

Determinación de la resistencia a la penetración de un suelo cohesivo en diferentes condiciones de hidratación y compactación.

Determination of the resistance to penetration of a cohesive soil under different conditions of hydration and compaction.



MSc. Ing. Romer Daniel Oyola-Guzmán

Ingeniero Civil, Diplomado en Ingeniería Vial por la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno (UAGRM). Bolivia

Ph.D Student en el Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, (CICATA-Legaria). México

Telf: +5255 5530274383

E-mail: romer_oyol@hotmail.com

Recibido: 27-09-16

Aceptado: 20-10-16

Resumen:

Esta publicación muestra el comportamiento de un suelo cohesivo en diferentes estados de compactación e hidratación, es decir en diferentes condiciones de hidratación y de peso volumétrico seco. Para ello se realizó la experimentación con un material cohesivo, al cual se efectuó una caracterización mecánica, ensayo de Proctor (energía modificada) y resistencia a la penetración (CBR). Se presenta un gráfico donde se relaciona la resistencia a la penetración con la humedad, peso volumétrico seco y volumen de vacíos. Concluyéndose que la resistencia a la penetración del suelo estudiado está relacionada con el contenido de agua.

Palabras clave: compactación, curva de saturación, curva de estabilidad, CBR, suelos parcialmente saturados.

Abstract:

This article analyzed the soil behavior in different compaction conditions (different water contents and different dry unit weights). For this purpose it was realized the experimentation with a cohesive material, which was analyzed thru a mechanical characterization, Proctor test (modified effort) and CBR. It is show a graphic which connect CBR with water content, dry unit weight and void volume. Concluding that the resistance of penetration in soil is related with water content.

Keywords: compaction, saturation curve, stability curve, CBR, partially saturated soils.

Introducción:

En la construcción de obras viales (p. ej. carreteras, calles, aeropistas), la compactación es un proceso utilizado muy frecuentemente, con la finalidad de densificar el material y mejorar ciertas propiedades como incrementar la resistencia a la penetración, disminuir la permeabilidad y deformaciones, este hecho era conocido empíricamente desde la época de los romanos ^[1].

El proceso de compactación mejora las propiedades mecánicas del material ^[2], no obstante éstas se ven influenciadas por la presencia del agua dentro de la masa de suelo, en especial en suelos finos plásticos o también llamados cohesivos, esto debido a que la succión juega un papel importante en la resistencia ^[3], así por ejemplo en época de estiaje (bajo contenido de agua), la resistencia del suelo puede aumentar, mientras que en época de lluvias (alto contenido de agua), si el agua llega a infiltrarse en la masa de suelo la resistencia puede reducirse considerablemente. De ahí la importancia de realizar una compactación con el contenido de agua óptimo, además de las adecuadas obras de drenaje ^[4], ^[5]. Este artículo muestra de forma cualitativa y cuantitativa el efecto del contenido de agua en la resistencia del suelo, además se analizan las ventajas de compactar el material en condiciones muy cercanas a su óptimo de compactación aunque parecieran no ser las mejores en cuanto a resistencia, sin embargo se explica por qué hacerlo en ese rango.

Geomateriales

El planeta Tierra está constituido en superficie por dos tercios de agua y un tercio de tierra ^[6]. Según sea el enfoque de alguna de las ramas de la ciencia (geología, ingeniería civil, agronomía), la definición de suelo o tierra, es diferente ^[6]; sin embargo todas coinciden en que el suelo es un geomaterial, es decir un material que proviene de la corteza terrestre. Los dos grandes grupos en los que se puede clasificar los geomateriales son las rocas y los suelos ^[7].

El suelo

Dentro de la ciencia de los materiales, el suelo es uno de los más utilizados en el ámbito de la industria de la construcción ^[8]. Se lo utiliza tanto para preparar concreto, mezclas asfálticas, como también para base de obras civiles (p. ej.: aeropistas, edificios, puentes).

El suelo es un material constituido por partículas sólidas y un conjunto de huecos o vacíos, dentro de los cuales puede haber agua, aire o la mezcla de los dos ^[9]. Esquemáticamente el suelo se representa por un sistema de tres fases como se muestra en la figura 1, cada una de ellas con cierto peso y volumen. Para fines prácticos el peso del aire se considera despreciable, no así su volumen ^[10].

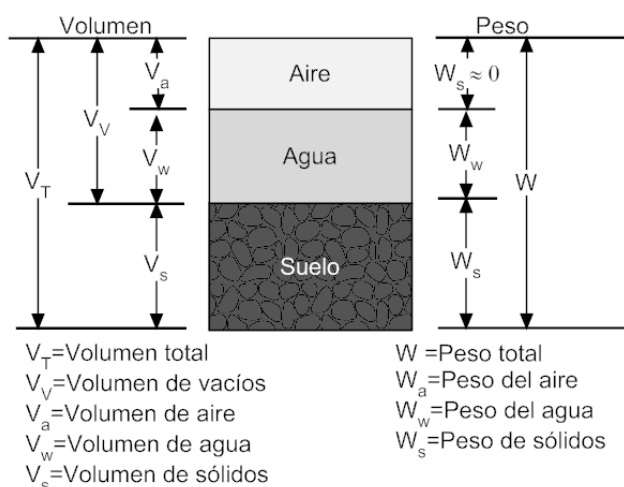


Figura 1. Esquema idealizado de las fases del suelo.

Compactación

Es un proceso mecánico de expulsión del aire contenido en la masa de suelo, con el que se reducen los vacíos del suelo (ver fig. 2), forzando a las partículas a estar más en contacto entre ellas ^[11], ^[12]. También se define como el reacomodo de las partículas de suelo a través de la expulsión de aire ^[4]. Esto se lleva a cabo a través de vibrado, impacto o amasado. Como resultado de este proceso mecánico de reducción de volumen de vacíos de aire se logra incrementar el peso volumétrico del suelo ^[2].

La compactación se realiza sobre suelos parcialmente saturados o también llamados no saturados, es decir en suelos donde el grado de saturación es menor al 100% ^[13]. De acuerdo con Lambe y Whitman ^[13] el óptimo de la curva de compactación se encuentra entre 80 y 85% del grado de saturación.

En suelos parcialmente saturados de acuerdo con Zepeda-Garrido y Pérez-García ^[3] se define la succión: “como un estado de presión negativa en el agua del suelo”.

La succión es responsable de que suelos con alto contenido de finos cohesivos, presenten una elevada resistencia a bajos contenidos de agua, sin embargo, a contenidos de agua altos la resistencia disminuye ^[3], ^[9].

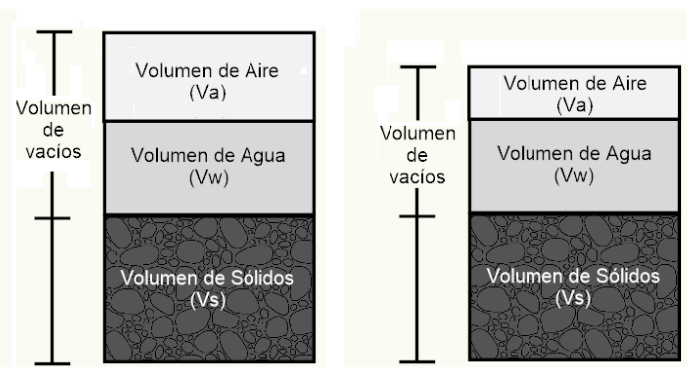


Figura 2. Esquema de las fases del suelo después del proceso de compactación.

Ensayo de Proctor

El ensayo de Proctor simula en laboratorio el proceso de compactación en obra, a través de golpes en la masa de suelo ^[11]. Su objetivo es determinar la densidad seca máxima y contenido de agua óptima del geomaterial. Esta prueba de laboratorio se encuentra normada por diversas instituciones entre ellas, la Sociedad Americana para Pruebas de materiales (ASTM) por sus siglas en inglés, es una de las pruebas más ampliamente usadas en el ámbito de vías camineras ^[14]. Su designación para la prueba con energía modificada en la norma ASTM corresponde a: ASTM D 1557, en ella se pueden encontrar: equipos, procedimientos, valores a reportar como resultados, entre otros detalles.

Ensayo de CBR

Es un ensayo semi-empírico cuyo objetivo es determinar la resistencia a la penetración del suelo. Fue propuesto por los ingenieros T. E. Stanton y O. J. Porter en el año 1929, y hasta la fecha sigue siendo uno de los valores o índices más empleados para el cálculo de pavimentos flexibles ^[15], este ensayo se ha difundido especialmente en toda América Latina y parte de Europa. Con este ensayo se simula en laboratorio la carga de un suelo bajo las ruedas de un vehículo ^[4]. El ensayo, en términos generales, consiste en preparar especímenes con diferentes contenidos de agua y energía. Luego se penetra la muestra a una velocidad normalizada (1.27 mm/min). El pisón tiene un sección normalizada de 19.3 cm². La curva se traza colocando en el eje de las abscisas la

penetración y en el eje de ordenadas la presión ejercida por el pisón al suelo. Esta curva se denomina como curva esfuerzo-deformación.

Se registra la presión necesaria para penetrar el suelo 0.1" (2.54 mm) y se lee la correspondiente presión ^[1]. Este valor de presión se compara contra un patrón (piedra triturada), para el caso de 0.1" de penetración, el patrón de comparación es de 70 kg/cm² y este es el valor que se reporta como índice CBR o resistencia a la penetración. Los detalles de la prueba se encuentran en la norma ASTM con designación ASTM D 1883.

Curva de estabilidad

Valle-Rodas ^[15] afirma: "Si compactamos un suelo a distintos grados de humedad, (p. ej.: 6%, 8%, 10%, etcétera) y medimos la "estabilidad" que presenta cada "estado de compactación", hincando, una barra metálica de dimensiones y peso conocidas...obtendremos la curva de estabilidad". Se puede utilizar el ensayo de CBR para determinar la resistencia a la penetración en cada "estado de compactación" con una penetración preestablecida (p. ej.: 2.54 mm) y de este modo obtener los valores de CBR para cada estado de compactación. La gráfica de estabilidad se obtiene al representar en un plano cartesiano cada par ordenado (contenido de agua y CBR) para cada estado de compactación, donde el eje de las abscisas es el contenido de agua y el eje de las ordenadas es el valor de CBR (kg/cm²).

Relaciones fundamentales

En mecánica de suelos existen relaciones que son muy útiles de conocer y/o recordar ^{[17], [18], [19]}, a continuación se enlistan las principales:

La porosidad (n) es la relación entre el volumen de vacíos (V_v) y el volumen total (V_T):

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad ; \quad 0 < n < 1 \quad (1)$$

La relación de vacíos (e) es el cociente entre el volumen de vacíos (V_v) y el volumen de sólidos (V_s):

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad ; \quad e > 0 \quad (2)$$

Tanto la porosidad como la relación de vacíos se pueden expresar en forma porcentual al multiplicar por cien este valor (hecho muy común en libros de texto).

La vinculación entre la relación de vacíos (e) y la porosidad (n) se puede obtener utilizando convenientemente manipulaciones algebraicas y se presentan en las ecuaciones 3 y 4 ^[18].

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (3)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (4)$$

El contenido de agua o humedad (w) de una muestra de suelo, se expresa como la relación entre el peso del agua (W_w) y el peso de la materia sólida (W_s), en porcentaje:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad ; \quad w \geq 0 \quad (5)$$

A continuación se presenta otra relación fundamental en mecánica de suelos, que según sea el autor, la denominan: peso volumétrico húmedo ^[12], peso unitario húmedo ^{[10], [17]}, peso específico húmedo ^[19], densidad húmeda ^[15]. Los diversos nombres que se dan a esta relación se debe a la traducción del inglés y francés al español ^[9], en esta publicación se hará referencia a esta relación utilizando el nombre de peso volumétrico húmedo o seco, según sea el caso, en virtud que las unidades utilizadas son unidades de peso (N) por unidad de volumen (m³).

El peso volumétrico húmedo (γ_h) ^[12] está dado por:

MSc. Ing. Romer Daniel Oyola-Guzmán. Determinación de la resistencia a la penetración de un suelo cohesivo en diferentes condiciones de hidratación y compactación.

$$\gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V_T} \quad ; \quad \gamma_h > 0 \quad (6)$$

El peso volumétrico seco (γ_d) (el subíndice d proviene de la abreviación de la palabra en inglés "dry" que significa seco) se expresa como:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_T} \quad ; \quad \gamma_d > 0 \quad (7)$$

El peso unitario de los sólidos se define como el cociente entre el peso exclusivo de los sólidos (W_s) y el volumen de sólidos (V_s) es decir:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad ; \quad \gamma_s > 0 \quad (8)$$

La densidad relativa de sólidos o gravedad específica (G), se define como la relación entre el peso unitario de los sólidos (γ_s) y el peso unitario del agua destilada y desairada a 4°C (γ_{w0}) éste último valor para fines prácticos se denota como γ_w y se considera 1.0 g/cm³.

$$G = \frac{W_s}{V_s \gamma_{w0}} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{w0}} \quad ; \quad G > 0 \quad (9)$$

Una interpretación de la gravedad específica es la siguiente: si un suelo tiene un peso específico de 2.7 significa que 1.0 cm³ de sus partículas minerales pesa 2.7 veces más que 1.0 cm³ de agua destilada, a igual temperatura [15].

Nótese que la densidad relativa de sólidos (G) es un valor adimensional, ya que el peso unitario de los sólidos (γ_s) al igual que el peso unitario del agua (γ_w) se expresan en unidades de peso o masa por unidad de volumen (kN/m³, Kg/m³, g/cm³ según sea el sistema utilizado) y por tanto al realizar el cociente las unidades se cancelan.

El grado de saturación (S_r) es la relación entre el volumen de agua (V_w) y el volumen de vacíos (V_v):

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad ; \quad 0 \leq S_r \leq 1 \quad (10)$$

Para suelos no saturados, aplicando apropiadamente manipulaciones algebraicas se puede obtener alternativamente la siguiente expresión para el grado de saturación [19]:

$$S_r = \frac{w}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}} \quad (11)$$

Donde (S_r) es el grado de saturación y (w) es el contenido de agua, ambos expresados en forma decimal, (γ_w) es el peso unitario del agua, (γ_d) es el peso volumétrico seco del suelo y (γ_s) es el peso volumétrico de los sólidos (ec. 8). De la ecuación 11 se puede despejar el peso volumétrico seco del suelo (γ_d) para diferentes grados de saturación (p. ej.: 0.75, 0.80, 0.85, 0.90) o el caso especial de 100% de grado de saturación ($S_r=1$) que corresponde a la curva de saturación o también llamada de cero vacíos de aire. La expresión está dada por:

$$\gamma_z = \frac{G \gamma_w}{1 + wG} \quad (12)$$

Donde (γ_z) es el peso volumétrico seco correspondiente a un suelo con cero vacíos de aire (valor teórico), el subíndice z corresponde a la abreviación del inglés "zero air void". (G) es la gravedad específica (adimensional), (γ_w) es el peso unitario del agua (kN/m³) y (w) es el contenido de agua expresado en forma decimal.

Metodología:

Para efectuar la experimentación en laboratorio, se recolectó un lote de suelo proveniente de una obra de pavimentación en la localidad de Santa Cruz-Bolivia, en la región de Colinas del Urubó, se realizó una caracterización mecánica (granulometría [20], límites de consistencia [21], gravedad

MSc. Ing. Romer Daniel Oyola-Guzmán. Determinación de la resistencia a la penetración de un suelo cohesivo en diferentes condiciones de hidratación y compactación.

específica ^[22], clasificación HRB ^[23], se realizó la prueba de Proctor modificado ^[24] y se efectuó ensayos de resistencia a la penetración (CBR) de acuerdo a la variante 7.2 de la norma ASTM ^[25], es decir se realizó la prueba en condiciones “tal como se compactó”, se reportó el valor de CBR correspondiente para 0.1” (2.54 mm) de deformación.

Resultados y discusión:

Los resultados de la caracterización mecánica se presentan en la tabla 1, donde se observa que el suelo corresponde a una material fino plástico A-7-6(15), con un índice de plasticidad de 23.6%.

Tabla 1. Caracterización del material.

| | |
|-------------------------------|-----------|
| Contenido natural de agua (%) | 7.2 |
| Límite Líquido (%) | 48.3 |
| Índice de plasticidad (%) | 23.6 |
| Densidad relativa de sólidos | 2.7 |
| Arena gruesa (%) | 1.5 |
| Arena fina (%) | 1.5 |
| Limo y Arcilla (%) | 97 |
| Clasificación del suelo | A-7-6(15) |

Los resultados de la prueba de compactación con energía modificada ^[24] se presentan en la figura 3. En ella se observa que el contenido de agua óptima es de 17.1% y el peso volumétrico seco máximo es de 17.39 kN/m³. Se contrasta este valor con el obtenido por Sánchez-Leal ^[14] para un material con características granulométricas y de plasticidad similares, cuyo valor de contenido de agua óptimo fue 17.4 % y un peso volumétrico seco máximo de 17.07 kN/m³. Se observa que los valores sólo difieren en décimas.

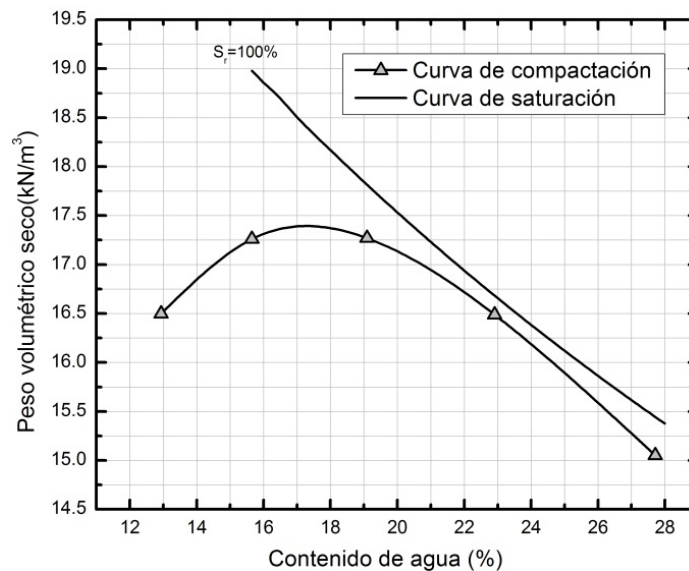


Figura 3. Curva de compactación del material.

Haciendo uso de la ecuación 11, se trazaron las familias de curvas de saturación para diferentes grados de saturación, como se muestra en la figura 4. Se observa que el óptimo de la curva de compactación presenta un grado de saturación de 85%.

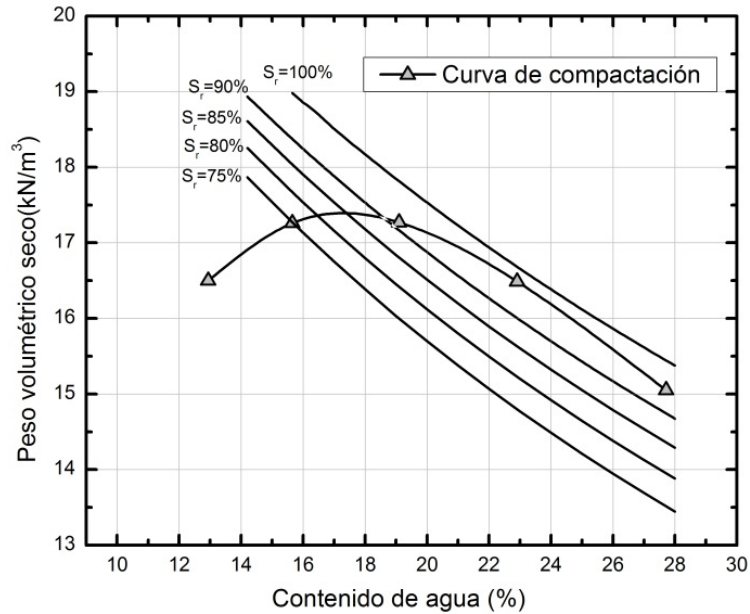


Figura 4. Familia de curvas con diferente grado de saturación.

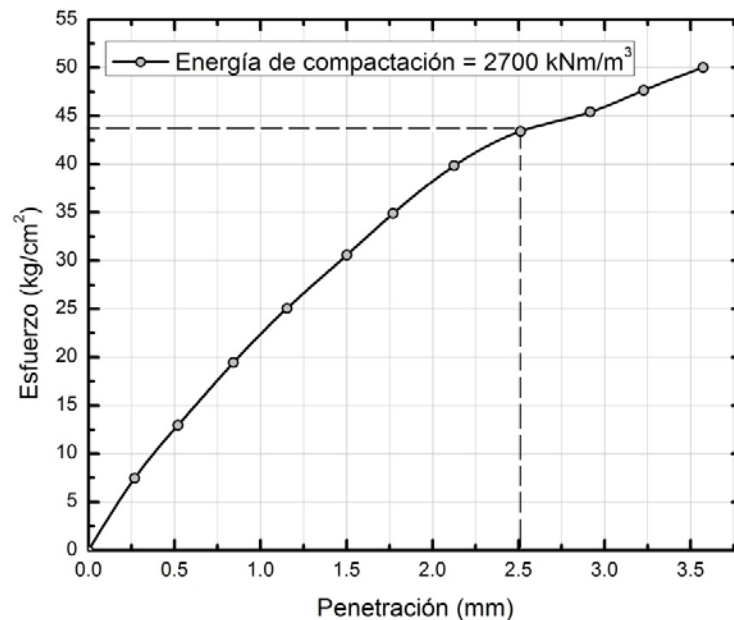


Figura 5. Curva del ensayo de CBR.

En la figura 5 se muestra la curva esfuerzo-penetración del suelo A-7-6(15) para una energía de compactación de 2700 kNm/m^3 (56 golpes por capa), con 17.1% de contenido de agua y un peso volumétrico seco de 17.4 kN/m^3 , es decir en las condiciones del óptimo de la curva de compactación (ver figura 3). En estas condiciones el suelo presenta un CBR de 62% (43.4 kg/cm^2).

En la figura 6 se presenta: la curva de compactación [13], saturación [19] y estabilidad [15], en esta gráfica se observa cualitativamente que a menor contenido de agua se obtiene un menor peso volumétrico seco, sin embargo se obtiene la mayor resistencia (CBR) para una penetración preestablecida de 0.1" (2.54 mm), en contra parte, se observa que la relación de vacíos no es la mínima. Esto sugiere que al compactar el material con un contenido de agua de 13% se obtendría la mayor resistencia del suelo (punto A de la curva de estabilidad, 80% CBR), sin embargo se observa que en esas condiciones el suelo presenta un volumen de vacíos de 38.8%

En el óptimo de la curva de compactación se observa que la resistencia a la penetración (punto D de la curva de estabilidad, 62% CBR) no es la máxima, no obstante en estas condiciones el volumen de vacíos es mínimo (35.5%).

Así pues, si se realiza una compactación en las proximidades del contenido de agua óptimo se observa que el volumen de vacíos se reduce y se alcanza un valor muy próximo al peso volumétrico seco máximo, además en caso de que el suelo se encuentre expuesto a cambios de contenidos de agua, la resistencia a la penetración no se ve tan fuertemente afectada, esto es, con el contenido de agua óptima el valor de la resistencia a la penetración (punto D de la curva de estabilidad), se puede mover entre los puntos C y E, sin que se vea afectada considerablemente la resistencia a la penetración. Se observa que cuando el suelo es compactado con un contenido de agua de 13% su peso volumétrico seco es de 16.5 kN/m³, su volumen de vacíos es de 38.8% y su resistencia a la penetración o CBR es de 80%, si este suelo se humecta hasta alcanzar 23%, su resistencia a la penetración o CBR es de 14.63% lo que indica que debido al aumento de la humedad en la masa del suelo, su resistencia a la penetración se reduce en 81.7%

Por otra parte se observa que para altos contenido de agua (p. ej.:28%) la resistencia a la penetración (CBR de 1%) es casi nula y el volumen de vacíos es muy alto (44.4%).

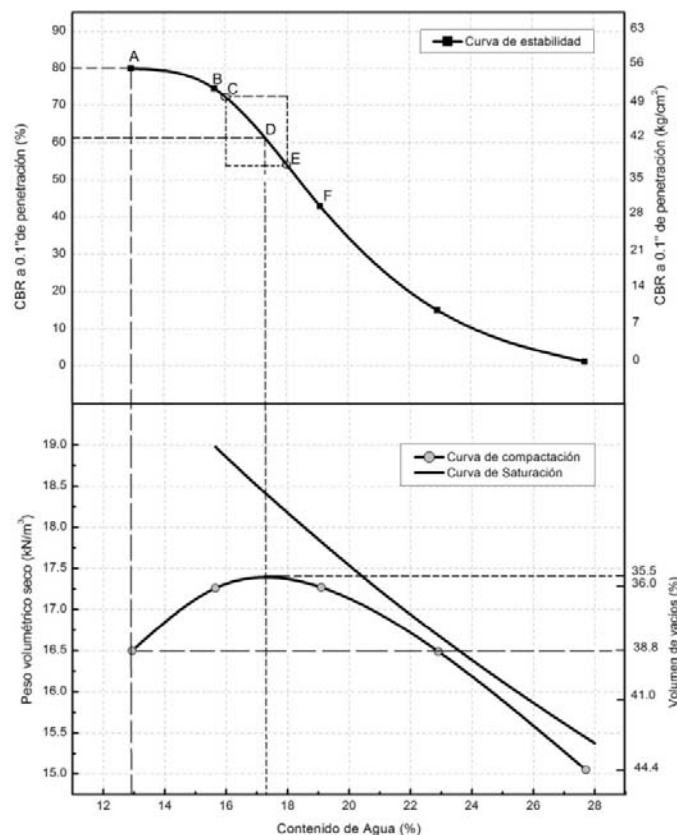


Figura 6. Curva de compactación, saturación y estabilidad.

Conclusiones:

Existe una relación entre el contenido de agua, peso volumétrico seco y resistencia a la penetración del suelo.

En el punto máximo de la curva de compactación el volumen de vacíos se reduce con respecto a cualquier otro punto de la curva.

El suelo experimenta una disminución de la resistencia a la penetración en función al contenido de agua, cuanto mayor es el contenido de agua menor es la resistencia a la penetración.

Para este tipo de suelo en el óptimo de la curva de compactación, la resistencia a la penetración es menor que la resistencia máxima, sin embargo el volumen de vacíos es mínimo.

La compactación de este tipo de material se debe realizar en las proximidades del contenido de agua óptima, es decir con un $\pm 1\%$ del contenido de agua óptima para que la resistencia a la penetración no sufra mucha variación.

Al compactar el suelo en el óptimo de la curva de compactación se asegura que la relación de vacíos se ha reducido al mínimo y las variaciones del contenido de agua en la masa del suelo no afectaran de manera considerable la resistencia a la penetración. Aunque, lo ideal es que este tipo de suelo no esté expuesto a cambios de humedad. Para ello es importante que cuente con buenas obras de drenaje y una adecuada impermeabilización.

Referencias bibliográficas:

- 1) Bañón Blázquez, L. y J. F. Beviá García. Manual de carreteras. Volumen I: Elementos y proyecto. Alicante, Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, SA, 2000.
- 2) Bowles J. E. Foundation design and analysis. New York. McGraw-Hill, 1982.
- 3) Zepeda-Garrido, J., y A Pérez-García. Succión y estado del agua en el suelo. México: Sociedad Mexicana De Suelos, 2004.
- 4) Arquie, G. Compactación en carreteras y aeropuertos. Barcelona. Editores técnicos asociados, 1972.
- 5) Caicedo B., J. Tristancho, L. Thorel y S. Leroueil. Experimental and analytical framework for modelling soil compaction. Engineering Geology. 2014; 175: 22-34. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.014>. [Consulta: julio 10 de 2016].
- 6) Davis DS., y R. Wiest. Hidrogeología. Barcelona, Editorial Ariel, 1971, 563 p.
- 7) Borselli L. Definición, estructura y propiedades físicas de los geomateriales. Disponible en <http://www.lorenzo-borselli.eu/geotecnica1/>. [Consulta: septiembre 15 de 2016].
- 8) Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos. España. Disponible en <http://www.aridos.org/fda/estadisticas/> [Consulta: septiembre 19 de 2016].
- 9) Díaz-Rodríguez J. Mecánica de Suelos Naturaleza y propiedades. México, Editorial Trillas, 2015.
- 10) Terzaghi K., R. Peck, y G. Mesri. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley y Sons, 1996.
- 11) Flamand C. Introducción a la Mecánica de Suelos. México, Universidad Autónoma de Chapingo, 1995.
- 12) Das B. M. Fundamentos de ingeniería geotécnica. Cengage Learning Latin America, 2014.
- 13) Lambe W., y R. Whitman. Mecánica de Suelos. México, Editorial Limusa, 2014.
- 14) Sánchez-Leal, F., P. Garnica Anguas, J. Gómez López y N. Pérez García. RAMCODES: Metodología racional para el análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados. México, Publicación Técnica, 2002.
- 15) Valle-Rodas R. Carreteras, Calles y Aeropistas. Buenos Aires, Argentina, El Ateneo, 1963.

MSc. Ing. Romer Daniel Oyola-Guzmán. Determinación de la resistencia a la penetración de un suelo cohesivo en diferentes condiciones de hidratación y compactación.

- 16) Proctor R. R. Fundamental principles of soil compaction. Engineering News Record, 111(9): 245-248 p, 1933.
- 17) Hogentogler C. Engineering Properties of Soils. Estados Unidos de América, McGraw-Hill, 1937.
- 18) Tamez E. Ingeniería de Cimentaciones. México, TGC Geotecnia, 2001.
- 19) Costet J., y G. Sanglerat. Curso Práctico de Mecánica de Suelos. Barcelona, Ediciones Omega, 1975.
- 20) ASTM D 422-63. Standard test method for particle-size analysis of soils. Annual Book of ASTM Standards, pp. 10–17. American Society For Testing and Materials, West Conshohocken, PA 04.08. 2003.
- 21) ASTM D 4318-00. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. Annual Book of ASTM Standards, pp. 582–595. American Society For Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 04.08, 2003.
- 22) ASTM D 854. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, Pa. 2014.
- 23) ASTM D 3282-93. Standard practice for classification of soil and soil-aggregate mixtures for Highway construction purposes. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- 24) ASTM D 1557-12. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- 25) ASTM D 1883. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. United States, West Conshohocken, PA, 2007.