

## PENETRÓMETRO EN MINIATURA PARA LA MEDICIÓN DE CONTENIDO DE AGUA EN SUELO COHESIVO

MICHAEL WILLY ECHALAR FLORES<sup>1</sup>

<sup>1</sup>: Docente investigador de la Carrera de Ingeniería Civil – Departamento de Topografía y Vías – Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

**Dirección de correspondencia:** Michael W. Echalar F. Calle 15 de Abril - Tarija, Bolivia.

**Correo electrónico:** laraksosal@gmail.com - katerinsoruco@gmail.com

### RESUMEN

Se diseñó y verificó un penetrómetro en miniatura y para verificar su aptitud se han confeccionado probetas con suelo cohesivo en las que la densidad y humedad son conocidas, sobre las cuales se ha hecho el ensayo de penetración. Se desarrolló el instrumento tipo penetrómetro, a partir del CPT (Cone Penetration Test), más conocido como Cono Holandés o Cono Dinámico y se redujo el tamaño del instrumento a miniatura. Al contrastar el número de golpes requerido para penetrar 2.5 centímetros contra el contenido de humedad de la probeta en la que se realiza el ensayo se verifica que existe una correlación entre ambos valores. La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Suelos y Hormigón de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. El diseño experimental contempla la toma de muestras en un sistema no aleatorio.

### PALABRAS CLAVE

CPT, Cono Holandes, Cono Dinamico, Humedad, Correlación, Penetrómetro en miniatura

### ABSTRACT

The objective of this work is the design and verification a CPT type mini penetrometer, and the verification of moisture measurenet by the instrument.

In this work, the design and test of a CPT type, mini penetrometer was made. In order to evaluate its performance, a verification of moisture measurements in cohesive soils with a well-known moisture content was evaluated. There is a high level of correlation after the number of hits to got into a 2.5 centimeters of soil and the content of moisture on it.

This work was made in the Soil and Concrete Laboratory of the Science and Technology Faculty of Juan Misael Saracho University. Experimental methodology include extract test samples in handmade compacted cohesive soil

### KEYWORDS

CPT, Dutch Cone, Moisture, Correlation, Mini Penetrometer

### INTRODUCCIÓN

La exploración geotécnica es una de las actividades de mayor importancia dentro de cualquier tipo de obra sea esta lineal o estructural. Dentro del transcurso de este trabajo debe recabarse la mayor cantidad de información posible en el sitio de exploración para su proceso posterior, para esto se han desarrollado varios instrumentos portátiles para determinar propiedades de los suelos in situ.

Dentro de esta línea se encuentra el Speedy para determinar humedades y el Penetrómetro de Bolsillo para determinar capacidades portantes. Así también para varios instrumentos desarrollados para determinar una propiedad geotécnica, las mismas han sido ampliadas mediante correlaciones. Este es el caso del ensayo CPT, que ha sido empleado en la determinación de densidad, humedad y valores de C.B.R.

Es dentro de esta línea de investigación instrumental, la cual incluye sondeo mediante instrumentos muy finos y sensibles, y el empleo del análisis de señales como se indica en Santamarina (2004)]. Que surge la duda de si no es posible convertir el CPT en un instrumento portátil que pueda determinar propiedades geotécnicas.

De esta forma es que se plantea un penetrómetro en miniatura, de geometría y funcionamiento similar al CPT y se exploró inicialmente la posibilidad de relacionar la penetración del mini penetrómetro con una de las propiedades más simples y útiles, el contenido de agua o humedad de un suelo. Se ha trabajado con un suelo cohesivo el cual es muy afín a los ensayos de penetración.

A continuación se detalla la configuración física del aparato, la metodología para la realización de los ensayos, la ecuación básica de correlación y los resultados conseguidos mediante la investigación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales empleados para la realización de los ensayos en la presente investigación fueron provistos por el Laboratorio de Suelos y Hormigón de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

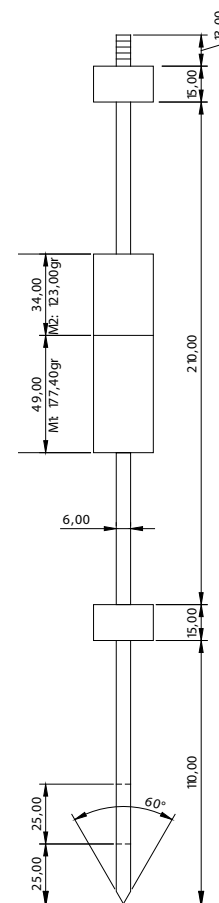
El principal ensayo realizado fue el de compactación Proctor, tanto en su versión

normal como modificada.

El instrumento desarrollado especialmente para esta investigación es el Penetrómetro en miniatura; cuyas características principales son las siguientes:

- Altura libre de caída para los martillos de 21 centímetros.
- Dos martillos de golpeo uno de 177.40 gramos y otro de 123.00 gramos, para el experimento se ha utilizado el peso combinado de ambos de, 300.40 gramos.
- Altura de penetración de 2.5 centímetros.
- Punta con ángulo de ataque de 60 grados.

FIGURA I: Esquema del penetrómetro en miniatura.



El material suelo sobre el que se realizaron todos los ensayos, es un suelo fino con las características siguientes: 98.16% del material pasa la malla N° 200, ejecutados los ensayos de límites se determinó que presenta un límite líquido de 48.00%, un límite plástico de 37.03% y un índice de plasticidad de 10.96%.

Corresponde a un suelo tipo ML en el sistema S.U.C.S. y a un suelo A-7-6 (18) en el sistema A.A.S.H.T.O.

Para contar con una gran variedad tanto de contenidos de agua como de densidades, se ha decidido emplear 6 energías de compactación, aplicadas en el molde Proctor estándar en tres capas. Son 3 energías con el martillo Proctor modificado empleando 25, 12 y 6 golpes; y otras 3 energías aplicadas con el martillo Proctor estándar utilizando 56, 25 y 12 golpes.

Para cada energía se han confeccionado 5 moldes con distintos contenidos de humedad. Al contar con 6 energías de compactación y 5 puntos por cada energía se han conseguido 30 puntos, representativos para el estudio del comportamiento del material. Este tamaño de muestra es el mínimo recomendado para que exista suficiente representatividad estadística en cualquier estudio práctico.

El método empleado para la realización experimental se describe a continuación.

1. Con 24 horas de anticipación a la realización del ensayo, se tomó una muestra para contenido de agua del suelo; al momento del ensayo determinar la humedad y calcular la cantidad necesaria de agua para lograr una humedad de compactación previamente escogida.

2. Tomar 3 kilogramos de material previamente molido y que pase por el tamiz N° 4, mezclar con el agua y homogenizar toda la masa con la misma.
3. Pesar el molde de compactación Proctor sin el collar.
4. Usar el martillo o estándar con una energía de compactación previamente escogida y compactar el suelo dentro del molde empleando 3 capas.
5. Enrazar cuidadosamente la parte superior del molde quitando el anillo.
6. Pesar el molde lleno de suelo húmedo.
7. Colocar el molde en una superficie horizontal estable e hincar el penetrometro 2.5cm contando la cantidad de golpes necesaria en por lo menos 3 puntos sobre el molde, de preferencia no en el centro ni cerca de los bordes.
8. Extraer el suelo de dentro del molde y tomar una muestra para contenido de agua.
9. Al día siguiente calcular la humedad y la densidad seca del molde y verificar que entre dentro de la tendencia de la curva de compactación.

Para el análisis de la correlación de las variables se parte de una ecuación que relaciona propiedades geoelectricas de los suelos y que se detalla en Gonzales de Vellejo (2002) y haciendo uso de la descripción de propiedades gravimétricas volumétricas de los suelos según Juárez Badillo (1990), se desarrolla el manejo algebraico para plantear la ecuación que describe la relación de variables.

Fórmula de Archie

$$\rho = \frac{\rho_w}{(\varphi S)^2} \quad [1]$$

$$\rho = \frac{\rho_w}{(w(\%)S_g)^2} \quad [8]$$

Donde:

 $\rho$  = resistividad del suelo $\rho_w$  = resistividad del agua contenida $\varphi$  = porosidad $S$  = saturación

resistividad relativa

$$\rho_a = K \left( \frac{V}{I} \right) = KR \quad [9]$$

Porosidad y saturación en notación de fases

$$\varphi = n(\%) = \frac{V_v}{V_m} \quad [2]$$

$$S = G_w(\%) = \frac{V_w}{V_v} = \frac{W_w}{V_v \gamma_w} \quad [3]$$

Simplificación del producto de porosidad y saturación

$$\varphi S = \frac{V_v}{V_m} \frac{W_w}{V_v \gamma_w} = \frac{W_w}{V_m \gamma_w} \quad [4]$$

Peso del agua como función de la humedad y peso del suelo

$$W_w = w(\%)W_s \quad [5]$$

Gravedad específica como función de las fases del suelo y densidad del agua

$$S_g = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_m} \frac{1}{\gamma_w} \quad [6]$$

[5] y [6] en [4]

$$\varphi S = w(\%) \frac{W_s}{V_m} \frac{1}{\gamma_w} = w(\%) S_g \quad [7]$$

[7] en [1]

Igualando [8] a [9], simplificando y despejando humedad

$$\frac{\rho_w}{(w(\%)S_g)^2} = KR$$

$$(w(\%)S_g)^2 = \frac{\rho_w}{KR}$$

$$w(\%) = \sqrt{\frac{\rho_w}{RK}} \frac{1}{S_g}$$

Asumiendo como constantes las características eléctricas

$$w(\%) = \frac{C}{S_g}$$

En este punto se hace evidente que las características eléctricas del material dependen de la cantidad de agua y de la Gravedad Específica. Pero para los fines de este estudio la ecuación [11] nos muestra también que el contenido de agua es una función inversa de la Gravedad Específica si asumimos como constantes las características eléctricas.

Aplicando relaciones gravimétricas volumétricas sabemos que existe una proporcionalidad directa entre la Gravedad Específica de un suelo y su Densidad. De acuerdo a varios estudios y correlaciones realizadas para penetrómetros, sabemos también que la Densidad está directamente relacionada con la Resistencia a

la Penetración; por lo que proporcionalmente podemos sustituir la Gravedad Especifica (Sg) por la Resistencia a la Penetración (N).

Por lo expuesto anteriormente planteamos la siguiente relación inversa entre Contenido de Agua contra Resistencia a la Penetración.

$$w(\%) = \frac{a}{N^b}$$

Dónde:

- w(%) = contenido de agua
- N = resistencia a la penetración
- a = constante

### RESULTADOS

De cada ensayo realizado, se obtuvieron los siguientes datos:

#### Contenido de agua o Humedad

Valor obtenido a partir de realizar el ensayo de humedad, a una muestra extraída del molde inmediatamente después de ser compactado y realizados los ensayos con el Penetrometro en Miniatura.

#### Densidad húmeda

Logrado a partir del peso de la masa de suelo compactada y su relación con el volumen del molde.

#### Densidad seca

Valor calculado a partir del valor de densidad húmeda y el contenido de agua de la muestra.

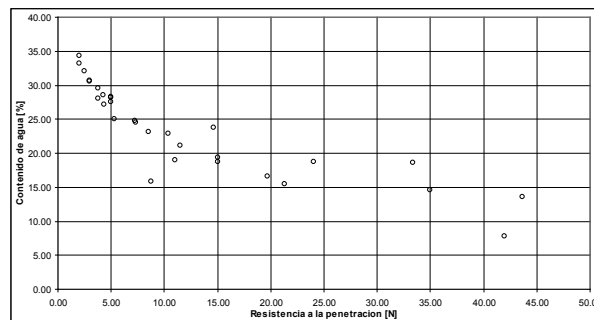
#### Resistencia a la penetración

Dato conseguido del promedio de por lo menos dos lecturas de penetración realizados sobre el

molde compactado.

A continuación se presenta una gráfica del contenido de agua contra la resistencia a la penetración.

FIGURA 2: w(%) vs. N



Se puede observar que la nube de datos sigue una tendencia clara, lo cual indica la existencia de interrelación entre las variables.

Es de notar que en contenidos altos de humedad existe muy poca dispersión de los datos, por el contrario para valores bajos de humedad se observa que los valores tienen baja convergencia.

La explicación a este comportamiento de los valores es que, a contenidos altos de humedad, la muestra es más homogénea ya que existe agua suficiente para humectarla totalmente, de esta forma cualquier punto en el molde contiene a fines prácticos la misma cantidad de humedad y por lo tanto arroja los mismos valores de resistencia a la penetración en cualquier punto de su masa.

En el caso de valores bajos de humedad, el agua empleada no es suficiente para lograr la humectación homogénea de toda la muestra debido a la tendencia de la misma de formar grumos; se ha tratado de reducir este efecto empleando rociadores y amasando la muestra pero ha sido imposible eliminar del todo el efecto. Es por esta razón que en el molde no todos los puntos de prueba tienen los mismos valores de

contenido de agua y no arrojan valores iguales de resistencia a la penetración.

### Calibración del modelo teórico

Partiendo de la estructura básica de la ecuación, usamos de la expresión siguiente:

$$w(\%) = \frac{a}{N^c}$$

Dónde:

$w(\%)$  = contenido de agua

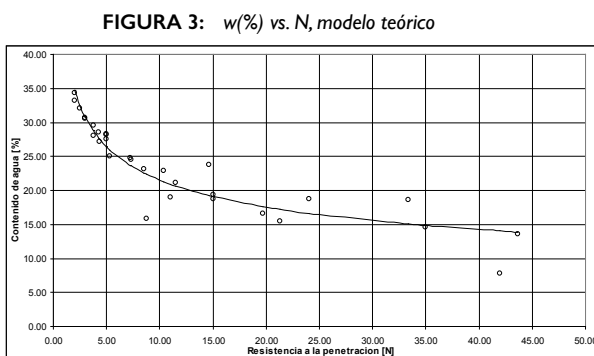
$N$  = resistencia a la penetración

Empleando la opción Regresión No Lineal de una versión trial del programa Statgraphics calibramos los coeficientes obtenidos los valores siguientes:

$$a = 42.6254$$

$$c = 0.297428$$

La expresión tiene un valor de R-Cuadrado de 88.21%, a continuación se muestra una figura en la que se muestra la nube de datos y la ecuación calibrada.



### Selección del mejor ajuste

Para la selección de un modelo matemático entre las dos variables se utilizó una versión Trial del programa Statgraphics, empleando la opción

Modelos De Calibración, la misma analiza varios modelos matemáticos que describan la relación entre las variables, e indica el que el que presenta el mayor valor de correlación, en este caso con un valor de 0.94; la expresión es la siguiente:

$$w(\%)^2 = a - b \ln(N)$$

$$w(\%) = \sqrt{a - b \ln(N)}$$

Dónde:

$w(\%)$  = contenido de agua

$N$  = resistencia a la penetración

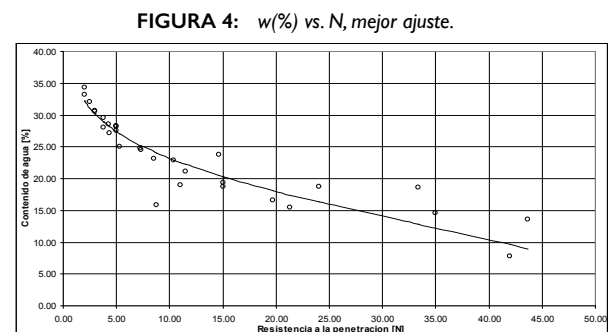
Los coeficientes resultado de calibrar el modelo anterior a los datos proporcionados son los valores siguientes:

$$a = 1248.09$$

$$b = 309.098$$

De acuerdo al reporte del programa de estadística la relación tiene un nivel de confianza del 95.0%, y un valor R-cuadrado que explica el 89.23% de la variabilidad de  $w(\%)$ . De tal forma que existe una clara relación entre las variables.

Se muestra a continuación una figura de la nube de puntos más la curva de la ecuación encontrada.



Observando la función con más detenimiento, teniendo en cuenta que la constante  $a$  puede

ser también expresada como un logaritmo, y empleando propiedades de estos podemos escribir la ecuación como:

$$w(\%)^2 = \frac{\ln(a)}{\ln(N)^b}$$

Así observamos que la expresión se trata de una relación inversa entre el contenido de agua y la resistencia a la penetración, este resultado es concordante con la teoría existente de la Mecánica de Suelos ya que a mayor contenido de agua menor resistencia a la penetración.

### DISCUSIÓN

A partir de los datos recolectados con los instrumentos propuestos y del análisis de la interrelación de las propiedades medidas, se puede emitir un criterio de la calidad de las relaciones propuestas, el mismo está basado en los valores de R-cuadrado obtenidos para cada relación; a manera de resumen a continuación se muestra una tabla que contiene el valor R-cuadrado para cada relación propuesta.

**TABLA I:** Valores de R-cuadrado modelos analizados

MODELO	R-cuadrado
TEÓRICO	88,21
AJUSTADO	89,23

Partiendo de los valores de correlación obtenidos tanto de modelo teórico como de la selección de un modelo estadístico, se comprueba que el valor de la resistencia a la penetración está fuertemente relacionado con el contenido de agua.

Las correlaciones logradas a partir de datos obtenidos con este instrumento tienen un R-cuadrado elevado. De esto se desprende que el instrumento tiene un desempeño consistente y confiable, así puede a futuro utilizarse como

equipo de laboratorio e investigar diferentes configuraciones físicas del aparato, como la posibilidad de relacionarlo con otras propiedades ingenieriles de aplicación práctica; incluso se puede investigar la mejor configuración física para una propiedad dada.

### BIBLIOGRAFÍA

GONZÁLES DE VALLEJO LUÍS I. Ingeniería Geológica. Pearson Education, Madrid 2002.

JUÁREZ BADILLO EULALIO Y RICO RODRÍGUEZ ALFONSO, Mecánica de Suelos, Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Editorial Limusa S.A. de C.V. 3ª Ed. México 1990.

SANTAMARINA J. CARLOS, GYE CHUN CHO Y JONG-SUB LEE, Spatial Variability in Soils: High Resolution Assessment With Electrical Needle Probe.

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE/August 2004.

TERZAGUI KARL, PECK RALPH B. Y MESRI GHOLAMREZA, Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons 3d. Ed, New York 1996.