

**Estudio Comparativo del Grado de Compactación y Módulo de Elasticidad de  
Rellenos Estructurales**  
**Comparative Study of Compaction Degree and Elasticity Module of Structural  
Fillings**

Mario Narváez-Espinoza, Wilmer Zambrano-Zambrano, Darwin Campoverde-Cajamarca,  
Norma Armijos-Sánchez  
[menarvaez\\_est@utmachala.edu.ec](mailto:menarvaez_est@utmachala.edu.ec)

**RESUMEN**

La presente investigación tiene por objetivo estimar la correlación de la densidad de un material y su módulo de elasticidad en el control de la compactación in-situ, mediante el método del cono de arena y el Geogauge para reducir tiempo y gastos en obra, en este proyecto nos establecimos en la ciudadela Palermo de la ciudad de Machala. La metodología empleada fue la de la recolección de datos en campo y el uso del software Excel para la tabulación y graficación de resultados y así determinar el coeficiente de Pearson en la correlación existente entre variables. Los estudios que se llevaron a cabo fueron determinar las características del material en el laboratorio y en campo, establecer el grado de compactación y módulo de elasticidad, haciendo uso de las normas ASTM D6758 para Geogauge. En los resultados se evidencia que ambas variables son funcionalmente positivas y que el suelo pierde resistencia luego de sobrepasar el contenido de humedad óptimo. Las conclusiones en base a los resultados son que el control de compactación por densidad no determina la resistencia del suelo, por lo que es mejor realizar un control mecanicista a través de módulos.

**Palabras clave:** Geogauge, grado de compactación, módulo de elasticidad, ASTM D6758.

**Abstract**

The objective of this research is to estimate the correlation of the density of a material and its modulus of elasticity in the control of in-situ compaction, by means of the sand cone method and the Geogauge to reduce time and expenses on site, in this project we settled in the citadel Palermo of the city of Machala. The methodology used was the collection of data in the field and the use of Excel software for tabulation and graphing of results and thus determine the Pearson coefficient in the existing correlation between variables. The studies that were carried out were to determine the characteristics of the material in the laboratory

and in the field, to establish the degree of compaction and modulus of elasticity, making use of the ASTM D6758 standards for Geogauge. The results show that both variables are functionally positive and that the soil loses resistance after exceeding the optimum moisture content. The conclusions based on the results are that the density compaction control does not determine the resistance of the soil, so it is better to perform a mechanistic control through modules.

**Keywords:** Geogauge, degree of compaction, modulus of elasticity, ASTM D6758.

## **INTRODUCCIÓN**

En el medio local para determinar el grado de compactación en un terraplén es a través de la razón de la densidad seca del material in-situ para la densidad máxima de un material obtenido previamente en un ensayo proctor (norma AASHTO T180), lo que comúnmente se deja de lado el comportamiento mecánico del suelo, el mismo que es variado por factores que intervienen durante el tendido del material, por cambios naturales en la cantera, entre otros; es por ello que se pretende comprobar que la densidad de un material guarda una correlación con su módulo de elasticidad, es decir que a mayor nivel de compactación mayor será su módulo de Young; y que es más beneficioso conocer el valor de esta constante ya que se tiene una idea del esfuerzo que resiste un suelo antes de que llegue a deformarse por completo.

Así mismo se debe considerar que el módulo de Young puede variar significativamente debido por factores como la granulometría y el contenido de humedad siendo estas dos las más importantes y entre otras tenemos la dureza y la forma de las partículas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para determinar la correlación de las variables de densidad seca de un material tomado in-situ se hará uso del ensayo de cono de arena Vs el módulo de elasticidad del material, el mismo que para poder determinar este valor se lo realiza con la ayuda del equipo de Geogauge.

### **Densidad seca in-situ a través del ensayo de cono de arena**

La determinación del grado de compactación empleando el método de cono de arena es aplicable para partículas no mayores a 1 ½ plg (Flores Cano, 2014). Es fundamental para la ejecución de este ensayo que el suelo tenga la compactación suficiente evitando así el colapso al momento de realizar los agujeros.

El grado de compactación es determinado por la razón entre la densidad seca del suelo y la densidad seca máxima obtenida a través de un ensayo proctor en un laboratorio.

### **Determinación del módulo de elasticidad mediante el uso del equipo de Geogauge**

Para obtener el módulo de elasticidad del suelo solamente es necesario limpiar la superficie a ensayarse, enraizar la misma con un material fino y colocar el equipo de Geogauge sobre dicha capa tendida. El equipo realizara todo el trabajo del operador y este no llevara mucho tiempo hasta tomar un valor de 4 resultados para poder promediarlas entre sí.

“El Geogauge puede utilizarse para evaluar la fuerza potencial de materiales empleados base, sub-base y sub-rasante e incluyendo materiales tratados para su uso en carreteras y terraplenes. Los valores de CBR estimado en este método forman parte integrante de varios métodos de diseño para pavimentos, en particular para la determinación empírica de espesores de capa.

El Geogauge puede ser aplicado en cualquier lugar que exista la necesidad de evaluar estructuralmente un material, El CBR puede ser estimado a partir de las mediciones del Geogauge mediante el uso de la ecuación siguiente, donde el CBR está dado en porcentaje (%) y KG es la rigidez en (MN/m) determinada por el Geogauge, este instrumento trabaja con un coeficiente de correlación R2 de 0.84 para todos los datos provistos

$$\text{CBR} = 0.0039 (8.672 \text{ KG})^2 - 5.75 (92883)'' \text{ (Recinto \& Rub, 2016).}$$

“El coeficiente de correlación de Pearson se utiliza para medir la extensión de dos variables para predecir entre sí. En el cálculo de la correlación de Pearson, se obtendrá el coeficiente que muestra la relación entre dos variables. Las variables coeficiente de la relación son válidas si el valor mayor que -1 y menor que 1 con nivel significativo es 0,05 (Sensuse, Cahyaningsih, & Wibowo, 2015).”

“La estimación del coeficiente de determinación (r2) nos muestra el porcentaje de la variabilidad de los datos que se explica por la asociación entre las dos variables (Fernández, 2001).”

En las vías se enfocaron 20 puntos en la fase 1 de la construcción de la ciudadela y 20 puntos en la fase 2 de la misma; estos puntos estarán esparcidos con una separación de 3 a 6 metros debido a factores que intervienen en el proceso de compactación tales como la segregación del material o problemas con el contenido de humedad óptima. Previamente se deberá realizar el ensayo proctor del suelo en laboratorio para obtener la curva de compactación y

así una vez realizado el ensayo de densidades in-situ por el método de cono de arena se podrá obtener el grado de compactación. Así como también el ensayo de CBR para determinar la resistencia del suelo.

Continuamente luego de obtener las densidades, junto al área de ensayo se procederá a tomar la lectura del módulo de elasticidad con el apoyo del equipo de Geogauge para así procesar los datos y obtener el porcentaje de confiabilidad y relación que guardan el grado de compactación con su respectivo módulo.

## **DISCUSIONES**

Durante los ensayos en la toma de densidad del material de base de la ciudadela Palermo, estos obtuvieron un grado de compactación de alrededor de un 85% hasta un 100% aunque de igual manera existieron zonas donde la compactación más baja fue del 75%.

En lo que respecta a los valores obtenidos durante los ensayos el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson se obtiene:

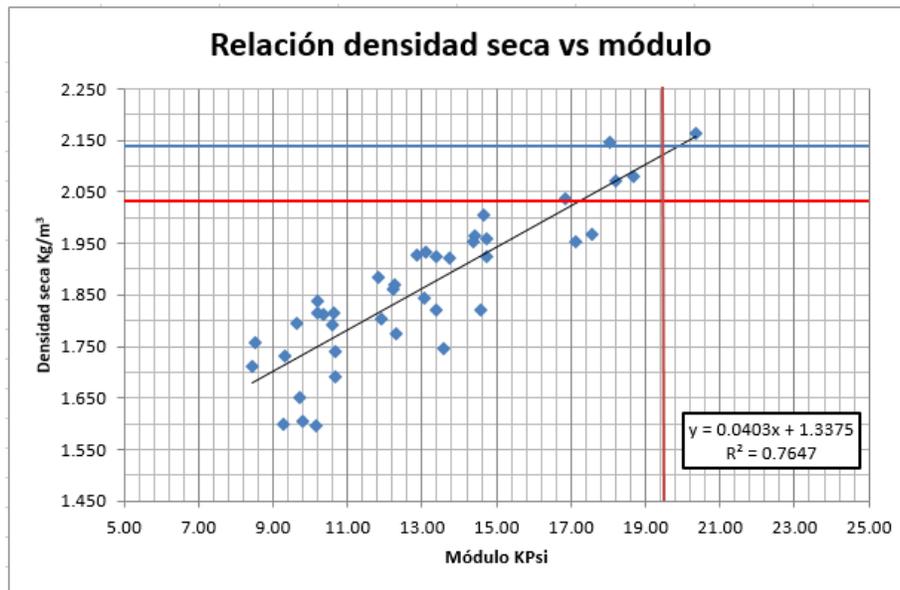
$$r=0.874 \text{ Correlación de Pearson}$$

$$r^2=0.765$$

Como es de observarse el coeficiente de correlación de Pearson “r” es un valor positivo y cercano a +1, lo que indica que ambas variables son funcionales y que, a mayor grado de compactación, mayor será el módulo de elasticidad del suelo. Finalmente, el valor de “r<sup>2</sup>” nos otorga un grado de confianza aproximado al 80%, confirmando certeramente la existencia de la relación de estas variables.

El software de Microsoft Excel con la tabulación de los datos nos otorga una representación gráfica de la dispersión de los puntos mostrándose a continuación en la figura 1 del cual el eje de ordenadas corresponde a las densidades tomadas por el ensayo de cono y placa, mientras que las abscisas el módulo de elasticidad tomado por el equipo de Geogauge.

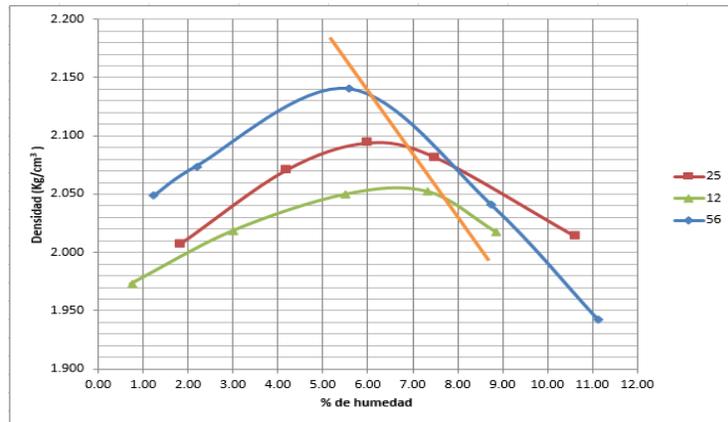
**Figura 4. Módulos y valores de densidad**



Luego de observar la linealidad o relación que guardan las dos variables objetos de este estudio, es preciso mencionar que para el tipo de suelo empleado como base en la ciudadela Palermo, el módulo de elasticidad de 20.37 KPsi es el más alto al obtener una compactación del 100% en el punto número 3 con una densidad de 2150 Kg/m<sup>3</sup> a través del método de cono de arena. Así mismo en la gráfica se observan puntos con un grado de compactación mayor al 95%, los cuales están sobre la línea roja verificándose de igual manera un aumento en los módulos respectivos.

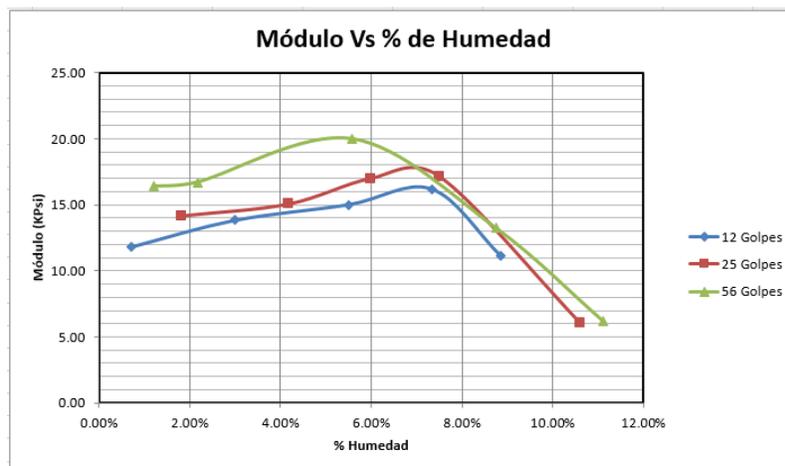
Durante la ejecución de los ensayos de CBR, se realizó la toma de lectura del módulo de elasticidad sobre el material procesado a diferente energía de compactación y contenido de humedad. A continuación, en la Fig. 2 se muestran tres curvas diferentes, las mismas que presentan la densidad del material compactado a distinto número de golpes con diferentes humedades.

**Figura 5. Curva de densidades a diferente energía de compactación y contenido de humedad**



Como es de observarse en la figura 2 las curvas tienden a desplazarse hacia la izquierda, esto indica que a mayor energía de compactación el contenido de humedad óptimo es reducido en cada caso. Este gráfico es importante ya que nos será de utilidad para obtener la densidad seca a distintos contenidos de humedad razón de 1%. De igual manera es necesario graficar el módulo de elasticidad del suelo compactado a diferente número golpes y porcentaje de humedades (figura 3).

**Figura 6. Curva de Módulo de elasticidad Vs Contenido de Humedad**

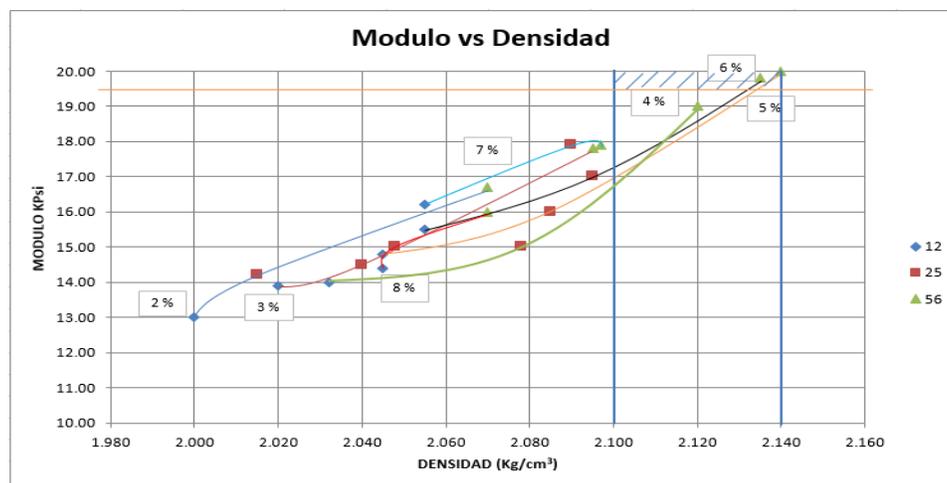


De los gráficos realizados anteriormente se obtienen módulos, densidades y porcentaje de humedad a razón de 1%, los mismos que son necesarios para realizar la gráfica del comportamiento que tiene el suelo a diferente grado compactación. Estos resultados se muestran en la tabla 1.

**Tabla 6. Módulos, % de humedad y densidad**

Golpes	Módulo (KPsi)	Humedad	Densidad (Kg/cm <sup>3</sup> )
12	13.00	2.0%	2.000
12	13.90	3.0%	2.020
12	14.00	4.0%	2.032
12	14.80	5.0%	2.045
12	15.50	6.0%	2.055
12	16.20	7.0%	2.055
12	14.40	8.0%	2.045
25	14.20	2.0%	2.015
25	14.50	3.0%	2.040
25	15.00	4.0%	2.078
25	16.00	5.0%	2.085
25	17.00	6.0%	2.095
25	17.90	7.0%	2.090
25	15.00	8.0%	2.048
56	16.70	2.0%	2.070
56	17.80	3.0%	2.095
56	19.00	4.0%	2.120
56	20.00	5.0%	2.140
56	19.80	6.0%	2.135
56	17.90	7.0%	2.097
56	16.00	8.0%	2.070

Graficando los datos anteriores se obtiene lo siguiente:

**Figura 7. Módulo de elasticidad vs Densidad**

En la figura 4 se verifica que los puntos con un contenido de humedad menor a 4% y mayores a 6%, presentan una densidad baja. Sin embargo, es importante mencionar que las muestras con un contenido de humedad del 4% compactado a 56 golpes cumplen con la densidad, pero

no logra alcanzar el requerimiento mínimo de módulo, característica que no sería apreciable si se realiza un control por densidades. Los elementos compactados con un contenido de humedad del 5% al 6% a 56 golpes cumplen tanto en resistencia como en grado de compactación. Por lo tanto, al realizar controles con el Geogauge luego del proceso de compactación podemos comprobar que el material cumple con el requerimiento mínimo de resistencia.

## CONCLUSIONES

El control de compactación a través de procesos mecanicistas otorga al contratista o fiscalizador la seguridad de obtener buenas resistencias y un buen grado de compactación en suelos, el mismo proceso que es posible gracias al equipo Geogauge, elemento del cual se obtienen valores de módulo de elasticidad del suelo, factor que guarda una relación directa con la resistencia que tiene el material y su máxima densidad. Tal es el caso del suelo utilizado como objeto de estudio en esta investigación donde los porcentajes de humedad que se encuentran entre el 5% y 6% compactados a 56 golpes durante los ensayos de CBR cumplen con un grado de compactación satisfactorio mientras que su módulo se encuentra sobre el valor mínimo requerido.

Realizar un control por resistencia resulta más beneficioso que hacerlo por un control de compactación, tal es el caso del pavimento; elemento estructural que es diseñado a través de la resistencia misma del suelo, donde sus capas granulares deben contar con parámetros mínimos para poder responder satisfactoriamente a las solicitudes de carga lo que obviaría por completo determinar la densidad que estas presentan.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cavero Tello, E. & Teran Soret, J. (2015). *Número de ciclos patrón a nivel de capa de afirmado para obtener el óptimo grado de compactación, utilizando métodos: cono de arena y densímetro nuclear; en el acceso principal a conga*. Cajamarca: Universidad Privada Del Norte.

Fernández, P. (2001). *Investigación: Relación entre variables cuantitativas*. Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística.

Flores Cano, J. (2014). *Validación de la determinación de la densidad in-situ de un tramo del proyecto Collas-Tababela; utilizando un densímetro eléctrico y comparando los resultados con el densímetro nuclear y el cono y arena*. Quito: Pontificia Universidad

Católica del Ecuador.

GeoGauge. (2007). Rigidez de la estructura de medición. *Humboldt*. Disponible en: <https://bit.ly/2FnMqzf>

Recinto, M. & Rub, U. (2016). *Diseño de un tramo vial de 1.73 km en el casco urbano del municipio de El Tortuguero, Región Autónoma de la Costa Caribe Sur (R.A.C.C.S) – Nicaragua*. Managua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

Romero-Cervantes, J. & Pérez-Rea, M. (2016). *Análisis de la pérdida de resistencia por remoldeo de suelos arenosos de la zona estuarina de Nayari*. Disponible en: <https://bit.ly/2jg2KJu>

Sensuse, D. I., Cahyaningsih, E., & Wibowo, W. (2015). Identifying Knowledge Management Process of Indonesian Government Human Capital Management Using Analytical Hierarchy Process and Pearson Correlation Analysis. *Procedia Computer Science*, 72, 233–243.

Sierra Pérez, E. & Varela Paternina, M. (2013). *Correlación entre el método geogauge y el método del cono de arena para determinar la densidad del suelo en campo*. Barranquilla: Universidad de la Costa.

Vlcek, J., Vondráčková, T., Plachý, J., Nývlt, V. & Kučerka, D. (2016). Comparative Analysis of Dynamic Methods for Earthwork Controlling. *Procedia Engineering*, 161, 483–488.