

ZONIFICACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO DE LOS SUELOS DE LA FORMACIÓN LIBERTAD: MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN Y ESTABILIZACIÓN

Álvaro Rostan, MSc.; Profesor Adjunto, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
e-mail: alrostan@fing.edu.uy

Marcos Musso, MSc.; Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
e-mail: mmusso@fing.edu.uy.

Leonardo Behak, MSc.; Asistente, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
e-mail: lbehak@fing.edu.uy.

Av. Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay, CP. 11.300, Tel/fax: 711 2880

Resumen

Se analiza el comportamiento expansivo de suelos en estado "inalterado" y remoldeado. Se observa que los suelos de la Formación Libertad son variables en su potenciales expansivos. Esta variabilidad se observa tanto respecto a su ubicación geográfica como con la profundidad. Existen diferencias debidas a su composición mineralógica, distribución granulométricas y propiedades físicas. En general se observan variaciones en los resultados entre muestras "inalteradas" y remoldeadas. Ensayos de expansión y presión de expansión realizados sobre mezclas de suelos de la Formación Libertad y diferentes contenidos de cal y de cemento Portland muestran una importante reducción del potencial expansivo de estos suelos.

Introducción y Antecedentes

La mayoría de las obras civiles ubicadas en la región sur del territorio uruguayo se encuentran fundadas sobre unidades geológicas del Terciario, como la Fm. Raigón y Fm. Fray Bentos, o del Cuaternario, como la Fm. Libertad y Fm. Dolores.

La Fm. Libertad, objeto de estudio de este trabajo, está formada por suelos sedimentarios transportados compuestos por limos y arcillas con cantidad variable de arena, la cual está presente en mayor proporción hacia su base (Goso, 1965). Es de color pardo marrón en las regiones expuestas a oxidación, mientras que en profundidad es posible encontrarla con colores verdes y grises, indicadores de ambiente reductor. La presencia de varios niveles de loess intercalados, con potencias variables de 0,50m a 3,00m en diferentes sectores de la formación, marcan los diferentes aportes de materiales y las variaciones climáticas ocurridas durante el Cuaternario. En general en las zonas más arcillosas de color pardo marrón se encuentra presente carbonato de calcio en forma de concreciones, de 30mm a 50mm de tamaño medio, y en polvo.

En general se puede indicar que dicha formación conforma relieves de tipo colinas suaves, pudiéndose distinguir variaciones en curvatura y pendientes dependiendo del espesor y estratigrafía local, así como de la profundidad del Basamento o formaciones terciarias subyacentes (Musso 2001). Normalmente no se encuentran saturados, presentando índices de liquidez menores que 0 y contenidos de humedad natural prácticamente constantes estacionalmente. De existir nivel freático se encuentra generalmente en el contacto con las formaciones subyacentes y no presenta grandes variaciones de cota durante el transcurso del año.

Algunas de las sistematizaciones de las experiencias con suelos expansivos en subrasantes de los Estados Unidos de América son presentadas por Snethen (1975). En la década del 70 se estimaban daños producidos por estos fenómenos que generaban pérdidas anuales de 1000 millones de dólares (Jhones & Holtz 1973). Para Nuhfer (1994) los costos de reparación de los daños generados en obras civiles en los Estados Unidos de América, por suelos expansivos, son de 6000 a 11000 millones de dólares por año. En Rusia, las pérdidas económicas generadas son de 3000 a 5000 millones de dólares según Ragozin (1994).

Esto ha motivado diversos estudios para la identificación y cartografía de los suelos expansivos, así como investigaciones sobre metodologías para disminuir la expansión y/o construir de forma adecuada sobre este tipo de suelos (Snethen, 1975). Algunos países, donde existe una larga tradición en cartografía geotécnica, han desarrollado mapas de suelos expansivos como el realizado en España a escala 1:1.000.000 por Ayala et al. (1986), en Estados Unidos a escala 1:2.500.000 por Olive et al. (1989) como auxilio para los trabajos de detalle en el momento de implantación de las obras vinculadas a desarrollo urbano y/o infraestructura.

En nuestro país existen estudios sobre el comportamiento expansivo de algunas unidades geológicas desde mediados de los 90. A partir de la observación se puede indicar que la mayoría de las patologías específicas, asociadas a fenómenos de expansión, en pavimentos y estructuras livianas del sur del país, se encuentran sobre algunos suelos asociables a la Fm. Libertad (Nahoum et al. 1996, Musso 2001; Musso et al. 2003). El alto potencial expansivo de algunos suelos finos de esta formación, cuando se saturan a partir de un estado inicial parcialmente saturado, llevó a plantear posibles formas de identificación y cuantificación a través de técnicas de laboratorio (Musso 2001; Musso et al. 2003; Musso et al. 2004; Rostan et al. 2006).

En suelos de la región noreste de Montevideo se determinaron valores máximos de presión de expansión de 500 kPa (Musso 2001). Estudiando suelos de subrasante de la Ruta Nacional N°1, en el Departamento de San José, Musso et al. (2003) determinaron valores máximos de presión de expansión de 500 kPa, 250 kPa y 125 kPa (para muestras remoldeadas con 20 % de humedad). Al reducir la humedad (a valores de 17%), el valor máximo fue de 1000 kPa. Para estos suelos particulares en estas condiciones de humedad, la expansión libre en edómetro fue de 25 % a 34 %. La expansión medida en el ensayo CBR, ensayo rutinario para el diseño de pavimentos, en condiciones óptimas de compactación Proctor Modificado fue de 9% a 19 % en 4 días de inmersión.

La rutina de identificación y caracterización de suelos potencialmente expansivos fue realizada según la propuesta de Musso et al. (2003). Esta rutina incorpora, al conjunto de ensayos clásicos de caracterización, la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que permite diferenciar suelos potencialmente expansivos de no expansivos, para luego cuantificar el fenómeno mediante ensayos edométricos de expansión libre (EL) y presión de expansión (PE).

Ensayos

La totalidad de las muestras ensayadas en el Departamento de Geotécnica se realizaron siguiendo técnicas o normas estandarizadas y reconocidas internacionalmente. Los ensayos de granulometría y de límites de plasticidad fueron realizados siguiendo las normas ASTM D422 y D4318 respectivamente. Las muestras se clasificaron según los sistemas S.U.C.S. y AASHTO, normas ASTM D2487 y D3282 respectivamente.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó mediante el método de azul de metileno (Pejon 1992). En los estudios anteriores realizados por los autores los parámetros de compactación se determinaron mediante ensayos Proctor Modificado (ASTM D1557). Cabe señalar que la norma UY-S-15, utilizada por el Laboratorio de la Dirección

Nacional de Vialidad, es equivalente al ensayo Proctor Modificado. La determinación de la capacidad portante (CBR) se realizó según ASTM D1883.

Para determinar el potencial expansivo se realizaron ensayos de expansión libre (EL) y presión de expansión (PE) en edómetro, siguiendo los procedimientos indicados en la norma ASTM D4546 (método A y método C respectivamente). Las muestras remoldeadas se compactaron estáticamente usando la prensa de CBR, mientras que las “inalteradas” se tallaron a partir de la muestra original. Posteriormente a su colocación o moldeo en los anillos edométricos, las muestras son saturadas con agua destilada bajo una tensión total inicial aplicada de entre 3kPa y 4,2kPa.

Métodos de Identificación

En esta sección se presentan resultados de ensayos sobre suelos de la Fm. Libertad presentados en diversas publicaciones previas, conjuntamente con otros realizados sobre muestras retiradas de la zona oeste del proyectado Anillo Colector Perimetral de la ciudad de Montevideo. Se plantea analizar en conjunto los resultados de caracterización clásicos con ensayos de expansión en edómetro para intentar identificar suelos potencialmente expansivos.

Referencias previas

Las muestras caracterizadas por Musso (2001) están compuestas por arcillas limosas y limos arcillosos con contenido variable de carbonato de calcio (en concreciones o en polvo), clasificados como CL-CH o, según AASHTO, de A-7-6 a A-7-5. La fracción arcilla es 30 a 57% de la composición granulométrica, su límite líquido (LL) de 29 a 95 y su índice plástico (IP) de 15 a 40. Los valores de CIC del suelo, determinados con la técnica de azul de metileno, varían de 10 a 55cmol/kg. Su composición mineralógica, determinada mediante Difractometría de Rayos X (DRX), es fundamentalmente esmectita, con contenidos variables de illita y caolinita.

Se realizaron ensayos sobre muestras “inalteradas” con su humedad natural, “inalteradas” secadas al aire y remoldeadas compactadas en prensa CBR. Las muestras “inalteradas” fueron retiradas mediante la hinca estática de un tubo de 70mm de diámetro. La caracterización de los suelos remoldeados, compactados en prensa CBR, son presentados en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Caracterización de suelos compactados del noreste de Montevideo (Musso 2001)

| Suelo | Arcilla (%) | CIC _{suelo} (cmol/kg) | LL | IP | γ_d (kN/m ³) | ω (%) | PE (kPa) | Clasificación | |
|-------------|-------------|--------------------------------|----|----|---------------------------------|--------------|----------|---------------|------------|
| 26-1 | 46 | 44 | 59 | 37 | 13,7-16,7 | 14,6 | 55-360 | CH | A-7-6 (20) |
| 39-1 | 40 | 28 | 66 | 43 | 13,7-16,7 | 14,0 | 24-220 | CH | A-7-6 (20) |
| 44-1 | 46 | 37 | 52 | 30 | 13,8-16,9 | 14,3 | 32-130 | CH | A-7-6 (18) |
| 45-1 | 47 | 35 | 57 | 35 | 14,7-16,5 | 15,0 | 120-270 | CH | A-7-6 (19) |

26-1: punto 26, profundidad 1m

En la **Tabla 2** se presentan resultados de caracterización de suelos de subrasante de la Ruta Nacional N°1, muestreados en diferentes progresivas y pertenecientes a la Fm. Libertad obtenidos por Musso et al. (2003), Musso et al. (2004) y Rostan et al. (2006). Sobre estas muestras se realizaron ensayos de expansión edométrica de muestras remoldeadas mediante compactación estática con prensa CBR, y ensayos de expansión CBR.

Tabla 2: Caracterización de algunos suelos de subrasante de la Ruta Nacional N°1 (Musso et al. 2003, Musso et al. 2004 y Rostan et al. 2006).

| Suelo | Arcilla (%) | CIC _{suelo} (cmol/kg) | LL | IP | γ_d máx. (kN/m ³) | ω_{opt} (%) | EL (%) | PE (kPa) | Clasificación |
|-------|-------------|--------------------------------|-----|----|--------------------------------------|--------------------|--------|----------|---------------|
| I | 69 | 75 | 101 | 69 | 14,7 | 19,9 | 17,0 | 500 | CH A-7-5 (83) |
| II | 48 | 51 | 78 | 56 | 17,0 | 17,8 | 9,0 | 250 | CH A-7-6 (63) |
| III | 11 | 15 | 40 | 13 | 14,2 | 25,1 | 1,0 | 30 | ML A-6 (5) |
| IV | 55 | 41 | 81 | 50 | 15,2 | 21,0 | 18,8 | 500 | CH A-7-5 (59) |

Anillo Perimetral de Montevideo

A solicitud de la Dirección Nacional de Vialidad, el Departamento de Geotécnica realizó dos series de ensayos edométricos de expansión libre y presión de expansión sobre muestras extraídas por el comitente del entorno de la subrasante de la obra proyectada del Anillo Colector Perimetral de Montevideo. En la primera serie se ensayaron dos muestras en condiciones remoldeadas extraídas de las progresivas 4K111 y 10K400, mientras que en la segunda serie se ensayaron cinco muestras en condiciones “inalteradas”. La ubicación geográfica aproximada de los suelos ensayados de la primera serie y de puntos notables del trazado es presentada en la **Figura 1**. La plasticidad, granulometría y clasificación de las muestras son presentadas en la **Tabla 3**.

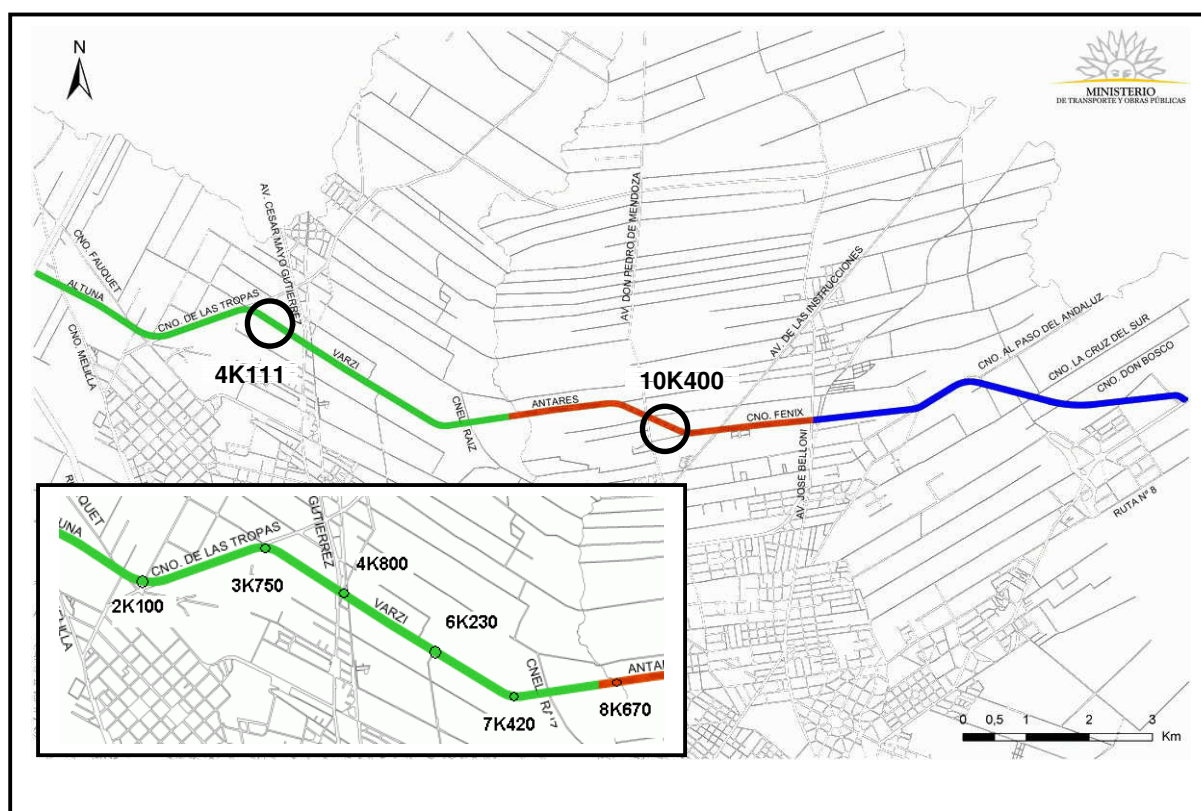


Figura 1: Ubicación aproximada de muestras de suelo ensayadas. Plano tomado de página Web de Vialidad (DNV, 2007)

Las muestras ensayadas de la primera serie fueron remoldeadas en condiciones iniciales de contenido de humedad y peso específico seco cercanas a los parámetros óptimos de compactación, determinados por el comitente mediante la norma UY-S-15

(humedad óptima de 22% y peso específico seco máximo de 14,1kN/m³) para 4K111 y mediante la norma UY-S-17 (humedad óptima de 18,2% y peso específico seco máximo de 16,9kN/m³) para 10K400. Al no ser utilizando el mismo procedimiento de compactación para ambas muestras, además de que uno de ellos (el UY-S-17) no se corresponde con procedimientos estándar internacionalmente aceptados y no sería adecuado realizar comparaciones de ambos suelos.

Las muestras de la segunda serie fueron retiradas de las progresivas y profundidades indicadas en la **Tabla 3**. La forma de extracción fue mediante la hinca estática de tubos de 70mm de diámetro interno, entregándose desmoldadas para su ensayo.

Tabla 3: Características granulométricas y clasificación de las muestras del Anillo Colector Perimetral de Montevideo.

| Progresiva | Profundidad (m) | SUCS | AASHTO | % arena | % limo | % arcilla |
|------------|-----------------|------|------------|---------|--------|-----------|
| 4K111 | 2,50 – 3,00 | MH | A-7-5 (48) | 1,4 | 46,9 | 51,6 |
| 10K400 | 2,50 – 3,00 | CH | A-7-6 (31) | 9,4 | 50,8 | 39,7 |
| 2K300 | 2,70 | CL | A-7-6 (24) | 4,0 | 68,3 | 27,7 |
| 3K150 | 0,80 | CH | A-7-6 (44) | 4,6 | 48,7 | 46,5 |
| 3K955 | 1,60 | CH | A-7-6 (47) | 2,6 | 51,3 | 46,1 |
| 7K900 | 0,80 | CH | A-7-6 (43) | 5,4 | 53,4 | 41,2 |
| 8K000 | 0,80 | CL | A-7-6 (21) | 6,1 | 66,5 | 27,0 |

Tabla 4: Características de plasticidad, CIC del suelo, expansión libre, presión de expansión y actividad de las muestras del Anillo Colector Perimetral de Montevideo.

| Progresiva | LL | IP | CIC _{suelo} (cmol/kg) | EL (%) | PE (kPa) |
|------------|----|----|--------------------------------|--------|----------|
| 4K111 | 75 | 39 | 44 | 11-18 | 75-300 |
| 10K400 | 52 | 32 | - | 6-13 | 50-350 |
| 2K300 | 43 | 23 | 20 | 0 | 0 |
| 3K150 | 62 | 42 | 8 | 1,1 | 8 |
| 3K955 | 68 | 41 | 26 | 3,3 | 14 |
| 7K900 | 63 | 41 | - | 5,6 | 65 |
| 8K000 | 41 | 21 | - | 4,6 | 34 |

Como se observa en los resultados granulométricos, algunos de estos suelos presentan un importante contenido de arena fina (ej. 10K400). Esta fracción está constituida principalmente por carbonato de calcio, el cual puede estar presente naturalmente o pueden ser concreciones cuyo tamaño se redujo en el proceso de preparación de muestras. Las muestras “inalteradas” 2K300 y 8K000 presentan un elevado porcentaje de fracción limo.

Discusión de resultados

En la **Figura 2** se presentan los estados iniciales de peso específico seco y contenido de humedad de los suelos de la Fm. Libertad. En la parte superior se indican las condiciones iniciales de las muestras remoldeadas, todas ellas compactadas estáticamente en prensa CBR; mientras que en la parte inferior se presentan las condiciones “inalteradas” de las muestras retiradas mediante la hinca estática de tubo. Los valores mostrados en algunos puntos indican las presiones de expansión (PE), medidas en ensayos edométricos, expresadas en kPa. Las curvas de saturación fueron trazadas utilizando un valor de gravedad específica (G) de 2,85, que puede considerarse un valor promedio para suelos de la Fm. Libertad.

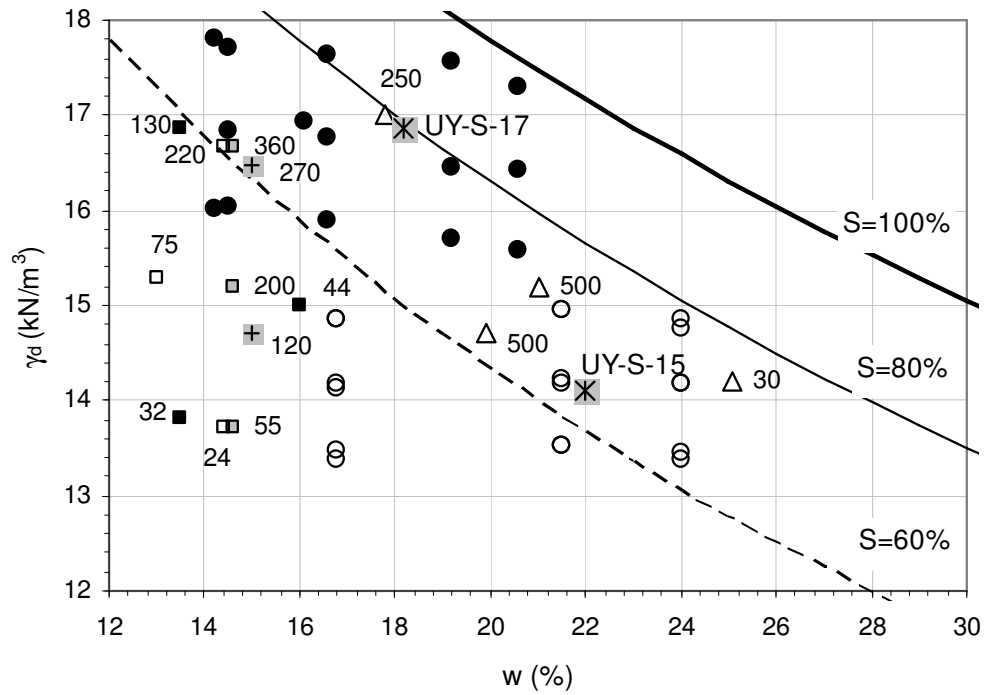
Para la realización de ensayos de (EL) y (PE), las muestras del Anillo Perimetral (4K111 y 10K400) se compactaron según los nueve estados indicados en la figura. Como se muestra en la **Tabla 4**, se registraron mayores valores de (EL) en 4K111 que en 10K400. Las (PE) varían entre 75 y 300kPa para 4K111, aumentando con el aumento del peso específico seco y sin mucha influencia de la humedad de compactación; mientras que para 10K400 estas presiones varían entre 50 y 350kPa, disminuyendo con el aumento de la humedad de compactación y no presentando mucha influencia del peso específico seco (**Figura 3**).

Las muestras de Musso (2001), muy similares en sus valores de fracción arcilla, límites de plasticidad y CIC_{suelo} , presentan una tendencia al aumento de (PE) con el peso específico seco. Este resultado indicaría que si se elimina la variable mineralógica, la (PE) tiende a crecer con el aumento del peso específico seco de compactación. En general Musso (2001) concluye que para las muestras compactadas existe un aumento de (PE) con el aumento del peso específico seco y del CIC_{suelo} , observando también que el carbonato de calcio presente en el suelo influye fuertemente en todos estos parámetros.

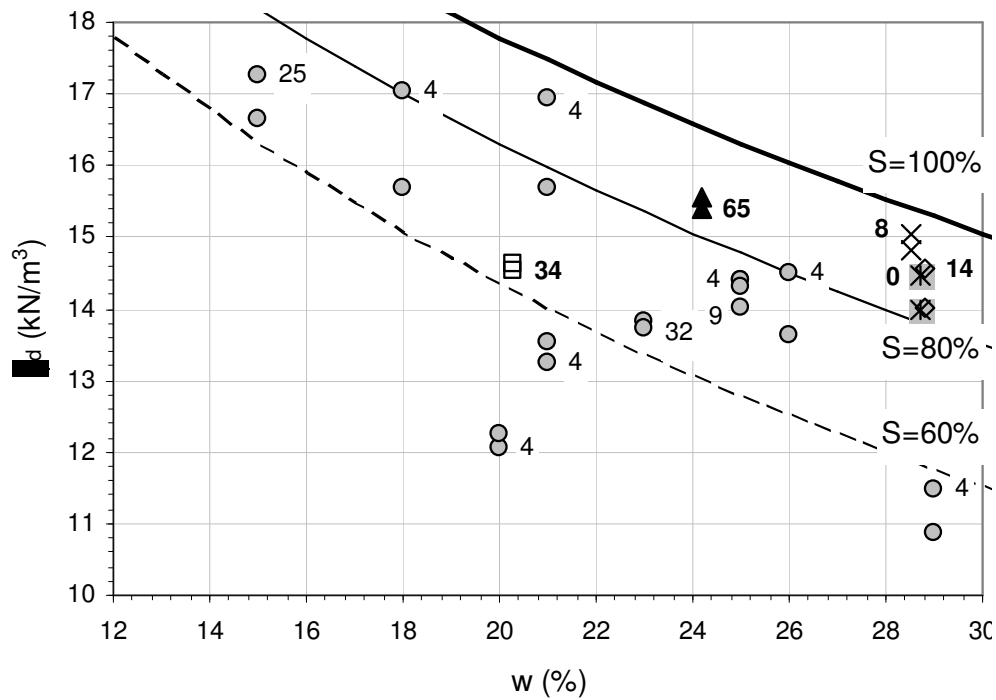
La variabilidad de los resultados de las (PE) de los distintos suelos mostrados en la Figura 2 se debe a que en dicha representación no interviene la composición mineralógica y el porcentaje de carbonato de calcio. En este sentido el CIC sería un valor más indicativo del potencial expansivo dado por la mineralogía y la distribución granulométrica. La succión, que es función de la granulometría, mineralogía y de las condiciones de humedad y peso específico de un suelo, permitiría analizar de una manera más racional el fenómeno de la expansión de los suelos parcialmente saturados.

Dentro de los suelos estudiados en condiciones compactadas se puede observar que algunos puntos de la subrasante de la Ruta Nacional N°1 presentan mayores expansiones libres y presiones de expansión. Los suelos I y IV son los que generan (PE) del orden de 500kPa y (EL) de 17 a 19%, en condiciones de compactación Proctor Modificada. Los mismos presentan una fracción arcilla de 69 y 55%, límites líquidos de 101 y 81, índices plásticos de 69 y 50, y CIC_{suelo} de 75cmol/kg y 41cmol/kg respectivamente.

El suelo del Anillo Perimetral (4K111) presenta 52% de fracción arcilla, 75 de límite líquido, 39 de índice plástico y 44cmol/kg de CIC_{suelo} . En condiciones óptimas de compactación presenta 17% de (EL) y 240kPa de (PE). A pesar que su fracción arcilla, CIC_{suelo} y (EL), en condiciones óptimas del Proctor Modificado, son muy similares al del suelo IV, su (PE) es aproximadamente la mitad de este último.



- 4K111 ● 10K400 △ Musso et al. 2003 □ 26-1 Musso 2001
- 39-1 Musso 2001 ■ 44-1 Musso 2001 + 45-1 Musso 2001



- ⊗ 2K300 × 3K150 ◇ 3K955 ▲ 7K900 □ 8K000 ○ Musso 2001

Figura 2: Condiciones iniciales de peso específico seco y contenido de humedad de muestras remoldeadas compactadas (superior) e “inalteradas” (inferior).

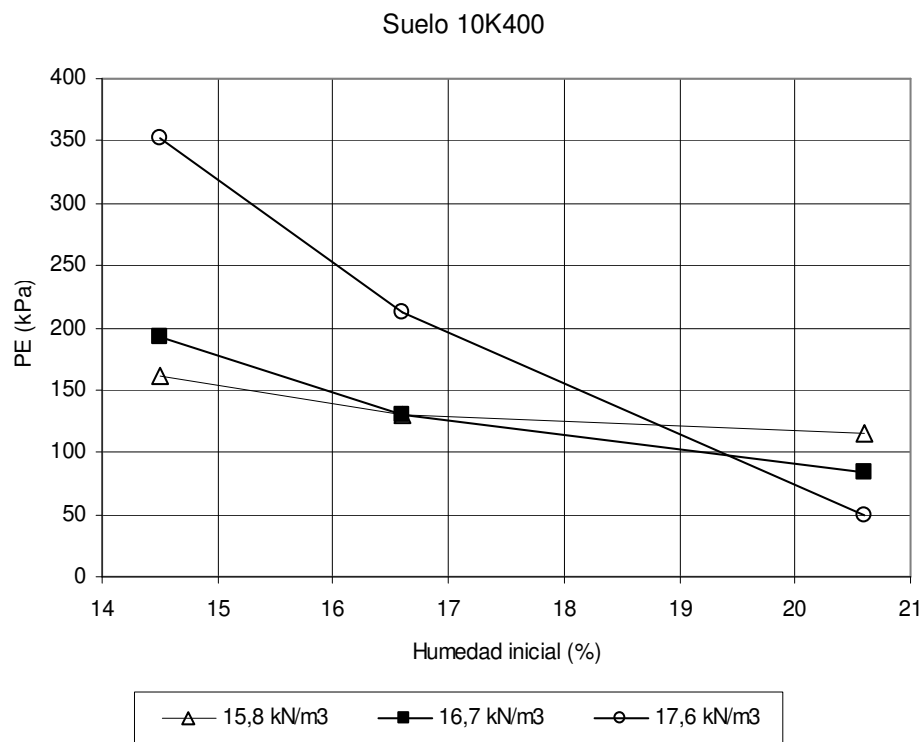
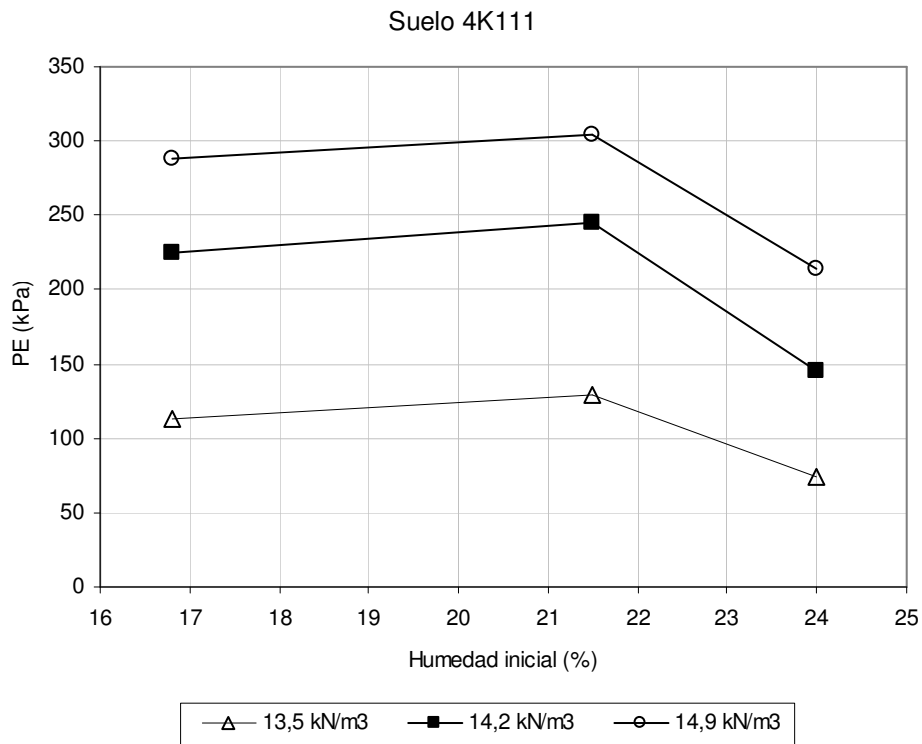


Figura 3: Resultados de presión de expansión de los suelos compactados del Anillo Perimetral.

En ambos casos las muestras “inalteradas” fueron retiradas del campo mediante procedimientos similares y con muestreadores de igual diámetro interno pero diferentes espesores de tubo. Se observa que las muestras de Musso (2001) se encuentran en general con grados de saturación inferiores a 80% y pesos específicos secos muy variables (de 11 a 17kN/m³); mientras que las del Anillo Perimetral presentan mayor saturación ($S > 80\%$) pero similares pesos específicos secos, de entre 14 y 15kN/m³. Ambos conjuntos presentan importantes variaciones en su contenido de humedad natural.

En Musso (2001) se observa que las (EL) medidas son en general bajas y varían de 0,3 a 5,0%, existiendo casos particulares que alcanzan a 16%. Las (PE) medidas son del orden de 4kPa, independientemente del suelo y de su estado inicial, existiendo algunos puntos particulares que alcanzan valores del orden de 25 a 32kPa. Los valores de CIC_{suelo} de dichos suelos varían de 28 a 45 cmol/kg. No existe una correlación entre los suelos con valores elevados de (EL) con los que desarrollan mayores (PE).

Las muestras del Anillo Perimetral generan (EL) de entre 0 y 6% y (PE) de entre 0 y 65kPa. En este caso los suelos con mayor (EL) presentan mayores valores de (PE). Estas muestras son limos y limos arcillosos que se encuentran con un grado de saturación elevado y presentan un CIC_{suelo} muy bajo (de 8 a 26cmol/kg). Esto explicaría en parte los bajos potenciales expansivos de estas cinco muestras.

Para un mismo suelo los valores de (EL) y (PE) en condiciones compactadas son siempre mayores que en condiciones “inalteradas”, para las mismas condiciones iniciales de peso específico seco y contenido de humedad. No se tienen datos suficientes para cuantificar estas diferencias, así como para determinar cuales son las variables principales del fenómeno.

Como se observa en la **Foto 1**, las muestras “inalteradas” (de 70mm de diámetro y 20mm de altura) pueden presentar concreciones o vetas de carbonato de calcio que ocupan gran parte de su volumen. Esto presenta problemas de escala en este tipo de muestreo, lo que hace poco representativo al resultado obtenido en muestras edométricas “inalteradas” respecto al potencial expansivo del mineral arcilloso. Al preparar la muestra para realizar ensayos compactados, el carbonato de calcio se muele y pierde su “estructura” natural (concreciones o vetas), aumentando el porcentaje de arena de la muestra global y haciendo variar los valores de plasticidad y CIC del suelo arcilloso propiamente dicho.



Foto 1: Muestra “inalterada” 3K150.

Cuando se realiza una excavación para una obra civil en suelos de la Fm. Libertad, su extensión y profundidad son mucho mayores que cualquier estructura carbonática presente. Además cortará varios estratos de suelos de características y potenciales expansivos distintos, aliviando el estado tensional y permitiendo el intercambio de humedad con la atmósfera de los suelos inferiores. El proceso constructivo, por más cuidadoso que sea, alterará un importante volumen de material y generará el remoldeo del suelo, destruyendo y mezclando los diversos componentes y niveles (vetas y concreciones), como ocurre durante la preparación de muestras para la compactación en laboratorio. Por este motivo es que los ensayos de laboratorio ofrecerán resultados mas representativos del comportamiento real que tendrá la masa de suelo en un caso real.

Una vez caracterizado el suelo que se va a excavar o utilizar para fundar una obra civil, se pueden distinguir primariamente algunos indicadores de su posible comportamiento expansivo. Cuando exista riesgo de que dicho suelo sea potencialmente expansivo se

deberán realizar ensayos que cuantifiquen dicho comportamiento en las condiciones de compactación.

Métodos de Mejoramiento

Debido a su potencial expansivo alto se eligió el suelo IV de las muestras de la subrasante de la Ruta Nacional N°1 para realizar una experiencia de mejoramiento de sus propiedades expansivas a través de la adición de cal y cemento Pórtland, por ser estos los más comunes comercialmente y existir una gran experiencia mundial en su utilización.

Para distintos porcentajes de suelo mezclado con cada uno de ellos, se realizaron ensayos de expansión libre sobre muestras edométricas compactadas mediante prensa CBR. Las condiciones iniciales de peso específico seco y contenido de humedad se determinaron a partir de los resultados óptimos de compactación de ensayos Proctor Modificado realizados sobre mezclas de suelo con 3% de cada uno de los mejoradores.

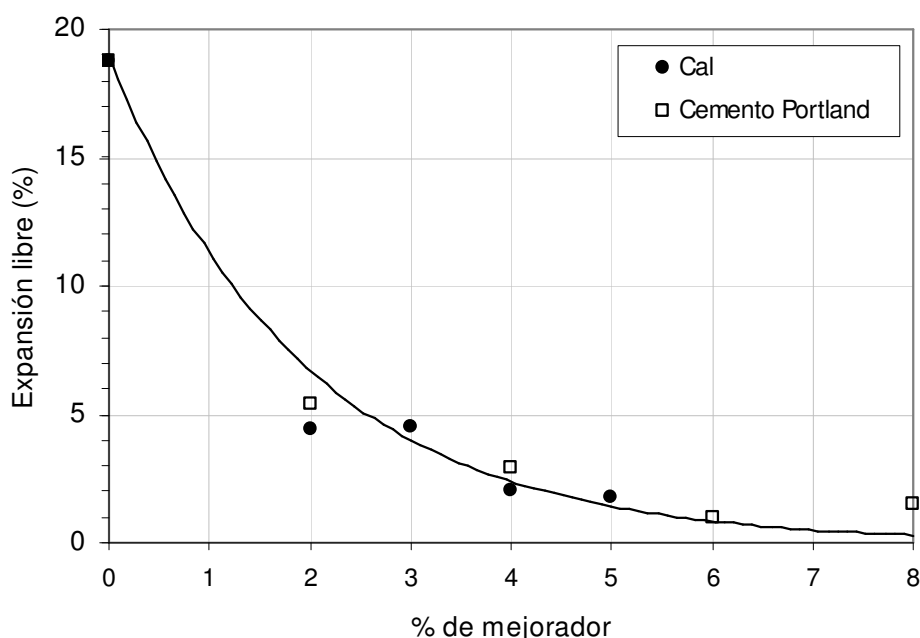


Figura 4: Variación de la expansión libre con la adición de cal o cemento Pórtland.

En la **Figura 4** se puede observar una caída brusca de la expansión libre del suelo para pequeños tenores de cal y cemento Portland. Con la adición de un 2%, de peso seco de suelo, de cal o cemento, la (EL) pasa de 18,8% a 4% en promedio. Para llevar estos valores a un 2%, como valor admisible, sería necesario adicionar un 4% de cal o un 6% de cemento. Esto demuestra la eficacia en la modificación de suelos potencialmente expansivos de la Fm. Libertad mediante la adición de cal, siendo mayor el consumo de cemento necesario para reducir la expansión a valores admisibles.

Para observar la variación en la presión de expansión se realizaron ensayos sobre mezclas de suelo + 4% de cal y suelo + 6% de cemento. Esta adición provoca que el suelo, que inicialmente presentaba valores de 500kPa, desarrolle valores de entre 15 y 20kPa de (PE). Esto indica que el desarrollo de presiones de expansión en suelos tratados con cualquiera de estos mejoradores es prácticamente despreciable.

Los resultados obtenidos con el mejoramiento del suelo IV con cal y cemento son consistentes con la experiencia y práctica internacional. Behak (2001) obtuvo similares resultados del mejoramiento con cal y cemento de suelos del descompuesto de la Fm. Arapey en el noroeste del Uruguay.

Conclusiones

Como resultado de la conjunción de los diversos trabajos sobre suelos de la Fm. Libertad presentados se puede señalar que:

- La Fm. Libertad presenta heterogeneidad granulométrica y mineralógica, expresada en la variación de su potencial expansivo. De los antecedentes recabados hasta el momento puede concluirse sobre la necesidad de definir distintas unidades dentro de la Fm. Libertad en función de diferentes parámetros físicos y mecánicos, entre ellas la expansión.
- Para el caso de obras civiles livianas, fundadas sobre suelos finos potencialmente expansivos, donde las complicaciones durante la ejecución de las obras o los riesgos de daños pueden conducir a elevados costos, los ensayos edométricos de presión de expansión y expansión libre son los que permiten cuantificar mejor este fenómeno.
- Los suelos de la Fm. Libertad limosos o limo arcillosos o aquéllos que tienen grado de saturación mayor al 80% tienen un potencial de expansión prácticamente despreciable.
- Algunos niveles de la Fm. Libertad presentan importantes porcentajes de concreciones o vetas de carbonato de calcio que pueden ocasionar problemas de escala en muestras inalteradas, haciendo poco representativos a los resultados de los ensayos edométricos respecto al potencial expansivo de la fracción arcillosa.
- La extensión y profundidad de las excavaciones realizadas para obras civiles en suelos de la Fm. Libertad son mucho mayores que cualquier estructura carbonática presente y afectará varios estratos del mismo suelo con características y potenciales expansivos distintos, aliviando el estado tensional y permitiendo el intercambio de humedad con la atmósfera de los suelos inferiores. El proceso constructivo, por más cuidadoso que sea, alterará un importante volumen de material y generará el remoldeo del suelo, destruyendo y mezclando los diversos componentes y niveles, como ocurre durante la preparación de muestras para la compactación en laboratorio. Los ensayos de laboratorio ofrecerán resultados mas representativos del comportamiento real que tendrá la masa de suelo en un caso real.
- El mejoramiento con cal y con cemento Pórtland de un suelo de la Fm. Libertad, en lo que tiene que ver con la reducción de su potencial expansivo, se muestra muy eficiente con bajos tenores de ambos productos. La modificación con cal precisa de menos porcentaje, siendo una solución más económica y extensamente aplicada en todo el mundo.

Referencias Bibliográficas

- Ayala, F. J.; Gijón, M. F. Oteo Mazo, C. O. (1986) *Mapa Previsor de Riesgos de Expansividad de Arcillas en España a escala 1:1.000.000*. Centro de Estudios Experimentales (CEDEX) & Instituto Geológico y Minero de España.
- Behak, L. (2001). *Metodologías de Utilización de los Materiales Basálticos del Descompuesto y Desagregado de la Formación Arapey en Pavimentos Económicos*; 3o Congreso de la Vialidad Uruguaya; CD; Montevideo.
- Jhones, D. E. & Holtz, W. G. (1973). Expansive soils- the hidden disaster. Civil Engineering, ASCE v. 43, n. 8, p. 49
- Musso, M. (2001). *Estudo do Fenômeno de Expansão dos Sedimentos da Formação Libertad (Quaternario): Metodologia de Aviação e Mapeamento na Região de Montivideú-Uruguay*, Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Musso, M., Rostan, A. e Behak, L. (2003). Subrasantes Expansivas en Rutas Nacionales: ¿Mito o Realidad?, 4º Congreso de la Vialidad Uruguaya, CD-ROM.

- Musso, M., Rostan, A. e Behak, L. (2004). Expansión en Suelos de Subrasantes de Uruguay: Edómetros vs CBR. *5º Simposio Brasileiro de Solos Não Saturados*, ISBN 85-98156-04-3, Sao Carlos, Brasil, Trabajo 066, p. 377-380.
- Nahoum, B.; Prefumo, J. E.; Goso, C.; Chapuis, D.; Peyronel, S. (1996). *La problemática de los materiales expansivos como fundación de construcciones livianas. estudio de caso: formaciones Libertad-Dolores*. 8 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia.p. 215-226. Rio de Janeiro.
- Nuhfer, E. B. (1994). *What's a geology hazard*. Geotimes, July p. 4
- Olive, W.W.; Chleborad, A F.; Frahme, C. W.; Schloker, J.; Schneider, R. R. & Shuster, R. L. (1989). *Swelling Clays Maps Of The Conterminous United States*. U. S. Geological Survey Publication. http://www:surevoid.com/surevoi_web/soil_map/co.html (06/10/99)
- Pejon, O J. (1992). *Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba-SP (escala 1.100.000) estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos*; Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo; 2 v.; São Carlos.
- Ragozin, A L. (1994). *Basic principles of natural hazard risk assessment and management*. 7th International IAEG Congress. p.1277-1286
- Rostan, A. ; Behak, L.; Musso, M.; Regusci, M.I. (2006). *Caracterización de Subrasantes Finas Sedimentarias Potencialmente Expansivas del Sur de Uruguay*. III Congreso Luso-Brasileiro de Geotécnica, COBRAMSEG, Curitiba (PR), Brasil, p. 215 – 219
- Snethen (1975). *A review of engineering experiences with expansive soils in highway subgrades*. Report Nº FHWA-RD75-48.