

LOS MATERIALES ALTAMENTE POROSOS Y SU DIFERENCIACIÓN GEOTÉCNICA ENTRE TALUDES Y LADERAS: LAS TIERRAS DE DIATOMEAS

HERNÁNDEZ GARVAYO, J. Carlos. ICCP. D.E.A. Ingeniería Civil. Geotécnica del Sur, S.A.
OCETE RUIZ, Isidro. Ldo. C. Geológicas. D.E.A. Ingeniería Civil. Geotécnica del Sur, S.A.
RUBIO GARCÍA, Francisco. ICCP. D.E.A. Ingeniería Civil.
HERNÁNDEZ DEL POZO, J. Carlos. Dr. ICCP. Universidad de Granada.

RESUMEN: Las tierras de diatomeas o diatomitas constituyen un recurso mineral biogénico relativamente abundante. La complejidad del mineral y su amplio espectro de aplicaciones abren interesantes posibilidades para el desarrollo de técnicas de análisis, poco conocidas en el país. En general, corresponde a un suelo de origen vegetal, compuesto mayoritariamente de sílice. Este suelo, que tiene un comportamiento geotécnico fuera de lo común y puede encontrarse en varias zonas del país, no cuenta con estudios concluyentes a nivel nacional. El objetivo general del trabajo es determinar las propiedades geotécnicas de este suelo, tanto en condiciones naturales como compactadas. Para estados de muestra inalterada, y dado el elevado índice de huecos, la influencia de la fricción y el encaje entre partículas deberá de presentar un carácter secundario, donde la cementación propia de las diatomitas, generan el principal fenómeno resistente de los materiales. Sin embargo, en terraplenes, cuando el material ha sido remoldeado los suelos responden a materiales que funcionan como suelos de características geotécnicas muy desfavorables.

1 INTRODUCCIÓN

Cada vez es más frecuente, durante la construcción de obras lineales, encontrarse con el problema de la necesidad de enviar a vertedero volúmenes muy importantes de materiales que no cumplen los requisitos mínimos exigidos en las normativas existentes. Esta situación suele verse agravada por la inexistencia de vertederos adecuados y los requisitos medioambientales.

La situación reflejada se pone de manifiesto en el área entre Lucena y Monturque, en Córdoba. Donde, nos hallamos ante unos barros de diatomeas, con características de roca blanda, que en los ensayos realizados han dado resultados tan significativos para la alarma, como su baja densidad natural o el valor del ensayo Próctor, alternativamente, con valores próximos a una tonelada por metro cúbico y con límites líquidos superiores a cien.

2 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS DIATOMEAS Y LAS ROCAS DIATOMÍTIICAS

La Diatomita, Tierra de Diatomeas o Kieselguhr, corresponde a un suelo de origen vegetal formado por "crústulas" microscópicas compuestas mayoritariamente de sílice. Son algas de formas y tamaños variados. Hay aproximadamente 5.000 especies de Diatomea, todas ellas compuestas por una pared celular transparente, con una capa externa traslúcida de sílice semejante al cristal y una capa interna de pectina (sustancia neutra que forma soluciones coloidales).

Cuando la célula muere todo el contenido orgánico del protoplasto y de la pared celular se destruye, con excepción de las valvas silicosas, las cuales generalmente van a depositarse al fondo de las aguas, para formar al cabo de siglos grandes depósitos de tierra de diatomeas. Esos depósitos se denominan diatomitas.

Las cualidades de la tierra de diatomeas son a la vez extrañas y variadas: es agente de purificación, filtrado, abrasivo, material aislante y a prueba de sonido.

La Diatomita pura está compuesta por ópalo, que en caso de ser suficientemente antigua pasa a cuarzo, tratándose en ambos casos de polimorfos. El mineral por lo general es de coloración clara, blanquecino, con una densidad aparente de 0,2 a 0,6 gr/dm³ y de gran porosidad.

3 ENTORNO GEOLÓGICO

Hace más de un siglo se definieron con el nombre de "moronitas", en referencia a la localidad de Morón de la Frontera, en Cádiz, los sedimentos miocenos de la Cuenca del Guadalquivir que incluyen gran cantidad de diatomeas.

Las asociaciones de diatomeas en estas rocas están constituidas fundamentalmente por especies planctónicas de aguas templado-cálidas que aparecen preferentemente en áreas marinas con corrientes ascensionales.

4 LAS DIATOMITAS EN EL ENSAYO DE COMPACTACIÓN. PRÓCTOR NORMAL

La compactación es la mejora artificial de las propiedades mecánicas de un suelo. Este método aumenta la resistencia, disminuye la capacidad de deformación y el suelo adquiere inalterabilidad frente a agentes externos.

Todos los suelos compactados constituyen un sistema de tres fases (sólida, líquida y gaseosa). Dichas fases pueden variar, teniendo desde suelos perfectamente secos (difícilmente encontrados en estado natural) a suelos totalmente saturados de agua (estado imposible de obtener debido a que no se puede expeler todo el aire mediante la compactación). Las partículas sólidas conforman un esqueleto dentro el sistema, dichas partículas están rodeadas por el fluido de poro compuesto por agua, vapor de agua y aire.

El proceso de la compactación es la densificación rápida de un suelo, sin pérdida de humedad, donde se produce una disminución del volumen de los huecos que contienen aire y un acercamiento de las partículas provocado por la energía de dicha compactación.

En la compactación además de variar el contenido de aire del suelo, también varían otras características como puede ser la resistencia mecánica, la deformabilidad, la permeabilidad, etc. Estas características se modifican debido a la disminución de relación de vacíos que se produce a consecuencia de la densificación de la estructura.

Los valores con los que se cuentan de las distomitas estudiadas son los procedentes de la realización de Próctor normales ejecutados a muestras obtenidas en calcatas. En la figura 1 se muestran los resultados conseguidos a partir de dicho ensayo llevado a cabo en materiales que geológicamente se han clasificado en campo como Margas Diatomíticas.

Los valores obtenidos definen un valor medio de la densidad máxima para el Próctor Normal de 1.32 gr/cm^3 , notablemente bajo con respecto a los valores que normalmente se definen para otros materiales.

La primera aproximación que se puede realizar de esta representación es la importante variabilidad existente de valores de densidades máximas donde la gran mayoría de las muestras ensayadas quedan definidas por debajo del valor preceptuado de 1.45 gr/cm^3 para su clasificación como suelos Tolerables.

En general (figura 2) se puede observar que para densidades máximas bajas y medias, las curvas obtenidas indican una clara asimetría con respecto a su vértice, generando una forma roma y achadata. Esta tendencia tiende a suavizarse hasta desaparecer para las curvas con densidades máximas elevadas. Este fenómeno se debe a la etapa donde la incorporación de agua forma en la superficie de las partículas sólidas una capa fina solidaria a éstas con una elevada viscosidad (hidratación) y la correspondiente a la incorporación de agua que aumenta la capa descrita, donde parte de la superficie que rodea a las partículas actúa como lubricante, facilitando el reacomodamiento de las mismas que han sido compactadas en una estructura más cerrada sin haber excluido todo el contenido de aire (lubricación). Estos fenómenos, en el sector de la rama húmeda del ensayo, están definidos por la existencia de agua en exceso que causa el hinchamiento de la masa del suelo sin cambiar el contenido de aire, junto con la etapa de "saturación" donde virtualmente todo el aire es desplazado y el suelo se torna saturado.

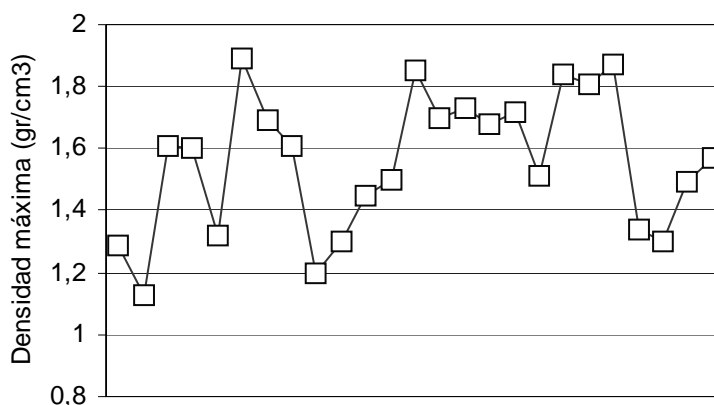


Figura 1

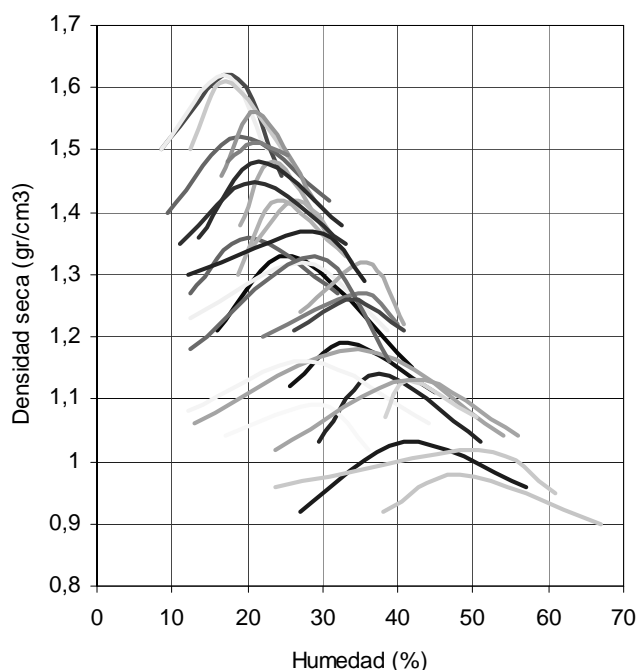


Figura 2

En el proceso de compactación evidentemente no se logra la saturación completa del suelo y la curva de compactación a la derecha de la humedad óptima tiende a ser asintótica a la curva de saturación.

En cualquier caso, la teoría basada en las tensiones efectivas para la forma de la curva de compactación es más certera que las teorías que involucran conceptos de viscosidad y lubricación, aunque entendemos que estos términos no deben de ser excluidos totalmente sino más bien ser complementarios.

Es razonable suponer que suelos con bajos contenidos de humedad están formados por terrenos de partículas conglomeradas por la tensión efectiva causada por la capilaridad. Cuanto más seco está el suelo, más duros son los terrenos. El proceso de compactación intenta deforma esos terrenos pero terminar uniéndolos.

La dureza de estos terrenos decrece con el incremento del contenido de agua, achatando la curvatura de los meniscos formados por capilaridad, obteniendo mayor efectividad con el esfuerzo de compactación.

La oclusión de aire en la masa de suelo compacto provee una razonable explicación del límite de efectividad de una energía de compactación dada.

Con el incremento de agua, el proceso de compactación no logra eficientemente expeler el aire ocluido y la presión de aire de poro puede desarrollarse, resistiendo al esfuerzo de compactación.

La clara dispersión existente entre los valores de densidad máxima obtenida viene puesta de manifiesto en la figura 3.

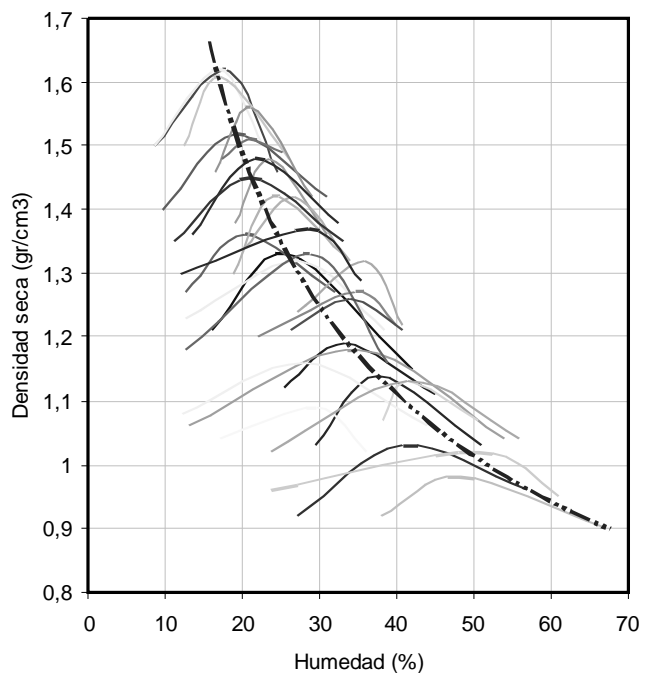


Figura 3

El proceso de compactación intenta deforma esos terrenos pero terminar uniéndolos.

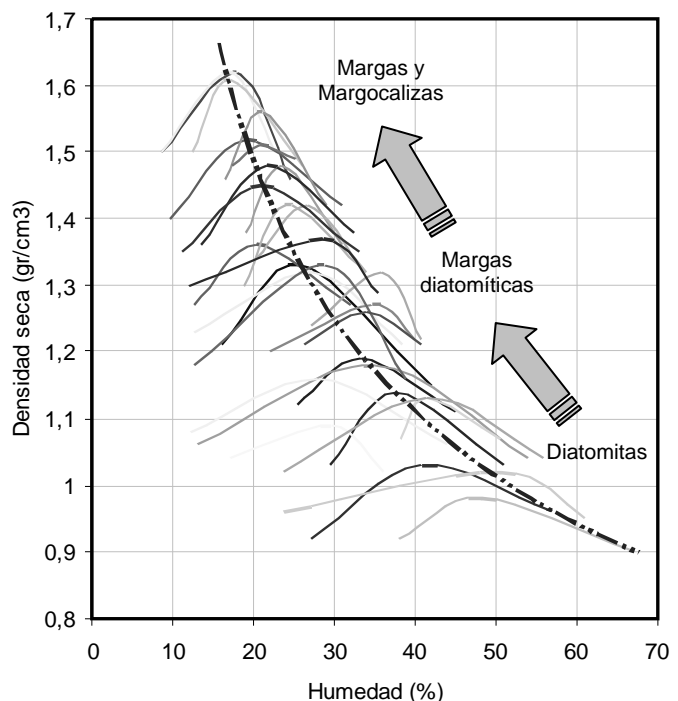


Figura 4

La distribución potencial obtenida reparte los valores de densidad máxima entre valores inferiores a la unidad y ligeramente superiores a 1.6 gr/cm³. Es difícil achacar esta dispersión a fenómenos exclusivamente de variabilidad textural y debe de explicarse mediante diferentes composiciones de orden transicional entre extremos. Según esta interpretación parece lógico que nos encontramos ante unos materiales que varían su composición pasando desde la diatomitas poco contaminadas hasta llegar a materiales margosos y margocalizos quedando definidos entre ellos, como generalidad, las margas diatomíticas que participan de las características de ambos extremos (figura 4).

Esta definición se encuentra lógicamente condicionada por la composición química de los materiales y en especial por la componente cálcica y silícica, quedando la mayoría de los materiales definida por la componente cálcica-silícica, debiéndose estudiar según esta última característica (figura 5).

Esta diferenciación química entre los materiales definidos provoca además un diferente comportamiento frente al fenómeno de la compactación, dado que la densidad seca máxima y la humedad óptima depende del tipo de suelo.

Los mayores valores de las densidades secas máximas, asociados a humedades óptimas bajas, corresponde a los suelos granulares con finos, de naturaleza poco plástica. Los suelos arcillosos muy plásticos dan en cambio curvas relativamente romas y achatadas, con densidades bajas y elevadas humedades óptimas de compactación, generalmente poco definidas.

Este fenómeno queda puesto de manifiesto en la gradación observada en el gráfico de distribución de curvas Próctor, donde las curvas más verticales se localizan en la rama de densidades secas más elevada, mientras que las curvas achatadas se localizan en el lado opuesto.

Esta distribución se achaca a las siguientes causas:

- a.- Mayor componente granular en el sector que se define como margas y margocalizas, delimitan curvas más próximas a los materiales granulares.
- b.- Este carácter "pseudogranular" en comparación con la que presentan los suelos margo-diatomíticos y diatomíticos tiende a disminuir el carácter cohesivo de los materiales de mayor densidad máxima.
- c.- En ambos casos hemos de suponer, como se referirá más adelante, relativamente constante el componente de esmectitas.

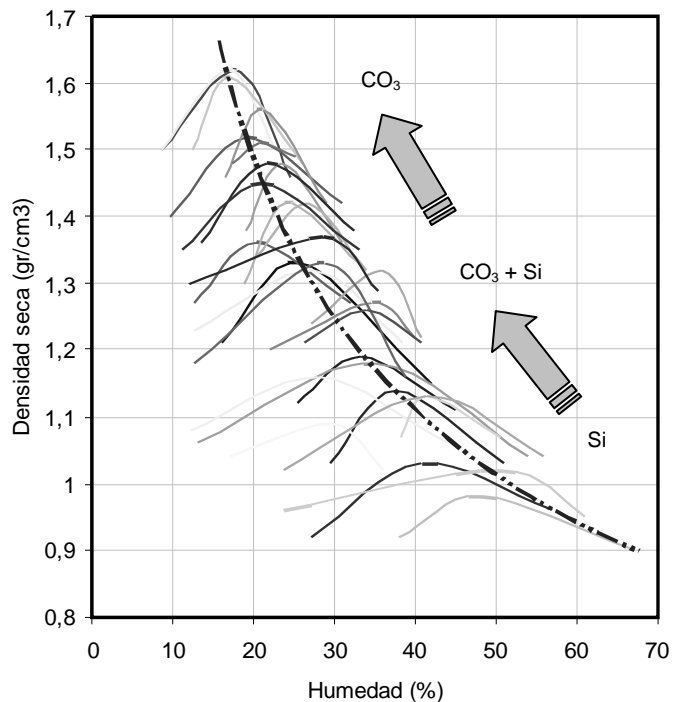


Figura 5

De este modo hemos de considerar como materiales diatomíticos propiamente dichos, los que se definen, en referencia al ensayo Próctor, con:

- Bajos valores de densidad máxima en general inferiores a 1.2 gr/cm^3 para el Próctor Normal. Ocasionalmente inferiores a la unidad.
- Elevadas humedades óptimas, en general entre el 30 y el 50%.

Podemos definir como curva típica para los materiales referidos como diatomíticos la presentada en la figura 6.

La primera consideración que se debe hacer de la "curva típica" es la clara asimetría entre las ramas seca y húmeda junto con un evidente "asintotismo" del sector húmedo con respecto a la curva de saturación del material.

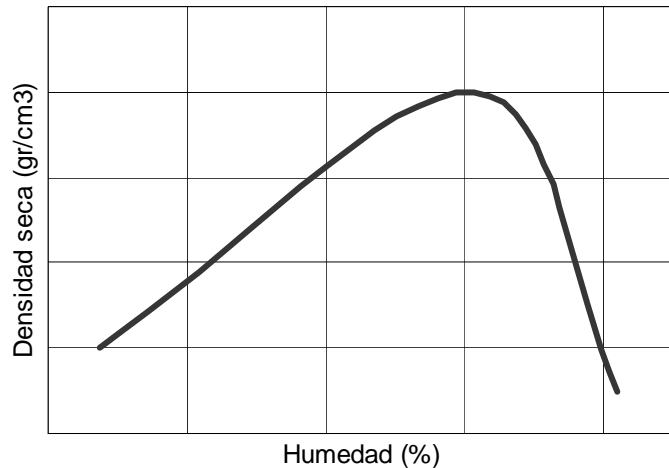


Figura 6

La característica más singular que se puede obtener de la representación precedente es sin ningún género de dudas, el elevado índice de poros existente.

Este elevado valor de "e" es sintomático de un suelo con un gran porcentaje de huecos frente al de sólidos y por consiguiente altamente compresible frente a presiones reducidas.

En general se puede afirmar que los materiales "lógicamente" diatomíticos presentan un índice de poros superior a 1.5 y aunque no es una característica exclusiva de estos materiales, es claramente discriminadora a la hora de diferenciarlos de otro tipo de materiales más comunes donde no es frecuente encontrar valores de e superiores a la unidad.

La forma de la curva obtenida de la compactación se debe de explicar por los conceptos de presión capilar y presión de aire de poro.

La primera aproximación a la curva realizada pasa por definir el gran rango de humedades existente en la rama seca en comparación con la húmeda, y la suave pendiente que define. Este fenómeno puede ser explicado por dos causas:

1. La propia definición física del concepto de humedad hace que en comparación con el peso de

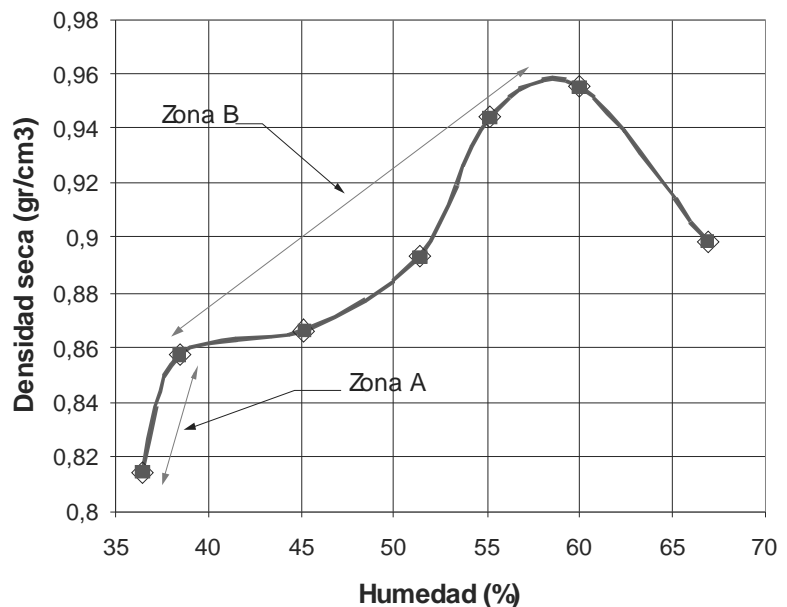


Figura 7

las partículas sólidas, cualquier incremento de aporte de agua, para suelos con un elevado índice de huecos, genere un elevado incremento de humedad, que en otros materiales sería poco apreciable.

2. Para los materiales que nos ocupan, en estado semiseco existe una clara resistencia a la compactación, debido a la existencia de efectos capilares que producen tensiones de tracción que generan una alta fricción causada por la gran curvatura del menisco capilar que se oponen al esfuerzo de compactación.

Al objeto de determinar, de una forma clara, el desarrollo y la forma de la curva de la rama seca se desarrolló un ensayo de contraste sobre una muestra pura, cuyo resultado se aprecia en la figura 7.

El sector A (figura 7) está definido por la existencia de un área de la curva claramente más pendiente que el resto de la rama seca. Esta anomalía viene inducida por la existencia de fenómenos de colapso al aplicar la carga de compactación en estados muy secos. Efectivamente, a bajas humedades estos suelos reciben el agua adaptándose a los granos pero sin llegar a definirse meniscos de contacto. Esta situación hace que a pequeños presiones de compactación las partículas de suelos se agrupen rápidamente reduciendo el índice de vacíos y aumentado por ende la compacidad (figura 8).

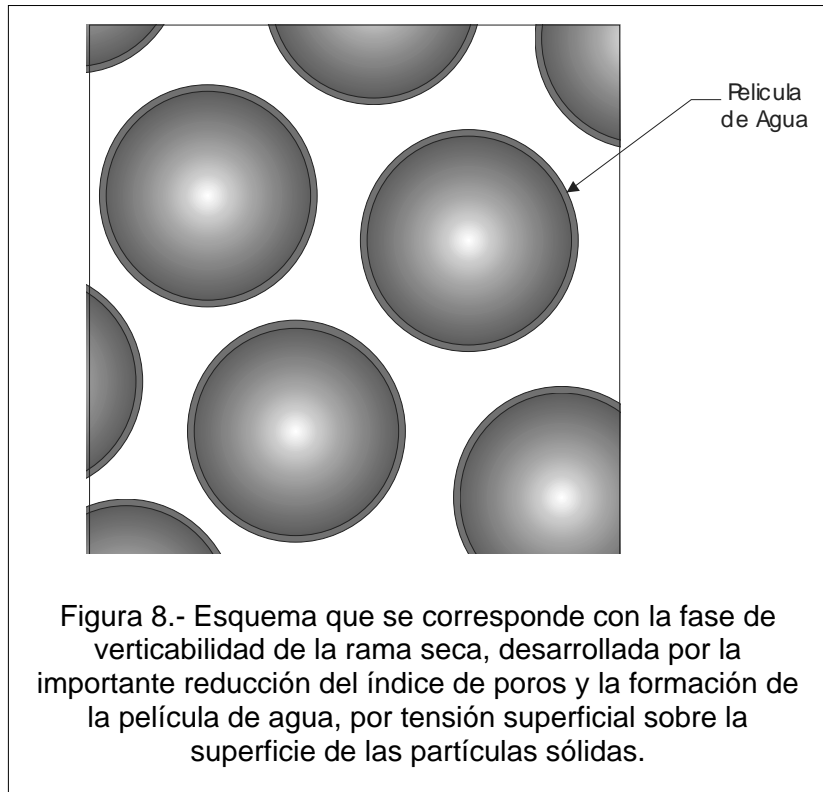


Figura 8.- Esquema que se corresponde con la fase de verticabilidad de la rama seca, desarrollada por la importante reducción del índice de poros y la formación de la película de agua, por tensión superficial sobre la superficie de las partículas sólidas.

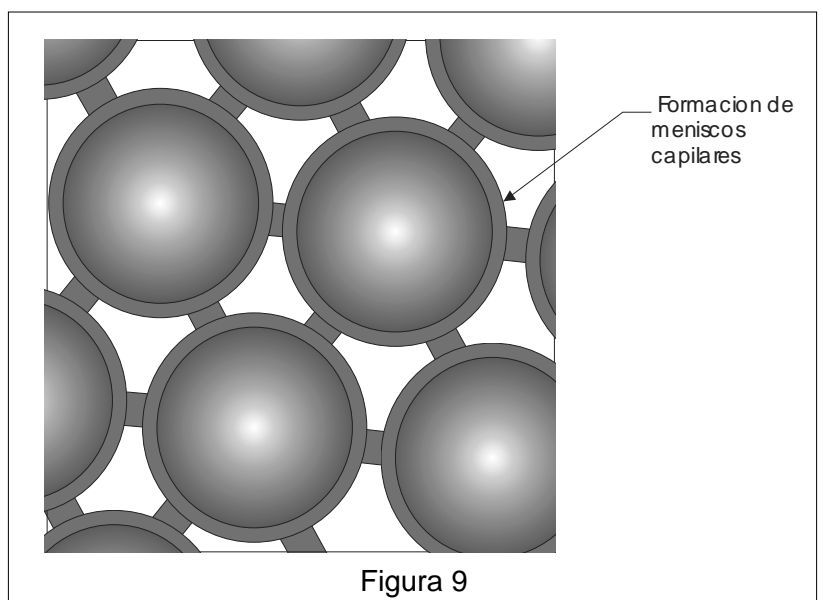


Figura 9

La base B (figura 7) se encuentra, como se ha referido anteriormente, caracterizada por la existencia de una recta de pendiente suave y prolongada, caracterizada por la existencia de tensiones provenientes de la formación de meniscos que se oponen a la compactación (figura 9).

Al final de la curva hasta llegar al punto de densidad máxima, se puede apreciar un incremento de la pendiente característico de un proceso de agotamiento de los fenómenos de tracción, desarrollados por los meniscos capilares. Efectivamente el menisco se achata y no puede resistir el esfuerzo de compactación hasta alcanzar el máximo referido.

La rama húmeda está caracterizada por un descenso muy brusco de la pendiente por disminución de la densidad conforme

aumenta la humedad, a partir del punto óptimo. Este descenso es debido al contenido de aire atrapado y al crecimiento de aire de poro, el cual reduce la efectividad de la compactación (figura 10). Dado el elevado valor de índice de huecos esta presión llega a ser muy importante produciendo la brusca caída de la curva.

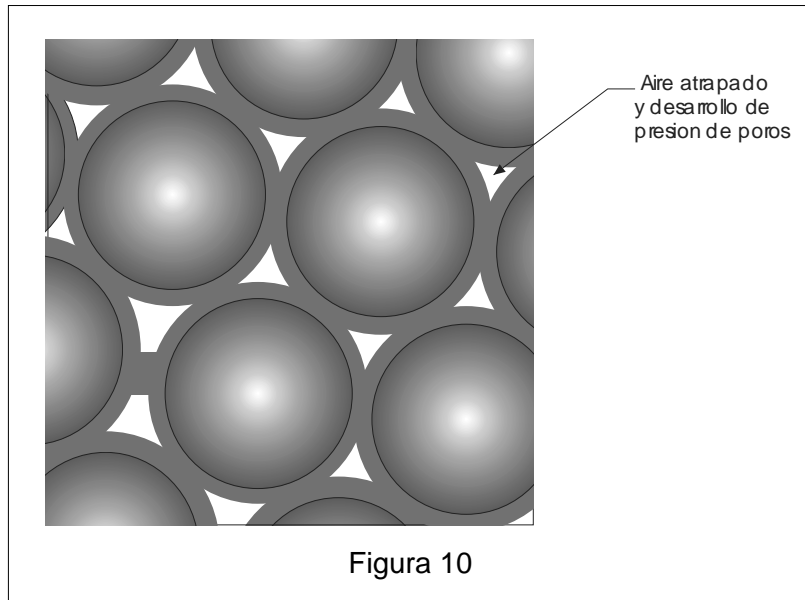


Figura 10

5. PRÓCTOR MODIFICADO

El método más empleado, actualmente es el denominado ensayo Próctor Modificado, en el que se aplica mayor energía de compactación que el estándar siendo el que está más de acuerdo con las condiciones actuales de compactación.

Los valores que se han obtenido para este ensayo se encuentran en la figura 10, donde se definen un valor de densidad máxima medio de 1.56 gr/cm^3 para una humedad media del 20.97%.

En la figura 11 se pone de manifiesto las curvas

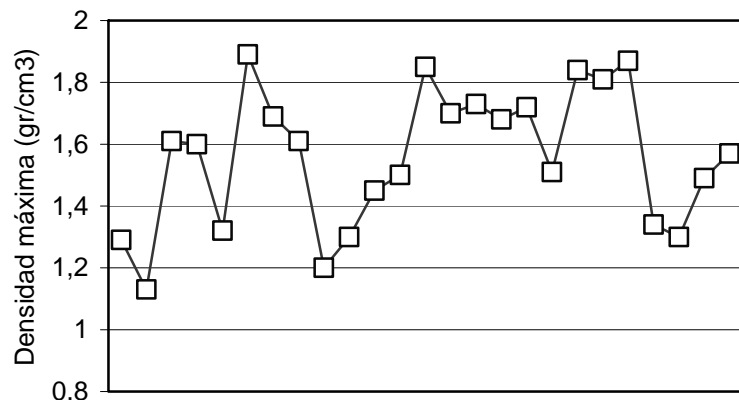


Figura 11

obtenidas para los ensayos Próctor Modificado realizados, junto con la línea de tendencia definida.

La primera aproximación que se puede obtener de los resultados comparativos obtenidos es el lógico incremento de valores de densidad máxima del Próctor Modificado con respecto al Normal. Esta situación viene aparejada además por la reducción de los valores de la humedad óptima para los ensayos del Próctor Modificado. Este incremento de la compactación es derivado directamente de la mayor energía de compactación utilizada (figura 12).

Al desarrollar las curvas de tendencia de cada uno de los ensayos se han obtenido resultados que definen dos curvas prácticamente paralelas y de tendencia homogénea que definen igualdad de condiciones sólo influenciadas por la energía de compactación utilizada.

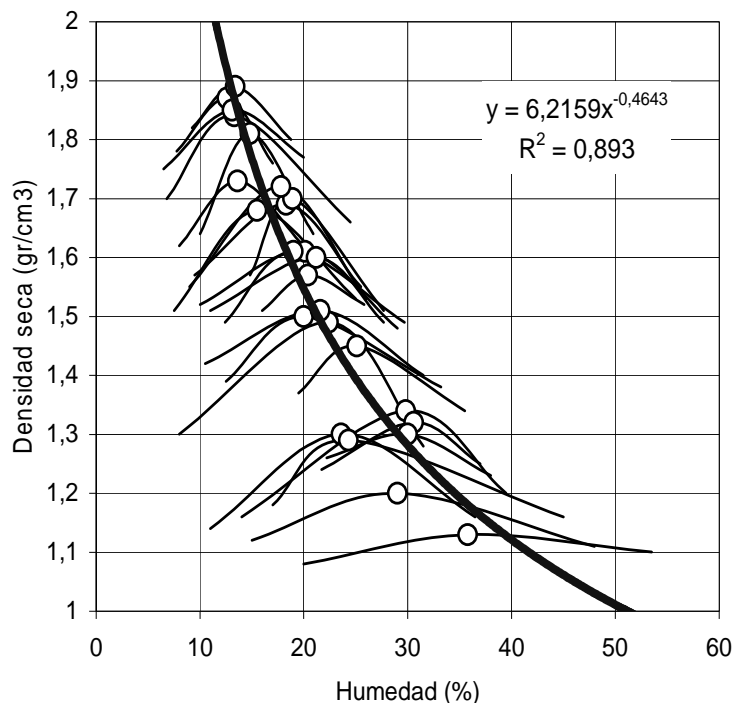


Figura 12

Estos valores, de tendencia relativamente homogénea, definen unos materiales muy susceptibles a los incrementos de energías de compactación. Estos incrementos son los siguientes:

	Máxima densidad obtenida (gr/cm ³)	Mínima densidad obtenida (gr/cm ³)	Incremento densidad obtenida (gr/cm ³)	Máxima humedad obtenida (%)	Mínima humedad obtenida (%)	Incremento humedad obtenida (%)
Próctor Normal	1,62	0,98	0,64	50,6	16,9	33,7
Próctor Modificado	1,89	1,13	0,76	35,8	12,6	23,2
Porcentaje de incremento	16,7%	15,3%		-29%	-25%	

Tabla 1.

Las muestras que se ensayaron definen unos “suelos” extremadamente susceptibles a la energía de compactación, de tal forma que el optar por un Próctor Modificado representa incrementos en los valores de la densidad máxima entre el 15.3 y 16.7%, respecto al Próctor

Normal. Esta situación es de extrema importancia, dado que un suelo, como el presente, donde el índice de poros es muy elevado, es condición vital aplicar una elevada energía de compactación que lo reduzca.

Este sistema de utilizar el Próctor Modificado frente al Normal lleva aparejado una reducción entre el 29 y el 25% de la humedad necesaria para alcanzar el punto de densidad máxima. Esta situación no sólo mejora las consideraciones puramente económicas de ejecución en obra debido al menor gasto en riegos sino que presenta un importante aspecto técnico. Un material tan extremadamente susceptible, como se refirió anteriormente, a los cambios de humedad, sobre todo en las proximidades del punto de densidad máxima, sufre procesos de colapso muy importantes en el momento que se alcanza la rama húmeda tanto del Próctor Normal como Modificado. Se requeriría una fineza extrema para definir la humedad aplicada en obra al objeto de no alcanzar la rama húmeda. Esta situación nos hace decantarnos por la necesidad de realizar las compactaciones siempre del lado de la rama seca evitando acumulaciones de aguas de riego en algún sector que reduciría la capacidad de compactación en valores muy importantes.

6 ENSAYO DE LA RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA (C.B.R.)

No basta con especificar el grado de compactación de un suelo. Dos suelos diferentes alcanzarán no sólo densidades secas y humedades óptimas diferentes en el ensayo de compactación, sino que el material al estar constituido por partículas diferentes, tendrá un comportamiento en términos de ingeniería diferente. Por ello, se hace necesario un parámetro adicional que considere la capacidad de soporte del suelo en sí mismo para esas condiciones de compactación.

El ensayo C.B.R. mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número asociado a la capacidad de soporte.

Los ensayos de C.B.R. se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo determinado utilizando el ensayo de compactación estándar (o modificado).

Los ensayos de referencia con los que se ha trabajado a la hora de obtener el índice C.B.R. son los siguientes: Próctor Normal al 95 y 100%, y Próctor Modificado al 95 y 100%.

Los resultados obtenidos en referencia tanto al Próctor Normal como al Modificado se definen en la figura 13.

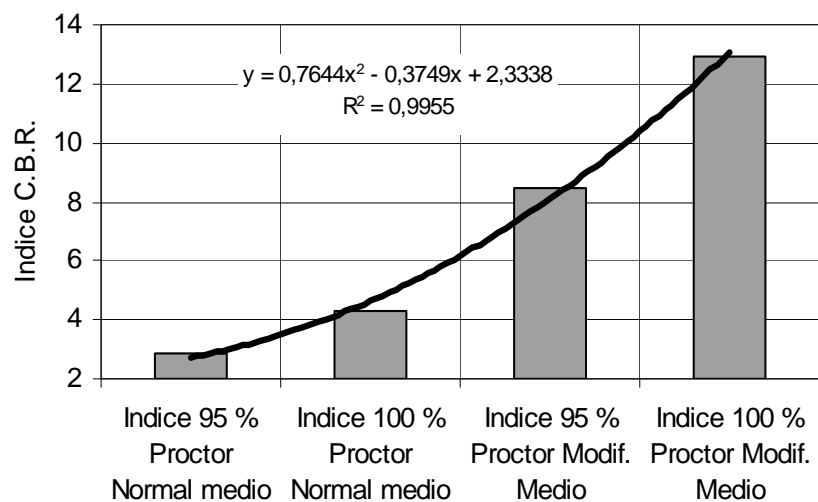


Figura 13

En este gráfico se puede apreciar el notable incremento que se produce en el índice C.B.R. si consideramos de referencia el Próctor Modificado frente al Normal.

Igualmente, se puede observar el incremento, en dicho índice, conforme se aumenta la energía de compactación de referencia.

Los materiales estudiados indican unos suelos que bajo condiciones de carga bajas denotan valores de índice C.B.R. bajos a muy bajos debido, como se ha comentado, a la existencia de un índice de poros muy elevado. Conforme aumentan los esfuerzos de compactación, las muestras ensayadas alcanzan valores de dicho índice elevados, creciendo de una forma polinómica, hasta alcanzar un punto donde el índice de huecos se ha disminuido notablemente y el incremento es mucho más reducido.

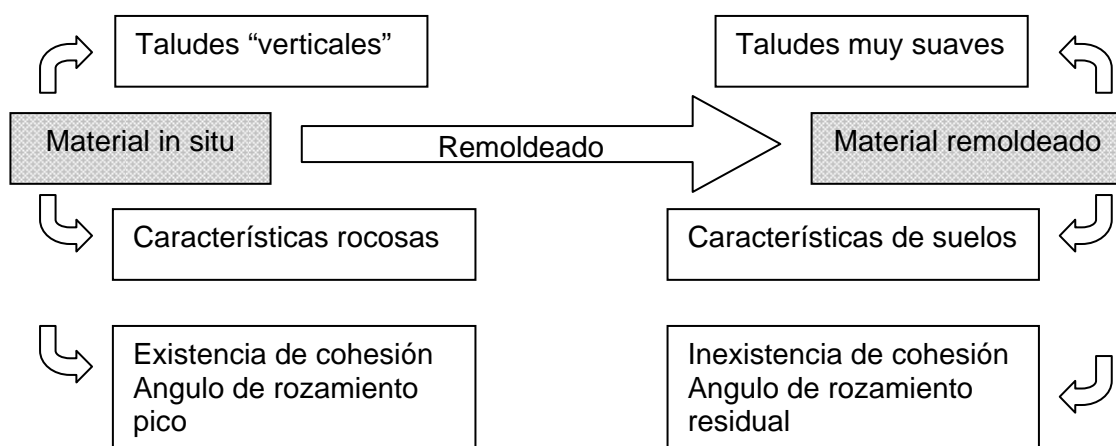
7 CONCLUSIONES

Con todos los datos expuestos hasta el momento podemos afirmar que nos encontramos frente a un material, que a todas luces, debe de ser clasificado como un suelo de tipo marginal, con unas connotaciones tan singulares que hace que de no proceder a su correcto estudio deba de ser retirado a vertedero.

Estos barros de diatomeas presentan unas características definidas principalmente por unas densidades máximas inferiores a la del agua y elevadísimas plasticidades, pero con unas características naturales in situ de roca blanda, que genera, en situaciones favorables, taludes muy verticales.

La situación descrita a lo largo del texto, define materiales remoldeados (terraplenes) de condiciones muy desfavorables, frente a taludes naturales de edad reciente prácticamente verticales. Esta controversia entre taludes naturales y valores de laboratorio debe ser explicada a la luz de la cementación que presentan los barros de diatomeas, en estado seco, y que desarrollan fenómenos de cohesión y le confieren características "pseudorocosos". Este matiz rocoso desaparece, en el momento que estas diatomeas se excavan y remoldean para ser utilizadas como suelos para terraplén.

De esta forma se puede establecer el siguiente esquema:



Esquema 1

Estos materiales, lejos de lo que pudiera parecer, se pueden localizar en amplias zonas coincidentes con los márgenes de la Cuenca del Guadalquivir, por lo que sería necesario un correcto estudio que pueda ser, en la medida de lo posible, extensible a otras zonas similares.

El campo de investigación que se plantea, al objeto de utilizar materiales caracterizados como "Marginales" es enorme. No debemos olvidar que gran parte de los materiales aflorantes en el entorno del sur nacional, se clasifican como suelos marginales.

Este campo, de teóricamente reciente desarrollo, presenta dos vertientes: el amplio campo de investigación geotécnica y el riesgo añadido que presenta su uso. Se abre un ámbito de futuro de dimensiones laborales desconocidas en el entorno de la ingeniería civil, que habrá de requerir de técnicos altamente especializados y de contrastada experiencia en todos los conjuntos que desarrolla la geotecnia.

8 BIBLIOGRAFÍA

DALLMEYER, R.M. y MARTÍNEZ-GARCÍA, E, (editores) (1990): Pre-Mesozoic Geology of Iberia. Ed. Springer-Verlag, Berlín, 416 pags.

GARCÍA-LLEYNÁNDEZ, M., LÓPEZ-GARRIDO, A.C., RIVAS, P., SANZ DE GALDEANO, C. Y VERA, J.A. (1980): Mesozoic paleogeographic evolution of the External Zones of the Betic Cordillera (Spain). Geol. Mijimb., vol. 59, pp.455-168.

GARCÍA-HEMÁNDEZ, M., LÓPEZ-GARRIDO, A.C., MARTÍN-ALGARRA, A., MOLINA, J.M., RUIZ-ORTIZ, P.A. Y VERA, J.A. (1989): Las discontinuidades mayores del Jurásico de las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas: análisis e interpretación de los ciclos sedimentarios. Cuader. Geol. Ibérica., vol, 13, pp-3552.

HERNÁNDEZ DEL POZO, J. C., OCETE RUIZ, I, BLANCO MARTÍN, J., Y HERNÁNDEZ GARVAYO, J.C. (2002): Análisis y usos de los residuos de la construcción de obras lineales: El caso de la Autovía Monturque-Lucena, Córdoba. Congreso Nacional de Ingenieros Consultores. Madrid, 21 y 22 de Octubre de 2002

HERNÁNDEZ GARVAYO, J.C. (2002): Los materiales diatomíticos: Estudio y caracterización geomecánica en las obras para la construcción de la Autovía de Monturque a Lucena, en Córdoba. Trabajo de investigación tutelada (Inédito)

MARTÍN-ALGARRA, A. (1987): Evolución paleogeográfica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética. Tesis, Univ. Granada, 1171 pags.

SANZ DE GALDEANO, C. Y VERA, J.A. (1991): Una propuesta de clasificación de las cuencas neógenas béticas. Acta Geológica Hispánica, vol. 26, pp.-205-227.

VERA, J.A. (1986): Las Zonas Externas de la Cordillera Bética. In: Geología de España, Libro Homenaje J.M. Ríos, Ed. Inst. Geol. Min. España, vol. 11, pp.-218-251.

VERA, J.A. (1988): Evolución de los sistemas de depósito en el margen ibérico de las Cordilleras Béticas. Rev- Soc. Geol. España, vol. 1, pp.-373-391.