

Modelo de óptimos de parámetros de compactación de rocosos argilíticos en presas de tierra

Alina Hernández-Tur
Rafael Guardado-Lacaba

Resumen

La presente contribución expone los resultados de la aplicación de la modelación matemática al control de la calidad del proceso de compactación de los suelos rocosos argilíticos en terraplenes de presas en Cuba, expresado en un gráfico de óptimos. Se conceptualiza una metodología general para la modelación del comportamiento físico-matemático de los parámetros de compactación de estos suelos, con el fin de lograr la más adecuada selección y control para su aprovechamiento como material de construcción. El modelo matemático incorpora una variable más al control de la compactación tradicional: la fracción gruesa mayor de 19,1 mm, que favorece notablemente la interpretación de los resultados experimentales del fenómeno físico, permitiendo una mayor racionalidad y flexibilidad en la toma de decisiones ingenieras, al mismo tiempo que se recomienda un método para la corrección de los resultados del Ensayo Próctor Estándar por la influencia de esta fracción gruesa, validado en la práctica por pruebas y resultados definitivos obtenidos en terraplenes.

Palabras clave: Gráfico de óptimos; compactación de suelos; suelos rocosos argilíticos; presas de tierra.

Models for optimal parameters for argillaceous rocky soil compaction in earthfill dam

Abstract

This investigation provides the mathematical modeling results applied to the quality assurance performed during the compaction process of argillaceous rocky soils in the embankments of Cuban dams. These results are expressed in a chart of optimal values. A general methodology is conceptualized to model the physical-mathematical behavior of the compaction parameters for these soils. The mathematical model incorporates an additional variable to the traditional compaction process: a larger coarse fraction of 19,1 mm. This facilitates significantly the interpretation of the experimental results concerning the physical phenomenon and allows a better reasoning and flexibility during the engineering decision-making. At the same time, it is recommended to use a method to correct the results from the Standard Proctor Test due to the influence of this coarse fraction, empirically validated through tests and the final results obtained in the embankments.

Keywords: Chart of optimal values; soil compaction; argillaceous rocky soils; earthfill dams.

1. INTRODUCCIÓN

Las presas de tierra son estructuras de suelo y roca que permiten el aprovechamiento de los recursos hídricos de las cuencas hidrográficas al embalsar los mismos para su posterior entrega con diferentes garantías, mitigando los efectos de los períodos de sequía o de inundaciones para beneficio de la sociedad. El desarrollo de la Mecánica de Suelos y la Hidrología han influido de forma satisfactoria en el diseño de presas cada vez más altas y con más aprovechamiento de los suelos locales.

La calidad del proceso de compactación de los materiales térreos que conforman el terraplén de la cortina de una presa de tierra es vital para garantizar la seguridad de este tipo de obra, desde la propia etapa de construcción y durante los años de vida útil.

Actualmente constituye una máxima en el diseño de las presas de tierra el aprovechamiento de los suelos que existen en las proximidades del cierre de las mismas o de los que se obtendrán como productos de las excavaciones para la construcción del cuerpo de la presa y de sus objetos de obra (aliviaderos y obras de toma) y en la toma de decisiones al respecto, resulta indiscutible el protagonismo de la ciencia de la mecánica de los suelos. En este sentido, la selección de los parámetros de compactación es de vital importancia ya que incide directamente en los valores de los parámetros de diseño: ángulo de fricción interna (f) y cohesión (c) que se obtengan y, posteriormente, el proyectista considere para el cálculo de la estabilidad de los taludes y las tensiones verticales y horizontales sobre los elementos de hormigón, etcétera, con los cuales se diseña la obra, además de que permite un mejor control de la calidad del proceso de compactación, garantía de la seguridad de este tipo de obra, desde la propia etapa de construcción y durante los años de vida útil.

Es conocida la heterogeneidad del comportamiento de los parámetros de compactación de los suelos rocosos argilíticos durante el proceso de compactación en las presas de tierra debido al incremento del porcentaje de la fracción gruesa en la medida en que la profundidad de yacencia en que se hallan estos suelos es mayor y la roca se encuentra menos meteorizada, constituyendo este el problema real a solucionar.

La presente contribución expone los resultados obtenidos en la aplicación de la modelación matemática al control de la calidad del proceso de compactación de los suelos rocosos argilíticos en terraplenes de presas construidas en Cuba, expresado en un gráfico de óptimos (modelo matemático), conceptualizando una metodología general para la modelación del comportamiento físico-matemático de los parámetros de

compactación de estos tipos de suelos, que incorpora una variable más: la fracción gruesa mayor de 19,1 mm, en aras de lograr la más adecuada selección y el control de los mismos para su mayor aprovechamiento como material de construcción.

1.1. Teoría de compactación de los suelos

Los trabajos de Próctor sustentan la teoría de la compactación de los suelos, todo lo cual reflejó en las curvas de compactación que aparecen en la Figura 1.

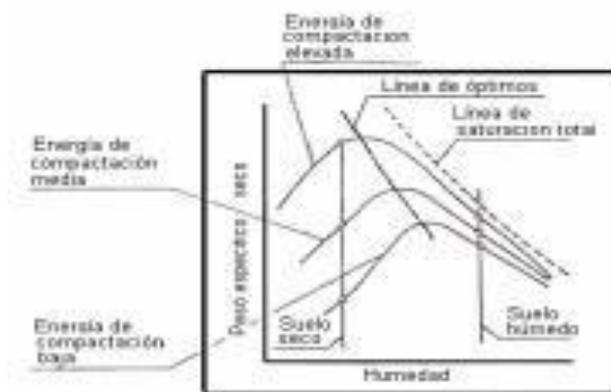


Figura 1. Curvas de compactación Próctor.

En estas curvas se relacionan las variables: humedad de compactación (ω) con el peso específico seco del suelo compactado (γ_d), referenciadas a una energía de compactación, originándose una familia de curvas del mismo suelo. La forma de la curva, empinada o aplanada, tiene mucha influencia en la sensibilidad del porcentaje de humedad de compactación, aspecto de gran importancia en la compactación de presas de tierra.

El lugar geométrico determinado por los puntos de peso específico seco máximo de la familia de curvas de compactación del mismo suelo obtenidas a diferentes energías de compactación se le denomina curva (o línea) de los óptimos, la cual es paralela a la curva de saturación. Esta define las dos ramas: la húmeda (a la derecha en la curva) y la seca (a la izquierda de la curva).

1.2. Influencia de la fracción gruesa

Es conocida la influencia de la fracción gruesa (entiéndase partículas mayores del tamiz No. 4) sobre los parámetros de compactación, fundamentalmente dirigida la atención hacia el incremento que produce en los pesos específicos secos del suelo compactado, aspecto que no refleja el Ensayo Próctor Estándar. Una revisión a los diferentes autores que han trabajado el tema se refleja en la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen de aportes de diferentes autores estudiados sobre la influencia de la fracción gruesa

Autor	Definición
Akroyd (1957)	$\gamma_{dmáxc} = \frac{(100 - X)\gamma_{dmáx} + 0,9G_sX}{100} \quad (1)$ $\omega_{oc} = \frac{100 - X}{100} \times \omega_o \quad (2)$ <p>Donde: $\gamma_{dmáxc}$: peso específico seco máximo corregido (g/cm³) $\gamma_{dmáx}$: peso específico seco máximo obtenido del Ensayo Próctor Estándar (g/cm³) G_s: peso específico del material (g/cm³) X: porcentaje de fracción gruesa mayor de 19,1 mm que se excluye del Ensayo Próctor Estándar (%) 0,9: coeficiente que considera la variación que introduce en los resultados el porcentaje de grueso mayor del tamiz 19,1 mm ω_o: humedad óptima corregida (%). ω_o: humedad óptima obtenida del Ensayo Próctor Estándar (%)</p>
Armas y Horta (1987)	<p>Expone que el peso específico seco máximo del material crece poco cuando el contenido de gravas (mayor del tamiz No. 4) es menor que un 30 %, crece hasta un máximo entre el 30 % y el 60 % y cuando es mayor del 60 % decrece y propone coeficientes de corrección estandarizados para el peso específico seco y la humedad obtenidos del Ensayo Próctor Estándar con hasta un 40 % de fracción gruesa mayor del tamiz No. 4</p>
Hernández (2002, 2005)	<p>Obtuvo resultados en terraplenes con esquistos, margas, serpentinitas y argilitas que le permitieron concluir que la fracción mayor de 19,1 mm es la que produce el incremento de los pesos específicos secos y que la misma presenta porcentajes de humedad que incrementan las humedades de compactación, obteniéndose en el campo valores más bajos de pesos específicos secos que los corregidos empleando el coeficiente de 0,90 de Akroyd. Consecuentemente modificaron las ecuaciones 1 y 2, validando en la práctica las siguientes:</p> $\gamma_{dmáxc} = \frac{(100 - X)\gamma_{dmáx} + \gamma_g X}{100} \quad (3)$ $\omega_{oc} = \frac{100 - X}{100} \times \omega_o + \frac{\omega_g X}{100} \quad (4)$ <p>Donde: γ_g: peso específico volumétrico de la fracción gruesa mayor de 19,1 mm (%) ω_g: humedad de la fracción gruesa mayor de 19,1 mm (%)</p>

Constituyen las ecuaciones 3 y 4 un aporte de la autora a la corrección, a escala de laboratorio, de los parámetros de compactación de los rocosos argilíticos obtenidos mediante los Ensayos Próctor Stándar.

1.3. Fallas en presas de tierra

La experiencia nacional e internacional en el diseño y construcción de presas de tierra, así como el conocimiento de las causas que han

provocado las fallas en las mismas permiten, en el caso de Cuba y otros muchos países tropicales y subtropicales, establecer criterios a seguir por los proyectistas generales, de acuerdo a la importancia de cada una de las fallas graves o catastróficas que pudieran presentarse en cada caso particular. En el caso particular de este reporte focalizamos la falla por agrietamiento.

La falla por agrietamiento debe ser la primera preocupación del proyectista y el constructor en todo proyecto de presas de tierra, ya que no existe otra medida para evitarla que no sea la buena selección de los materiales a utilizar y la forma de colocarlos. Narain (1976), Armas & Horta (1987), Jiménez & Justo (1975), Jiménez (1995) y Armas (1993, 2001) resumen, como medidas para evitar la aparición de la falla por agrietamiento, las siguientes:

- Utilizar suelos plásticos, recomendándose con índice plástico (IP) ≥ 15 %.
- Compactar los mismos con energías de compactación bajas, similares a las del Próctor Estándar de laboratorio, cuyo valor de la humedad óptima se encuentre frecuentemente próxima al límite plástico (LP) de los suelos finos.
- Compactar con humedades en un rango de valores ± 2 % de la humedad óptima del Próctor Estándar y grados de compactación por encima del 90 % de dicha energía en presas de tierra de 4ta categoría y por encima del 95 % en presas de tierra de tercera, segunda y primera categorías.

Si el suelo seleccionado tiene un IP < 15 %, entonces el suelo se considera propenso al agrietamiento y la única medida a considerar para evitar esta falla está en cómo compactarlo. Para ello, se debe exigir compactar el suelo con humedades por encima de la óptima del Próctor Estándar y siempre por encima del LP del suelo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño experimental constó de tres etapas, que fueron las siguientes:

I. Obtención de los parámetros de compactación a escala de laboratorio mediante Ensayos Próctor Estándar.

II. Obtención de los parámetros de compactación a escala de campo en terraplenes de prueba, simulando la energía de compactación con el compactador Taíno de 30 t.

III. Obtención de los parámetros de compactación a escala de campo en los terraplenes de las presas como validación definitiva del modelo de control propuesto.

Las propiedades físicas del suelo rocoso a caracterizar aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas a caracterizar según objetivo

OBJETIVO	PROPIEDADES FÍSICAS
1. Caracterización del suelo. (Escala de campo)	Granulometría Límites de Consistencia Humedad natural Peso específico
2. Obtención de los parámetros de compactación y otros para la corrección de resultados del Ensayo Próctor Estándar (Escala de Laboratorio)	Peso específico seco máximo del Ensayo Próctor Estándar Humedad óptima del Ensayo Próctor Estándar Peso específico volumétrico de la fracción gruesa mayor de 19,1 mm Humedad de la fracción gruesa mayor de 19,1 mm
3. Obtención de parámetros de compactación en el terraplén de prueba (Escala de campo)	Peso específico seco <i>in situ</i> . Humedad <i>in situ</i>

♦ Tratamiento de los resultados obtenidos mediante el Ensayo Próctor Estándar a escala de laboratorio.

Los resultados del Ensayo Próctor Estándar fueron tratados de tres maneras, que son: Sin corrección por la presencia de fracción mayor de 19,1 mm, con corrección según las ecuaciones 1 y 2 y con corrección según las ecuaciones 3 y 4.

♦ Modelos de regresión.

Para el establecimiento de las correlaciones entre las propiedades físicas se emplearon los modelos que aparecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Modelos de regresión

MODELO DE REGRESIÓN	VARIABLES (Propiedades físicas)
$Y=a_0+a_1X$	Y es el peso específico seco máximo X es la humedad óptima, el porcentaje de fracción mayor de 19,1 mm, el peso específico volumétrico de la fracción gruesa mayor de 19,1 mm
$Y=a_0+a_1X + a_0Z$	Y es el peso específico seco máximo X es el porcentaje de fracción gruesa mayor de 19,1 mm Z es la humedad óptima

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del estudio experimental aparecen en las Figuras de la 2 a la 9.

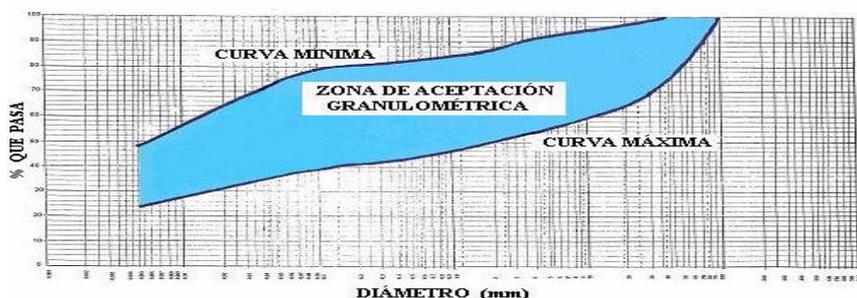


Figura 2. Curvas superior e inferior del rocoso argilítico investigado.

En la Figura 2 se observa que los rocosos argilíticos estudiados presentan un comportamiento granulométrico muy amplio, oscilando desde un material fino hasta un grueso, con marcada influencia del porcentaje de finos en las características plásticas manifestadas en el proceso de la compactación, que clasifica como arcilla inorgánica de alta plasticidad. Su fácil meteorización se debe a la yacencia, prácticamente horizontal, en que se encuentran en el depósito natural y a que su microestructura es de glomérulos bien cementados del tamaño de la arcilla y el limo, que proporciona acceso al agua, destruyéndose la cementación al cabo de poco tiempo.

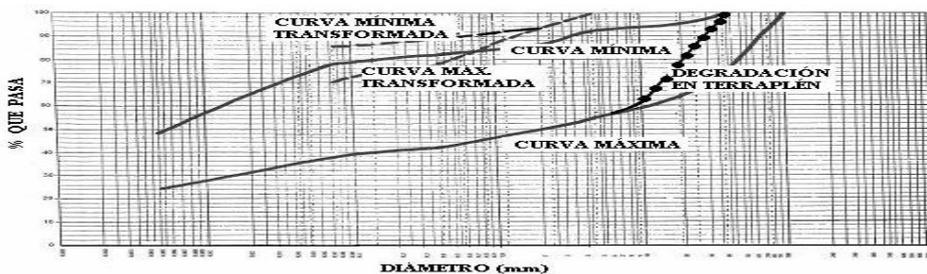


Figura 3. Límites granulométricos de las curvas transformadas.

En la Figura 3 se muestra, con los límites granulométricos de las curvas transformadas, la limitante del Ensayo Próctor Estándar que representa con sus resultados solo al suelo con partículas menores del tamiz de 19,1 mm. De ahí la importancia de lograr la más acertada corrección de los mismos para simular el fenómeno físico de la compactación del suelo real colocado en el terraplén.

3.1. Resultados de los Ensayos Próctor Estándar

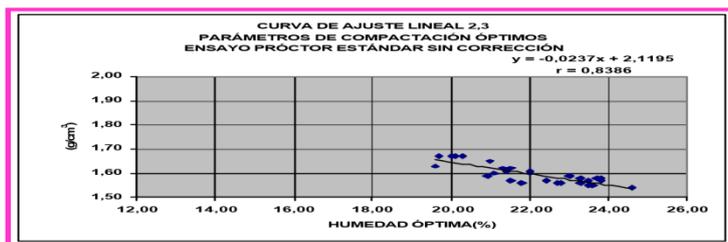


Figura 4. Ajuste lineal de los Ensayos Próctor Estándar sin corrección.

En la Figura 4 se observa que los valores de las humedades óptimas se encuentran concentrados en la parte derecha e inferior, en la zona de más altos valores de humedades y más bajos valores de los pesos específicos secos máximos, muy cercanos a los que caracterizan a las arcillas, siendo el rango de variación de los mismos el más pequeño. Sin embargo, al ensayarse con muestras tomadas en el terraplén de prueba los resultados de pesos específicos secos daban mayores con humedades menores.

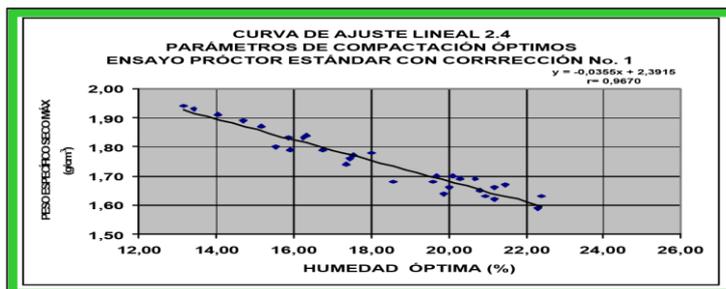


Figura 5. Ajuste lineal de Ensayos Próctor con corrección No. 1.

En la Figura 5, que muestra los resultados de ajuste lineal de óptimos del Ensayo Próctor Estándar corregido mediante las ecuaciones de Akroyd 1 y 2, se observa un desplazamiento de los resultados hacia la margen izquierda del gráfico con un amplio rango de variación, y que los pesos específicos secos máximos son más altos y a costa de menor humedad de compactación. Esto obedece a la fuerte mayoración por la adición del 90 % del peso específico del material para la corrección de los vacíos adicionales que se producen en el material compactado, lo que no simula de forma adecuada el fenómeno físico que ocurre.

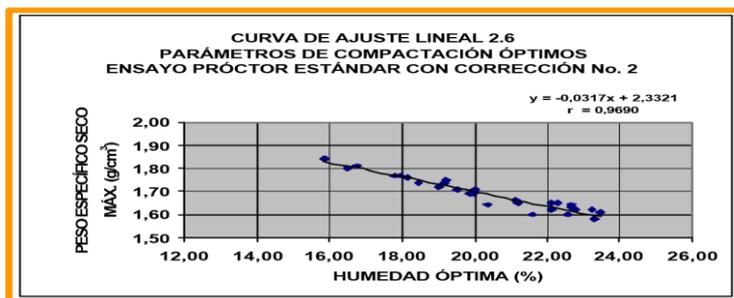


Figura 6. Ajuste lineal de Ensayos Próctor con corrección No. 2.

La Figura 6 exhibe los resultados del ajuste lineal de óptimos con la corrección propuesta por los autores (ecuaciones 3 y 4) del Ensayo Próctor Estándar, y presenta una menor dispersión en sus resultados, con una caracterización más homogénea del material. Esto se explica porque al considerar en la ecuación 3 solo el peso específico volumétrico de la fracción gruesa mayor de 19,1 mm se está adicionando al valor del peso específico seco máximo obtenido solamente el peso específico que resulta excluido en el Ensayo Próctor, alrededor del 78 % del peso específico del material total. Porcentaje este mucho menor que el recomendado por la fórmula de Akroyd, ya que con la adición de la humedad de la fracción mayor de 19,1 mm presente en el proceso mediante la ecuación 4 se mejoran los resultados de ambos parámetros de compactación con la obtención de valores más bajos de pesos específicos secos y mejor rango de humedades óptimas. Este comportamiento se acerca más a los resultados de pesos específicos secos y humedades obtenidos en el terraplén de prueba, simulando mejor el fenómeno físico y, al mismo tiempo, se trabaja la compactación con un rango de humedades más cercana al límite plástico de los materiales objeto de la investigación, favoreciendo la obtención de un terraplén más flexible.

3.2. Conceptualización del modelo de selección y control de los parámetros de compactación (gráfico de óptimos)

La conceptualización del modelo comprende cinco pasos, que son:

Primer paso: Selección y obtención del modelo matemático.

El modelo estadístico matemático de regresión múltiple se obtendrá para los datos corregidos por las ecuaciones 3 y 4, obteniéndose que:

$$Y = 0,74629 + 0,0027 X + 0,04419 Z$$

Segundo paso: Adecuación del modelo matemático.

Para evaluar la adecuación del modelo matemático, independientemente del alto coeficiente de correlación múltiple obtenido, se realizaron los análisis y comparaciones de varianzas (ANOVA) entre los modelos de regresión lineal simples arrojando resultados ADECUADOS.

Para la confección del modelo se seleccionaron tres escalas verticales: peso específico seco máximo, porcentaje de fracción gruesa mayor de 19,1 mm y peso específico volumétrico de esta fracción y una escala horizontal: la humedad óptima, estableciendo la relación mediante las respectivas ecuaciones de regresión simple del resto de las variables con el peso específico seco máximo.

Tercer paso: Obtención de las curvas ajustadas de saturación del 100 %, máxima, media y mínima.

Una vez confeccionado los modelos básicos desde el punto de vista estadístico-matemático se procederá a aplicar los principios de la teoría de la compactación de Próctor en cuanto al significado de las curvas de saturaciones del 100 %, máximas, medias y mínimas, obteniéndose las curvas ajustadas correspondientes.

Cuarto. paso: Confección del modelo matemático.

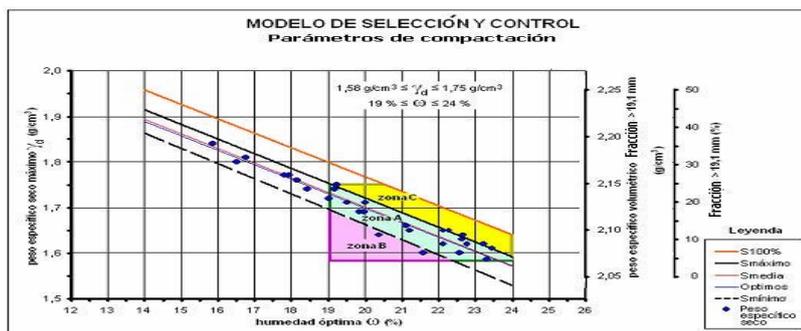


Figura 7. Modelo de selección y control de los parámetros de compactación en las muestras estudiadas.

En la Figura 7 en un plano de ejes cartesianos con abcisa: humedad óptima y ordenada el peso específico seco máximo, se plotean las curvas ajustadas de: humedad óptima vs. peso específico seco máximo (parámetros óptimos), saturación del 100 %, saturación máxima y

saturación mínima. Prácticamente todos los valores de pesos específicos secos máximos y humedades óptimas caen dentro de los límites demarcados por las curvas de saturación máxima y mínima y se encuentran en el entorno de valores óptimos demarcado justamente por la curva de saturación media, y significan que tienen las menores relaciones de vacíos posibles con la energía del Próctor Estándar y, por supuesto, para el material rocoso argilítico. Esta consideración podrá llevarnos a la idea de que el gráfico delimita el amplio rango de valores de parámetros de compactación óptimos que pueden obtenerse para este material con la energía del Próctor Estándar dado por la influencia de la fracción gruesa mayor de 19,1 mm. Y se delimitan los rangos: $19 \% \leq \omega \leq 24 \%$ y $1,58 \text{ g/cm}^3 \leq \gamma_d \leq 1,75 \text{ g/cm}^3$ identificándose diferentes áreas, que son:

Área A: Área delimitada por las curvas de saturación máxima y mínima, de total aceptación de los resultados.

Área B: Área demarcada entre el rango de los valores seleccionados, pero con valores de saturación por debajo de la curva de saturación mínima, por tanto los resultados tendrán mayores relaciones de vacíos debiendo evaluarse la conveniencia o no de su rechazo. Para fines prácticos se propone aceptar solo el 5 % de los resultados del total con la condición de que al realizársele un Ensayo Próctor Estándar *in situ* se obtengan pesos específicos secos en el orden del 95 %.

Área C: Área de resultados dentro de los rangos establecidos pero las saturaciones serán mayores que la saturación máxima obtenida, pero menores que la saturación del 100 %, por lo que se aceptarán los resultados.

Quinto paso: Validación del modelo matemático en el terraplén de prueba.

3.3. Resultados de la aplicación del modelo matemático.

En la Figura 8 aparecen los resultados de la aplicación del modelo al terraplén de prueba, los que se corresponden con lo explicado anteriormente.

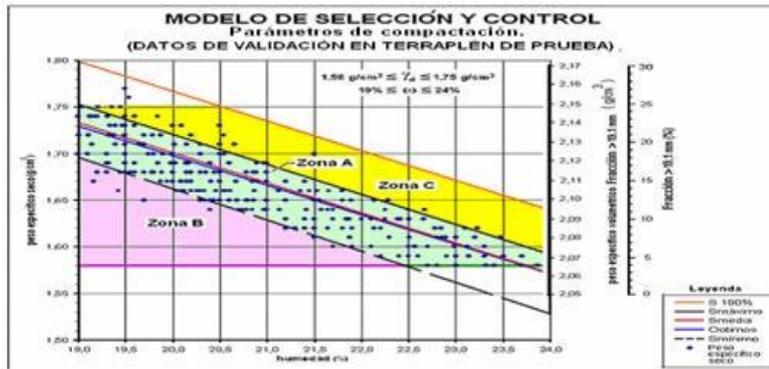


Figura 8. Modelo de selección y control de los parámetros de compactación validado en el terraplén de prueba.

Y en la Figura 9 la aplicación en el terraplén de la presa.

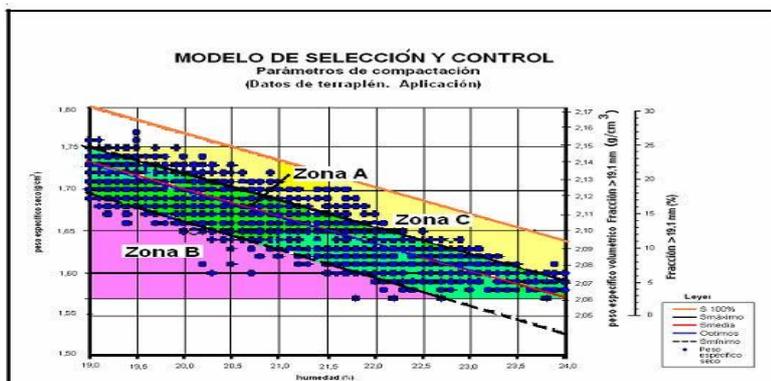


Figura 9. Modelo de selección y control de los parámetros de compactación aplicado en el terraplén de la presa Faustino Pérez.

4. CONCLUSIONES

1. El rocoso argilítico estudiado presenta significativo porcentaje de fracción gruesa mayor del tamiz No. 4, con influencia notable en los resultados de pesos específicos secos y humedades obtenidos en los terraplenes de prueba. Consecuentemente, los resultados de los Ensayos Próctor Estándar deben ser corregidos, proponiéndose las ecuaciones enunciadas como 3 y 4, como las que mejor representan el comportamiento físico de estos suelos compactados.
2. Para el rocoso argilítico investigado existe una fuerte y bien definida correlación múltiple entre las variables: porcentaje de fracción gruesa mayor de 19,1 mm, en primer orden y humedad óptima en segundo orden, sobre el peso específico seco máximo obtenido en el Ensayo Próctor Estándar, que permite el establecimiento de un modelo óptimo de selección y control de los

parámetros de compactación con fines prácticos para la probabilidad confiable de 0,95.

3. El modelo de selección y control de los parámetros de compactación de los materiales rocosos define tres zonas: A, B y C. La zona A constituye la zona de aceptación de los resultados óptimos; la zona C, también de aceptación y con resultados del lado derecho de la línea de los óptimos, y la zona B, la zona de rechazo.
4. La aplicación del modelo de selección y control de los parámetros de compactación del rocoso argilítico estudiado al terraplén de la presa Faustino Pérez validó en la práctica el mismo, así como las formulaciones físico-matemáticas realizadas, con una excelente representatividad estadística de los resultados obtenidos respecto al volumen de material colocado, logrando que el 89 % al 94 % de los resultados se encontraran en las zonas de aceptación A y C.
5. El modelo de selección y control caracterizó el comportamiento físico-matemático de los rocosos argilíticos investigados, lo que permitió alertar sobre la necesidad de reevaluar los índices geotécnicos (valores de f y c) y el coeficiente de permeabilidad con los cuales se diseñó la sección típica de la cortina, modificándose la misma para garantizar su seguridad y vida útil.
6. Con la realización del control de la calidad de la compactación, mediante el modelo propuesto, se logró el aprovechamiento de todo el material producto de las excavaciones de los diferentes objetos de obra de las presas, y eliminar los impactos ambientales negativos que se producirían.
7. Se recomienda entonces utilizar los materiales rocosos objeto de la investigación como material de construcción en las secciones impermeables de las presas de tierra, así como corregir los resultados del Ensayo Próctor Estándar mediante la aplicación de las ecuaciones 3 y 4.

5. REFERENCIAS

- AKROYD, T. N. W. 1957: Laboratory Testing in soil engineering. *Geotechnical Monograph* No. 1, Soil Mechanics Limited, p. 158-165, Gran Bretaña.
- ARMAS, R. & HORTA, E. 1987: *Presas de tierra*. Editorial CUJAE, La Habana, p. 39-88.

- ARMAS, R. 1993: Algunas consideraciones sobre el agrietamiento en presas de tierra. *Revista Ingeniería Estructural y Vial* 14(2), Editorial CUJAE, La Habana.
- ARMAS, R. 2001: Conferencia sobre presas de tierra impartida en el Diplomado de Obras Hidráulicas, Maestría de Ingeniería Hidráulica, Granma.
- HERNÁNDEZ, A. 2002: Las argilitas como material de construcción en presas de tierra. XX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Hidráulica (Memorias). La Habana, Cuba.
- HERNÁNDEZ, A. 2005: *Modelo de selección y control de los parámetros de compactación de los rocosos argilíticos*. Tesis de maestría. La Habana.
- JIMÉNEZ, J. A. & JUSTO, J. L. 1975: *Geotecnia y cimientos* I. 2da ed. Editorial Rueda, Madrid, p. 1-45.
- JIMÉNEZ, J. A. 1995: Suelos compactados: propiedades dinámicas y su relación con la microestructura. Curso sobre geotecnia de las obras lineales, CEDEX, España, p. 1-13.
- NARAIN, J. 1976: *Flexibility of Compacted Clays*. Doctoral Thesis. Purdue University.

Alina Hernández-Tur

Empresa de Recursos Hidráulicos, La Habana, Cuba

Rafael Guardado-Lacaba rguardado@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Geología
Instituto Superior Minero Metalúrgico
Moa, Holguín, Cuba