Materiales yesíferos y su eventual utilización como relleno en terraplenes

Gypsum materials and its possible use as fill for embankments

Hernán Patiño Nieto
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Investigador ETSICCP – UPM.
Ignacio González Tejada
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos ETSICCP – UPM
Claudio Olalla Marañón
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Profesor Titular ETSICCP – UPM

RESUMEN

La utilización de materiales yesíferos en la construcción de terraplenes suele ser rechazada, debido a las incertidumbres existentes respecto a su comportamiento inapropiado originado por las deformaciones a largo plazo, causadas por las características físicas y químicas del material, por su solubilidad y por las posibles expansiones o colapsos de la estructura del suelo. En este artículo se incluye un resumen de las principales propiedades químicas de los materiales yesíferos, los resultados de un estudio experimental y algunas recomendaciones para su eventual utilización en la construcción de terraplenes. La etapa experimental se realizó con arcilla yesífera, yeso arcilloso y glauberita; con cada una de las muestras se realizaron pruebas de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado con probetas cuyas condiciones de humedad y densidad seca se ubicaban sobre cada una de las curvas de compactación; se estudió el comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo, el potencial expansivo, el colapso de la estructura y la rotura de partículas.

ABSTRACT

The use of gypsum materials in the construction of embankments is usually rejected due to the uncertainties regarding inappropriate behavior caused by long term deformations, originated by the physical and chemical characteristics of gypsum, its solubility and possible expansions or collapses of the soil structure. This paper summarizes the main chemical properties of gypsiferous materials, includes results of an experimental study and some recommendations for possible use in the construction of embankments. The experimental phase was carried out with glauberite and with natural mixtures of gypsum-clay and clay-gypsum. With each of the samples, Normal Proctor and Modified Proctor compaction tests were performed with specimens in which the conditions of moisture and dry density were located on each of the compaction curves. Stress-strain-time behavior, the expansion potential, the collapse of the structure and particle breakage were studied.

1. INTRODUCCIÓN

En general, las normativas que rigen la construcción de terraplenes son muy exigentes en lo que respecta a la selección de los materiales que serán utilizados como relleno y por esta razón algunos tipos de depósitos son radicalmente rechazados y enviados a botadero; por ejemplo, los de origen evaporítico en los que aparecen materiales yesíferos y rocas salinas intercaladas con materiales arcillosos y en algunos casos con rocas blandas evolutivas.

Al menos en España, la historia de la construcción de terraplenes se puede ubicar, en el tiempo, en las tres épocas siguientes: 1ª) Hasta la década de los 60, en la construcción de numerosas variantes de carreteras se utilizó cualquier tipo de material, lo cual conllevó a que no pasara mucho tiempo antes de que se presentaran numerosos problemas relacionados con deformaciones excesivas. 2ª) El desarrollo de la geotecnia, como nueva ciencia, erradica los viejos conceptos y se inicia la selección de materiales apropiados y el desecho de otros; en esta fase surgen las especificaciones técnicas, excesivamente restrictivas, por las que muchos materiales, considerados no aptos, eran enviados a botaderos. 3ª) Actualmente, se tiende a aprovechar al máximo los materiales, existente cerca de las obras, con el objeto de optimizar los recursos económicos y minimizar el impacto ambiental, pero sin reducir la

calidad y seguridad de la obras; algunas experiencias, con la utilización de materiales yesíferos, son reportadas en la literatura, Soriano (2002) y (2007).

La necesidad de aprovechamiento de grandes volúmenes de materiales, sistemáticamente rechazados y enviados a botadero, exige profundizar en el conocimiento del comportamiento geomecánico de éstos, para lo cual se requiere de programas de investigación básica, como el que se presenta en este artículo.

Por limitación de espacio, se presentan solamente algunos de los resultados obtenidos en la fase 1 del programa I+D que realizó la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - ETSICCP de la Universidad Politécnica de Madrid - UPM, relacionado con el "Estudio del comportamiento de rocas evaporíticas para su utilización en infraestructuras viarias". Olalla, González Tejada y Patiño (2008) y (2009); González Tejada, Olalla, Patiño, Romana y Cimadevila (2009).

La investigación, en la fase 1, se realizó con tres tipos diferentes de materiales provenientes de las excavaciones de un túnel, ubicado en el Mar de Ontígola, que se encontraba en fase de construcción en la misma época en la que se realizó está investigación. El Mar de Ontígola se ubica entre las provincias de Madrid y Toledo, cerca de Aranjuez, en la cuenca del Tajo, Figura Nº 1.



Figura Nº 1. Localización del Mar de Ontígola.

La investigación centró la atención en el estudio del comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo, riesgo de colapso, potencial expansivo y rotura de partículas; temas que han sido suficientemente estudiados por diferentes autores.

La rotura de partículas es un fenómeno que se ha estudiado en materiales granulares por su influencia en el comportamiento macroscópico del conjunto. Los estudios realizados han estado especialmente enfocados a determinar la variación de las curvas granulométricas y en consecuencia de la permeabilidad y de la deformabilidad. Es importante destacar el factor de escala en el que se estudia, tanto por el tamaño de las partículas como por la magnitud de las acciones. Además, las propiedades tensodeformacionales intrinsecas del material (en este caso, una roca blanda) y los procedimientos habituales de construcción (extracción, transporte, colocación y compactación) pueden llevar al relleno a una situación intermedia entre pedraplén y terraplén, siendo aún más importante analizar la escala de ensayo. Por tanto, las posibles adimensionalizaciones que se hagan en el problema dependen, entre otros factores, de la forma de la curva granulométrica, del tamaño de las partículas, de la compacidad, de la resistencia y deformabilidad y del peso especifico de las mismas. Estudios experimentales interesantes a este respecto han sido realizados por: Lee y Farhoomand (1967); Hardin (1985); Hagerty et al. (1993); Lade, Yamamuro y Bopp (1996); McDowell y Bolton (1998); y Takei et al. (2001).

Experimentalmente, los primeros intentos se deben a Kjaernsli y Sande (1963), que realizaron ensayos de compresión sobre escolleras y definieron el índice de rotura como la máxima diferencia en ordenadas entre las curvas granulométricas antes y después de realizar el ensayo. Marsal (1965) estudio la rotura de partículas en presas de tierra, tras realizar ensayos triaxiales a gran escala; el índice de rotura B de Marsal se define como la suma de las diferencias entre los porcentajes retenidos en cada tamiz entre los estados inicial y final teniendo el mismo signo; el límite inferior es cero y el superior 100%. Lee y Farhoomad (1967) realizaron sus trabajos enfocados en la rotura de los materiales rocosos de los filtros de presas de materiales sueltos; tras realizar ensayos de carga en arenas y estudiar la rotura, propusieron un factor de rotura basado solo en el cambio del tamiz por el que pasa el 15 % mas fino. Hardin (1985) basó su medición en el cambio que se produce en toda la curva de retención; relaciona el área comprendida entre la curva de retención y el tamiz No. 200 (0.074 mm); lo limitó en este punto porque supone que hay poca rotura de partículas inferiores a este tamaño. Lade et al. (1996) propusieron un índice de rotura basado en el D_{10}, diámetro eficaz, que es un parámetro definido

por Hazen y utilizado por él para calcular la permeabilidad.

El fenómeno del colapso ha sido estudiado, por rusos, búlgaros, alemanes y rumanos, antes que para suelos parcialmente saturados para suelos con algún tipo de cementación, particularmente loess. Para suelos parcialmente saturados Jennings fue uno de los primeros investigadores que contempló el suelo como una estructura mucho mas compleja que los modelos de "gavilla de capilares" (Jiménez Salas, 1984).

La causa del colapso en suelos finos no se explica del mismo modo en los suelos granulares gruesos. Si en estos últimos el colapso parece relacionado con la propagación de fractura bajo un estado de esfuerzos y con la influencia de la humedad, en los suelos finos se debe más bien al efecto no despreciable que suponen las fuerzas capilares sobre las superficies de contacto. También influye como es la estructura y si ésta se encuentra en un equilibrio estable o inestable, dando lugar a un conjunto amplio de posibilidades.

Aunque no se expliquen de la misma manera el colapso de las escolleras y de los suelos finos, se puede encontrar una analogía formal (Alonso y Oldecop, 2000). En general, el colapso de los suelos finos se debe a la perdida de un enlace entre partículas que es "ficticio" o temporal. Existen enlaces entre las partículas de suelos finos que contribuyen a la estabilidad pero que pueden desaparecer. Estos tipos de enlaces pueden ser debidos a las fuerzas capilares o a la presencia de agentes cementantes.

En los suelos granulares finos, las fuerzas debidas a la succión del agua son, según se ha mencionado, de un orden de magnitud importante en relación con las fuerzas gravitatorias. Si bien estados de saturación parcial pueden contribuir de manera favorable al aumento de la resistencia del suelo, el cambio de ese estado a otro puede suponer el colapso repentino por la perdida de esa contribución. Según Jennings y Burland (1962) cuando aumentan las fuerzas exteriores un suelo granular fino, poco denso y saturado puede colapsar por la destrucción de las estructuras poco estables que puedan existir en él.

En un suelo limoso o arcilloso los mecanismos de colapso bajo condiciones de saturación o de grado parcial de saturación se alejan de la explicación de Jennings y Burland, debido a la mayor importancia de todos los fenómenos de superficie. Los suelos con cierto contenido de arcilla, depositados en ambientes marinos o lacustres, con aguas con elevado contenido en sales, han floculado; las arcillas se han agregado en partículas o flóculos, que han adquirido una cierta individualidad que no han perdido durante la posterior consolidación, constituyendo glomérulos muy consistentes que dan al suelo propiedades que, en algunos casos, se aproximan a las de los limos. Un grado de humectación moderado no es capaz de destruir los glomérulos ni siquiera durante un apisonado normal. Particularmente, si el suelo tiene una granulometría extendida (lo que es usual en estos sedimentos, ya que los flóculos se sedimentan rápidamente, coincidiendo así con los elementos mas gruesos), se forman estructuras complicadas, en las que parte de estos glomérulos quedan apisonados entre partículas mas gruesas, rigidizando el contacto y conduciendo la estructura a una similar al loess (Jiménez Salas, 1984).

Otro fenómeno característico de los suelos más finos es la expansión, termino por el que se conoce al aumento de volumen que experimentan algunas arcillas y limos cuando bajo carga constante aumentan su contenido de agua.

Este fenómeno se asocia fundamentalmente con suelos arcillosos plásticos, con densidades secas altas y presiones exteriores bajas, contrariamente a lo habitual en procesos de colapso (Josa, 1988). Pero también ocurre con densidades bajas y presiones altas. Los mecanismos que producen la expansión están directamente relacionados con las propiedades y características de las partículas arcillosas y son las cargas eléctricas netas las responsables de estos fenómenos. (Josa, 1988)

Según Delgado (1986) los mecanismos microestructurales que producen la expansión son la hidratación de las partículas de arcilla, la hidratación de cationes y la repulsión osmótica. Por otro lado, según Gromko (1974) los factores que más afectan al proceso de expansión son el tipo de minerales, la densidad seca, el estado de esfuerzos y la estructura del suelo.

2. PROPIEDADES DEL YESO MASIVO

El yeso masivo es una roca blanda y evolutiva. Valores orientativos de los parámetros que gobiernan su comportamiento mecánico (Rodríguez Ortiz, 1994) se indican en las tablas Nº 1 y Nº 2.

Atendiendo a los valores de su resistencia a compresión simple se puede decir, en principio, que solo los yesos masivos de tipo cristalino o alabastrino podrían dar lugar a pedraplenes y, en cualquier caso, que se requieren una serie de precauciones si se utilizan como tal.

Tabla Nº 1 Propiedades generales del yeso masivo

Tipo	γ t/m3	w_{nat} %	RCS MPa
Yesos masivos con fracturas, huellas de disolución o inclusiones margosas	1.80 – 2.10	3 - 6	2.5 – 8
Yesos masivos sanos, porosos, sacaróideo o nodular.	2.00 – 2.25	1 - 3	5 – 20
Yesos masivos cristalinos o alabastrinos.	2.16 – 2.40	>1.5	15 - 40

Tabla Nº 2 Propiedades generales del yeso masivo

Tipo	E GPa	ν	V_s Km/seg.
Yesos masivos con fracturas, huellas de disolución o inclusiones margosas	0.08 – 0.8	0.28 – 0.32	1.8 – 2.3
Yesos masivos sanos, porosos, sacaróideo o nodular.	0.3 - 2	0.24 – 0.28	2.3 – 2.7
Yesos masivos cristalinos o alabastrinos.	2 - 30	0.20 – 0.28	2.5 – 3.2

Nota: En las tablas Nº 1 y N º2 γ es la densidad natural, $w_{nat.}$ la humedad natural, RCS la resistencia a la compresión simple, E el módulo de elasticidad, ν la relación de Poisson y V_s la velocidad de las ondas de corte.

De hecho el carácter de roca blanda hará que en la propia extracción y en el transporte los bloques previsiblemente se redondearán y fracturarán. Es importante destacar además que la resistencia de la roca de yeso y su densidad están íntimamente ligadas. La máxima densidad y resistencia ocurren con rocas integras, no fisuradas y sin contaminaciones térreas. Además, aunque la anisotropía original debido a su carácter evaporítico es poco marcada, condiciones tectónicas que pueda sufrir o los procesos posteriores a su génesis que les puedan afectar y que supongan la aparición de componentes secundarias como carbonatos, anhidrita, etc., pueden hacer variar mucho los valores antes expuestos.

Una característica más a añadir sobre el yeso es que el comportamiento mecánico diferido, debido a los fenómenos de relajación y fluencia es especialmente importante, ya que se puede desarrollar por medio de un mecanismo fisicoquímico.

3. QUÍMICA DE MATERIALES YESÍFEROS

Los materiales yesíferos están formados por fracciones de sulfato de calcio y fracciones de arcilla o carbonatos. La proporción de éstas será determinante en las propiedades geotécnicas finales de la mezcla, tanto en lo referente a su comportamiento mecánico, instantáneo y diferido, como a posibles fenómenos adversos que pueden comprometer la seguridad y el buen funcionamiento del terraplén.

Frente a las arcillas, las margas y los carbonatos, cuyo comportamiento como material de relleno en terraplenes es más conocido, las fracciones de yeso pueden ser determinantes cuando coexisten con ellos, pudiendo afectar al servicio y seguridad de la infraestructura.

Por yeso se entiende genéricamente a los materiales cuya constitución química es sulfato de calcio. Algunos de éstos incluyen agua en su estructura y otros no, y el sistema cristalográfico varía de uno a otro tipo. Además no todas esas fases tienen una génesis diferente y no resultan igual de estables.

La inestabilidad del sulfato de calcio se debe fundamentalmente a su alta solubilidad y a los cambios de fase que se pueden producir por la adición de agua (incluso aunque ésta no circule) o por los cambios térmicos.

La inestabilidad del sulfato de calcio presente en materiales yesíferos utilizados como relleno en el núcleo de terraplenes puede producir expansiones, debidas a la rehidratación de la anhidrita; disoluciones o subsidencias, provocadas por la circulación de agua y aumento de las deformaciones diferidas, debido a la presencia de agua libre en los huecos.

Además de las propiedades del sulfato de calcio, el tipo de arcilla o carbonato que acompañe al material yesífero, puede también influir en el comportamiento final y puede producir fenómenos como expansiones, fluencia, etc.

Por eso, es importante conocer qué otros materiales existen, además del sulfato de calcio, y en qué proporción.

El sistema químico formado por sulfato de calcio y agua puede presentar distintas fases, divididas en tres grupos: Dihidrato ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), Hemihidrato o Basanita ($CaSO_4 \cdot ½H_2O$) y Anhidrita ($CaSO_4$). Estos grandes grupos se dividen a su vez en otros más pequeños en función de su forma o estado y su estructura cristalina. Estos grupos presentan

características físicas y químicas diferentes y no tienen la misma estabilidad. El hemihidrato puede ser α o β , y la anhidrita de tipo I, II o III.

Según Arredondo (1969), el dihidrato tiene una red cristalina monoclínica laminar con cuatro u ocho moléculas por estructura elemental, de modo que en la estructura se alternan capas de sulfato de calcio y agua; se presenta en la naturaleza con el nombre de algez o roca yeso; la cual, es una roca sedimentaria evaporítica, blanda, de color blanco o grisáceo, que aparece en forma monocristalina (selenita, marienglass o espejuelo) o en forma policristalina o granular (alabastro sacaroideo o fibroso). Las principales impurezas son arcilla, caliza, dolomita y sílice.

Según Arredondo (1969), el semihidrato tiene un sistema cristalino romboédrico. La red posee una gran estabilidad debido a que los átomos de calcio y los tetraedros de ión sulfato están colocados de tal forma que existen unas poderosas fuerzas de unión entre los átomos de calcio de una capa y los tetraedros de sulfato de la adyacente y que, además, existen unos canales en la red en los que están situadas las moléculas de agua. Sin embargo, con la misma composición química e igual agua de cristalización (6.21 %), se producen dos formas de semihidrato, α o β, con características físicas y microestructurales diferentes. Cuando la presión es más alta, se produce la variedad α, caracterizada por cristales mayores y más compactos; en la β están más separados y holgados. Para la formación de la variedad α es condición indispensable que se produzca la deshidratación del algez en una atmósfera saturada o próxima a la saturación.

Artificialmente, la deshidratación total del doble hidrato o del semihidrato entre 110 y 290 º C se produce el sulfato cálcico anhidro o anhidrita III, también denominada anhidrita soluble. Si proviene de una forma α de semihidrato, la anhidrita III es tipo α, y si proviene de un semihidrato β, la anhidrita III es tipo β. La anhidrita III es muy ávida de agua y muy inestable, transformándose en semihidrato incluso con la humedad ambiental.

4. ETAPA EXPERIMENTAL

4.1. Procedencia de las muestras

Las muestras utilizadas en esta investigación fueron extraídas de depósitos del Cenozoico y en particular del Mioceno, cuyas edades se ubican entre 18 y 20 millones de años. Geográficamente, el sector donde se tomaron las muestras se ubica cerca al Mar de Ontígola, Figura Nº 1, el cual se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias, cuyo aspecto natural es el indicado en la figura Nº 2.



Figura Nº 2. Aspecto natural de los depósitos sedimentarios cercanos al Mar de Ontígola.

Para la realización de la etapa experimental, relacionada con el estudio preliminar de depósitos yesíferos, se seleccionaron los siguientes tres tipos, característicos, de materiales que afloran en la región:

- Mezcla natural de arcilla-yeso color verdoso, humedad natural igual al 12% y porcentaje de partículas que pasan la malla de 0.08 milímetros igual al 70%. El aspecto natural de esta muestra, extraída de un talud de una vía secundaria, es el mostrado en la Figura Nº 3.



Figura Nº 3. A la izquierda, aspecto natural de la mezcla arcilla-yeso. A la derecha, aspecto del material después de secado al aire y disgregado.

- Mezcla natural de yeso-arcilla color blanquecino, humedad natural igual al 18% y porcentaje de partículas que pasan la malla 0.08 milímetros igual al 35%. De esta mezcla natural fueron enviadas al laboratorio muestras cuyo tamaño máximo de partícula era igual a 8 centímetros y bloques de más o menos 25 centímetros de lado. El aspecto natural de estas muestras, tomadas superficialmente, es el mostrado en la Figura Nº 4.



Figura Nº 4. A la izquierda, aspecto natural de la mezcla yeso - arcilla. A la derecha, bloque masivo de yeso – arcilla.

- Glauberita color gris oscuro, con humedad natural igual al 21%. El aspecto natural de esta muestra extraída del frente de excavación de un túnel en el sector del Mar de Ontígola, más o menos en la abscisa 103+070, es el mostrado en la Figura Nº 5.



Figura Nº 5. A la izquierda, aspecto natural de la glauberita. A la derecha, aspecto del material después de secado al aire y disgregado.

4.2. Ensayos realizados

Los ensayos que se realizaron, algunos descritos más adelante, fueron los siguientes:

- Humedad natural, gravedad específica, contenido de partículas con tamaño menor de 0.08 milímetros y difracción de rayos X.
- Tres ensayos de compactación Proctor Modificado
- Tres ensayos de compactación Proctor Normal
- Veinte ensayos de expansión libre en consolidómetro, combinados con posterior consolidación y descarga.
- Diez ensayos de colapso en célula Rowe.
- Doce evaluaciones de rotura de partículas, mediante ensayos no normalizados.
- Tres ensayos de compresión con núcleos de yeso.

4.2.1. Humedad natural

Debido a que en estos tipos de materiales las altas temperaturas son capaces de eliminar agua diferente a la libre, la evaluación de la humedad se realizó con los datos obtenidos después de un proceso de secado a 45º durante 24 horas y a 110º durante 24 horas; además, se evaluó la capacidad de absorción de agua en el ambiente natural del laboratorio. Los resultados obtenidos se indican en la tabla Nº 3

Tabla Nº 3. Contenidos de humedad.

Tipo de material	w_{45} %	w_{110} %	w_a %
Mezcla natural de arcilla-yeso	3.4	12.2	10.3
Mezcla natural de yeso-arcilla	2.2	17.9	13.5
Glauberita	5.2	21	18,5

Nota: los subíndices $_{45}$ y $_{110}$ indican la temperatura de secado y $_a$ absorción.

4.2.2 Ensayos de compactación

Como el objetivo de la investigación, en la etapa inicial, era la evaluación generalizada del comportamiento de materiales provenientes de depósitos yesíferos ante su eventual utilización como relleno en terraplenes, se realizaron ensayos de compactación Proctor, tanto normal como modificado. La metodología seguida para la realización de estos ensayos es la descrita a continuación:

- Secado del material al ambiente.
- Disgregación de grumos y tamizado por la malla de 5 milímetros. En este caso en particular, por tratarse de un material en grumos, a fin de garantizar la homogeneización de la humedad se utilizó la fracción que pasó la malla de 5 milímetros. Cuando se utiliza la fracción que pasa la malla de 25 milímetros es prácticamente imposible homogeneizar la humedad de la muestra debido a que el contenido de agua en la superficie de los grumos es bastante mayor respecto a la del interior de éstos. El aspecto del estado de los materiales utilizados en los ensayos de compactación es el indicado en las Figuras Nº 3 y Nº 5.
- Humedecimiento y homogeneización de las muestras. Todos los ensayos de compactación se realizaron como mínimo con seis evaluaciones de la densidad seca en función del contenido de agua, consiguiendo así que tres de las determinaciones quedaran ubicadas del lado seco y tres del lado húmedo. A fin de garantizar la homogeneización de la humedad en todas y cada una de las fracciones utilizadas para la evaluación de la densidad seca en función de la humedad de compactación, el agua se aplicó mediante atomizado; procediendo de esta manera el material se moja superficialmente, Figura Nº 6, se mezcla,

nuevamente se extiende, se atomiza, se mezcla y así sucesivamente hasta conseguir que la fracción quede con el contenido de agua deseado. El control de la aplicación de la cantidad de agua necesaria para llevar la fracción de material a la humedad predefinida se hace por diferencia de peso del atomizador. Una vez se han llevado las diferentes fracciones de material a la humedad predefinida, éstas se guardan en bolsa de plástico (Figura Nº 6) y se mantienen en la cámara húmeda durante 24 horas. Este tiempo es suficiente y necesario para garantizar la homogeneización de la humedad.



Figura Nº 6. A la izquierda, detalle del aspecto de una fracción de material durante el proceso de humedecimiento por atomizado y mojado superficial. A la derecha, detalle de las diferentes fracciones de material en proceso de homogeneización de la humedad.

- Compactación propiamente dicha. Para la evaluación de la variación de la densidad en función de la humedad se utilizó una compactadora automatizada, fabricada por Controls (Figura Nº 7). En relación con la manejabilidad de los materiales de origen yesífero ha existido la incertidumbre respecto a si permiten su compactación por métodos mecánicos. En el caso de la mezcla natural de yeso-arcilla; es decir, la de mayor contenido de yeso, la compactación se realizó con facilidad (Figura Nº 7).

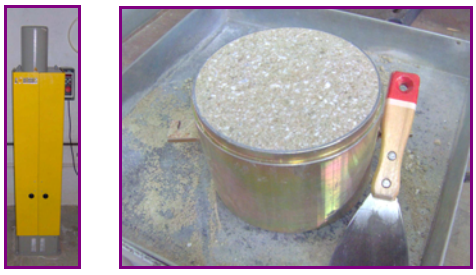


Figura Nº 7. A la izquierda, detalle del equipo utilizado durante el proceso de compactación. A la derecha, aspecto de la mezcla natural de yeso-arcilla después del proceso de compactación.

Los resultados de los ensayos de compactación son los mostrados en las figuras Nº 8, Nº 9 y Nº 10.

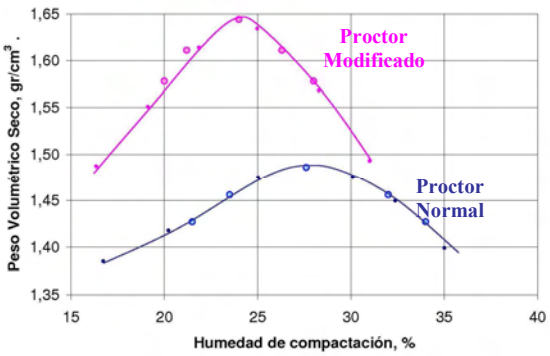


Figura Nº 8. Curvas de compactación de la mezcla natural de arcilla-yeso.

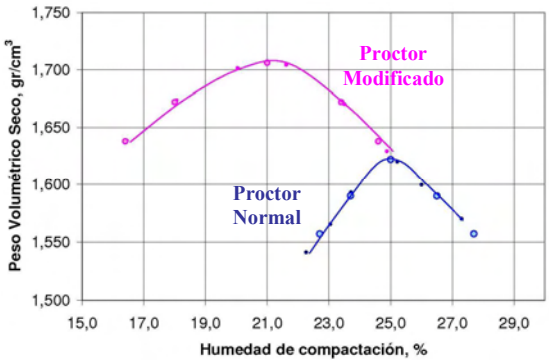


Figura Nº 9. Curvas de compactación de la mezcla natural de yeso-arcilla.

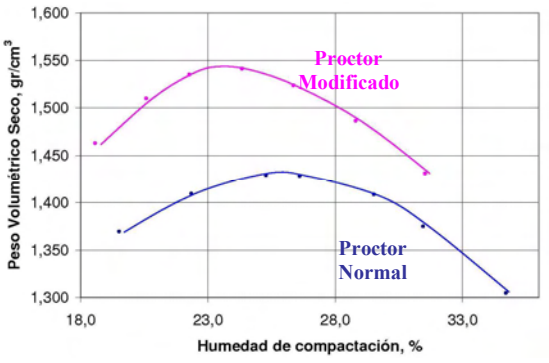


Figura Nº 10. Curvas de compactación de la glauberita.

En las gráficas de las figuras Nº 8 y Nº 9 los puntos pequeños corresponden a las parejas de densidad y humedad obtenidas mediante los ensayos de compactación y los puntos de mayor tamaño a las combinaciones de densidad y humedad seleccionadas para la realización de las pruebas de expansión y consolidación.

En adelante los puntos de mayor tamaño serán identificados como: AY_96S_PM, AY_98S_PM, AY_100_PM, AY_98H_PM, AY_96H_PM, AY_96S_PN, AY_98S_PN, AY_100_PN, AY_98H_PN, AY_96H_PN, Y_96S_PM, Y_98S_PM, Y_100_PM, Y_98H_PM, Y_96H_PM, Y_96S_PN, Y_98S_PN, Y_100_PN, Y_98H_PN y Y_96H_PN. Con el siguiente significado:

- AY: Mezcla natural de arcilla-yeso
- Y: Mezcla natural de yeso-arcilla
- 96, 98, 100: Porcentaje de densidad respecto a la máxima del Proctor
- S: Rama seca de la curva de compactación
- H: Rama húmeda de la curva de compactación
- PM: Proctor Modificado
- PN: Proctor Normal

4.2.3. Expansión libre y consolidación

Estos ensayos se realizaron con muestras de la mezcla natural de yeso-arcilla y de arcilla-yeso, compactadas estáticamente con humedades predefinidas y hasta reproducir densidades secas equivalentes al 96%, 98% y 100% respecto a la máxima obtenida mediante los ensayos de compactación Proctor Normal y Modificado.

A fin de evaluar el comportamiento de los materiales frente a expansión y consolidación en función de la densidad seca y la humedad de compactación, se ensayaron en total diez probetas de cada material. Cinco probetas con las densidades obtenidas a partir de la prueba Proctor Modificado y cinco con las densidades obtenidas a partir de la prueba Proctor Normal, tal como se indica en la Figura Nº 11. En los dos casos, las características de compactación ubican dos probetas en la rama seca, dos en la rama húmeda y una en el óptimo de compactación.

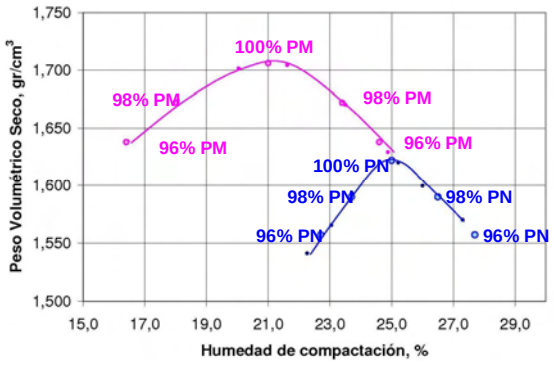


Figura Nº 11. Ubicación, sobre las curvas de compactación, de las propiedades de las probetas utilizadas en los ensayos de expansión libre y consolidación.

La metodología seguida para la realización de los ensayos de expansión libre y consolidación fue la siguiente:

- *Preparación del material*. Conocida la humedad de homogeneización inicial con la que se tenía almacenado el material en la cámara húmeda y las dimensiones del anillo de confinamiento de la célula de consolidación, se evaluó la cantidad de material necesario para cumplir con la densidad seca predefinida y se le agregó agua por atomizado. La cantidad de agua que se le agregó a cada fracción de material era la necesaria para cumplir con la humedad predefinida. En estado suelto se guardó el material en bolsa de plástico y se conservó en la cámara húmeda durante 24 horas. Este tiempo es suficiente y necesario para garantizar la homogeneización de la humedad.
- *Colocación en el anillo de consolidación*. En estado suelto se colocó el material, de cada una de las fracciones, dentro de los anillos de consolidación y por carga estática se obligó a ocupar justamente el interior de éstos. De esta manera se garantizó la reproducción de probetas que cumplían con la densidad seca y la humedad predefinidas. Una vez compactadas las muestras dentro de los anillos de consolidación, éstos se guardaron en bolsa de plástico y se conservaron en cámara húmeda durante 24 horas.
- *Secuencia de carga.* Inicialmente, a fin de evaluar el potencial expansivo del material para diferentes combinaciones de densidad seca y humedad de compactación, se aplicó un esfuerzo axial de 10 kPa y se permitió la expansión libre. Los resultados a escala reducida se incluyen en las figuras Nº 16, Nº 19, Nº 24 y Nº 27. Las gráficas a escala reducida permiten observar fácilmente y de manera cualitativa el comportamiento de los materiales estudiados. Una vez las deformaciones por expansión eran muy pequeñas, prácticamente nulas, se hicieron nueve incrementos de esfuerzo axial (10, 20, 20, 40, 40, 40, 100, 200 y 200 kPa) y cuatro descargas (400, 140, 80 y 50 kPa). Tanto en carga como en descarga se llevó un detallado registro de las deformaciones en función del tiempo. Terminada la secuencia de carga y descarga se removieron las probetas de los anillos de consolidación, Figura Nº 12, se evaluó la humedad final y el porcentaje de partículas con tamaño menor de 0,08 milímetros.

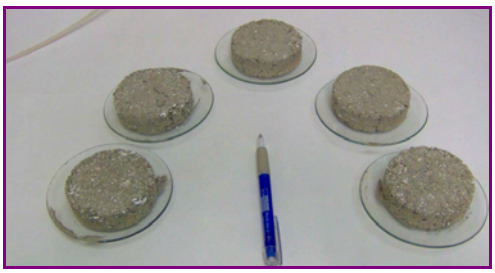


Figura Nº 12. Aspecto de las probetas después de los ensayos de expansión y consolidación.

4.2.4. Ensayos de colapso en célula Rowe

Estos ensayos se realizaron únicamente con la mezcla de yeso-arcilla pero tratando el material como un medio granular y no como suelo compactado, dado que en esta última condición se estudió mediante los ensayos de expansión y consolidación. Para estudiar este material se seleccionaron dos distribuciones granulométricas diferentes, dos condiciones de humedad y cuatro niveles de esfuerzos axiales. Las condiciones estudiadas fueron las siguientes:

- Las fracciones granulométricas fueron: 5 m.m. < D < 10 m.m. y 2 m.m. < D < 5 m.m.
- Las condiciones de humedad fueron: estado natural e inundación.
- Las presiones axiales fueron: 1, 3, 5 y 7 kg/cm^2.

El procedimiento de ensayo fue el siguiente:

- Evaluación de la densidad máxima para cada una de las gradaciones
- Colocación del material en el interior de la célula Rowe, Figura Nº 13, mediante vibración para garantizar máxima densidad. En todos los casos, la humedad que contenía el material al iniciar el ensayo fue igual a la humedad natural.

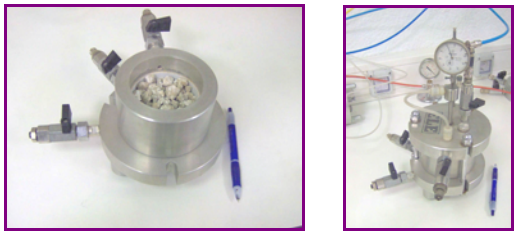


Figura Nº 13. A la izquierda, detalle del material con gradación de mayor tamaño en el interior de la célula Rowe. A la derecha, célula Rowe en proceso de carga.

- En condición de humedad natural, aplicación de esfuerzo axial mediante sistema neumático y registro de deformaciones axiales hasta el momento en el que éstas eran pequeñas.
- Inundación de la muestra y registro de deformaciones axiales hasta el momento en el que éstas eran pequeñas.
- Evaluación del contenido de agua final.

4.2.5. Ensayos de rotura de partículas

A fin de evaluar la dificultad que eventualmente se pudiera presentar en campo para compactar partículas de la mezcla natural de yeso-arcilla, o de glauberita, se realizaron determinaciones de rotura de partículas. Se resalta que el procedimiento no está estandarizado, pero permite de una manera cualitativa intuir si en campo se presentarán problemas en el caso de decidir construir terraplenes compactados con materiales de origen yesífero.

La metodología es sencilla y simplemente consiste en comparar las distribuciones granulométricas, de un determinado material, antes y después de ser solicitado por impacto o por carga axial.

En el caso de la solicitación por impacto, se tomó una fracción de material de 5 kilogramos y con ésta se realizó el ensayo Proctor Modificado. Antes y después del ensayo Proctor Modificado se evaluó la distribución granulométrica del material. Esto permite, mediante la comparación de las curvas granulométricas, intuir lo que ocurrirá en campo cuando se intente compactar el material con equipos que transmitan energía comparable a la del ensayo de laboratorio.

Las condiciones iniciales de ensayo fueron: humedad natural y tamaño de partícula comprendido entre 25 y 5 milímetros.

En el caso de la solicitación por carga axial, antes y después de realizar los ensayos de colapso en la Célula Rowe, se evaluaron las distribuciones granulométricas de las fracciones de material utilizadas. Como en el caso anterior, esto permite mediante la comparación de las curvas granulométricas, intuir lo que ocurrirá en campo si se llegara a realizar rellenos con fragmentos de la mezcla natural de yeso-arcilla y posteriormente éstos fueran exigidos axialmente incluso bajo peso propio.

4.2.6 Ensayos de compresión simple

A fin de evaluar la resistencia al corte de la mezcla natural de yeso-arcilla, en estado masivo, se programó la realización un buen número de ensayos de compresión simple, pero infortunadamente las

características intrínsecas de los bloques impidieron cumplir con este objetivo.

Como se puede observar en la Figura Nº 14, externamente los bloques de la mezcla natural de yeso-arcilla dan la sensación de estar en presencia de una muestra representativa de un depósito masivo, pero al extraer núcleos la evidencia es que la presencia de arcilla genera en éstos grandes irregularidades y diámetros no uniformes, Figura Nº 15, lo cual hace que no sean aptos para la obtención de resultados fiables. Por esta razón, solamente fue posible obtener tres núcleos de diámetro pequeño, los cuales fueron llevados a la falla mediante la aplicación de carga axial.



Figura Nº 14. Aspecto "masivo" de uno de los bloques de la mezcla natural de yeso-arcilla utilizado para extraer núcleos.

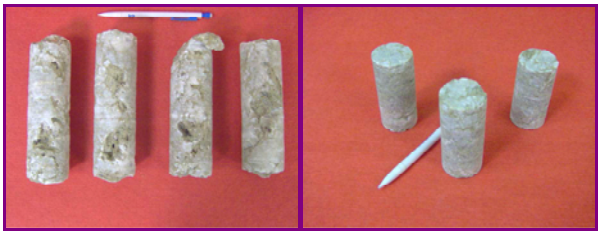


Figura Nº 15. Detalle de la irregularidad de los núcleos extraídos de los bloques aparentemente "masivos".

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A partir de los ensayos realizados durante la etapa experimental en la que de manera preliminar se estudió principalmente el potencial expansivo, el colapso y el comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo, de mezclas naturales de yeso-arcilla y arcilla-yeso, se hace el siguiente análisis:

5.1. Caracterización

El depósito que inicialmente fue caracterizado como francamente arcilloso tiene un contenido de material de origen yesífero, en promedio, igual al 30%. Cuando este material se somete a secado a 45º C solamente permite la remoción del 28% de agua respecto al secado a 110º C. Después del secado en el horno, el material tiene la capacidad de recuperar al ambiente el 84% del contenido de agua natural.

El depósito que inicialmente fue caracterizado como yeso tiene un contenido de arcilla, en promedio, igual al 35%. Cuando este material se somete a secado a 45º C solamente permite la remoción del 12% de agua respecto al secado a 110º C. Después del secado en el horno, el material tiene la capacidad de recuperar al ambiente el 75% del contenido de agua natural.

La glauberita cuando se somete a secado a 45º C solamente permite la remoción del 2% de agua respecto al secado a 110º C. Después del secado en horno, el material tiene la capacidad de recuperar al ambiente el 88% del contenido de agua natural.

Las gravedades específicas resultaron iguales a: 2.745 para la mezcla natural de arcilla-yeso, 2.775 para la mezcla natural de yeso-arcilla y 2.66 para la glauberita.

El contenido mineralógico evaluado mediante ensayos de difracción de rayos x, realizados en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX; es el siguiente:

- Mezcla natural de arcilla-yeso: yeso 46%, ilita 31%, magnesita 15%, cuarzo 5% y calcita 3%.
- Mezcla natural de yeso-arcilla: basanita 97%, moscovita 2% y cuarzo 1%.
- Glauberita: yeso 44%, glauberita 21%, magnesita 17%, cuarzo 9%, dickita 8%, kroenkita 0,5% y romboclasa 0,5%.

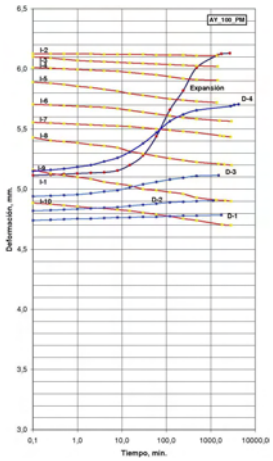
La evaluación mineralógica no es estrictamente igual a la de los materiales en condición natural, en razón de que el necesario secado previo al proceso de pulverización modifica, de alguna manera, la mineralogía de estos tipos de materiales. En este artículo el término pulverización se asimila a la generación de partículas que pasan la malla 200.

5.2. Expansión y consolidación

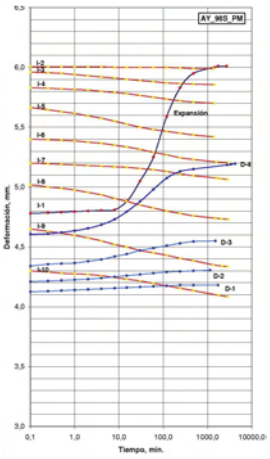
5.2.1. Mezcla natural de arcilla-yeso

En cada una de las gráficas incluidas en las figuras Nº 16, Nº 19, Nº 24 y Nº 27 la primera curva azul de arriba hacia abajo corresponde a las deformaciones por expansión libre, las curvas amarillas a las deformaciones por consolidación y las curvas inferiores azules a las deformaciones por descarga.

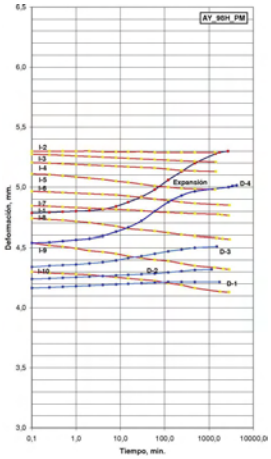
a) Probetas con densidades secas y humedades de compactación ubicadas sobre la curva de compactación Proctor Modificado.
Las muestras preparadas con densidades secas iguales al 96%, 98% y 100% y sus correspondientes humedades, las cuales se ubican sobre la curva de compactación Proctor Modificado, tanto en la rama seca como en la rama húmeda, exhiben el siguiente comportamiento:



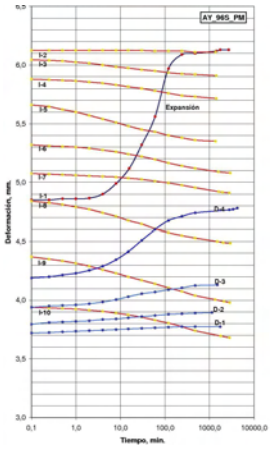
AY_100_PM



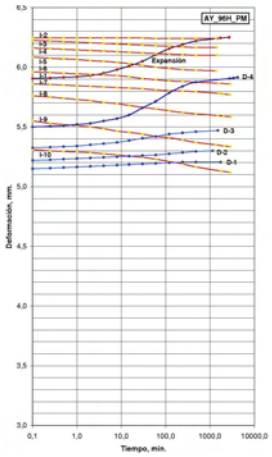
AY_98S_PM



AY_98H_PM



AY_96S_PM



AY_96H_PM

Figura Nº 16. Comportamiento deformación-tiempo de la mezcla natural de arcilla-yeso evaluado a partir muestras compactadas estáticamente. La disposición de las gráficas idealiza parejas de puntos de densidad seca y humedad de compactación ubicados sobre la curva de compactación.

- Las deformaciones por expansión son de mayor magnitud en la rama seca que en la húmeda (Figura Nº 16). A igual porcentaje de densidad seca (γ_d) respecto a la densidad seca máxima ($\gamma_{dmáx}$), obtenida a partir del ensayo Proctor Modificado, pero diferente rama de compactación, si γ_d = 96% la deformación por expansión en la rama húmeda es del orden del 27% de la deformación por expansión en la rama seca y si γ_d = 98% la deformación por expansión en la rama húmeda es del orden del 42% de la deformación por expansión en la rama seca.
- Las deformaciones por consolidación son de mayor magnitud en la rama seca que en la húmeda (Figura Nº 16). A igual porcentaje de densidad seca (γ_d) respecto a la densidad seca máxima ($\gamma_{dmáx}$), obtenida a partir del ensayo Proctor Modificado, pero diferente rama de compactación, si γ_d = 96% la deformación por consolidación en la rama húmeda es del orden del 67% de la deformación por consolidación en la rama seca y si γ_d = 98% la deformación por consolidación en la rama húmeda es del orden del 94% de la deformación por consolidación en la rama seca. Las deformaciones por consolidación de menor magnitud se registran, como es lógico, cuando la densidad seca es igual a la máxima evaluada en el ensayo Proctor.
- A igual densidad seca (Figura Nº 16), las deformaciones permanentes negativas después de la descarga tienden a ser mayores en la rama seca y presentan un máximo cuando la densidad seca es igual a la máxima evaluada en el ensayo Proctor. Lo que si es claro es que para densidades secas mayores al 96%, tanto en la rama seca como la húmeda, después de la descarga nuevamente se registran deformaciones por expansión hasta del 3%.
- En función de la humedad de compactación (Figura Nº 17) las deformaciones por expansión disminuyen en la medida en que aumentan el contenido de agua. Las deformaciones por consolidación disminuyen en la medida que aumenta el contenido de agua, presentando un mínimo para un contenido de agua cercano al óptimo de compactación; para contenidos de agua mayores que el óptimo las deformaciones aumentan en la medida en que aumenta el contenido de agua. En la descarga las deformaciones permanentes negativas aumentan en la medida que aumenta el contenido de agua, presentando un máximo en el óptimo de compactación, después del cual disminuyen en la medida que aumenta el contenido de agua. Se resalta que después de la descarga, nuevamente se registran deformaciones por expansión.
- A igual densidad seca (Figura Nº 18) las deformaciones por expansión son de mayor magnitud en la rama seca respecto a la rama húmeda. Las deformaciones por consolidación tienden a ser mayores en la rama seca respecto a la rama húmeda, pero en la medida en que aumenta la densidad seca tienden a ser magnitudes comparables en las dos ramas. La magnitud de las deformaciones por la descarga superan de manera significativa a las generadas durante el proceso de consolidación y además, se presentan deformaciones por expansión.

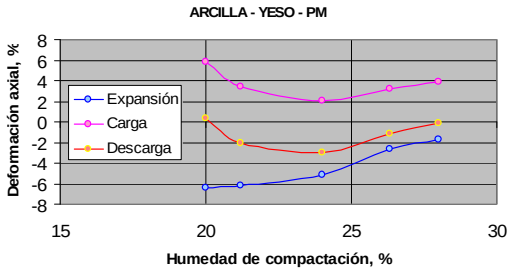


Figura Nº 17. Tendencias de variación de las deformaciones por expansión, consolidación y descarga en función de la humedad de compactación.

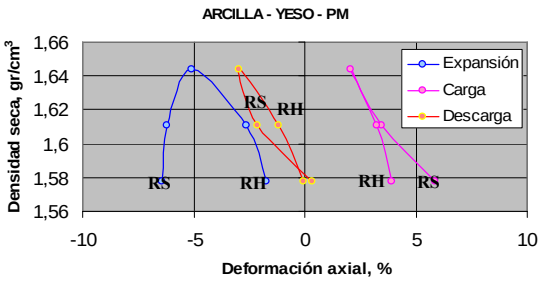


Figura Nº 18. Tendencias de variación de las deformaciones por expansión, consolidación y descarga en función de la densidad seca.

b) Probetas con densidades secas y humedades de compactación ubicadas sobre la curva de compactación Proctor Normal.

Las muestras preparadas con densidades secas iguales al 96%, 98% y 100% y sus correspondientes humedades, las cuales se ubican sobre la curva de compactación Proctor Normal, tanto en la rama seca como en la rama húmeda, exhiben el siguiente comportamiento:

- Las deformaciones por expansión son de mayor magnitud en la rama seca que en la húmeda (figura Nº 19). A igual porcentaje de densidad seca (γ_d) respecto a la densidad seca máxima ($\gamma_{dmáx}$), obtenida a partir del ensayo Proctor Normal, pero diferente rama de compactación, si γ_d = 96% la deformación por expansión en la rama húmeda es del orden del 4% de la deformación por expansión en la rama seca y si γ_d = 98% la deformación por expansión en la rama húmeda es del orden del 6% de la deformación por expansión en la rama seca.

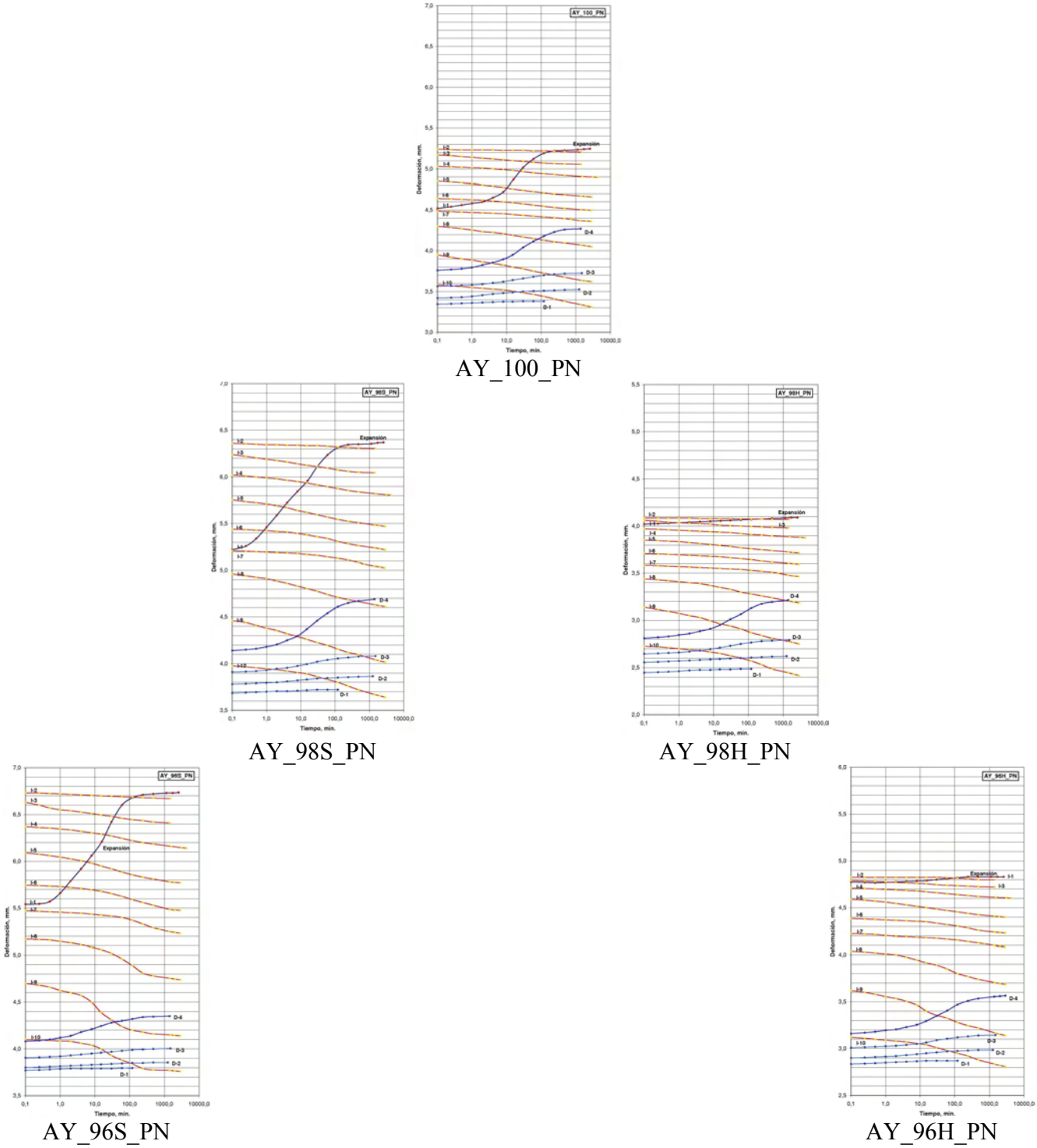


Figura Nº 19. Comportamiento deformación-tiempo de la mezcla natural de arcilla-yeso evaluado a partir muestras compactadas estáticamente.

- Las deformaciones por consolidación en la rama seca y la rama húmeda son de magnitudes comparables pero algo menores en la rama seca (Figura Nº 19). A igual porcentaje de densidad seca (γ_d) respecto a la densidad seca máxima ($\gamma_{dmáx}$), obtenida a partir del ensayo Proctor Normal, pero diferente rama de compactación, si γ_d = 96% la deformación por consolidación en la rama seca es del orden del 90% de la deformación por consolidación en la rama húmeda y si γ_d = 98% la deformación por consolidación en la rama seca es del orden del 98% de la deformación por consolidación en la rama húmeda. Las deformaciones por consolidación de menor magnitud se registran, como es lógico, cuando la densidad seca es igual a la máxima evaluada en el ensayo Proctor.
- A igual densidad seca (Figura Nº 19), las deformaciones permanentes después de la descarga tienden a ser mayores en la rama húmeda y presentan un mínimo cuando la densidad seca es igual a la máxima evaluada en el ensayo Proctor. Contrario a lo que ocurre con las probetas en las que la combinación densidad seca – humedad de compactación se ubica sobre la curva de compactación Proctor Modificado, en este caso no se registran expansiones después de la descarga.
- En función de la humedad de compactación (Figura Nº 20) las deformaciones por expansión disminuyen en la medida en que aumenta el contenido de agua. Las deformaciones permanentes por consolidación disminuyen en la medida que aumenta el contenido de agua, presentando un mínimo para un contenido de agua cercano al óptimo de compactación; para contenidos de agua mayores que el óptimo las deformaciones aumentan en la medida en que aumenta el contenido de agua. En la descarga las deformaciones permanentes disminuyen en la medida en que aumenta el contenido de agua, presentando un mínimo en el óptimo de compactación, después del cual aumentan en la medida en que aumenta el contenido de agua.
- A igual densidad seca (Figura Nº 21) las deformaciones por expansión son de mayor magnitud en la rama seca respecto a la rama húmeda. Las deformaciones por consolidación tienden a ser mayores en la rama húmeda respecto a la rama seca, pero en la medida en que aumenta la densidad seca tienden a ser de magnitudes comparables en las dos ramas. La magnitud de las deformaciones permanentes por la descarga tienden a ser mayores en la rama húmeda respecto a la rama seca.

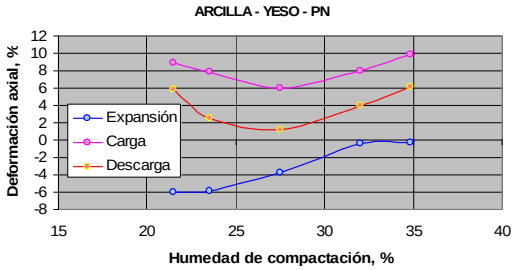


Figura Nº 20. Tendencias de variación de las deformaciones por expansión, consolidación y descarga en función de la humedad de compactación.

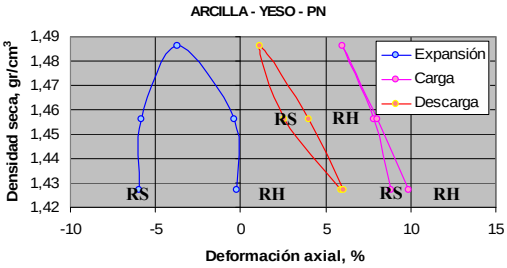


Figura Nº 21. Tendencias de variación de las deformaciones por expansión, consolidación y descarga en función de la densidad seca.

c) Probetas con densidades secas y humedades de compactación ubicadas sobre las curvas de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado.

Las Figuras Nº 22 y Nº 23 contienen las tendencias de variación de la presión de expansión en función de la densidad seca y de la humedad de compactación de probetas cuyas características se ubican sobre las curvas de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado. A partir de esta información se hace el siguiente análisis:

- En la Figura Nº 22 se observa que tanto en las probetas cuyas características se ubican sobre las curvas de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado, la presión de expansión se incrementa de manera significativa en la medida que se incrementa el contenido de agua, presentando un valor máximo cuando el contenido de agua es igual al óptimo. Después del contenido de agua óptimo, la presión de expansión se reduce drásticamente en la medida en que aumenta el contenido de agua.

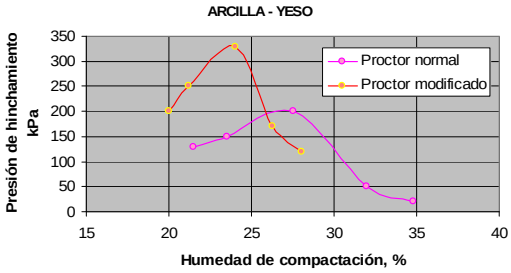


Figura Nº 22. Tendencias de variación de las presiones de expansión en función de la humedad de compactación.

- Independientemente del contenido de agua y de la ubicación de las características de las probetas sobre las curvas de compactación, todas las probetas, en mayor o menor grado, generaron presión de expansión.
- A igual humedad de compactación, las probetas compactadas con contenidos de agua menores que el 26% generan mayor presión de expansión cuando sus propiedades se ubican sobre la curva Proctor Modificado; para humedades de compactación mayores que el 26% cambia la tendencia y por tanto, generan mayor presión de expansión las probetas cuyas propiedades se ubican sobre la curva Proctor Normal.
- En la Figura Nº 23 se observa que, en general, generan menor presión de expansión las probetas cuyas características se ubican sobre la curva de compactación Proctor Normal, respecto a las que se ubican sobre la curva Proctor Modificado. No obstante, el rango de presiones de expansión comprendido entre 116 y 213 kPa puede ser generado por probetas cuyas características se ubican indistintamente sobre la curva Proctor Normal o sobre la curva Proctor Modificado.

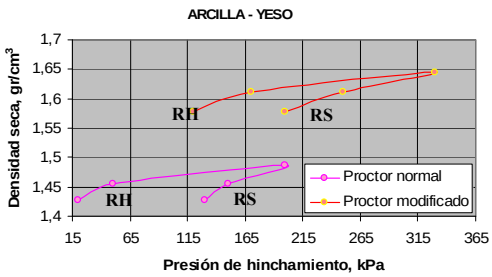


Figura Nº 23. Tendencias de variación de la presión de expansión en función de la densidad seca.

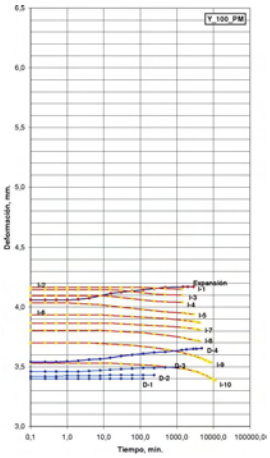
- A igual densidad seca generan mayor presión de expansión las probetas cuyas características se ubican sobre la rama seca de la curva de compactación, respecto a las que se ubican sobre la rama húmeda.

5.2.2. Mezcla natural de yeso-arcilla

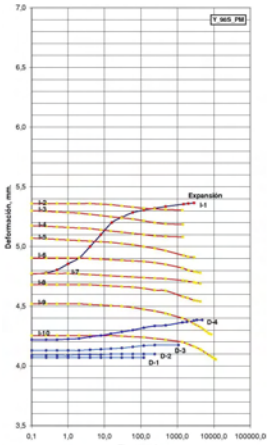
a) Probetas con densidades secas y humedades de compactación ubicadas sobre la curva de compactación Proctor Modificado.

Las muestras preparadas con densidades secas iguales al 96%, 98% y 100% y sus correspondientes humedades, las cuales se ubican sobre la curva de compactación Proctor Modificado, tanto en la rama seca como en la rama húmeda, exhiben el siguiente comportamiento:

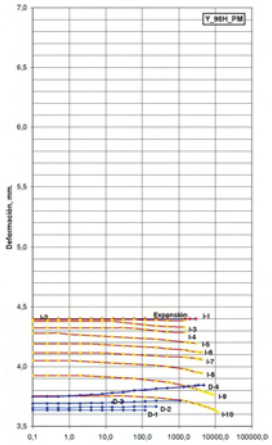
- Las deformaciones por expansión son de mayor magnitud en la rama seca que en la húmeda (Figura Nº 24). A igual porcentaje de densidad seca (γ_d) respecto a la densidad seca máxima ($\gamma_{dmáx}$), obtenida a partir del ensayo Proctor Modificado, pero diferente rama de compactación, si γ_d = 96% la deformación por expansión en la rama húmeda es nula y en la rama seca igual al 3.6% y si γ_d = 98% la deformación por expansión en la rama húmeda es nula y en la rama seca igual al 3%.
- Las deformaciones por consolidación son de mayor magnitud en la rama húmeda que en la seca (Figura Nº 24). A igual porcentaje de densidad seca (γ_d) respecto a la densidad seca máxima ($\gamma_{dmáx}$), obtenida a partir del ensayo Proctor Modificado, pero diferente rama de compactación, si γ_d = 96% la deformación por consolidación en la rama seca es del orden del 76% de la deformación por consolidación en la rama húmeda y si γ_d = 98% la deformación por consolidación en la rama seca es del orden del 90% de la deformación por consolidación en la rama húmeda.
- A igual densidad seca (Figura Nº 24), las deformaciones permanentes después de la descarga tienden a ser mayores en la rama húmeda que en la rama seca. A igual porcentaje de densidad seca (γ_d) respecto a la densidad seca máxima ($\gamma_{dmáx}$), obtenida a partir del ensayo Proctor Modificado, pero diferente rama de compactación, si γ_d = 96% la deformación permanente en la rama seca es del orden del 51% de la deformación permanente en la rama húmeda y si γ_d = 98% la deformación permanente en la rama seca es del orden del 67% de la deformación permanente en la rama húmeda.



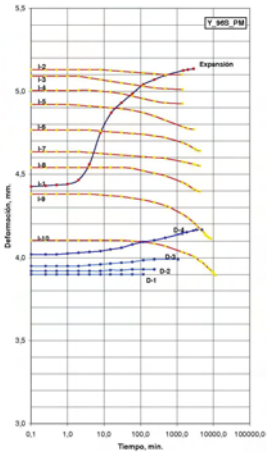
Y_100_PM



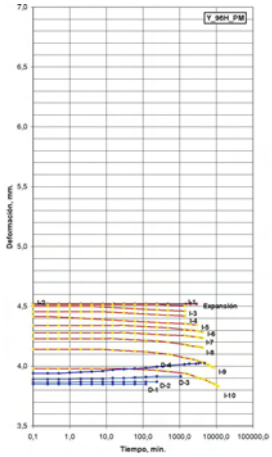
Y_98S_PM



Y_98H_PM



Y_96S_PM



Y_96H_PM

Figura Nº 24. Comportamiento deformación-tiempo de la mezcla natural de yeso-arcilla evaluado a partir muestras compactadas estáticamente.

- En función de la humedad de compactación (Figura Nº 25) las deformaciones por expansión disminuyen en la medida en que aumentan el contenido de agua, siendo nulas para contenidos de humedad mayores que el 23%. Las deformaciones por consolidación son relativamente pequeñas, no tienen una tendencia clara de variación y oscilan entre el 2.6% y el 3.9%. En la descarga la deformaciones permanentes, al igual que en

caso de la deformaciones por consolidación, son relativamente pequeñas, no tienen una tendencia clara de variación y oscilan entre el 1.3% y el 2.8%; es decir, se conservan entre el 50% y el 70% de las deformaciones por consolidación.

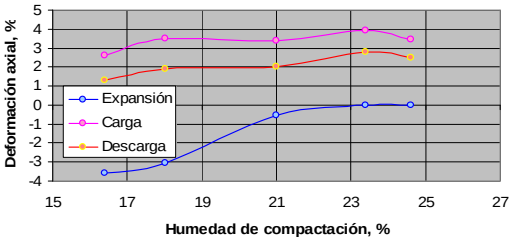


Figura Nº 25. Tendencias de variación de las deformaciones por expansión, consolidación y descarga en función de la humedad de compactación.

- A igual densidad seca (Figura Nº 26) las deformaciones por expansión son de mayor magnitud en la rama seca respecto a la rama húmeda; en la rama húmeda las deformaciones por expansión son nulas para densidades secas menores que 1.68 gr/cm^3. Las deformaciones por consolidación tiende a ser mayores en la rama húmeda respecto a la rama seca, pero en la medida en que aumenta la densidad seca tienden a ser magnitudes comparables en las dos ramas. Al igual que las deformaciones por consolidación, las deformaciones permanentes después de la descarga tienden a ser mayores en la rama húmeda respecto a la rama seca, pero en la medida en que aumenta la densidad seca tienden a ser magnitudes comparables en las dos ramas.

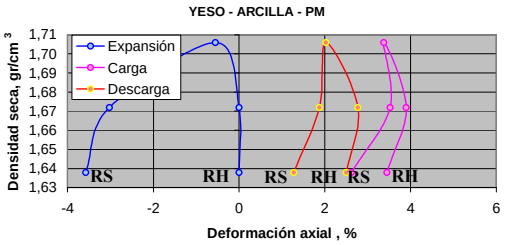


Figura Nº 26. Tendencias de variación de las deformaciones por expansión, consolidación y descarga en función de la densidad seca.

b) Probetas con densidades secas y humedades de compactación ubicadas sobre la curva de compactación Proctor Normal.

En función de la humedad de compactación (Figura Nº 27) las deformaciones por expansión disminuyen en la medida en que aumentan el contenido de agua, siendo nulas para contenidos de humedad mayores que el 28%.

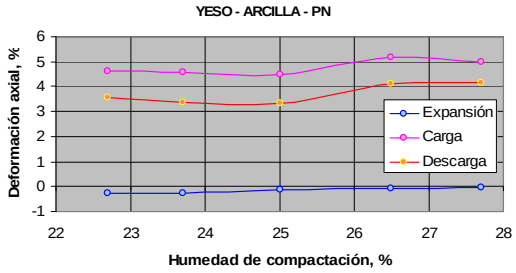
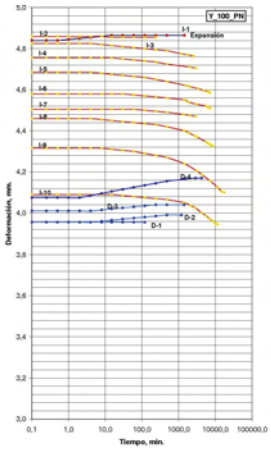


Figura Nº 27. Tendencias de variación de las deformaciones por expansión, consolidación y descarga en función de la humedad de compactación.

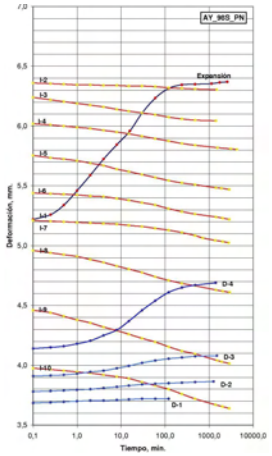
Las muestras preparadas con densidades secas iguales al 96%, 98% y 100% y sus correspondientes humedades, las cuales se ubican sobre la curva de compactación Proctor Normal, tanto en la rama seca como en la rama húmeda, exhiben el siguiente comportamiento:

- Las deformaciones por consolidación son de mayor magnitud en la rama húmeda que en la seca (Figura Nº 28). A igual porcentaje de densidad seca (γ_d) respecto a la densidad seca máxima ($\gamma_{dmáx}$), obtenida a partir del ensayo Proctor Normal, pero diferente rama de compactación, si γ_d = 96% la deformación por consolidación en la rama seca es del orden del 92% de la deformación por consolidación en la rama húmeda y si γ_d = 98% la deformación por consolidación en la rama seca es del orden del 88% de la deformación por consolidación en la rama húmeda.
- A igual densidad seca (Figura Nº 28), las deformaciones permanentes después de la descarga tienden a ser mayores en la rama húmeda que en la rama seca.
- A igual porcentaje de densidad seca (γ_d) respecto a la densidad seca máxima ($\gamma_{dmáx}$), obtenida a partir del ensayo Proctor Normal, pero diferente rama de compactación, si γ_d = 96% la deformación por consolidación en la rama seca es del orden del 85% de la deformación por consolidación en la rama húmeda y si γ_d = 98% la deformación por consolidación en la rama seca es del orden del 82% de la deformación por consolidación en la rama húmeda.
- Las deformaciones por consolidación son relativamente pequeñas, tienden a aumentar en la medida en que se incrementa el contenido de agua y varían entre el 4.6% y el 5.2%. En la

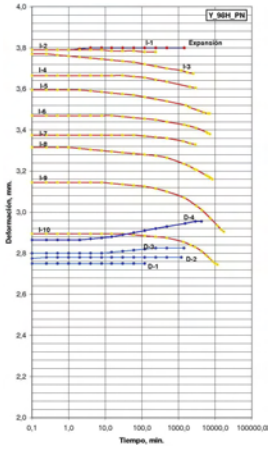
descarga la deformaciones permanentes, al igual que en caso de la deformaciones por consolidación, son relativamente pequeñas, tienden a aumentar en la medida en que se incrementa el contenido de agua y varían entre el 3.4% y el 4.2%; es decir, se conservan entre el 74% y el 81% de las deformaciones por consolidación.



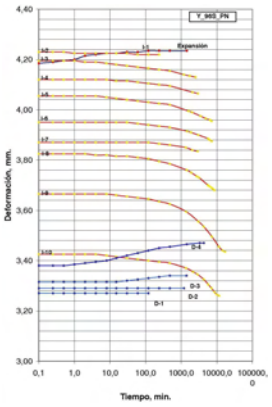
Y_100_PN



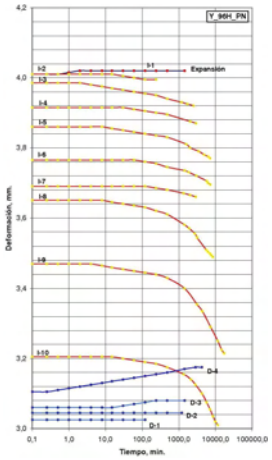
Y_98S_PN



Y_98H_PN



Y_96S_PN



Y_96H_PN

Figura Nº 27. Comportamiento deformación-tiempo de la mezcla natural de yeso-arcilla evaluado a partir muestras compactadas estáticamente.

c) Probetas con densidades secas y humedades de compactación ubicadas sobre las curvas de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado.

Las Figuras Nº 29 y Nº 30 contienen las tendencias de variación de la presión de expansión en función de la densidad seca y de la humedad de compactación de probetas cuyas características se ubican sobre las curvas de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado. A partir de esta información se hace el siguiente análisis:

- En la Figura Nº 29 se observa que en las probetas cuyas características se ubican sobre las curvas de compactación Proctor Modificado, la presión de expansión se reduce de manera significativa en la medida que se incrementa el contenido de agua, siendo igual a cero para contenidos de agua mayores del 23%. En el caso de las probetas cuyas características se ubican sobre las curvas de compactación Proctor Normal, la presión de expansión, independientemente del contenido de agua, es baja y en promedio igual a 25 kPa.
- A igual humedad de compactación, las probetas compactadas con contenidos de agua mayores que el 23% generan mayor presión de expansión cuando sus propiedades se ubican sobre la curva Proctor Normal.

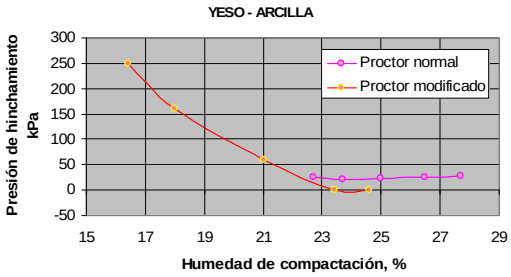


Figura Nº 29. Tendencias de variación de las presiones de expansión en función de la humedad de compactación.

- A igual densidad seca, Figura Nº 30, generan mayor presión de expansión las probetas compactadas con humedades que se ubican sobre la rama seca de la curva de compactación Proctor Modificado; en el caso de las probetas cuyas características de ubican sobre la curva de compactación Proctor Normal, independientemente de la densidad seca, la presión de expansión es en promedio igual a 25 kPa.
- Las probetas con densidad seca menor que el 99% de la máxima evaluada a partir de la prueba Proctor Modificado y ubicadas sobre la rama húmeda de la curva de compactación, generan menor o como máximo igual presión de expansión que las probetas cuyas características se ubican sobre la curva de compactación Proctor Normal.

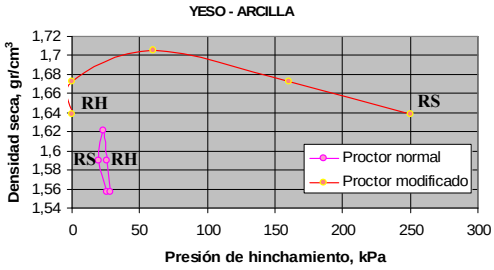


Figura Nº 30. Tendencias de variación de la presión de expansión en función de la densidad seca.

- A igual densidad seca, Figura Nº 31, las deformaciones por expansión son de mayor magnitud en la rama seca respecto a la rama húmeda y las deformaciones por consolidación y las remanentes después de la descarga son de mayor magnitud en la rama húmeda respecto a la rama seca

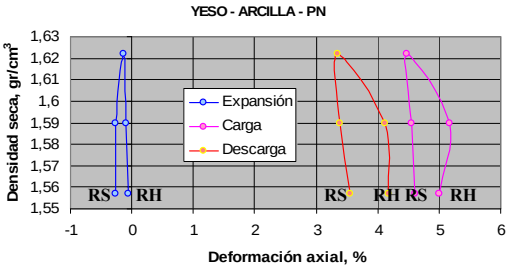


Figura Nº 31. Tendencias de variación de las deformaciones por expansión, consolidación y descarga en función de la densidad seca.

5.3. Colapso mezcla natural de yeso - arcilla

A partir del comportamiento deformación – tiempo reflejado mediante las gráficas incluidas en las Figuras Nº 32 y Nº 33 se analiza lo siguiente:

- La deformación axial que experimenta el material, independientemente del tamaño de las partículas, es de menor magnitud cuando el esfuerzo axial se aplica en condición de humedad natural (líneas azules), respecto a la deformación axial que se registra después de inundación (líneas rojas).
- En condición de humedad natural, la deformación axial que experimenta el material, independientemente del tamaño de las partículas, es relativamente pequeña cuando el

esfuerzo axial aplicado es igual 1 kg/cm^2. Para esfuerzos axiales mayores las deformaciones axiales, en el caso de 5 mm < D < 10 mm, se incrementan en la medida en que se incrementa el esfuerzo axial y en el caso de 2 mm < D < 5 mm, tienden a ser de magnitudes comparables para esfuerzos axiales mayores de 5 kg/cm^2.

- Independientemente de la condición de humedad, natural o después de inundar, el material constituido por partículas de menor tamaño, a igual esfuerzo axial, experimenta deformaciones axiales de mayor magnitud.

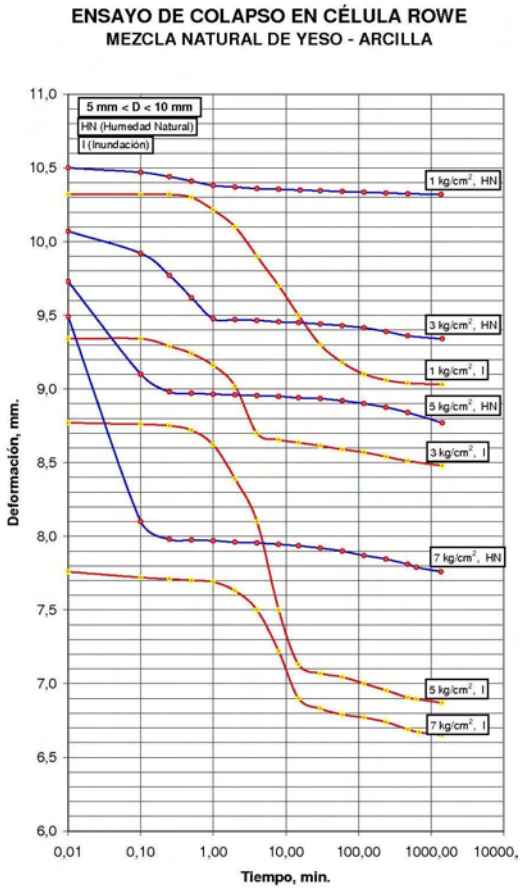


Figura Nº 32. Comportamiento deformación axial – tiempo con tamaño de partículas comprendido entre 5 y 10 milímetros.

Al comparar los resultados de las Figuras Nº 34 y Nº 35, en las que se incluyen gráficas de la tendencia de variación de la deformación axial en función del esfuerzo axial, para dos rangos de tamaños de partículas y dos condiciones de humedad, natural y después de inundación, se observa lo siguiente:

- En condición de humedad natural el material constituido por partículas de mayor tamaño, a igual esfuerzo axial, es menos susceptible a la deformación axial, respecto al material constituido por partículas de menor tamaño. Las deformaciones axiales del material con partículas de mayor tamaño varían entre el 26% y el 47%, respecto a las experimentadas por el material con partículas de menor tamaño.

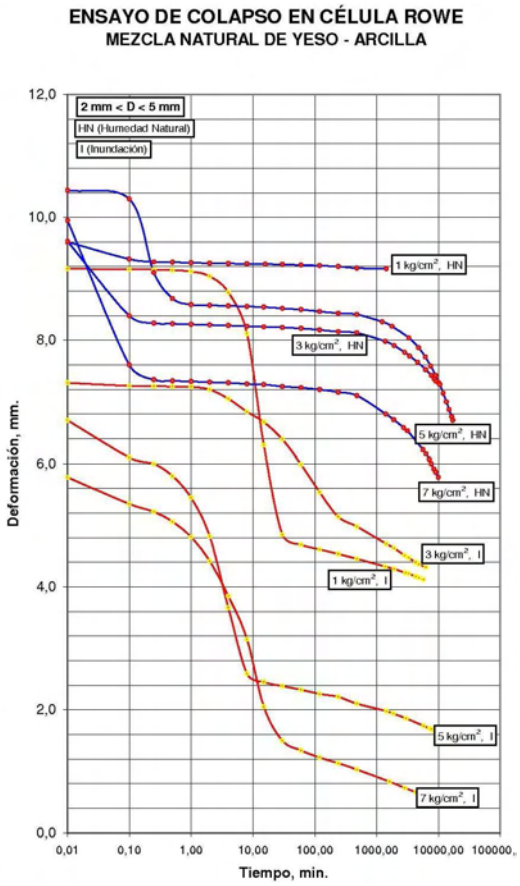


Figura Nº 33. Comportamiento deformación axial – tiempo con tamaño de partículas comprendido entre 2 y 5 milímetros.

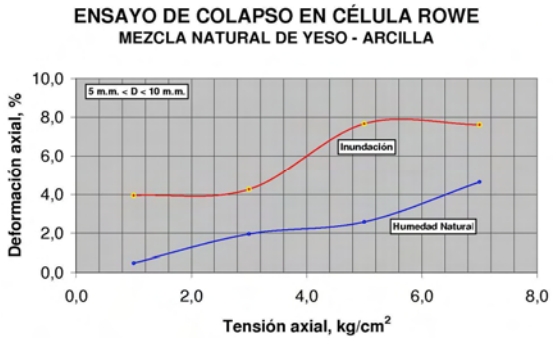


Figura Nº 34. Tendencia de variación de la deformación axial en función del esfuerzo axial, para condición de humedad natural y después de la inundación (5 mm < D < 10 mm).

- Después de la inundación el material constituido por partículas de mayor tamaño, a igual esfuerzo axial, es menos susceptible a la deformación axial, respecto al material constituido por partículas de menor tamaño. Las deformaciones axiales del material con partículas de mayor tamaño varían entre el 27% y el 33%, respecto a las experimentadas por el material con partículas de menor tamaño.

- A igual esfuerzo axial y diferente rango de tamaño de partículas la diferencia entre las deformaciones axiales experimentadas por los materiales es más significativa en condición de humedad natural que después de la inundación; las diferencias son del orden del 37% en promedio y del 30% en promedio, respectivamente.

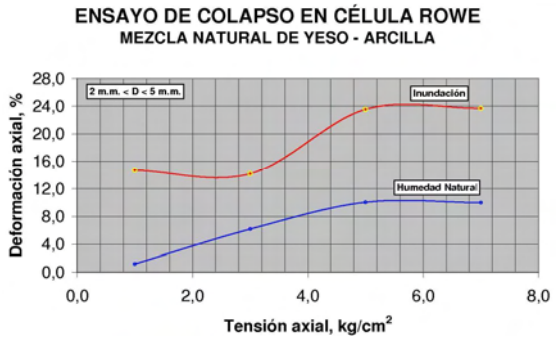


Figura Nº 35. Tendencia de variación de la deformación axial en función del esfuerzo axial, para condición de humedad natural y después de la inundación (2 mm < D < 5 mm).

- A igual rango de tamaño de partículas el efecto de la inundación en la generación de deformaciones axiales, adicionales a las presentadas en condición de humedad natural, es más significativo en el material constituido por partículas de menor tamaño, respecto al constituido por partículas de mayor tamaño. En el primer caso, las deformaciones se incrementan entre el 2% y el 5% y el segundo, ente el 8% y el 14%.

5.4. Rotura de partículas

A partir de ensayos no estandarizados y procedimientos no estandarizados se evaluó la susceptibilidad, de la glauberita y de la mezcla natural de yeso – arcilla, a la rotura de partículas cuando los materiales son sometidos en campo a procesos de compactación o cuando son solicitados por carga axial.

La simulación del proceso de compactación en campo se realizó como se describió en el apartado 4.2.5, obteniendo los resultados indicados en las Figuras Nº 36 a Nº 39.

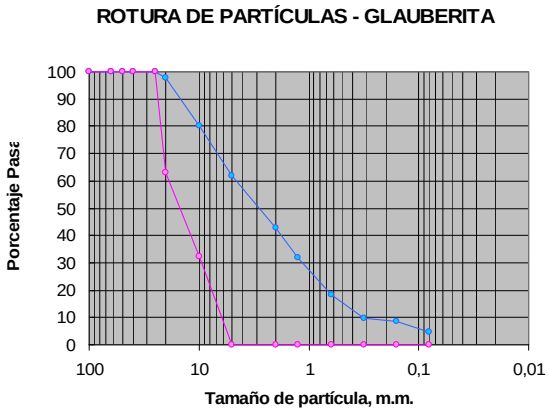


Figura Nº 36. Distribuciones granulométricas de una muestra de glauberita antes y después de realizar la prueba Proctor Modificado con humedad natural.

Los resultados de esta metodología no estandarizada permiten hacer los siguientes comentarios:

- Tanto la glauberita como la mezcla natural de yeso – arcilla son materiales que al someterlos, en el laboratorio, al proceso de compactación con la humedad natural, experimentan una rotura de partículas bastante significativa, incluso llegando a generar la pulverización evidente en las Figuras Nº 37 y Nº 39. En el caso de la glauberita, Figura Nº 36, la generación de partículas finas con tamaño menor de 0.08 milímetros fue igual al 5% y en el caso de la mezcla de yeso – arcilla, Figura Nº 38, igual al 4%.

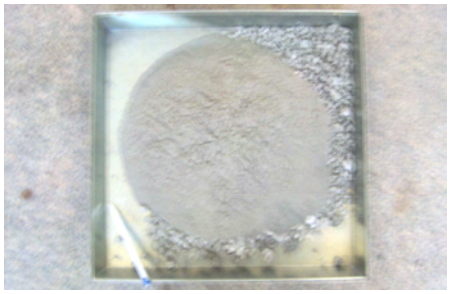


Figura Nº 37. Aspecto de una muestra de glauberita después de realizar la prueba Proctor Modificado con humedad natural. Antes de la compactación el tamaño de las partículas estaba comprendido entre 25 y 5 milímetros.

- Antes del proceso de compactación la distribución granulométrica de los dos materiales analizados es la típica de medios uniformes, pero como consecuencia de la energía aplicada las partículas se rompen, la distribución granulométrica se transforma y se queda en presencia de materiales bien gradados.

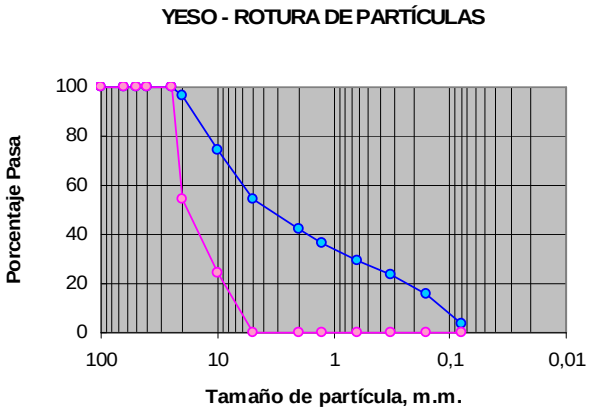


Figura Nº 38. Distribuciones granulométricas de una muestra de la mezcla natural de yeso – arcilla antes y después de realizar la prueba Proctor Modificado con humedad natural.



Figura Nº 39. Aspecto de una muestra de la mezcla natural de yeso - arcilla después de realizar la prueba Proctor Modificado con humedad natural. Antes de la compactación el tamaño de las partículas estaba comprendido entre 25 y 5 milímetros.

- Ante la posibilidad de utilizar estos materiales como material de relleno en terraplenes, al menos desde el punto de vista de dificultades durante el proceso de compactación en campo, no se prevé problemas, dado que normalmente y con facilidad se consigue que la energía que transmiten los equipos de compactación en campo sea mayor que la energía de laboratorio.

La simulación del proceso de aplicación de carga axial en campo se realizó como se describió en el apartado 4.2.4, obteniendo los resultados indicados en las Figuras Nº 40 y Nº 41.

A partir de las distribuciones granulométricas incluidas en las Figuras Nº 40 y Nº 41, se hace el siguiente análisis.

- La mezcla natural de yeso – arcilla es menos susceptible a la rotura de partículas, por efecto de carga axial, cuando está constituida por partículas cuyo tamaño está comprendido entre 5 y 10 milímetros, respecto a la constituida por partículas cuyo tamaño está comprendido entre 2 y 5 milímetros.
- En el caso de la mezcla natural de yeso – arcilla constituida por partículas cuyo tamaño estaba comprendido entre 5 y 10 milímetros, se fracturaron entre el 12% y el 24% de las partículas; mientras que en la mezcla natural de yeso – arcilla constituida por partículas cuyo tamaño estaba comprendido entre 2 y 5 milímetros, se facturaron entre el 46% y el 51% de las partículas.

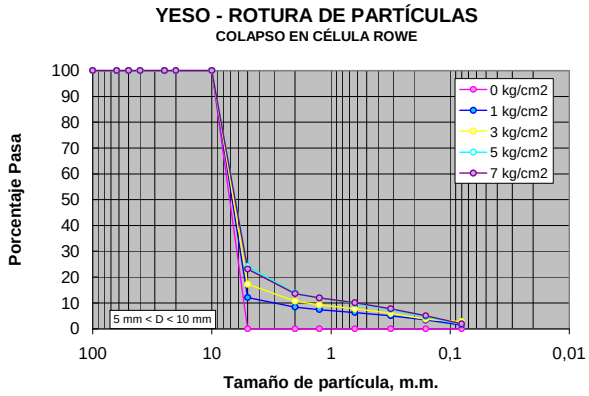


Figura Nº 40. Distribuciones granulométricas de muestras de la mezcla natural de yeso – arcilla antes y después de ser solicitadas por carga axial. Antes de aplicar la carga axial el material estaba constituido por partículas cuyo tamaño variaba entre 5 y 10 milímetros.

- La mezcla natural de yeso – arcilla es menos susceptible a la pulverización, por efecto de carga axial, cuando está constituida por partículas cuyo tamaño está comprendido entre 5 y 10 milímetros, respecto a la constituida por partículas cuyo tamaño está comprendido entre 2 y 5 milímetros.
- En el caso de la mezcla natural de yeso – arcilla constituida por partículas cuyo tamaño estaba comprendido entre 5 y 10 milímetros, la pulverización varió entre el 1.5% y el 3%;

mientras que en la mezcla natural de yeso – arcilla constituida por partículas cuyo tamaño estaba comprendido entre 2 y 5 milímetros, la pulverización varió entre el 3,5% y el 4.5%.

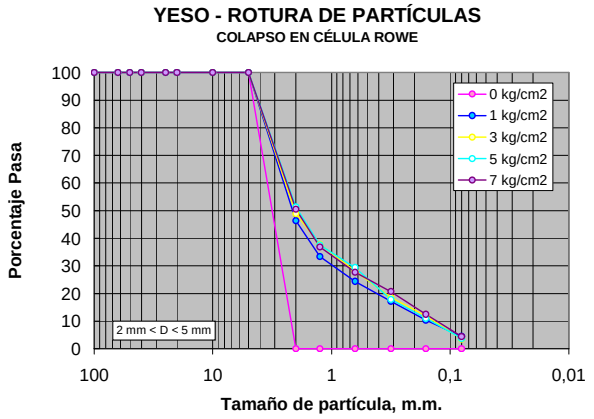


Figura Nº 41. Distribuciones granulométricas de muestras de la mezcla natural de yeso – arcilla antes y después de ser solicitadas por carga axial. Antes de aplicar la carga axial el material estaba constituido por partículas cuyo tamaño variaba entre 2 y 5 milímetros.

- En el caso de la mezcla natural de yeso – arcilla constituida por partículas cuyo tamaño estaba comprendido entre 5 y 10 milímetros, la rotura de partículas se incrementa en la medida que se incrementa el esfuerzo axial hasta 5 kg/cm^2. Dado que las distribuciones granulométricas después de aplicar 5 kg/cm^2 y 7 kg/cm^2 son prácticamente coincidentes, se intuye que para incrementar la rotura de partículas de una manera significativa sería necesario incrementar los esfuerzos axiales a niveles por encima de 10 kg/cm^2.
- En el caso de la mezcla natural de yeso – arcilla constituida por partículas cuyo tamaño estaba comprendido entre 2 y 5 milímetros, la rotura de partículas tiende a incrementarse, pero de manera poco significativa, en la medida que se incrementa el esfuerzo. Dado que todas distribuciones granulométricas son prácticamente coincidentes, se intuye que basta con aplicar 1 kg/cm^2 para que se rompan las partículas más débiles y que para incrementar la rotura de partículas de una manera significativa sería necesario incrementar las tensiones axiales a niveles por encima de 10 kg/cm^2.
- La generación de partículas cuyo tamaño es menor de 0.08 milímetros puede deberse a los efectos combinados de rotura de partículas y disolución de éstas, pero a la luz de esta investigación no es posible evaluar el porcentaje de contribución de cada uno de ellos.

5.5. Resistencia a la compresión simple

Por las condiciones naturales del yeso masivo, con incrustaciones arcillosas, solo fue posible realizar tres ensayos de compresión simple. Los valores obtenidos (9, 10 y 11 MPa) se corresponden con los presentados en la literatura como típicos para el material ensayado en el laboratorio.

Además, los valores de la resistencia a la compresión simple evaluados mediante ensayos realizados con núcleos extraídos de bloques "masivos" tienen baja dispersión.

6. CONCLUSIONES

A pesar de que la normativa estipula que el secado de estos tipos de materiales se debe realizar a bajas temperaturas, desde el punto de vista práctico tanto para la realización de ensayos de compactación como para control de calidad, el secado se debe realizar a 110º C, en razón de que al hacer las gráficas de compactación a partir de la humedad evaluada con secado a baja temperatura, la distribución de las parejas de puntos densidad seca – humedad de compactación es muy errática.

Independientemente de que la energía de compactación sea la del ensayo de compactación Proctor Normal o Proctor Modificado, la mezcla natural de arcilla-yeso es potencialmente expansiva para humedades de compactación menores al 32%; incluso puede exhibir expansión después de un ciclo de carga y descarga.

Independientemente de que la energía de compactación sea la del ensayo de compactación Proctor Normal o Proctor Modificado, la mezcla natural de yeso-arcilla es, en general, potencialmente expansiva para humedades de compactación menores al 28%, salvo probetas cuyas propiedades se ubican sobre la curva de compactación Proctor Modificado con humedades mayores al 23%. Estas expansiones pueden deberse a la hidratación de las fases anhidras o hemihidratadas de sulfato cálcico presentes en el yeso.

La mezcla natural de yeso-arcilla cuando se trata como material granular, incluso en estado denso, registra deformaciones importantes cuando es

solicitado por carga axial, siendo más significativas las deformaciones en la medida en que disminuye el tamaño de las partículas y cuando se inunda el material. En paralelo, registra también una importante rotura de partículas, resultando más afectada la distribución granulométrica en la medida que disminuye el tamaño de las partículas. La explicación podría deberse a el proceso químico (mayor superficie específica de las muestras con partículas más pequeñas hacen que se produzcan con mayor celeridad) y al proceso mecánico (la propagación de las fracturas hace romper antes a las partículas pequeñas).

La deformación a largo plazo en muestras inundadas es superior a la producida en muestras semisaturadas. En este tipo de materiales, es especialmente importante este fenómeno, ya que la deformabilidad se debe no solo a un mecanismo mecánico favorecido por la inundación (rotura y deformación de partículas) sino también a un complejo mecanismo químico (disolución y recristalización). Es posible que la temperatura influya en el desarrollo de este fenómeno y por tanto en la deformación del conjunto.

Tanto la mezcla natural de yeso-arcilla como la glauberita resultan bastante vulnerables a la rotura de partículas cuando son solicitadas por cargas originadas por impacto, es decir cuando son compactados, llegando incluso a la pulverización.

La glauberita es un material que se puede calificar como inaceptable para ser utilizado en la construcción de terraplenes.

La utilización del yeso masivo como material de relleno en pedraplenes, eventualmente, podría ser utilizado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- El comportamiento de medios granulares está especialmente marcado por la rotura de partículas y principalmente en aquellos materiales que son blandos, como lo es el yeso.
- El relleno yesífero si no se compacta lo suficiente (hasta pulverizarlo y llevarlo a un estado tipo suelo) es posible que registre grandes deformaciones, en razón de que por ser una roca blanda se producirá la rotura de partículas con facilidad y además colapso de estructura.
- La deformabilidad se reduce en la medida en que el tamaño de los fragmentos aumenta, el material es bien gradado, las condiciones de esfuerzos se reducen y la densidad se incrementa.
- La acción del agua puede provocar la disolución del material, por lo que interesa evitar completamente los flujos de agua.

Con base en los resultados experimentales, en principio, las mezclas naturales de arcilla-yeso y yeso-arcilla estudiadas en esta investigación, podrían ser utilizadas como material de relleno en terraplenes, prestando especial atención a los siguientes aspectos:

- El material debe quedar encapsulado para reducir al máximo comportamientos no deseados por expansión, colapso o deformaciones por disolución.
- El material debe ser compactado del lado húmedo hasta lograr como mínimo una densidad seca igual al 98% de la evaluada mediante la prueba de compactación Proctor Modificado.
- La humedad de compactación deberá ser, como máximo, mayor en un 2% a humedad óptima evaluada mediante la prueba de compactación Proctor Modificado.

A fin de decidir, de manera categórica, si los materiales yesíferos son aptos para ser utilizados como relleno en terraplenes, se requiere experimentación más detallada y en la que se incluya además de los tópicos estudiados, otros aspectos como la resistencia el esfuerzo cortante y la influencia de la disolución en el comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo. Para cumplir con este objetivo se requiere:

- Ensayar un mayor número de materiales
- Realizar pruebas combinadas de expansión y consolidación a más largo plazo, ya que si bien es cierto que en esta investigación se realización pruebas cuya duración fue hasta de 48 días, se optimizaría la utilización de la información si la duración de las pruebas se prolonga al menos a 120 días.
- Realizar ensayos de colapso con un mayor número de fracciones granulométricas, un mayor número de esfuerzos axiales y más largo plazo.
- Realizar ensayos de compresión simple y ensayos triaxiales con muestras cuyas propiedades se ubiquen sobre las curvas de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado.

- Desarrollar un ensayo que permita evaluar la influencia de la disolución en el comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo.
- Realizar pruebas de colapso y ensayos triaxiales con probetas cuyo tamaño de partícula sea como mínimo 20 milímetros.
- Construir un terraplén de prueba debidamente instrumentado para observar su comportamiento durante un largo período de tiempo.

AGRADECIMIENTOS

A GETINSA INGENIERÍA por promover la investigación sobre la utilización de yesos en terraplenes y por financiar la fase inicial del proyecto desarrollado en la Universidad Politécnica de Madrid "Estudio del comportamiento de rocas evaporíticas para su utilización en infraestructuras viarias".

A la entidad pública ADIF por permitir el ingreso a uno de sus proyectos para tomar las muestras utilizadas en la investigación.

Al CEDEX por la evaluación del contenido mineralógico de las muestras.

REFERENCIAS

Arredondo, F., 1969. El yeso, en Estudio de Materiales. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento. Madrid.

Alonso E., y Oldecop, L., 2000. Comportamiento de pedraplenes y escolleras. Simposio sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte. Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica. Barcelona, España, pp 843 - 859.

Delgado A., 1986. Influencia de las trayectorias de las tensiones de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.

González, I., Olalla, C., Patiño, H., Romana, M., y Cimadevila, A., 2009 "Principales características geotécnicas de los materiales yesíferos para su utilización en terraplenes". Revista IngeoPres, Nº 186, pp. 24-33.

Gromko, G.J., 1974. Review of expansive soils. Journal of the Geot. Eng. Div. ASCE., Vol. 100(GT6), pp. 667-687.

Hagerty, M. M., Hite, D. R., Ullrich, C. R., y Hagerty, D. J., 1993. One-dimensional highpressure compression of granular media. J. Geotech. Engrg., ASCE, 119(1).

Hardin, B. O., 1985. Crusing of soil particles. J. Geotech. Engrg., ASCE 111 (10), pp 1177 - 1192.

Jennings, J. E. B. y Burland, J. B., 1962. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. Geotechnique, 12(2), pp. 125-144.

Jiménez Salas, J. A., y Justo Alpañes, J. L., 1984, Geotecnia y Cimientos I (2a Edición). Ed. Rueda.

Jiménez Salas, J. A., 1986. Suelos parcialmente saturados. Simposio sobre terraplenes, pedraplenes y otros rellenos, Sociedad Española de Mecánica del Suelo y Cimentaciones, A.I.P.C.R. Española y Sociedad Española de Mecánica de Rocas, Madrid, España. pp. 3 - 42

Josa A., 1988. Un modelo elastoplástico para suelos no saturados. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

Lade, P. V., Yamamuro, J. A. y Bopp, P. A., 1996. Significance of particle crushing in granular materials. J. Geotech. Engrg. ASCE, 122 (4), pp 309 – 316.

Lee, K. L. y Farhoomand, I., 1967. Compresibilidad y rotura de suelos granulares en compresión triaxial anisótropa. Can. Geotech. J., Ottawa, Canada, 4(1). pp 68-86

McDowell, G. R. y Bolton, M. D., 1998. On the micromechanics of crushable aggregates. Geotechnique, 48(5), pp 667-679.

Marsal R. J., 1965. Investigaciones sobre el comportamiento de suelos granulares y muestras de enrocamiento. Comisión Federal de Electricidad, México.

Matyas, E.L. y Radhakrishna, H.S., 1968. Volume change characteristics of partially saturated soils. Geotechnique, 18(4), pp. 432-448.

Takei, M., Kusakabe, O., y Hayashi, T., 2001. Time-dependent behavior of crushable materials in one-dimensional compression test. Soils and Foundations, 41(1), pp. 97-121.

Soriano, A., 2002. "Los materiales yesíferos en la construcción de terraplenes". Jornadas sobre los suelos marginales en la construcción de Obras Lineales, INTEVIA, Sevilla.

Soriano, A., 2007. "Ejecución de rellenos con materiales yesíferos". II Jornadas sobre materiales marginales en obras viarias", Asociación Técnica de Carreteras, Sevilla.