

**MEJORAMIENTO CON CAL COMO TÉCNICA DE
APROVECHAMIENTO DE MATERIALES ALTERNATIVOS EN OBRAS
DE PAVIMENTOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO. CASO DE
ESTUDIO: SUELOS RESIDUALES BASÁLTICOS DEL NOROESTE DEL
URUGUAY**

Ing. Civil Leonardo Behak

Asistente del Departamento de Geotécnica, Instituto de Estructuras y Transporte

“Prof. Julio Ricaldoni”, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

Oriental del Uruguay

Resumen: Se presenta un estudio de mejoramiento con cal de materiales basálticos alterados del Noroeste del Uruguay para su racional aprovechamiento en pavimentos de bajo volumen de tránsito. Los descompuestos brindan subrasantes expansivas; los desagregados proporcionan bases naturales de resistencias relativamente bajas. El estudio parecía oportuno dada las potencialidades de desarrollo de la producción de cal a nivel nacional; siendo una solución relativamente económica. Se define lo que se entiende por niveles de alteración descompuesto y desagregado. El estudio consistió en la caracterización de los descompuestos y desagregados basálticos y en la medición de la evolución del comportamiento mecánico con la cal mediante ensayos de expansión y compresión inconfineda. Se concluye que es posible aprovechar de forma económica los materiales basálticos alterados gracias al mejoramiento con cal, en la medida que se apliquen métodos racionales de estudio y diseño.

Palabras claves: Estabilización, cal, pavimentos

1. 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. En Uruguay, los materiales basálticos presentan gran interés, toda vez que ellos se extienden en un área que equivale a la cuarta parte del territorio nacional y su uso en obras de pavimentación se hace ineludible. Así se ha entendido y para estudiar las problemáticas generadas por estos materiales se ha venido desarrollando un programa de asesoramiento e investigación entre la Facultad de Ingeniería y la Dirección Nacional de Vialidad.

El Programa abarcó una serie de líneas de trabajo; una de ellas el estudio de técnicas adecuadas para el aprovechamiento de los materiales basálticos de los niveles más alterados en sustitución de los correspondientes al nivel diaclasado de las rocas (fracturados) tradicionalmente utilizados. Es posible identificar dos horizontes de alteración con características mecánicas diferentes. Un primer horizonte de suelos básicamente finos (arcillas y limos) conocido como nivel descompuesto que presentan una actividad volumétrica considerable y que conformarán las subrasantes de los pavimentos; otro horizonte de suelos gruesos, conocidos como desagregados, de baja resistencia al tránsito como materiales para capas de base natural. En ambos casos el mejoramiento de las propiedades mecánicas a través de la adición de cal se

presentaba como una técnica a ser estudiada. Fundamentándose en el hecho de ser la cal un producto de fabricación enteramente nacional y con un gran potencial de desarrollo industrial, se establecía como hipótesis de trabajo que los costos de mejoramiento podrían llegar al orden de los correspondientes al destape de canteras para alcanzar materiales de mejor calidad o a sus costos de transporte.

2. NIVELES DE ALTERACIÓN DE SUELOS RESIDUALES DEFINIDOS EN URUGUAY

Definir los niveles de alteración de un perfil de suelo residual es una cuestión aun no del todo resuelta, siendo el criterio más utilizado el propuesto por Deere y Patton (1971), basado en criterios pedológicos y que distingue tres horizontes. Se ha 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. Cabe destacar el debido a Lambe (1991) quien propone tres zonas para dividir el perfil de un suelo residual. En Brasil, Pastore (1995) propuso una estandarización de terminología para suelos tropicales.

En Uruguay se ha venido utilizando un sistema de caracterización de perfil de alteración debido a Goso y Nahoum (1990), definido inicialmente para el caso de la Formación

Arapey. En él se establecen cinco horizontes diferenciados por el grado de alteración:

- Orgánico – Suelo con alto grado de alteración y rico en materia orgánica.
- Descompuesto – Suelo 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.
- Desagregado – Suelo algo alterado y hasta fracturado que no ha sufrido una meteorización química significativa.
- Fracturado – Rocas que han sufrido procesos incipientes de meteorización física. La resistencia mecánica dependerá mucho de los planos de debilidad.
- Sano – Rocas que no han sufrido ningún tipo de meteorización.

Así definidos, estos serán los horizontes utilizados en el presente trabajo.

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS ESTUDIADOS

Los suelos estudiados fueron los correspondientes a los niveles de alteración definidos como descompuesto y desagregado. Dado lo extenso de la región implicada, se trabajó a partir de muestras extraídas de la Cantera Yucutujá, ubicada

en la progresiva 38K300 de la Ruta Nacional N° 30 en el Departamento de Artigas; noroeste del Uruguay. La selección del punto de muestreo surgió de una recorrida de campo que totalizó 63 km de rutas de la región. En la Cantera Yucutujá se verificó la existencia de un nivel de descompuesto de 2 m de potencia y un desagregado subyacente de 6 m. El suelo del descompuesto es un limo, clasificado según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como MH (ASTM D2487 – 85) y como A-7-6 (7) (AASHTO M145 – 82). La Tabla 1 resume la composición granulométrica y los Límites de Atterberg.

Tabla 1. Granulometría y Límites de Atterberg del Descompuesto basáltico

Grava	Arena	Limo	Arcilla	W _l	IP
9,3%	35,2%	46,4%	9,2%	44	16

La Actividad de la Arcilla (Skempton, 1953) fue de 1,8; calificando como suelo activo. El Poder Expansivo (Seed, 1962) fue de 29, calificando como un suelo de expansión muy alta. El Peso específico seco máximo en el ensayo Proctor Modificado (AASHTO T180 – 86) fue de 16,5 kN/m³ con una humedad óptima de 19,5%. Su CBR (AASHTO T193 – 81) es del 6%. La expansión en el CBR fue del 4,2% y la expansión libre medida en el consolidómetro sobre muestras compactadas a peso específico seco máximo y a humedad óptima fue de 8,8% a las 24 h de ensayo.

De los resultados obtenidos se concluyó que el suelo del descompuesto basáltico, como potencial subrasante de pavimentos, se adecuaba al objetivo del proyecto de estudiar el control de la expansión mediante su mejoramiento con cal. En este caso, la resistencia al tránsito parecía poco relevante para el estudio.

El desagregado es una grava limosa pobremente graduada, clasificado según SUCS como GP-GM y según AASHTO como A-1-a (0). La Tabla 2 resume la composición granulométrica y los Límites de Atterberg.

Tabla 2. Granulometría y Límites de Atterberg del Desagregado basáltico

Grava	Arena	Finos	IP
46,1%	42,5%	11,4%	NP

Sin embargo el suelo se expone en cantera con una cohesión aparente muy baja pasando a “arenizarse” al aplicarle una muy baja energía mecánica. Este es el fenómeno conocido vulgarmente como alteración y que estrictamente se puede definir como desagregación. Para la investigación se consideró que el material colocado en el pavimento estaría en su mayor estado de degradación, comportándose más como una arena que como una grava. Partiendo de esta hipótesis, los parámetros restantes se

evaluaron con muestras que fueron llevadas a arena por trituración. En estas condiciones, el peso específico seco máximo del Proctor Modificado fue de 20,1 kN/m³ y la humedad óptima de 12%.

La Figura 1 ilustra los resultados obtenidos del ensayo CBR, destacándose la alta sensibilidad del material al grado de compactación.

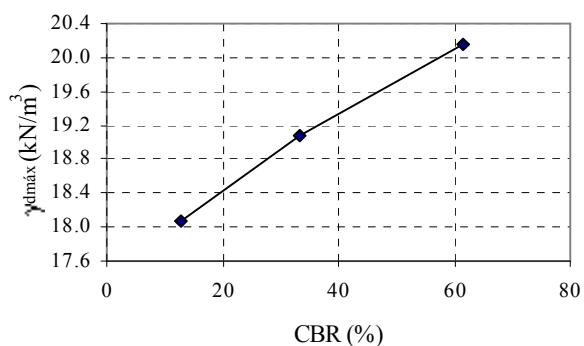


Figura 1. Relación CBR vs. peso específico seco para el desagregado basáltico

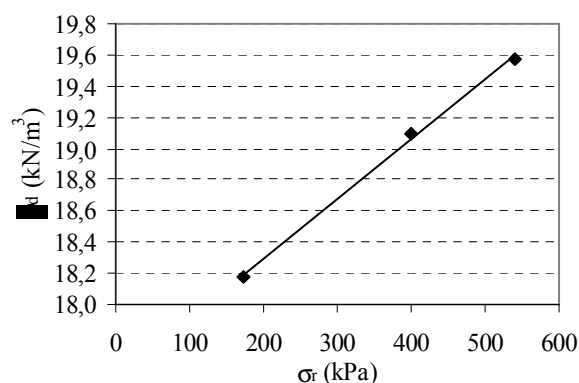


Figura 2. Resistencia última inconfiada del desagregado basáltico en función del peso específico seco

La Figura 2 resume la resistencia última a la compresión inconfiada de muestras ensayadas a diferentes pesos específicos secos.

El desagregado basáltico se adecuaba al los objetivos de estudiar la evolución de la resistencia mecánica por adición de cal.

4. LOS ENSAYOS REALIZADOS

El objetivo del proyecto era abordar el mejoramiento con cal de dos problemáticas diferentes en dos materiales de un mismo origen basáltico pero con grados de alteración distintos. Por un lado se enfocó la reducción del poder expansivo del descompuesto basáltico, para lo cual se ejecutaron ensayos de expansión en edómetros de anillo fijo sobre muestras moldeadas con diferentes contenidos de cal. Las probetas se compactaron a peso específico seco máximo y humedad óptima correspondientes a cada contenido de cal; razón por la cual se ejecutaron previamente ensayos Proctor Modificado. El tiempo de curado fue de 7 días. Los ensayos de expansión se realizaron con una sobrecarga equivalente a la utilizada en el ensayo CBR de manera de obtener resultados lo más semejante posible a los tradicionalmente usados en nuestro país. Se tomó como expansión aquel valor alcanzado al cabo de 24 h de ensayo. Esto fue así, ya que en el

estudio previo realizado en muestras naturales del descompuesto, se verificó que este era el tiempo adecuado para alcanzar similar expansión a la obtenida al cabo de cuatro días de inmersión en las probetas del CBR. Incluso los valores así obtenidos en el consolidómetro serían mayores porque en forma estricta alcanzaría de 4 a 5 h de ensayo para equiparar los resultados con los del CBR. Estas apreciaciones pueden observarse en la Figura 3 donde se muestra la evolución de la expansión en el tiempo en sendas muestras de descompuesto natural, compactadas en las mismas condiciones de densidad y humedad y ensayadas en consolidómetro y en moldes CBR. La duración total de los ensayos fue de cuatro días, según la técnica del ensayo CBR.

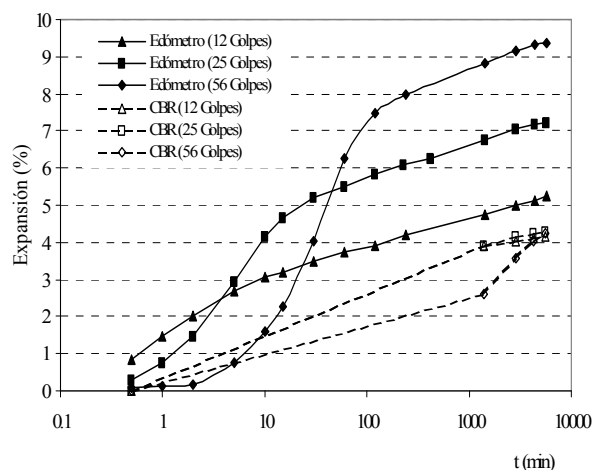


Figura 3. Expansión en el tiempo de muestras del descompuesto basáltico compactadas con diferentes energías y ensayadas en edómetro y CBR

Para el estudio del mejoramiento con cal de la resistencia del desagregado basáltico se

ejecutaron, por un lado, ensayos Proctor Modificado sobre probetas con diferentes contenidos de cal de manera de obtener los valores óptimos de compactación en cada caso. La resistencia se midió con ensayos de compresión axial inconfínada (Norma AASHTO T208 - 70 (1984)) para lo cual se moldearon para cada porcentaje de cal, probetas a diferentes pesos específicos secos y a la humedad óptima Proctor correspondiente. Los ensayos de compresión inconfínada se realizaron luego de 7 días de curado. Esta metodología permitió determinar las leyes de evolución de la resistencia última inconfínada en función del peso específico y del contenido de cal, base para la determinación de aquélla para cualquier grado de compactación.

La utilización del ensayo de compresión inconfínada para la determinación de parámetros de diseño de pavimentos no contaba con antecedentes en Uruguay. El CBR es el ensayo de uso en la práctica vial nacional, inclusive para materiales mejorados o estabilizados; aun lo ha sido a nivel de investigación. Cabe citar el estudio de estabilización con cal de materiales arcillosos para pavimentos económicos (Rodríguez et al.; 1990), donde el parámetro utilizado fue el poder soporte, CBR. La aplicación del ensayo de compresión inconfínada resultaba una experiencia novedosa para el país,

constituyéndose de esta forma en un objetivo particular de adecuación a la experiencia internacional.

La disponibilidad de prensas de carga de pequeño porte obligó al uso de probetas bastante menores a las recomendadas por las normativas conocidas (del orden de 15 cm de diámetro). Sin embargo, dadas las características granulométricas del suelo, se supuso que la utilización de probetas de pequeñas dimensiones no afectaría los resultados del ensayo por respetarse las condiciones de escala.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. Mejoramiento de la Expansión de los Materiales del Descompuesto Basáltico

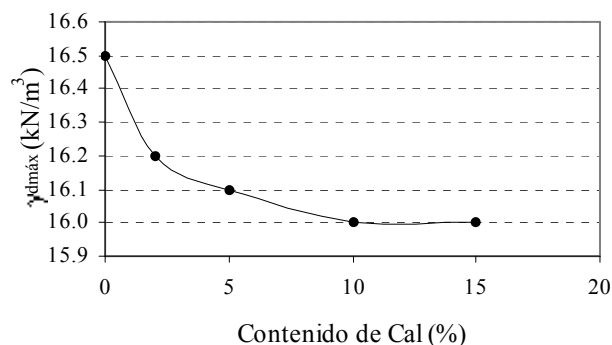


Figura 4. Evolución del peso específico seco máximo del descompuesto basáltico en función del contenido de cal

La Figura 4 muestra la evolución del peso específico seco máximo con el contenido de cal para el caso del descompuesto basáltico; notándose su considerable disminución para

bajos contenidos de cal y estabilizándose para contenidos altos.

La evolución de la humedad óptima de compactación con el contenido de cal, como puede apreciarse en la Figura 5, es errática aunque con una tendencia a aumentar con el contenido de cal. Las dispersiones en los valores obtenidos se deberían a errores propios del ensayo.

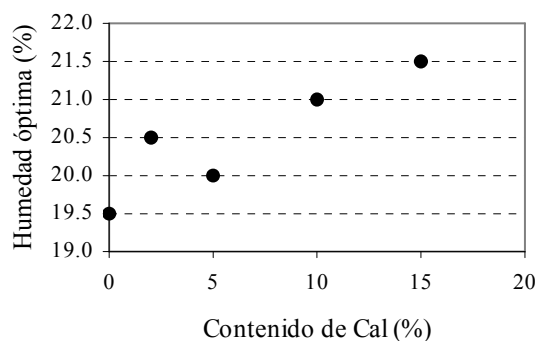


Figura 5. Humedad óptima de compactación del descompuesto basáltico en función del contenido de cal

En la Figura 6, que muestra la evolución de la expansión del descompuesto basáltico en función del contenido de cal, se aprecia su notable caída para muy bajos contenidos de cal, llegando a valores casi despreciables para un 2%. La expansión se reduce a valores prácticamente admisibles para una subrasante de pavimento, ni bien se le agrega al suelo un bajo contenido de cal. En estas circunstancias, los costos constructivos de una subrasante mejorada no serían mucho mayores que los correspondientes a la subrasante sin

mejorar; resultando una alternativa ventajosa.

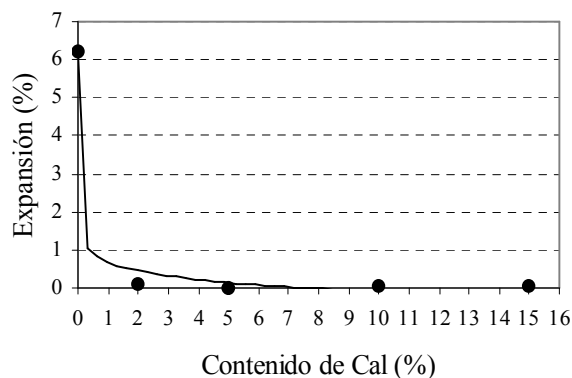


Figura 6. Expansión del descompuesto basáltico en función del contenido de cal

Sin embargo, se verifica en laboratorio la dificultad de obtener una mezcla suelo - cal homogénea para muy bajos contenidos de cal. La cal en la mezcla, en el mejor de los casos, se distribuiría de forma tal que gran parte de las partículas de suelo quedarían sin el estrecho contacto necesario con las de cal como para producir la reacción química. Si esto sucede en laboratorio, tanto más complejo debería resultar el mezclado y homogeneizado del suelo en obra. Además debe agregarse la dificultad de conseguir una distribución homogénea de la humedad, con la consiguiente heterogeneidad del proceso de curado y posterior evolución de las propiedades del suelo resultante.

Si bien en laboratorio es posible conseguir los resultados deseados con muy bajos contenidos de cal, en obra probablemente deberán adoptarse contenidos mayores, de forma de asegurar una disminución homogénea de la

expansión en toda la subrasante. El factor de adecuación a aplicar al resultado de laboratorio deberá establecerse mediante la ejecución de tramos de prueba a escala y tiempo reales, instrumentados adecuadamente, de manera de completar el estudio aquí tratado.

5.2. Mejoramiento de la Resistencia de los Materiales del Desagregado Basáltico

La Figura 7 muestra la evolución del peso específico seco máximo del desagregado basáltico con el contenido de cal; apreciándose su fuerte caída para bajos contenidos de cal y estabilizándose para contenidos altos.

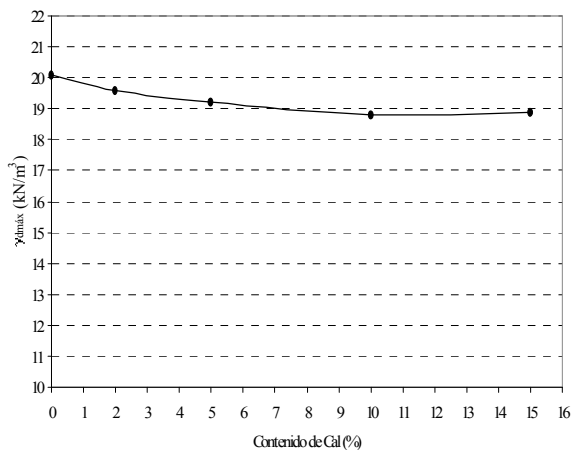


Figura 7. Peso específico seco máximo del desagregado basáltico en función del contenido de cal

La humedad óptima de compactación aumenta con el contenido de cal, hasta un 5%, como puede apreciarse en la Figura 8, disminuyendo sostenidamente para contenidos mayores.

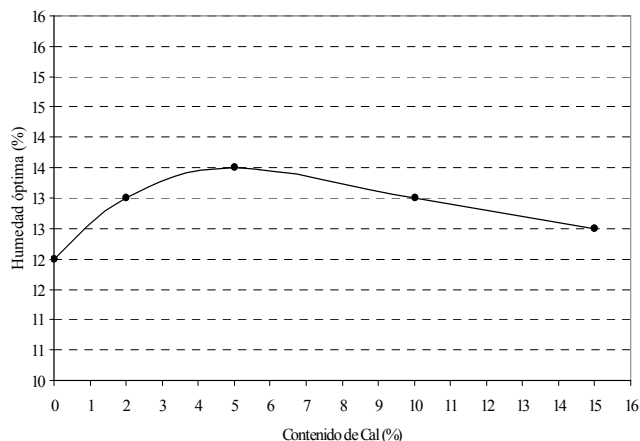


Figura 8. Evolución de la humedad óptima de compactación del desagregado basáltico en función del contenido de cal

La Figura 9 muestra la evolución de la resistencia última inconfiada del desagregado basáltico en función del peso específico seco para diferentes contenidos de cal; apreciándose una buena correlación lineal para 2% y 5%. Para 10% de cal se nota una dispersión en los resultados, que se debería a la sensibilidad que presentan las reacciones puzolánicas de la cal frente al agua. Teniendo en cuenta que las probetas mejoradas con 10% de cal fueron compactadas con una humedad promedio del 13%, se deduce que esta cantidad de agua no sería suficiente para trabajar sobre toda la cal incorporada, generando una gran heterogeneidad en el proceso puzolánico e incidiendo en el comportamiento mecánico de la mezcla. La dispersión de los resultados es mayor para 15% de cal, lo que reafirma los conceptos aquí vertidos.

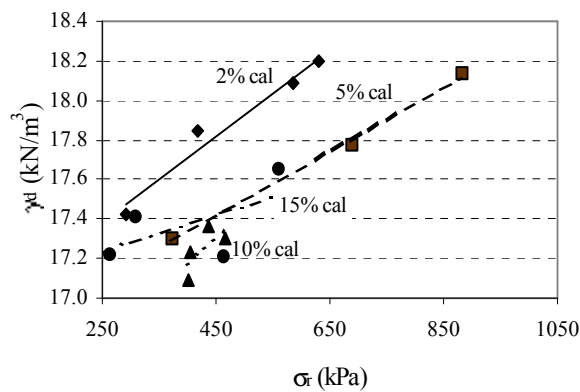


Figura 9. Resistencia última inconfiada de muestras de desagregado basáltico mejoradas con diferentes contenidos de cal en función del peso específico seco

La Figura 10 muestra los valores de la resistencia última en función del contenido de cal para diferentes grados de compactación de capas de base usuales en la práctica vial nacional. En casi todos los casos, la resistencia crece hasta un 5% de cal, disminuyendo notoriamente a partir ahí. También se aprecia que la sensibilidad de la resistencia inconfiada frente al contenido de cal es menor a medida que el grado de compactación disminuye. Esto era esperable, dada la dependencia de la resistencia de los suelos frente al grado de compactación. Puede concluirse que el contenido de cal óptimo teórico para mejorar la resistencia del desagregado basáltico se ubica en el entorno del 5%, más allá que debería estudiarse la eficiencia de estos contenidos en tramos reales.

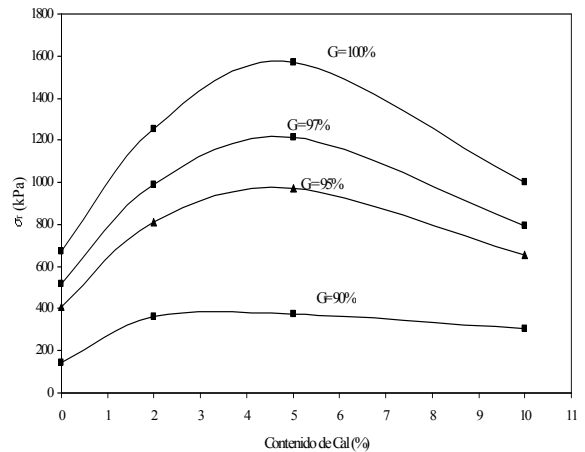


Figura 10. Resistencia última inconfiada del desagregado basáltico en función del contenido de cal para diferentes grados de compactación

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para el caso de los desagregados basálticos, el análisis de los resultados se realizó a través de la evaluación comparativa del comportamiento de los pavimentos tradicionalmente construidos en la región de estudio (bases y sub-bases de fracturados basálticos naturales) y aquellos conformados con bases mejoradas con cal de desagregado basáltico y sub-base de desagregado natural; considerando diferentes espesores estructurales. La performance se evaluó mediante el número de ejes equivalentes de 18 kips (W_{18}), determinado por el Método AASHTO 93.

La Figura 11 muestra los resultados del análisis, mostrándose la evolución de W_{18} en función del espesor total del pavimento para la

solución tradicional y para las soluciones con bases mejoradas con 2% y 5% de cal. A igualdad de espesores totales, los pavimentos tradicionales tendrían un mejor comportamiento respecto a aquéllos con bases mejoradas.

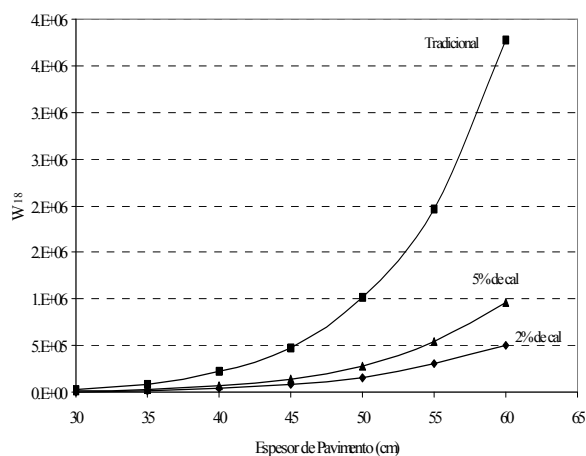


Figura 11. Evolución del W_{18} en función de los espesores totales para pavimentos tradicionales y con bases de desagregado basáltico mejoradas con 2% y 5% de cal

Sin embargo conviene realizar algunas observaciones. En el análisis se consideró que el fracturado basáltico alcanzaba un CBR del 80%, muy alto para un material natural. Esto fue así debido a que las características granulométricas de éste hacen muy difícil determinar su CBR real. Esto puso a la solución tradicional con una ventaja inicial muy importante respecto a las alternativas con bases mejoradas.

En la investigación se emplearon correlaciones entre la resistencia última

inconfiada y el módulo resiliente proporcionadas por el Método AASHTO 93 en forma indicativa, lo que aparejaba dos inconvenientes para el análisis. Por un lado la AASHTO 93 no incluye correlaciones para el caso de bases mejoradas con cal sino para soluciones de bases mejoradas con cemento, que fueron las adoptadas en el estudio. Intuitivamente los módulos resilientes de suelos mejorados con cemento y con cal no deberán ser iguales, menos aun las correlaciones con la resistencia última. Esto de por sí estaría introduciendo en el análisis una importante incertidumbre a los resultados obtenidos.

Por otra parte las correlaciones incluidas en el Método AASHTO 93 fueron obtenidas a partir de estudios realizados en materiales del Estado de Illinois (USA). Evidentemente estos suelos no deberían coincidir con los estudiados aquí y aun si tuvieran un mismo origen basáltico, las historias sufridas por unos y otros podrían haber sido muy diferentes. Lo lógico sería establecer correlaciones locales de cada material, lo actualmente en Uruguay no es posible aún por carecerse de los equipos de ensayo necesarios. Esta carencia obligó al uso de correlaciones que no deberían ser las más adecuadas para los materiales de estudio, induciendo a mayores incertidumbres en los resultados obtenidos. La suma de las incertidumbres explicaría, en parte, la escasa evolución de la performance determinada para las soluciones con desagregado mejorado con cal.

Las dificultades planteadas no hacen más que reafirmar la necesidad de desarrollo del área de la investigación en pavimentación en nuestro país si se quiere afinar en el estudio de técnicas que posibiliten la utilización de los materiales locales, sobretodo en aquellos pavimentos de bajo volumen de tránsito. La necesaria inversión que ello implicará, se traducirá en un futuro en diseños de pavimentos más precisos, con una mejor performance y más económicos.

Aun considerando los resultados obtenidos en cuanto a la performance de los pavimentos, un elemental análisis comparativo de costos constructivos entre las soluciones tradicionales y aquellas con bases mejoradas con cal indicarían que estas últimas serían más económicas tan sólo teniendo en cuenta el factor costos por distancia de transporte de los materiales desagregados y fracturados, suponiendo que aquéllos primeros estén localizados próximos a la obra particular.

7. CONCLUSIONES

El Peso específico seco máximo del descompuesto basáltico disminuye de forma notable para bajos contenidos de cal, estabilizándose para contenidos altos. La evolución de la humedad óptima de compactación es errática aunque con una

tendencia al aumento con el contenido de cal.

La expansión del descompuesto basáltico se reduce notablemente a bajos contenidos de cal, llegándose rápidamente a valores admisibles. Los costos constructivos de la subrasante mejorada no serían mayores que los resultantes de construirla sin mejorar; resultando una alternativa ventajosa. Los valores obtenidos en laboratorio, deberán ajustarse a valores de obra, si se desea una disminución homogénea de la expansión de las subrasantes. El factor de adecuación resultará de la ejecución y seguimiento de tramos de prueba.

El Peso específico seco máximo del desagregado basáltico sufre una fuerte caída para bajos contenidos de cal, estabilizándose para contenidos altos. La humedad óptima de compactación aumenta hasta un 5% de cal agregada, disminuyendo sostenidamente para contenidos mayores.

La evolución de la resistencia última inconfiada del desagregado basáltico en función del grado de compactación es linealmente proporcional para un 2% y 5% de cal. Para un 10% y 15% se nota una dispersión que se debería a la sensibilidad de las reacciones de la cal frente al contenido de agua.

La resistencia última inconfiada del desagregado basáltico crece hasta un 5% de cal, disminuyendo notoriamente a partir ahí. La

sensibilidad de la resistencia frente al contenido de cal es menor a medida que el grado de compactación disminuye. El contenido de cal óptimo teórico se ubicaría en el entorno del 5% aunque debería estudiarse la eficiencia de estos contenidos en tramos reales.

El comportamiento de los pavimentos tradicionales sería mejor que el de los pavimentos con bases de desagregado basáltico mejorado con cal, aunque el análisis partió de suponer condiciones ideales de poder soporte de aquéllos. Aun así, las soluciones mejoradas serían más económicas tan sólo si se tiene en cuenta los costos de transporte de los materiales desagregados y fracturados.

Los resultados obtenidos a partir de correlaciones entre la resistencia y el módulo resiliente no verificadas para los materiales locales, no hacen más que reafirmar la necesidad de avanzar en el establecimiento de estas correlaciones en Uruguay. La inversión que ello implicará, se traducirá en mejores y más económicos pavimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1993); AASHTO Guide for Design of Pavement Structures; Washington D.C.
- Deere, D. U.; Patton, F. D. (1971); Estabilidad de taludes en suelos residuales; IV Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, 4, San Juan.
- 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.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1991); Mecánica de Suelos; Editorial Limusa, p. 86.
- Lilli, F. J. (1986); Estabilizado de Suelos (con ligante hidráulico cal); Ministerio de Transporte y Obras Públicas - Dirección Nacional de Vialidad, CO.CA.P.
- Pastore, E. L. (1995); Weathering Profiles; X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, vol. 1, p. 353 – 364, Guadalajara.
- Rodríguez, R.; Michelena, S. (1990); Suelocal, una alternativa para pavimentos económicos; Revista Construir, N° 3, pp. 69 – 76.
- Seed, H. B.; Richard, W. I.; Raymond, L. (1962); Prediction of swelling potencial for compacted clays; A.S.C.E. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division; N° 88; SM 3.
- Skempton, A. W. (1953); The colloidal activity of clays; Memoria del III Congreso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones; vol. I, Zurich.