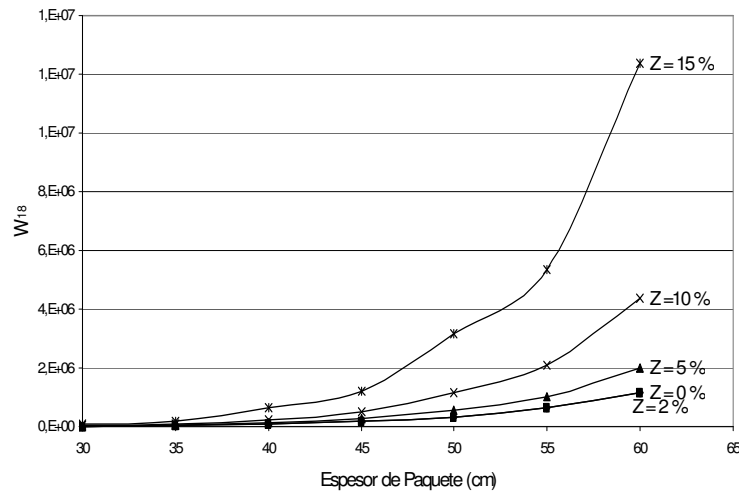


Figura 3. Relación de W_{18} con los espesores totales de pavimentos con bases de desagregados basálticos de la Cantera Yucutujá estabilizadas con diferentes contenidos de cemento

La solución con base estabilizada presentaría mejoras significativas en el W_{18} respecto a la solución con base natural cuando se utilizan contenidos de cemento mayores al 10% y cuando se requieran pavimentos mayores que 40 cm. Parece llamativo que la capacidad soporte del desagregado estabilizado hasta con un 2% de cemento no aumente respecto al desagregado natural siendo que la resistencia última inconfiada de aquél es prácticamente el doble que esta última. Aquí podría estar incidiendo la adopción de correlaciones entre la resistencia última y el módulo resiliente no verificadas para el material en estudio. Esta incertidumbre afirma la necesidad de desarrollar estudios que permitan determinar correlaciones para los suelos locales, si se quiere afinar respecto al uso de materiales hoy descartados por la práctica nacional y que podrían emplearse en la medida que se utilicen métodos racionales de diseño de pavimentos.

Posteriormente se realizó el estudio comparativo entre pavimentos con bases de desagregado estabilizadas con cemento y los tradicionalmente realizados en la región, conformados por bases y sub-bases de fracturado basáltico. Se consideró el mismo pavimento con base estabilizada utilizado anteriormente, mientras que el pavimento tradicional se supuso conformado supuesto así:

- Capa de rodadura: tratamiento superficial bituminoso.
- Capa de base: Fracturado basáltico (CBR = 80%) de espesor variable.
- Capa de Sub-base: Fracturado basáltico (CBR = 60%) de espesor variable.
- Subrasante: Descompuesto basáltico de la Cantera Yucutujá, compactado al 90% del peso específico seco máximo del Proctor modificado ($M_R = 7500$ psi).

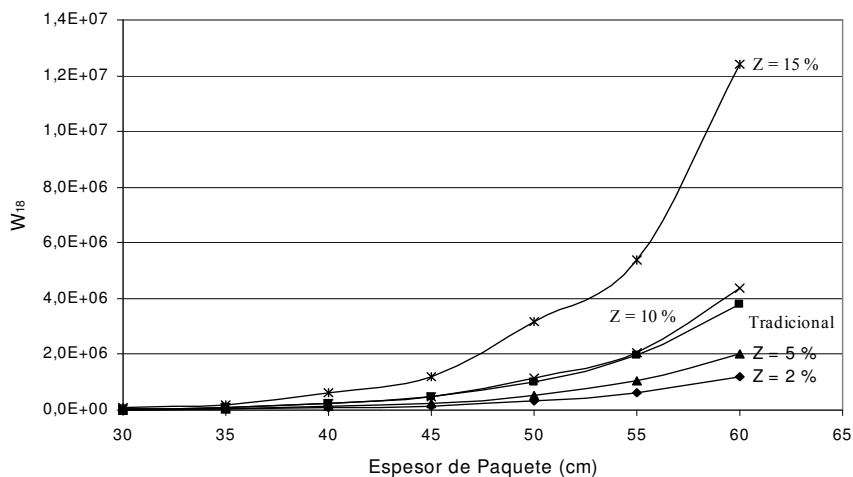


Figura 4. Relación de W_{18} para espesores totales de pavimentos con bases de desagregado basáltico de la Cantera Yucutujá estabilizados con diferentes contenidos de cemento y de pavimentos tradicionales

La Figura 4 presenta la evolución de W_{18} en función de los espesores totales de pavimento para la solución tradicional y para las soluciones con bases estabilizadas con cemento. La solución tradicional admite un mayor W_{18} que las soluciones con bases estabilizadas con hasta 10% de cemento. El W_{18} para bases estabilizadas con 15% de cemento es significativamente mayor que el de los pavimentos tradicionales, a partir de espesores totales de pavimentos de 40 cm. En este caso los costos iniciales serían muy elevados en la solución estabilizada, invalidándola de por sí.

El análisis se completó con una evaluación comparativa de costos implicados en cada solución de pavimento, que no se incluye por entenderse que excede los alcances propuestos en este trabajo. Sólo se mencionará que de dicho estudio puede concluirse que, fundamentalmente en función de los costos de transporte de los materiales desde la cantera hasta el lugar de colocación, las alternativas que implican la colocación de bases estabilizadas con cemento podrían llegar a ser más ventajosas respecto a los pavimentos tradicionales usados en la región de estudio cuando los desagregados basálticos se encuentran en un entorno próximo a la obra. Considerando las dificultades técnicas de construir bases estabilizadas con un 2% de cemento, debería profundizarse la investigación (a nivel de campo) para determinar con mayor precisión los valores mínimos prácticos posibles de cemento que podrán agregarse al material de modo de conseguir mezclas homogéneas.

CONCLUSIONES

La caracterización realizada permite establecer con mayor precisión que los desagregados basálticos de la Formación Arapey pueden clasificarse granulométricamente como arenas o gravas, con un contenido de fracción fina menor al 10%, las que prácticamente son no plásticas.

El peso específico seco máximo en la compactación Proctor prácticamente no sufre variación al estabilizarse los desagregados basálticos de la Formación Arapey con diferentes porcentajes de cemento. Algo similar sucede para la humedad óptima de compactación. Entonces bastaría con un ensayo de compactación Proctor para una muestra estabilizada en cualquier condición para determinar con exactitud los parámetros de compactación, aunque esta afirmación debería ser verificada con un mayor número de ensayos.

La resistencia última obtenida en ensayos de compresión axial inconfínada aumenta en forma directamente proporcional con el incremento del peso específico seco para todas las condiciones de estabilización. Para contenidos de cemento bajos (en el entorno al 2%) las correlaciones obtenidas fueron relativamente bajas debido a las dificultades de alcanzar una muestra homogénea durante el mezclado; lo que reafirma la idea de lo poco recomendable que sería realizar mezclas estabilizadas con estos bajos tenores, más allá que la técnica mejore el comportamiento mecánico del material original. La dosificación de proyecto requeriría de ajustes respecto de los valores que proporcionan los ensayos de laboratorio.

Aunque desde el punto de vista ingenieril el diseño de pavimentos con bases de desagregados basálticos estabilizados con cemento no mejoraría en mucho la capacidad soporte respecto a los pavimentos tradicionalmente construidos en la región Noroeste del Uruguay, las ventajas comparativas de su uso se hacen evidentes en función de las distancias de transporte de los materiales en competencia y de los costos de extracción de los mismos. En particular, en el estudio realizado bastaría que las canteras de los materiales tradicionalmente usados (fracturados basálticos) se ubicaran a partir de una distancia relativamente próxima a la cantera del desagregado para que la alternativa con estabilizado pasara a ser más económica y por tanto más recomendable. Este resultado surge de un análisis comparativo en el que incluso se colocó al material tradicional en condiciones resistentes ideales (CBR para base natural de 80%).

El hecho que la capacidad soporte del desagregado basáltico estabilizado hasta con un 2% de cemento no haya aumentado respecto al desagregado natural, siendo que la resistencia última inconfínada de aquél es prácticamente el doble que esta última, estaría indicando la necesidad de desarrollar estudios que permitan determinar correlaciones locales entre la resistencia última inconfínada y el módulo resiliente para los suelos de la región.

Los resultados verifican la posibilidad de aprovechar muchos de los materiales naturales locales en pavimentos económicos, hoy descartados por la práctica tradicional, en la medida que se sistematicen métodos racionales de estudio y diseño. Estas aplicaciones redundarán sin duda alguna en beneficios económicos imprescindibles para el desarrollo de nuestras naciones.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado es el resultado de una investigación que no hubiera sido posible sin la colaboración de colegas y amigos. En particular es nuestro deseo destacar la ayuda brindada por nuestros queridos asistentes de laboratorio Juan Alvez y María E. Bouvier sin quienes los ensayos no hubieran llegado a buen término. También agradecemos a los profesores del Departamento de Geotécnica MSc. Ing. Alvaro Rostán y Víctor Umpiérrez por sus aportes y colaboración en los ensayos. Por último en nombre de los ingenieros Carlos Magnone y Patricia Enrich queremos reconocer la contribución de la Dirección Nacional de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas y Transporte del Uruguay.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Deere, D. U.; Patton, F. D. (1971); Estabilidad de Taludes en Suelos Residuales; IV Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, vol. 4, San Juan.

- [2] Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1991); *Mecánica de Suelos*; Editorial Limusa, p. 86.
- [3] Pastore, E. L. (1995); *Weathering Profiles*; X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, vol. 1, p. 353 – 364, Guadalajara.
- [4] Goso, H; Nahoum, B. (1990); *La Utilización de Materiales Basálticos del Noroeste Uruguayo en la Construcción de Carreteras*; Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología, 2da. Época, N° 4, p. 49 – 59, Montevideo.
- [5] AASHTO (1986); *Standard Specifications for Transportation Materials of Sampling and Testing*, Washington D.C..
- [6] ASTM (1998); *Annual Book of ASTM Standards*. vol. 04.08, s. 4, Philadelphia.
- [7] Rodríguez, R.; Michelena, S. (1990); *Suelo-cal, una alternativa para pavimentos económicos*; Revista Construir, N° 3, p. 69 – 76, Montevideo.
- [8] AASHTO (1993); *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*; Washington D.C..