

El Camino en Arcillas Expansivas

Por D. José A. Jiménez Salas

Una de las características de las obras públicas es su magnitud, de tal forma que, una vez construidas, pasan a ser un hecho geográfico. Donde esto llega a su máxima expresión es en los embalses, pero también las obras lineales, tales como las carreteras, se incorporan a la morfología pasando a ser un rasgo más de ella.

Esto tiene consecuencias a largo plazo, ya que debemos tener siempre presente que el relieve no es algo "que está ahí", sino que es tan sólo una fase de un proceso dinámico. El ritmo de su evolución suele ser lento, por lo que podemos recibir la impresión de un equilibrio, si la medimos con la escala de la vida humana, pero, aún quitando el riesgo de episodios paroxísticos, unas veces espontáneos, pero otras muchas desencadenados por la herida que infligimos al terreno, la existencia de la carretera, dividiendo radicalmente el paisaje antes unido influirá poderosamente en esa evolución, y nada será exactamente igual a como iba a haber sido.

Por supuesto, el estudio de esta complejísima influencia no puede caber en este artículo, y requiere por otra parte un tratamiento multidisciplinar, pero éste tan sólo podrá hacerse con rigor si previamente se tienen los materiales con los que habrá de construirse. Y estos materiales consisten en el conocimiento de las distintas fuerzas que actúan en ese proceso.

La tensión capilar

Hoy nos vamos a limitar a algunas indicaciones sobre la forma de actuar de una de estas fuerzas, que es la tensión capilar. Y es particularmente interesante traerla durante unos momentos a primer plano, porque es habitual el despreciarla, con el argumento de que es algo que puede desaparecer. Ciertamente así es, pero por ello mismo es un parámetro esencial del proceso evolutivo que hemos enunciado, de tal forma que puede decirse que, en climas semiáridos como el nuestro, el paisaje depende de él. La erosión moldea el

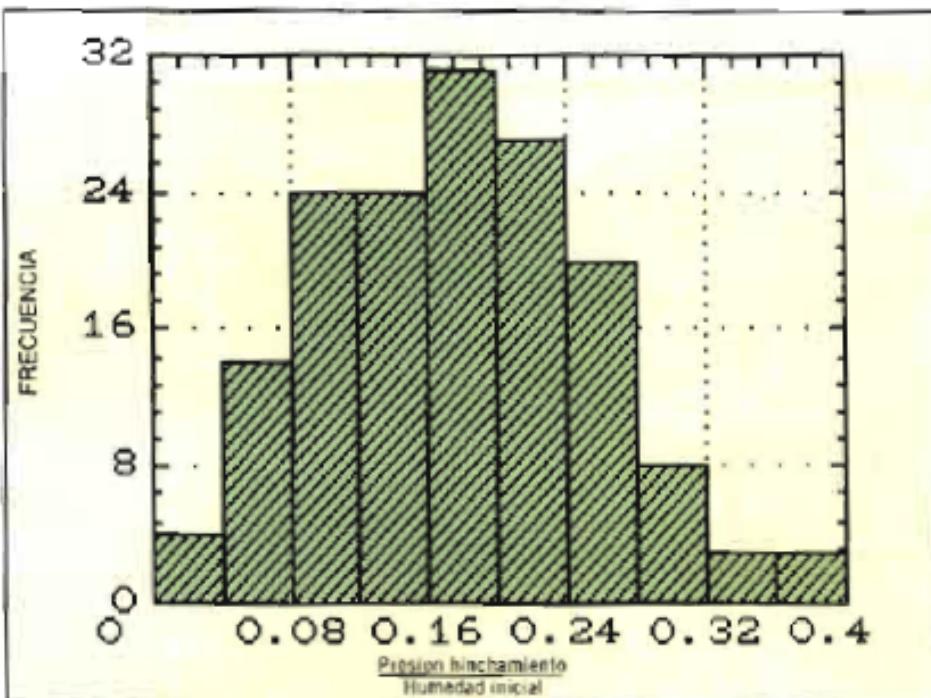


Fig. 1

relieve terrestre, a golpes de catástrofe cuando el coeficiente de seguridad de una ladera llega a ser inferior a la unidad, pero es la cohesión llamada ficticia, producida por la tensión capilar, la que tiene de las riendas el fenómeno, aflojándolas sólo de cuando en cuando, en años de lluvias extraordinarias, que, por otra parte, están sometidos a unos ritmos regulados a su vez por fenómenos de naturaleza astronómica.

A largo plazo, puede decirse que todo el relieve está con coeficiente de seguridad estricto, con lo cual podría concluirse, en pesimista, que nada es posible hacer, pues todo desencadenaría una inestabilidad. Pero esto no es así, si aprovechamos, como el cazador que está al acecho, los períodos durante los cuales las tensiones capilares están por encima del mínimo que produciría la catástrofe. Y además, diseñamos nuestra obra para que altere el equilibrio hidrológico de modo que dichas tensiones capilares se mantengan ya siempre suficientemente altas. Es Záruza, el eminente geólogo checo, primer presidente que fue de la Asociación Internacional de Geología para el Ingeniero el que dijo que hoy son más frecuentes los corrimientos en las trincheras de las carreteras de nueva construcción, y que ellos es debido

a que, cuando se hacen a pico y paleta, y descendiendo en toda su longitud, se daba tiempo para que se crease un nuevo equilibrio de tensiones del agua freática, mientras que ahora, al excavarlas rápidamente y a veces a toda altura, se crean las fuerzas que tienden a producir el corrimiento, mientras que todavía no ha tenido tiempo para evolucionar el estado hidrológico hacia el que correspondería al terreno en su configuración final. Pero podemos señalar otros casos, en los que la apertura rápida de una trinchera, en materiales sobreconsolidados y, por lo tanto, dilatantes, tiene como consecuencia la aparición de tensiones capilares fuertes, que mantienen el talud durante algún tiempo. Este puede ser largo, ya que las transferencias de humedad en suelos semi-saturados son lentas, pero generalmente con la facilidad de acceso al agua que proporciona una temporada de lluvias, el talud termina por caerse.

Los terraplenes

Pero consideremos ahora los terraplenes. En terrenos arcillosos, es evidente que los taludes con los que los construimos no corresponden con su ángulo de rozamiento interno. Si

así lo hiciésemos, y aplicásemos un coeficiente de seguridad de 1.2, tendríamos que proyectarlos con taludes 1.3. Los taludes habituales tan sólo se mantienen ayudados por la cohesión, primordialmente la debida a la tensión capilar, ya que el apisonado, especialmente cerca de los taludes, poca cohesión verdadera puede aportar.

Una vez construido, el terraplén entra en equilibrio dinámico con su entorno, influyendo en él, con mayor eficacia que sobre el terreno llano, las condiciones climáticas, debido a su configuración protuberante. Podemos suponer, por lo tanto, que su tensión capilar oscila alrededor de la media definida por la relación de Russam, que liga el potencial capilar con el índice de Thornthwaite del lugar, el cual, a su vez, pretende ser una medida de la aridez o pluviosidad del lugar considerado. Hay que hacer notar, sin embargo, que dicha relación ha de ser considerada como simple indicación, pues su dispersión es muy grande. Influyen, por otra parte, en el estado hidrométrico de un terraplén, e incluso de cada uno de sus taludes por separado, circunstancias tales como el drenaje, la insolación, la vegetación, etc.

Además, alrededor del valor medio, la tensión capilar del terraplén varía mucho a lo largo del año. Cada temporada de lluvias produce un frente de humectación que casi satura un cierto espesor a partir de la superficie. El agua así retenida se irá difundiendo durante las semanas siguientes hacia el interior del terraplén, con velocidad menor conforme va encontrando zonas de grado de saturación más pequeño, y en consecuencia, de permeabilidad, mientras dure ese estado, más baja.

Durante este proceso, las fajas del terraplén próximas a los taludes pa-

Los taludes habituales tan sólo se mantienen ayudados por la cohesión, primordialmente la debida a la tensión capilar, ya que el apisonado, especialmente cerca de los taludes, poca cohesión verdadera puede aportar.

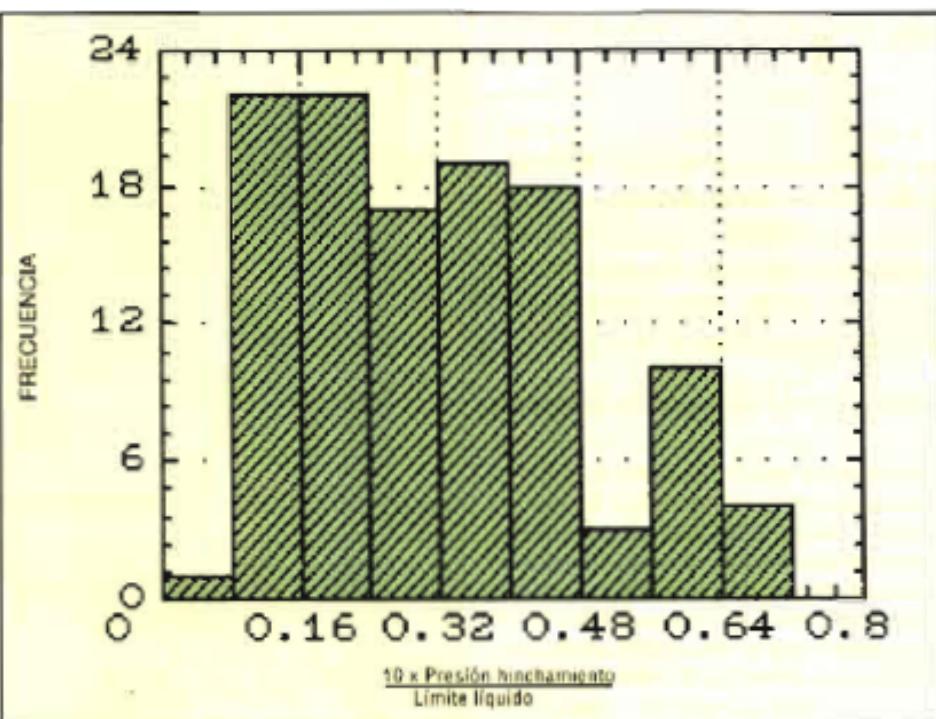


Fig. 2

san por estados muy peligrosos, pues su tensión capilar disminuye, y hasta puede anularse. Por ello, un terraplén arcilloso recién terminado se erosiona muy fácilmente. En realidad, se producen pequeñas "coladas de barro" en los puntos en los que el agua, al concentrarse, llega a saturar la arcilla próxima a la superficie. Pero, con un poco de tiempo, y, claro es, mejor si se hace un tratamiento, el terraplén se defiende. Esto tiene lugar principalmente por medio de la vegetación, que crea una trama de raíces que confieren otro tipo de cohesión en el terreno.

Las arcillas expansivas

Hay un tipo de suelos en el que la erosión superficial es especialmente temible, por lo cual hay que extremar en ellos las precauciones, y efectuar, en general, un tratamiento o crear una protección especial. Me refiero a los materiales que sufren grandes variaciones de volumen según el grado de humedad, a las llamadas arcillas expansivas. En ellas se produce un agrietamiento profundo, en los períodos de sequía, que facilita la entrada del agua y la saturación de una capa de terreno mucho más importante que en otro terreno que no tenga la mencionada característica. Se pueden ver, muchas veces, corrimientos de una hoja de treinta o cuarenta centímetros de espesor, que afectan a un área importante de un talud, al llegar las lluvias de otoño.

A merced de ese agrietamiento,

las variaciones estacionales penetran, además, mucho más profundamente en terraplenes de esta clase. La aparición, en tiempo de sequía, de grietas paralelas al eje de la carretera, en grandes longitudes del pavimento de la misma, es una manifestación clásica de la presencia de estos materiales.

No siempre resulta posible descharlos, ya que en muchos puntos del Globo hay muy extensas áreas cubiertas por ellos, pero si es necesario identificarlos: primero, para conocer el peligro y tomar algunas medidas que minimicen los inconvenientes previsibles, y, en segundo lugar, porque es posible que, con apariencia parecida, haya, dentro de la misma área, zonas de préstamo en donde la expansividad sea menor o incluso inexistente.

Los ensayos de identificación

Es bien conocido que uno de los medios para esta identificación es el ensayo de Lambe, desarrollado por ese profesor del Instituto Tecnológico de Massachusetts en 1960, por encargo de la Administración Federal de la Vivienda de los Estados Unidos. Consiste en medir la presión de hinchamiento desarrollada por una muestra colocada en un edómetro, cuyo pistón empuja contra un anillo dinamométrico. Esto hace que el ensayo no se haga rigurosamente a volumen constante, ya que el anillo, para medir, tiene que tolerar un pequeño hinchamiento (Ver figura 3).

La más arcillosa, y de arcilla más activa, producirá una presión mayor, y, por otra parte, tendrá, con un apisonado normalizado, una densidad más reducida”

Por otra parte, la muestra no es inalterada, y no está con la humedad natural. Según las normas formuladas por Lambe, se aceptan tres maneras distintas de prepararla con una “humedad inicial”. La primera es almacenarla en contacto con una atmósfera que tenga el 50% de humedad relativa. La segunda, hacerlo en contacto con una atmósfera saturada y la tercera darle la humedad correspondiente al límite plástico. Naturalmente, la presión es diferente según la alternativa que se escoga, pero, de esta presión se obtiene el “Cambio Potencial de Volumen” (CPV) mediante una curva diferente según el modo de preparación escogido.

Con el tiempo, de los tres inicialmente propuestos apenas se practican el segundo y el tercero, con lo que el primero ha pasado a ser el dominante. Es muy corriente también el olvidar la existencia del CPV, y presentar como resultados las presiones medidas, ya que se entiende que la muestra fue siempre preparada por el primero de los procedimientos. Las razones del abandono de los otros dos son, principalmente: es difícil preparar una muestra del tamaño de la necesaria para este ensayo, con la humedad correspondiente al límite plástico, y que quede homogénea. Además, las presiones producidas son pequeñas y difíciles de medir con precisión. En cuanto a la conservación en atmósfera saturada, es una situación inestable, muy sensible a los cambios de temperatura. Por ejemplo, es muy frecuente que la cámara húmeda esté más caliente que el laboratorio. Al sacar el recipiente con la muestra, el vapor contenido en el recipiente se condensa, aumentando el grado de humedad.

El apisonado se hace también de forma normalizada, y se mide la densidad obtenida, como también la humedad inicial. Puede comprobarse que las presiones producidas tienden

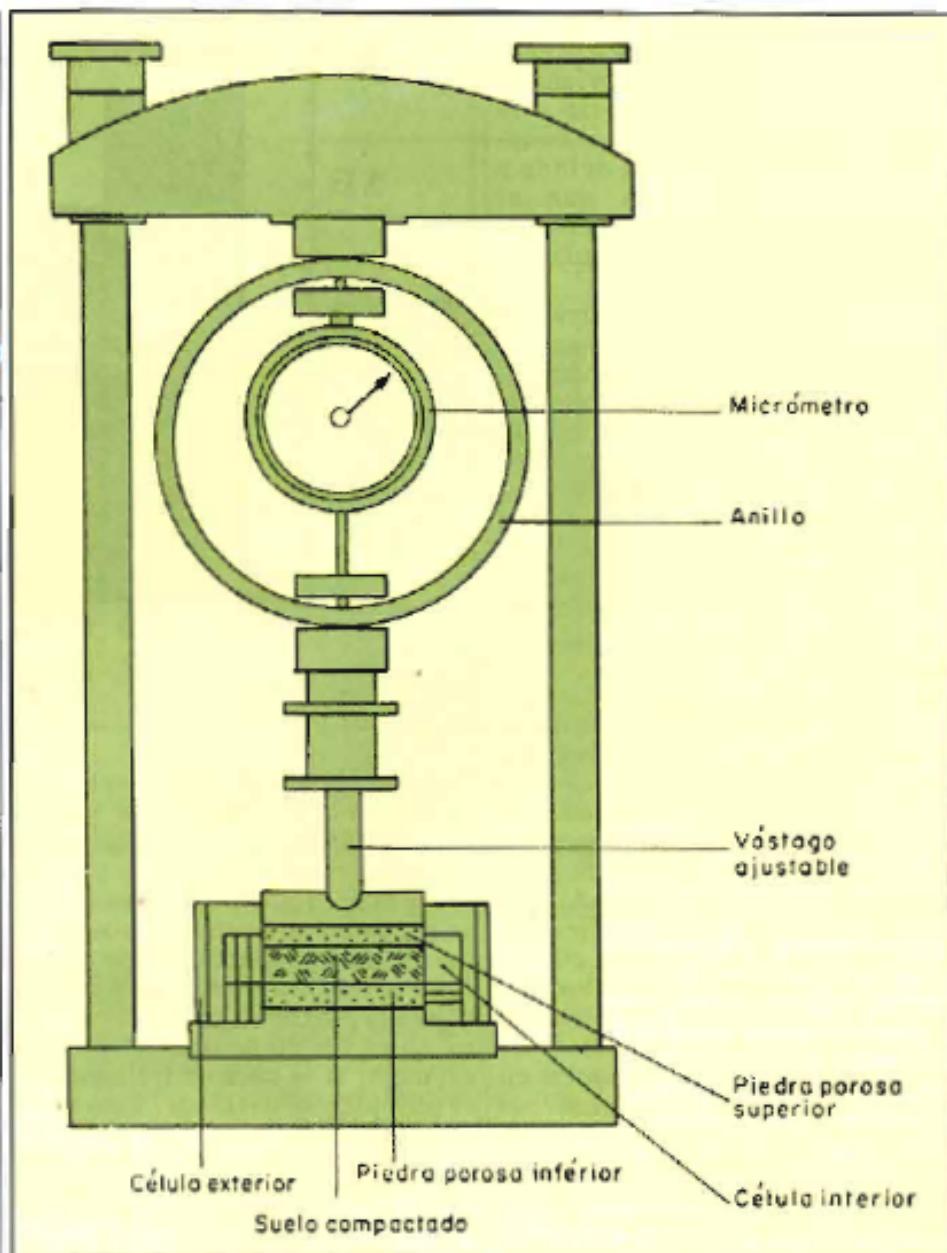


Fig. 3. Sección a través del aparato de Lambe

a ser mayores cuanto menor es la densidad inicial. Esto ha sido señalado alguna vez como señal de error, pues existe el hecho de que a mayor densidad, la presión de hinchamiento es mayor. Pero esto ocurre cuando tratamos de una sola muestra, que, evidentemente, ha tenido que ser más sobreconsolidada para que tenga una densidad mayor. Y esto nada tiene que ver cuando estamos ensayando diversas muestras: la más arcillosa, y de arcilla más activa, producirá una presión mayor, y, por otra parte, tendrá, con un apisonado normalizado, una densidad más reducida. Algo parecido ocurre con la humedad inicial: parece que un suelo más húmedo debe dar una presión menor, pero hay que tener en cuenta que la humedad de equilibrio en una atmósfera al 50% de humedad (que corresponde a una tensión capilar

elevada (de 1000 kg/cm^2) viene a ser una medida de la superficie específica del suelo y de su actividad, por lo que un valor alto corresponde a unas propiedades de hinchamiento desarrolladas.

En la ya muy larga experiencia que se ha ido acumulando sobre el ensayo de Lambe se ha podido comprobar su adecuación para detectar el peligro de expansividad de las arcillas, y quizás sea España donde haya sido más apreciado. Esto se debe probablemente a que en muchos otros países los terrenos expansivos se presentan con caracteres más claros: los suelos “black cotton” indios, por ejemplo, no necesitan realmente ningún ensayo para identificarlos, y si sólo para cuantificar los movimientos que en ellos se pueden producir. Pero, al parecer, nuestra península es el único lugar donde

abundan las arcillas que producen daños, teniendo límites de Atterberg del orden de 50, y cuya especie mineralógica es predominantemente illita, por lo cual la aplicación de un ensayo de identificación verdaderamente fiable es más interesante para nosotros que en otros países.

Porque una cosa que hay que dejar sentada claramente es que el ensayo de Lambe es un ensayo de identificación, y nunca ha pretendido ser otra cosa. Mide una presión de hinchamiento, pero no a volumen constante, ni sobre una muestra inalterada, con su humedad natural. Y, además, la muestra se prepara apisonándola en el mismo molde. Unido esto a que está muy seca, esto hace que quede en un estado de sobreconsolidación en el que las tensiones horizontales, contra el anillo, son importantes. Al disminuirse la resistencia del suelo, por la inundación, se produce un reajuste, responsable de una parte de la presión de hinchamiento medida.

Todo esto hace que este ensayo haya sido criticado con frecuencia, y se le presente como muy inferior a otros ensayos que se pretende que dan una información mucho más fundamental y cuantitativa.

Los ensayos cuantitativos

Dos parámetros que tienen prestigio como definitorios del posible comportamiento de estos suelos son: la presión de hinchamiento y el hinchamiento libre, llamando así al que se produce en el edómetro bajo una pequeña presión, que antes era de 70 g/cm² (siguiendo la práctica americana: una libra por pulgada cuadrada) y ahora 100 g/cm².

Pero ninguno de estos dos valores nos proporciona una medida real de las propiedades de la arcilla, de lo que hemos llamado "expansividad intrínseca", debido a que:

— La expansión del terreno en cada caso es función de su contenido inicial de agua, y éste varía en cada punto y también a lo largo del tiempo, por lo cual ninguna medida que dependa de él puede tener un valor intrínseco.

— La presión de hinchamiento no tiene un valor único para una muestra determinada, sino que depende de la trayectoria de presiones con relación al cambio de humedad que se siga, como ha demostrado el Prof. Justo Alpañés, de Sevilla, en una comunicación presentada en el Congreso de Adelaida (Australia), en 1984.

“*L a expansión del terreno en cada caso es función de su contenido inicial de agua, y éste varía en cada punto y también a lo largo del tiempo, por lo cual ninguna medida que dependa de él puede tener un valor intrínseco.*”

Tanto la presión de hinchamiento como el hinchamiento libre del terreno *in situ* dependen del estado total de tensiones, influyendo fuertemente las tensiones horizontales. Estas son diferentes de las que se producen en el laboratorio, y dependen en primer lugar de la fisuración, la cual depende a su vez de circunstancias tales como la configuración geométrica, drenaje, insolación, vegetación, naturaleza (incluyendo color) de los centímetros exteriores del suelo, etc.

Todo lo cual no quiere decir que dichas determinaciones no tengan valor, pero sí que la precisión cuantitativa que nos pueden dar respecto al desarrollo futuro de los fenómenos es muy escasa, y también que no se les puede presentar como situadas en un rango superior al Lambe, que es un intento de medir las propiedades expansivas del suelo, mientras que estos otros dos a los que ahora nos referimos son tan sólo, en la realidad, parámetros de estado.

Vemos, por otro lado, que hay muchas causas de heterogeneidad en el comportamiento de un terreno de esta clase. Como consecuencia, para llegar a una descripción útil de los futuros movimientos y de su distribución espacial, es necesario hacer un gran número de ensayos, lo cual

“*T anto la presión de hinchamiento como el hinchamiento libre del terreno *in situ* dependen del estado total de tensiones, influyendo fuertemente las tensiones horizontales.*”

no resulta posible si son complicados.

Correlaciones de la presión Lambe con otros indicadores

Esto ha sido evidente desde los primeros estudios que se hicieron sobre el problema, por lo que desde entonces se han buscado correlaciones entre las propiedades expansivas y los índices más usuales en Mecánica del Suelo: límites de Atterberg, límite de retracción, humedad óptima Proctor y también (Jiménez Salas, 1953), la humedad higroscópica.

El más favorecido hasta el momento ha sido el límite líquido, y, por otro lado, como expresión del estado de humedad, la razón entre la humedad natural y este límite, dado que la determinación del potencial capilar es operación delicada y que, aún después de la difusión del método del papel de filtro (más barato, pero también meticuloso), todavía no ha conseguido abrirse paso hacia los ensayos de rutina.

Con la idea de encontrar una forma sencilla de identificar la "expansividad intrínseca", y partiendo de la convicción de que el ensayo Lambe es lo que en este momento más se acerca a ese objetivo, hemos analizado una población de 162 muestras sobre las que se ha llevado a cabo. Todas ellas habían sido juzgadas inicialmente como sospechosas, aún cuando tan sólo el 29.05% resultaron ser peligrosas.

Se han determinado las correlaciones existentes entre la presión medida en el Lambe y los límites de Atterberg, así como con la humedad y la densidad iniciales medidas durante dicho ensayo. Se han probado también índices compuestos, procurando optimizar la correlación buscada. Como vemos en la tabla 1 (ver página siguiente) la correlación con el límite líquido es aceptable, superior a la hallada entre la presión Lambe y la razón entre la humedad inicial y dicho límite, y muy superior a la correlación con el límite plástico. Pero a todas estas es muy superior la correlación con la humedad inicial, y casi igual a ella es la correlación con el índice compuesto $W_{PL}^* \cdot \gamma_d / \gamma_w$ siendo γ_d la densidad inicial e γ_w la del agua.

En esta tabla, PHL significa Presión de hinchamiento Lambe, quedando así indicado que no se trata de una presión de hinchamiento real que pueda desarrollar el terreno "*in situ*", sino a una presión producida

“

Analizando en más detalle los valores individuales de la población ensayada, parece que los errores cometidos en la calificación de los suelos, mediante la aplicación del criterio de la humedad inicial no son aleatorios, sino que afectan a muestras que se sospecha que tienen una composición especial.”

en unas condiciones determinadas durante un ensayo.

En general, la PHL es superior a la que puede desarrollar el terreno, por las circunstancias mencionadas de humedad y de apisonado, y así ocurre que, mientras que un suelo capaz de producir una presión de hinchamiento, *in situ*, de 1 kg./cm²

efectuar el mencionado ensayo. Para comprobar si esto es así, hemos aplicado los tres criterios a la población de 162 muestras que nos ha servido para establecer dichas correlaciones.

Según los resultados del ensayo de Lambe, de las 162 muestras, el 29.05% resultaron ser peligrosas, y el 71.95% no peligrosas. Pero aplicando los criterios indicados los resultados fueron los siguientes:

minarse, si no se desea hacer el ensayo Lambe, con una pequeña muestra colocada en un desecador de vacío con ácido sulfúrico de densidad 1.344 en el fondo, con lo cual el equilibrio se alcanza en muy pocas horas, siendo además muy fácil ensayar varias muestras a la vez. Resulta de aquí que la humedad higroscópica es una alternativa válida al ensayo de Lambe, útil porque per-

	TABLA 2			
	CRITERIO APLICADO	Límite líquido	Hum. inicial	(Hum. in.) \wedge 9* Dens
Suelos peligrosos				
Aciertos	13.72%	21.73%	20.15%	
Errores	11.67%	8.54%	8.76%	
Suelos no peligrosos				
Aciertos	60.28%	63.41%	63.19%	
Errores	15.33%	7.32%	8.90%	

Vemos aquí que el límite líquido es claramente el indicador más pobre de los tres empleados, habiendo cometido un 27.00% de errores, contra un 15.86% y 17.66%, respectivamente, de los otros dos. Pero todavía es más importante señalar el sentido de estos errores, ya que los suelos

mité efectuar rápidamente un gran número de determinaciones, que den una validez estadística al modelo de terreno que es necesario definir.

Será recomendable, con todo, seguir haciendo algunos ensayos Lambe. Analizando en más detalle los valores individuales de la población ensayada, parece que los errores cometidos en la calificación de los suelos, mediante la aplicación del criterio de la humedad inicial no son aleatorios, sino que afectan a muestras que se sospecha que tienen una composición especial, bien por un alto contenido salino, o bien por la presencia de especies mineralógicas de arcilla poco usuales. La ejecución de unos ensayos Lambe, en cada caso, nos puede advertir si estamos en esas circunstancias.

TABLA 1

$$\begin{aligned}
 \text{PHL (kg/cm}^2\text{)} &= -0.12236 + 0.035271 * \text{Límite Líquido} \\
 &\quad (R = 0.54) \\
 \text{PHL (kg/cm}^2\text{)} &= 0.16781 + 0.16225 * \text{Humedad inicial} \\
 &\quad (R = 0.63) \\
 \text{PHL (kg/cm}^2\text{)} &= -0.07443 + 0.14168 * (\text{Hum. inic.})^0.9 * \text{Densidad} \\
 &\quad (R = 0.65) \\
 \text{PHL (kg/cm}^2\text{)} &= 0.67197 + 3.9693 * (\text{Hum. inic.} / \text{Lím. líquido}) \\
 &\quad (R = 0.29) \\
 \text{PHL (kg/cm}^2\text{)} &= 0.47818 + 0.04529 * \text{Límite plástico} \\
 &\quad (R = 0.32)
 \end{aligned}$$

es ya francamente peligroso, e incluso valores poco superiores a 0.5 kg./cm² ya pueden producir algunos daños, se considera que el límite inferior de los suelos peligrosos, según el ensayo Lambe, es el de PHL=1.6 kg./cm².

De acuerdo con las correlaciones de la Tabla 1, este valor corresponde a un límite líquido de 48.8, una humedad inicial de 8.827% y a un valor del parámetro compuesto de la correlación que figura en tercer lugar, de 11.818. No nos ocupamos más de las dos últimas correlaciones, que tienen un coeficiente de correlación demasiado bajo.

De esta manera, podemos pensar que una alternativa al ensayo de Lambe es efectuar la determinación de los parámetros indicados, lo cual es evidentemente más sencillo que

peligrosos dados por no peligrosos, es decir, los errores del lado de la inseguridad, vienen a ser el doble con la utilización del límite líquido que con cualquiera de los otros dos indicadores. También hay que señalar que, aun cuando el coeficiente de correlación resultó algo mejor para el indicador compuesto, esta superioridad no queda confirmada en esta comprobación. Como, por otra parte, es más complicado el obtenerlo, pues es necesario efectuar la operación de apisonado, podemos concluir que, entre los indicadores ensayados, la humedad inicial resulta ser el más exacto y también el más práctico.

En efecto, dicha humedad es simplemente, como ya se ha dicho, la humedad higroscópica con humedad relativa del 50% que puede deter-

Medidas correctoras

En ciertas formaciones, las arcillas expansivas se presentan como estratos delgados, del orden de decímetros. Coinciden estos casos, con frecuencia, con una gran expansividad, al tratarse de capas de mineralogía especial, por ejemplo, bentoníticas. Esto ocurre, por ejemplo, en los alrededores de Madrid. En estos casos estos materiales deben ser apartados.

Pero otras muchas veces todo el terreno es expansivo, y resulta difícil y costoso prescindir de él. Se impone llegar con él a un pacto.

Las medidas que en este caso podemos poner en práctica pueden dividirse en tres grupos:

– Cargar. Puesto que el terreno tiene la capacidad de desarrollar una presión de hinchamiento limitada,

si le aplicamos una carga equivalente, ya no podrá hinchar. Este es evidentemente un procedimiento válido, pero dichas presiones a veces son elevadas, y no resulta fácil producirlas, sobre todo en el caso de las carreteras. Un firme con gran espesor de subbase puede llegar a producir 400 g/cm² y son frecuentes presiones de hinchamiento de más de dos kg/cm². No hay duda, con todo, de que una carga disminuye mucho el levantamiento, y que, en el caso de terraplenes, construidos con materiales que no sean expansivos, pero sobre terreno de esta clase, si que es muy posible que el peso de un relleno de moderada altura contrarreste en su totalidad o en su mayor parte la capacidad de levantamiento del

beneficio mucho mejor que cualquier otro método.

En determinados casos, se pretende obtener una protección absoluta, dentro de lo realizable. Son los casos de protección con membranas impermeables de muy diversos tipos. Llevando el procedimiento a sus últimas consecuencias, se llega a la "encapsulación" idea muy antigua que se ha aplicado muchas veces con éxito suficiente para demostrar sus posibilidades, pero no para decidir su empleo generalizado.

Sin duda, el progreso en la fabricación de membranas, cada vez más resistentes al punzonamiento y al desgarro, parecen conceder progresivamente más posibilidades al método, que consiste en crear una es-

Desde hace muchos años, se ha venido observando en Andalucía que una capa relativamente pequeña de "albero" casi anula los movimientos estacionales del terreno. "

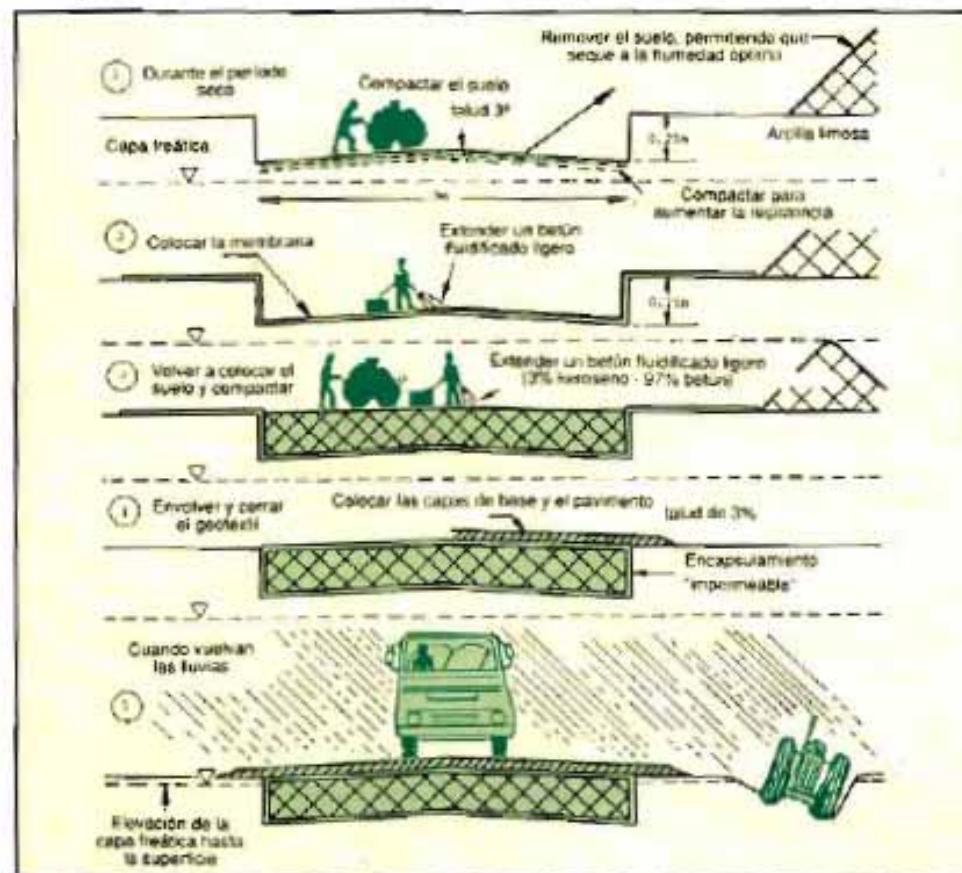


Fig. 4: Secuencia de construcción de encapsulamiento con membrana para controlar el hinchamiento de la explanada (FHWA, 1989)

terreno de apoyo.

— **Proteger.** El segundo grupo de medidas que se pueden tomar se basa en que los hinchamientos son consecuencia de un aumento de humedad. Si éste se evita, no habrá hinchamientos.

Esta solución resulta casi imposible en términos absolutos, ya que las transferencias de humedad se efectúan de muchas maneras distintas, incluso a través del estado de vapor. Sin embargo, en la práctica, este es el procedimiento más sencillo, y de una eficacia generalmente muy aceptable, con una relación coste/ben-

eficio de subbase de terreno expansivo, pero encapsulado por arriba y por abajo en la membrana. El espesor de esta subbase debe ser el suficiente para que su peso coante la expansividad del terreno subyacente. De cuando en cuando vemos publicado algo sobre algún nuevo tramo construido con esta técnica, siempre en plan experimental, sin que parezca que llegue el despegue, a pesar de que la Federal Highway Administration de los Estados Unidos le ha dedicado cierta atención.

La protección con suelo no expansivo

Pero hay otras protecciones más modestas que sí han alcanzado difusión. No tratan de buscar una impermeabilidad absoluta, pero sí producir una amortiguación importante en las transferencias de humedad que reduzca a términos tolerables los movimientos. De esta manera, se obtiene, como antes hemos dicho, una relación coste-beneficio excelente, y ello por lo siguiente: siendo las arcillas expansivas de naturaleza muy impermeable, los efectos estacionales deberían penetrar muy poco en ellas. Si penetran hasta profundidades suficientes para que los levantamientos sean grandes, es por el agrietamiento y microfisuración de estas arcillas, que se produce durante un período de sequía. Reduciendo esta desecación, dicha permeabilidad secundaria disminuye a su vez, con lo cual la mejora es grande con relación a los medios empleados.

Desde hace muchos años, se ha venido observando en Andalucía que una capa relativamente pequeña (por ejemplo, de treinta a cincuenta centímetros) de "albero" casi anula los movimientos estacionales del terreno, y también ha demostrado su eficacia la zahorra, siempre que sea sucia, de

El progreso en la fabricación de membranas, cada vez más resistentes al punzonamiento y al desgarro, parecen conceder progresivamente más posibilidades al método de "encapsulación". "

modo que sus finos sean suficientes para llenar totalmente los huecos. Y se había llegado a la conclusión de que el mecanismo reseñado tenía que ser la causa de la mejora, ya que la carga que tales espesores de tierra produce es totalmente insuficiente para explicarla.

Pero, recientemente, una extensa investigación llevada a cabo en la India ha venido a corroborar esas ideas, según se ha presentado en el Congreso sobre Arcillas Expansivas que tuvo

se logra actuando a mano sobre un tornillo para compensar la deformación del anillo dinamométrico.

Para su empleo en España, no hay que tomar estas especificaciones como una regla definitiva. Reflejan las características de unos suelos de la India que "han ido bien" pero, aparte de que los suelos expansivos y el clima son distintos, también nosotros podemos tener suelos CNS diferentes. El ejemplo más claro es el del albero, que no cumple las especifica-

La resistencia a la compresión simple de una probeta de suelo, compactado con la humedad óptima y hasta la densidad máxima Proctor, debe ser igual o mayor a 0.1 kg/cm^2

Granulometría

Arcilla (menor de dos micras)	15 a 20%
Limo (0.06 a 0.002 mm)	30 a 40%
Arena (2.00 a 0.06 mm)	30 a 40%

Límites de Atterberg

Límite líquido	30 a 55
Índice de plasticidad	15 a 30

la superficie del suelo expansivo y se regará de modo que penetre la humedad unos quince centímetros.

Estabilización

Por último, otro posible recurso para luchar contra los efectos del hinchamiento es la estabilización con aditivos. De los muchos que se han ensayado, parece que el único que

lugar en Nueva Delhi en diciembre de 1987. La conclusión es que la forma más práctica de luchar contra esta clase de fenómenos es una protección con un suelo coherente no expansivo (Coherent Not Swelling, CNS, en las siglas que han acuñado y que suelen emplear). Una idea nueva sobre su forma de actuación es la de la importancia que tiene el que tenga una cohesión apreciable, ya que este material, en el contacto con el suelo expansivo, tiende a evitar, con su resistencia a la tracción, la iniciación de la grieta.

Los resultados de la investigación mencionada han cristalizado en unas especificaciones tentativas para los materiales CNS, que son las siguientes: (Ver A y B).

Cohesión

La resistencia a la compresión simple de una probeta de suelo, compactado con la humedad óptima y hasta la densidad máxima Proctor, debe ser igual o mayor de 0.1 kg/cm^2 .

Prestón de hinchamiento

Suelos que tengan un límite líquido mayor de 55, y un contenido de arcilla mayor del 25% podrán ser aceptados como CNS siempre que desarrollen una presión de hinchamiento menor de 0.1 kg/cm^2 . Esta presión se determinará con una Norma india cuyos rasgos principales son: muestra pulverizada y completamente seca, compactación hasta alcanzar la densidad del terreno natural e inundación en condiciones de cambio de volumen nulo, lo que

TABLA 3

Presión de hinchamiento kg/cm^2	Espesor recomendado del suelo CNS para obtener levantamiento nulo (cm)
0.5 a 1.5	75 a 85
2.0 a 3.0	90 a 100
3.5 a 5.0	105 a 125

caciones reseñadas y que es comprobadamente excelente. Pero siempre esas especificaciones son una indicación valiosa que tampoco debemos despreciar.

En cuanto al espesor de la capa de material CNS, hay que decir que la investigación de referencia ha sido efectuada con el fin de resolver los problemas de acequias y canales, y no hay indicación de espesores convenientes para carreteras. Sin embargo, daremos aquí las recomendaciones para canales, que algo significan, por analogía. Los espesores recomendados varían con la presión de hinchamiento, determinada como antes se ha dicho.

Cuando la presión de hinchamiento es menor de 0.5 kg/cm^2 , no es necesaria esta protección.

En el caso de trincheras, la caja deberá tener la sobreexcavación necesaria para colocar el espesor necesario de CNS, más treinta centímetros para el perfilado. La colocación del CNS debe hacerse inmediatamente después del perfilado de la caja. Hasta ese momento, deberá conservarse la explanación con un metro al menos de resguardo respecto al perfil definitivo. Antes de la colocación del CNS, se escarificará

ha resultado práctico es la cal, que ha sido empleada en obras muy importantes, como, por ejemplo, en el aeropuerto de Dallas, tanto para las pistas como para los aparcamientos.

En España hay que decir que se ha empleado poco, y con resultados no muy concluyentes. Esto puede deberse a varias causas de significado muy diferente. Una de ellas puede ser el que el efecto de la cal, que está demostrado en muchas ocasiones, aún con dosis tan bajas como el 2% en peso, se debe en gran parte al cambio de base de la arcilla, del sodio, que confiere propiedades muy expansivas, al calcio, que restringe mucho la actividad. Pero dado que las arcillas españolas suelen ser cárnicas, es claro que tal efecto estabilizador no puede presentarse. Otros efectos, de forma de actuación menos clara, pueden ser la elevación del pH y la coagulación de las partículas de arcilla, formando microagregados.

La forma de aplicación de la cal tiene muchas variantes. La forma que cuenta con experiencia mejor documentada es la mezcla y posterior apisonado. La operación se hace con arados rotatorios de gran potencia, pues se ha comprobado que el

grado de pulverización de la arcilla es importante.

Pero otras muchas veces se procede a inyectar lechada de cal en el terreno; a veces sin presión, incluso vertiéndola en surcos, y otras veces a través de tubos hincados en el terreno, y con presiones altas, hasta llegar a la hidrofracturación. No es nada claro cómo actúa la lechada así inyectada, y tampoco se han publicado pruebas muy concluyentes de su eficacia, pero el procedimiento está bastante extendido y ha motivado el que se construyan equipos de maquinaria específicamente destinados a su aplicación, por lo que resulta difícil pensar que no tiene utilidad.

Se ha dicho muchas veces que, si bien la cal inyectada de ese modo queda tan sólo situada a lo largo de las "diáclasis" así producidas, luego el lión calcio impregnaba la masa por difusión, pero investigaciones cuidadosas han demostrado que ese proceso es extremadamente lento y no puede explicar los hechos. Lo que si parece posible es que el agua que entra en el terreno si lo hace a través de las mismas grietas y fisuras por donde ha entrado la cal, por lo que cuando llega al contacto con la arcilla, está ya saturada con la composición de la lechada.

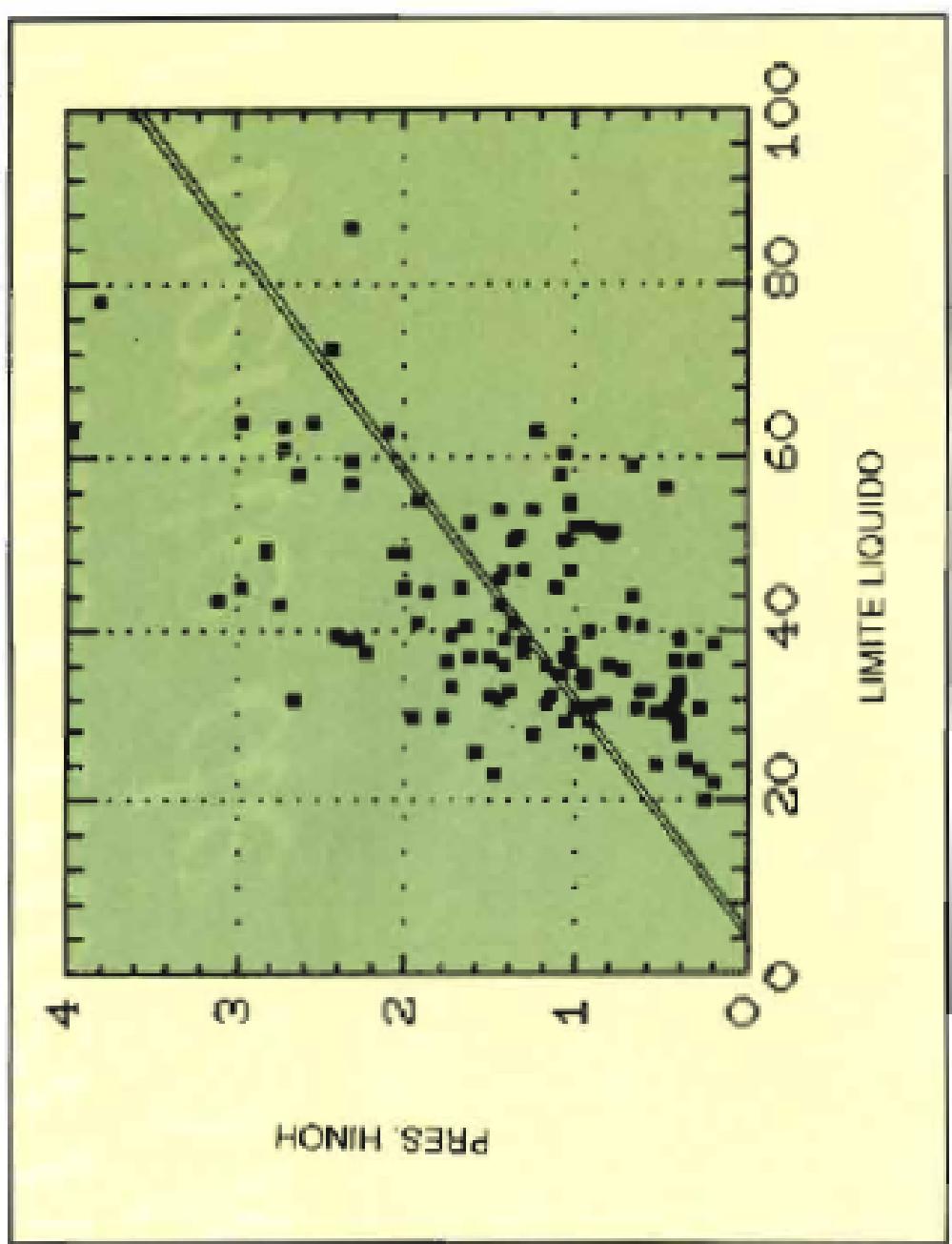


Fig. 8. Límite líquido

cion calcio y por ello produce un hinchamiento menor. Esto enlaza con una investigación de Morgenstern, en la que demostró que una muestra hinchaba más cuando se la ponía en contacto con agua pura, que cuando se la pone en contacto con una solución salina de composición parecida o igual a la del agua que impregna sus poros.

En todo caso, el suelo estabilizado con cal puede considerarse como un suelo CNS, y, al pensar en el peso necesario, habremos de recordar, igualmente, a los necesarios para el CNS.