



ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD SECA DE UN RELLENO GRANULAR UTILIZANDO EL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO

ESTIMATION OF THE DRY DENSITY OF A GRANULAR BACKFILL USING THE DYNAMIC CONE PENETROMETER

Iván José, Guevara Lopez¹; Ferrer, Canaza Rojas²

Recibido 07/06/2023: Aprobado: 20/07/2023

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica242.6>

RESUMEN

El control de calidad de un relleno generalmente se realiza con métodos estandarizados, como el cono de arena y el densímetro nuclear, pero se viene planteando un método alternativo, el penetrómetro dinámico de cono, que usualmente se utiliza para calcular la relación de soporte de California in situ. En esta investigación se utilizó el penetrómetro dinámico de cono para efectuar el control de calidad de un suelo de grava limosa arcillosa con arena. Primeramente se caracterizó el material, se realizaron los ensayos básicos y específicos, por otro parte, se realizó un relleno de prueba de 12,00m de longitud dividida en siete zonas, compactados con diferentes energías, realizándose pruebas de cono de arena y penetrómetro dinámico de cono. Con los datos obtenidos se determinó una ecuación de correlación, donde, el índice de penetrómetro dinámico de cono fue la variable independiente y la densidad seca la variable dependiente. Con la ecuación se procedió a calcular de densidad seca de una plataforma compactada con una sola energía de prueba de 2,40x2,40m, se estimó una buena correlación entre la densidad seca compactada e índice de penetrómetro dinámico de cono, mostrando así la posibilidad de su uso en el control de calidad de un relleno granular. En la comparación de la densidad seca calculada a partir de la ecuación de correlación, y la densidad hallada con el cono de arena se observó que varía alrededor de un 6%.

Palabras clave: relleno granular; penetrómetro dinámico de cono; densidad seca

¹Iván José, Guevara Lopez, Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú. Correo: iyanguelvar@upeu.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0161-7718>

²Ferrer, Canaza Rojas, Director de Investigación Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú, Correo: fcanaza@upeu.edu.pe, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3952-0962>

ABSTRACT

The quality control of a fill is generally performed with standardized methods, such as the sand cone and the nuclear densimeter, but an alternative method, the dynamic cone penetrometer, is being proposed and is usually used to calculate the in situ California bearing ratio. In this investigation, the dynamic cone penetrometer was used to perform quality control of a silty clayey gravel soil with sand. First, the material was characterized, basic and specific tests were carried out, and a 12,00m long test fill was made, divided into seven zones, compacted with different energies, and sand cone and dynamic cone penetrometer tests were carried out. With the data obtained, a correlation equation was determined, where the dynamic cone penetrometer index was the independent variable and the dry density the dependent variable. With the equation we proceeded to calculate the dry density of a compacted platform with a single test energy of 2,40x2,40m, a good correlation was estimated between the compacted dry density and the dynamic cone penetrometer index, thus showing the possibility of its use in the quality control of a granular backfill. In the comparison of the dry density calculated from the correlation equation and the density found with the sand cone, it was observed that it varies around 6%.

Keywords: granular backfill; dynamic cone penetrometer; dry density

1. INTRODUCCIÓN

Los ingenieros dedicados al movimiento de tierras se enfrentan al desafío de evaluar la calidad de los suelos compactados, definiéndose como la densificación del suelo a través de la eliminación de aire que se encuentra en su estructura mediante la aplicación de esfuerzos mecánicos, normalmente en suelos granulares se utiliza rodillos vibrantes de rueda lisa [1] [3]. Un factor clave en dicho control es adherirse a un plan de procedimientos durante la ejecución de los trabajos [2]. En la actualidad los métodos estandarizados para medir la densidad in situ y contenido de humedad de un relleno compactado de forma directa son, el cono de arena y carburo de calcio o densímetro nuclear [1] [4], estos resultados se comparan con las pruebas de compactación obtenidas en laboratorio, normalmente con el *Proctor* estándar o modificado, en dicha prueba se obtiene la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad, con los cuales se calcula el grado de compactación del relleno.

Los métodos mencionados presentan algunas desventajas, así, en el método nuclear se observó que no era demasiado confiable en el cálculo de la humedad de la muestra, asimismo su manipulación es peligrosa para los operadores y el medio ambiente. Mientras que el cono de arena presenta problemas en condiciones de alta humedad, debido a la dificultad de la calibración de la arena y su manejo, además consta de muchos pasos generando demora en su ejecución y necesita de un técnico para su operación [5] [6].

El penetrómetro dinámico de cono (DCP) se viene utilizando para el control de calidad de rellenos de tierra debido a su bajo costo, su sencillez en la operación y rapidez en su

ejecución, asimismo para el uso correcto del equipo se requiere una calibración entre la resistencia del cono y la densidad seca del relleno, y se pueden realizar en el laboratorio o in situ. De acuerdo con la revisión bibliográfica disponible en el Perú existen escasos estudios del control de calidad con el DCP en rellenos de suelos granulares. En el presente trabajo se usó como instrumento de control de calidad en un relleno granular que usualmente se emplea en las estructuras de una carretera (base y subbase) o en pavimentación rígida en el radio urbano. Para ello, se recurrió al ensayo de cono de arena para comparar los resultados del DCP, es decir como ensayo patrón. El aporte principal de este estudio es generar antecedentes en el control de calidad de suelos granulares compactados a través de dicho ensayo, esto debido a que se viene empleando hace ya bastante tiempo en Europa y Estados Unidos.

2. DESARROLLO

El DCP se utiliza para evaluar la resistencia y rigidez in situ de un suelo en su estado natural o de un relleno compactado [2] [7] [8], su configuración es como se muestra en la Figura 1; el equipo consta de dos partes unidos por una varilla de 16mm de diámetro, la parte inferior posee un acoplador o mango en el extremo superior y una punta de cono extraíble en su extremo inferior, mientras que en la parte superior tiene un martillo deslizable de 8kg que se deja caer desde una altura fija de 575mm. Asimismo, la punta cónica tiene un ángulo de 60° grados y un diámetro en la base de 20mm, además la mayoría de los fabricantes incluyen un medidor de penetración. El equipo normalmente se fabrica de acero inoxidable con excepción de la punta extraíble o reemplazable.

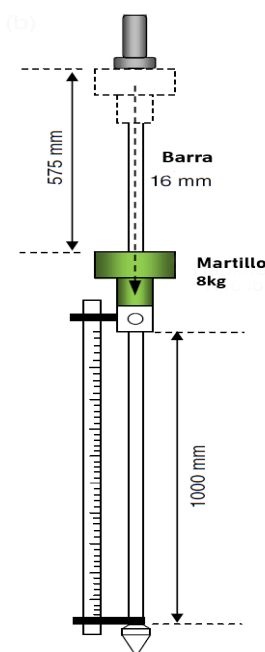


Figura 1. Esquema de equipo penetrómetro dinámico de cono ASTM D6951. Fuente: [9]

Los estudios con el dispositivo se han desarrollado ampliamente en la correlación del índice de penetrómetro dinámico de cono (IDCP) y la relación de soporte de California (CBR), el módulo resiliente de una subrasante, modulo elástico [1] [2]; asimismo en [1] muestra una lista de correlaciones disponibles entre el índice de penetrómetro dinámico de cono y otros parámetros de un suelo obtenidos en campo y laboratorio. Recientemente se correlacionaron el IDCP con parámetros como la humedad, coeficiente de uniformidad y límite de plasticidad en suelos de grano grueso, suelos de transición y suelos de grano fino esto en una subrasante compactada, donde reportaron correlaciones confiables con el número de golpes, el grado de humedad y coeficiente de uniformidad en los suelos de grano grueso, mientras que en suelos de grano fino lograron correlacionar satisfactoriamente el número de golpes y el índice de plasticidad [2]. En la misma línea se han realizaron ensayos de laboratorio y campo, para correlacionar el grado de compactación de un suelo arcilloso de alto limite liquido (CH) con buena gradación con los parámetros del IDCP y el contenido de humedad, consiguiéndose correlaciones confiables [8].

Por otro lado, en estudios en el que realizaron correlaciones de la densidad seca y el IDCP in situ en suelos de préstamos compactados, en suelos clasificados como arena arcillosa con grava, arena arcillosa y arena limosa, observaron efectos de la humedad y la altura de caída del martillo [1]. Asimismo, en otro trabajo con suelos de naturaleza uniforme arena pobremente graduada con limo (SP-SM), compactado con un rodillo vibrante de rueda lisa, se observaron variaciones de densidad considerable asumiendo que tal hecho de deba al cambio de la humedad del suelo y la condición de succión del material, mas no por la heterogeneidad del suelo, obteniendo correlaciones pobres [10].

De igual forma se desarrolló un método alternativo que funciona con los mismos principios del DCP en versión más pequeña, utilizaron el suelo arena de sílice y arena amarilla de Tamala ambas clasificadas como (SP), el modelo fue ejecutado en laboratorio, obteniendo correlaciones de la orden de 0,83 y 0,66 respectivamente para las dos muestras [11]. Igualmente en otra experiencia se utilizaron muestras de suelo (SP), donde observaron una correlación alta, además reportaron que el IDCP aumentaba considerablemente en profundidad, los ensayos fueron hechos en laboratorio y campo [6]. En todos los estudios mencionados para realizar las correlaciones utilizaron como ensayo patrón el cono de arena y/o el densímetro nuclear, además se aprecia que las muestras utilizadas fueron arenas en su mayoría, las cuales muestran correlaciones optimas, se ve la ausencia de materiales granulares en este tipo de investigaciones.

Por otro lado, también reportaron estudios realizados a través de modelos computacionales, donde usaron características de suelos granulares gruesos, realizaron modelos con el Método de Elementos Discretos (DEM) con el fin de apreciar la relación del tamaño de las partículas y su distribución ante el penetrómetro dinámico de cono, observando que el tamaño y distribución de partículas influyen en la resistencia a la penetración [12]. Asimismo en otra demostración, se evaluaron mediante Modelos de Elementos Finitos (FEM) la relevancia de la resistencia a la penetración en materiales granulares gruesos y cómo estas afectan la medición con el penetrometro dinámico de cono, observando que a pesar de que el material sea grueso las fuerzas medidas en la punta del cono reflejan el estado mecánico del material en el sitio ensayado [13]. Estos resultados invitan a realizar ensayos reales en suelos gruesos. La mayoría de los estudios citados coinciden en señalar que la humedad es una variable que hace que la resistencia del suelo varíe, por ende, también los resultados variarán con lo que se pueda obtener con el DCP [1] [2] [8] [10] [11] [14].

3. METODOLOGÍA

3.1. Materiales Empleados en el Estudio

En este estudio se utilizó un suelo de préstamo que se obtuvo de una cantera en el distrito de Espinar - Cusco en Perú. En la Figura 2 se muestra la metodología seguida para el desarrollo de la investigación, en consecuencia, se realizaron los ensayos para identificar las características mecánicas y físicas de acuerdo con la normativa nacional que a la vez están respaldadas por las normativas ASTM (American Society for Testing and Materials).

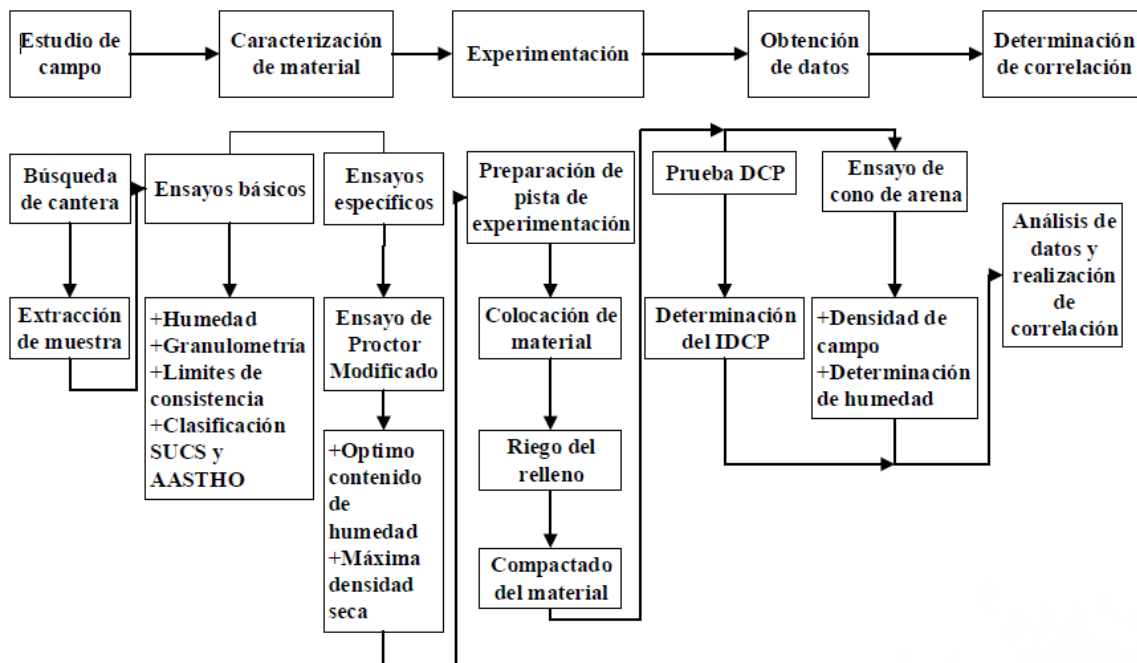


Figura 2. Metodología para la estimación de la correlación del IDCP vs pd. Fuente: los autores

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos básicos y específicos. Asimismo, el suelo fue clasificado de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el American Association Standards Highway Transportation Officials (AASHTO).

Tabla 1. Propiedades físicas del suelo. Fuente: los autores

Parámetros	Medición
D30 (mm)	0,733
D60 (mm)	11,616
Limite plástico (%)	19,23
Limite liquido (%)	25,45
Índice de plasticidad (%)	6,21
Clasificación del suelo	
SUCS	GC-GM
AASHTO	A-2-4 (0)
Optimo contenido de humedad (%)	10,07
Máxima densidad seca g/cm ³	2,248
Abrasión los ángeles (%)	25,5
CBR (%)	37,55

El suelo se clasifica como grava limosa arcillosa con arena (GC-GM), en el análisis granulométrico ASTM D6913, se observó que no posee el parámetro D10, esto debido a que los finos superan el 15%, en la Figura 3 se muestra la curva granulométrica de suelo usado. Por otro lado, la distribución en porcentajes esta dado de la siguiente forma, 53,13%, 31,36% y 15.51% de grava, arena y finos respectivamente.

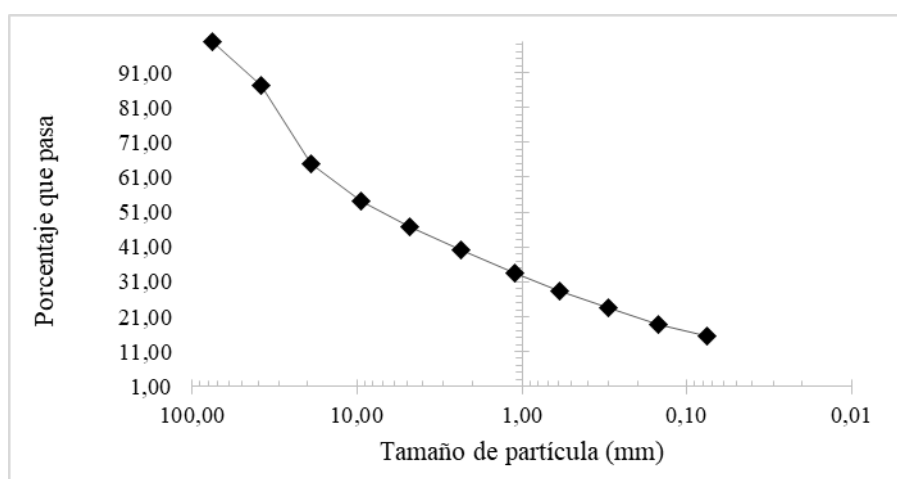


Figura 3. Curva granulométrica de la muestra. Fuente: los autores

Para hallar los parámetros del óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca se utilizó la metodología del Proctor Modificado ASTM D1557, siendo 2,248g/cm³ y 10,07% la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad respectivamente, la curva de compactación se aprecia en la Figura 4, además el material posee un CBR (ASTM D1883) al 95% de 37,55%. Asimismo, el material empleado en este estudio se utiliza como base o subbase en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Espinar.

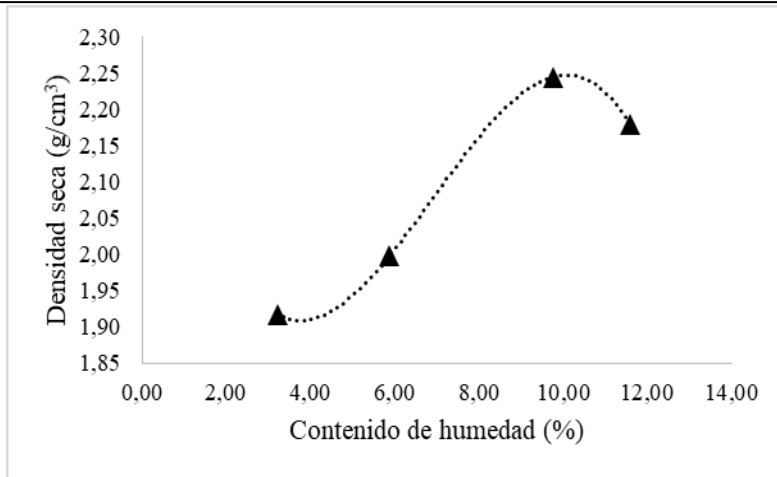


Figura 4. Curva de compactación (Proctor modificado). Fuente: los autores

3.2. Penetrómetro Dinámico de Cono

En los antecedentes se describió el aspecto físico y de forma del dispositivo DCP, en éste apartado se describirá brevemente cómo funciona. Después del correcto ensamblado se toma el equipo y se sujeta verticalmente en el punto elegido para prueba, inicialmente se dan unos golpes parciales con el martillo para asegurar el hincado de la punta, esta se toma como número de golpe cero. Una vez asegurado el hincado inicial se deja caer el martillo de una altura de 575mm para luego tomar dato hasta la profundidad dada, de la lectura hecha se extrae el resultado la cual se expresa en términos de IDCP, definiéndose como la profundidad de penetración del cono por cada golpe (mm/golpe), asimismo se calcula utilizando la Ecuación 1, donde, P_i y P_{i+1} son valores de penetración del cono en mm y N_i y N_{i+1} es el número de golpes correspondientes a las profundidades de penetración.

$$IDCP = \frac{P_{i-1} - P_i}{N_{i-1} - N_i} \quad (1)$$

$$IDCP_{P_pond} = \frac{1}{H} \sum_i^N [(IDCP)_i(Z)_i] \quad (2)$$

Mientras que para calcular el IDCP representativo del relleno se utilizó el promedio ponderado como sugiere [15], la cual se muestra en la Ecuación 2, donde, N=número total de IDCP, Z= distancia de penetración por golpe y H=altura total de penetración.

3.3. Experimentación

Con el material caracterizado se procedió a realizar una plataforma de 12,00m de largo y 2,50m de ancho, de la misma forma el ancho efectivo de compactación fue de 2,134m y el ancho útil de trabajo de 2,00m, como se muestra en la Figura 5, al conformar el relleno se colocó el material con una altura de 30cm de altura, la cual disminuyó después de realizarse la

compactación una altura promedio de 26cm. Después de conformarse el relleno se dividió en 7 zonas (Zi) de 1,50m por zona, excepto la zona 7 que tuvo una mayor dimensión, debido a que esa área se encontraba al final de la pista experimental y fue donde se compactó con mayor energía, la energía de compactación se tomó de la referencia [1] y la practica local.

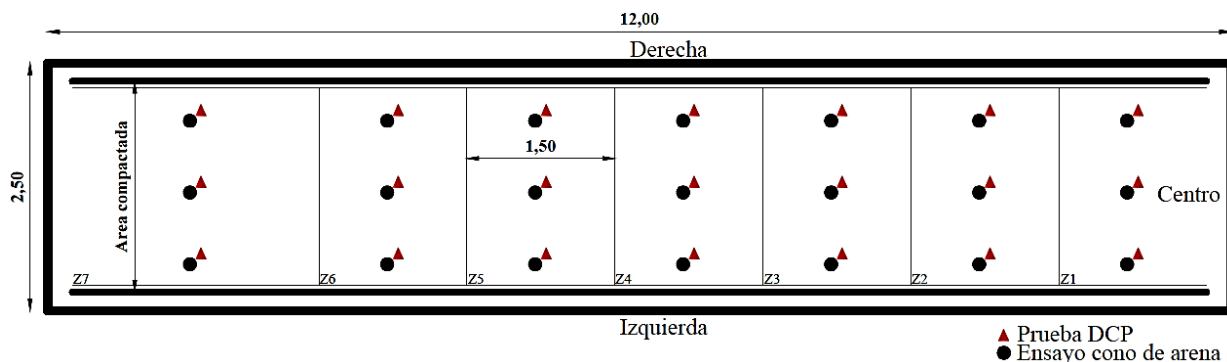


Figura 5. Esquema de relleno de pruebas. Fuente: los autores

En las zonas se aplicó diferentes energías de compactación, con el fin de tener múltiples densidades por cada zona, la configuración de energía se muestra en la Tabla 2. Para la compactación del relleno se utilizó un rodillo compactador de tambor liso Cat CS 533E de 2,134 de ancho de rueda lisa a una velocidad constante por pasada, realizando un total de 6 pasadas en la zona 7. En la Figura 6 se muestra la distribución realizada de las pruebas, 3 por cada zona. En cada zona se realizó 1 ensayo de cono de arena y 06 pruebas de DCP alrededor del ensayo de cono de arena dejando un espacio libre de 19cm.

Tabla 2. Configuración de energía de compactación. Fuente: los autores

Zona de compactación	Energía de compactación
Z1	1 pasada de baja vibración (BV1)
Z2	2 (BV1)
Z3	1 (BV1) + 1 pasada de alta vibración (AV1)
Z4	1 (BV1) + 2 (AV1)
Z5	2 (BV1) + 2 (AV1)
Z6	2 (BV1) + 3 (AV1)
Z7	2 (BV1) + 4 (AV1)

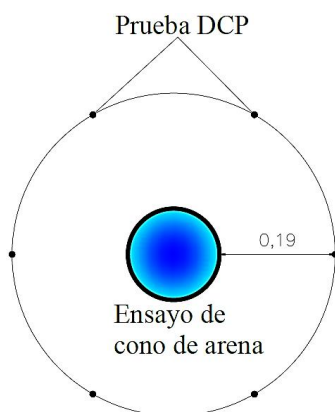


Figura 6. Esquema de pruebas por punto de cono de arena. Fuente: los autores

Después de realizar la compactación como muestra la Figura 7a se procedió a marcar la ubicación de lugar donde se realizaron los ensayos de cono de arena y los de DCP. Los puntos del ensayo DCP se realizaron aleatoriamente con el criterio de que cada punto debía tener una distancia mínima de separación tanto de lado como de ancho de 20 centímetros, en la Figura 7b se muestra la realización de los ensayos del DCP.



Figura 7. a) Compactación del relleno de pruebas con rodillo, b) prueba de DCP. Fuente: los autores

4. RESULTADOS

En total se realizaron 126 pruebas de DCP y 21 pruebas de cono de arena en todo el relleno compactado, de los datos procesados de los ensayos de DCP se descartaron algunos, especialmente de DCP que se realizó en el borde del relleno de prueba, esto por formar parte de datos atípicos. Por cada zona y punto de cono de arena se extrajo el promedio ponderado del ensayo DCP. Las pruebas de cono de arena tuvieron una variación mínima en cada zona, por consiguiente, se tomaron esos datos y se graficó el resultado global, es decir el IDCP versus la densidad seca (ρ_d) como se muestra en la Figura 8.

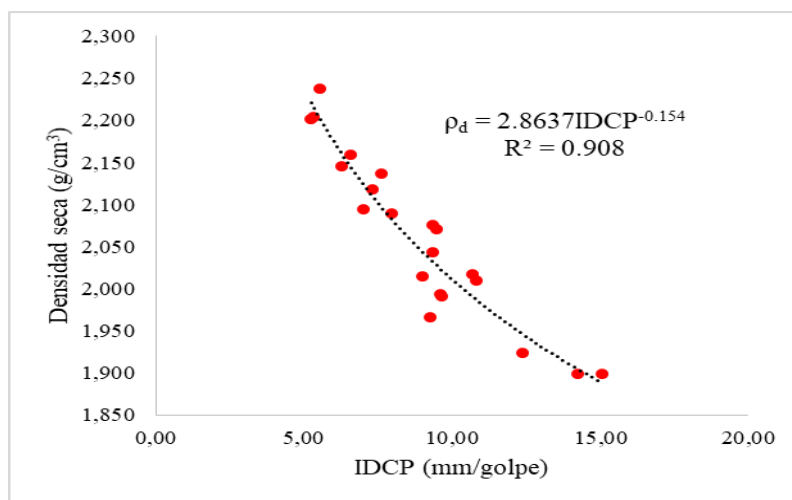


Figura 8. Variación del IDCP vs ρ_d . Fuente: los autores

Las humedades halladas de los ensayos de cono de arena presentaron mínimas variaciones, esto probablemente se debe a que se compacto a una sola humedad el relleno, además los agregados grueso tienen un rango de humedades a los que pueden alcanzar grados de compactación aceptables [16]. A continuación, se presenta la ecuación 3 de correlación global, donde para calcular la ecuación se utilizaron los datos de las siete zonas y los tres lados.

$$\rho_d = 2.8637(IDCP)^{-0.154} (R^2 = 0.908)(GC - GM, n = 126) \quad (3)$$

Dónde: ρ_d = densidad seca (g/cm^3), IDCP = índice de penetrómetro dinámico de cono (mm/golpe), n = número de pruebas de penetrómetro dinámico de cono.

Se puede observar que existe una buena correlación según [11] de ρ_d vs IDCP de 0,908 del suelo clasificado como grava limosa arcillosa con arena (GC-GM). También se presentan los resultados de cada lado o franja de relleno compactado, es decir de la derecha, centro e izquierda en la Figura 9. Donde se muestra correlaciones buenas según [11] de 0,931, 0,927 y 0,907 de los lados derecha, centro e izquierda respectivamente. En la Tabla 3 se muestra los resultados por cada zona y franja con esos datos se generó las correlaciones realizadas en este estudio.

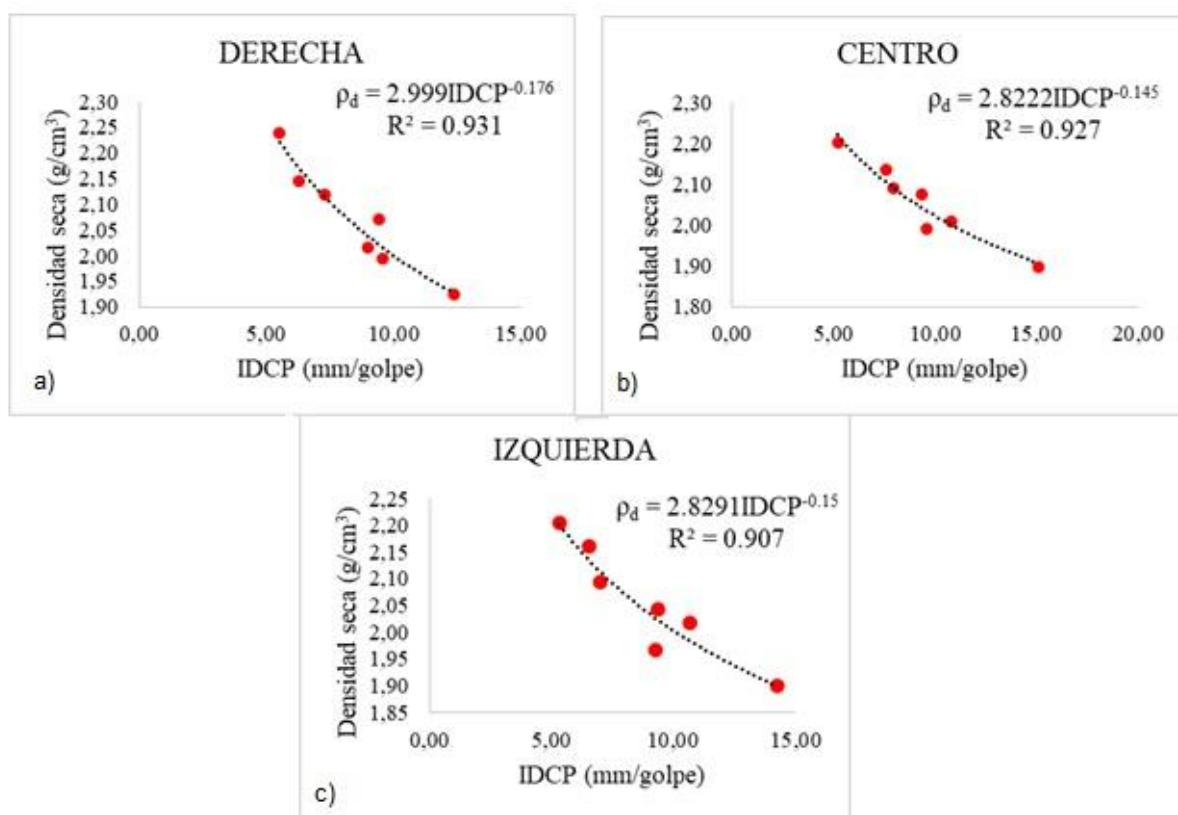
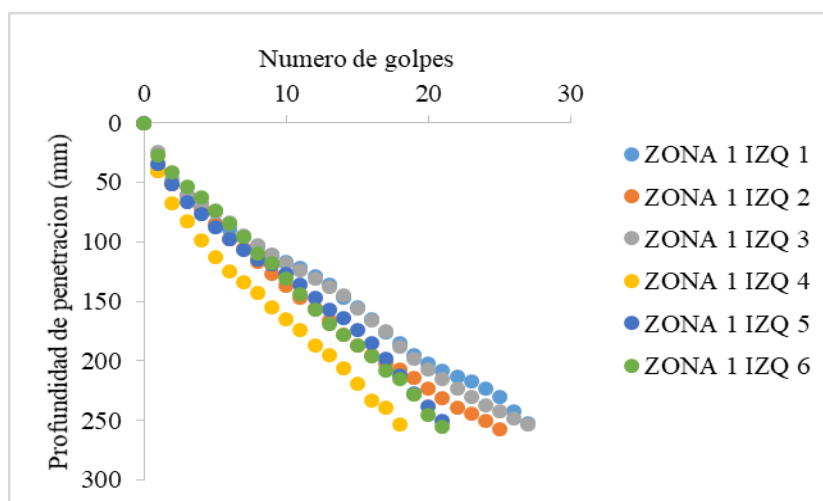


Figura 9. Variación del IDCP vs ρ_d en la franja derecha. Fuente: los autores

Tabla 3. Resumen de resultados por zonas. Fuente: los autores

Zona	Derecha		Centro		Izquierda	
	IDCP (mm)	ρ_d (g/cm ³)	IDCP (mm)	ρ_d (g/cm ³)	IDCP (mm)	ρ_d (g/cm ³)
Z1	12,36	1,92	15,08	1,90	14,23	1,90
Z2	9,60	1,99	9,62	1,99	9,27	1,97
Z3	9,00	2,01	10,80	2,01	10,69	2,02
Z4	9,45	2,07	9,35	2,08	9,35	2,04
Z5	7,30	2,12	7,96	2,09	7,00	2,09
Z6	6,27	2,15	7,63	2,14	6,55	2,16
Z7	5,54	2,24	5,24	2,20	5,32	2,20

A pesar de compactar a un mismo esfuerzo en cada zona en el mismo suelo, la variación de los resultados de cada franja se atribuye al tamaño de partículas de suelo, conformado por 53,13% de grava, 31,36% de arena y 15,51% de finos, es decir contiene mayor porcentaje de tamaño de suelo que pasan los tamices 1 1/2", 3/4", 3/8" y tamiz N° 04. En la revisión bibliográfica no se encontró considerables estudios donde se correlacionen el ρ_d vs IDCP en suelos granulares como el que fue utilizado en este estudio, pero de acuerdo con los resultados se opina que es posible utilizar el DCP como dispositivo adecuado para el control de calidad de rellenos granulares. Además, se informa que las curvas de número de golpes versus profundidad de penetración muestran una pendiente uniforme como se muestra en la Figura 10, este comportamiento se refleja en todas la zonas, por lo tanto se evidencia un solo estrato y de estructura relativamente uniforme [17].

**Figura 10.** Curva DCP vs golpes acumulados de la zona 1. Fuente: los autores

En la Figura 11 se presenta una comparación con los resultados reportados de [1] y los resultados hallados en este estudio, se puede apreciar que ambas curvas tienen la misma tendencia para IDCP iguales; probablemente, la variación existente se da por la cantidad de grava presente en ambas muestras. También varía el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca, datos que explican que para cada tipo de suelo en particular el IDCP mostrara resultados diferentes, es por ello que para utilizar este método de control de calidad se deberá calibrar la ρ_d vs el IDCP, y así evitar el uso incorrecto del método DCP en control

de compactación de suelos.

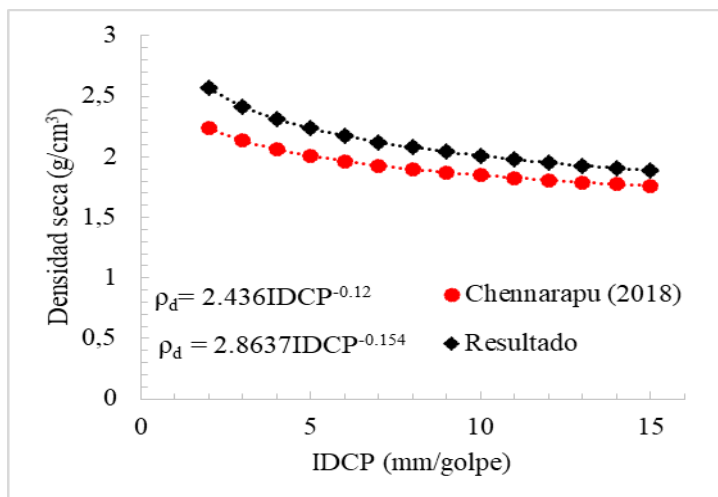


Figura 11. Comparación de IDCP vs ρ_d del presente estudio el de [1]. Fuente: los autores

4.1. Prueba de Correlación

Después de realizar el cálculo de la ecuación de correlación en la pista de prueba por cada franja y de manera general mostrados en las Figuras 8 y 9 respectivamente, se procedió a realizar un relleno para determinar la densidad seca por medio del IDCP, para ello se compacto una plataforma de 2,40x2,40x0,25m con el mismo material. La plataforma se compacto con un vibro-compactador estándar en tres capas de altura aproximada de 15cm, aplicándose a cada capa la misma cantidad de energía de compactación, al finalizar la compactación la plataforma termino con una altura promedio de 25cm. Terminado la compactación de la plataforma se dividió en 4 sectores como se muestra en la Figura 12, en cada sector se realizó 3 pruebas DCP y 1 cono de arena, las pruebas de cono de arena se extrajeron para comparar con los resultados de la ecuación de correlación general y los de franja [6][9][18].

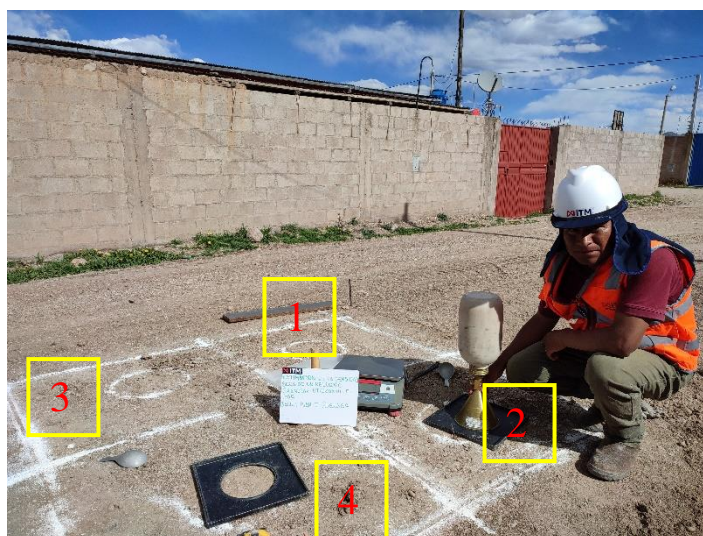


Figura 12. División de la plataforma en 4 sectores y realización del ensayo de CA. Fuente: los autores

Con la ecuación de correlación general se calculó la densidad seca en los sectores 1, 2, 3 y 4 los que se muestran en la Tabla 4, las variaciones respecto a la densidad seca de cono de arena (CA) en porcentaje de orden del 6% sobre estimando la densidad seca, pero aun así brindan resultados cercanos, estos resultados ofrecen evidencia positiva para el uso del DCP en el control de calidad en rellenos granulares (GC-GM) con un índice de plasticidad de 6,21 %.

Tabla 4. Resultados de la ecuación de correlación general. Fuente: los autores

ρ_a (IDCP) (g/cm ³)	ρ_a (CA) (g/cm ³)	Variación	
2,167	2,107	0,060	2,8%
2,202	2,136	0,067	3,1%
2,189	2,063	0,126	6,1%
2,233	2,108	0,124	5,9%

5. CONCLUSIONES

En este estudio se investigó la aplicación del DCP para el control de calidad de rellenos de un suelo granular. Después de realizar los ensayos requeridos se ha desarrollado una correlación del índice de penetrómetro dinámica de cono (IDCP) y la densidad seca. Para comprobar la ecuación de correlación se elaboró una plataforma, la cual se compacto con un vibro compactador en capas, donde se pudo apreciar resultados cercanos a los determinados con el cono de arena, variando en una orden del 6%, mostrando así ser una herramienta útil en el control de calidad en suelos con 53,13% de grava, 31,36% de arena y 15,51% de finos, como se demostró en este estudio.

Las pruebas de DCP son económicas y relativamente fácil de manipular, la cual podría ayudar en el control de calidad de un relleno en distancia cortas con mayor número de pruebas. Para el uso de DCP como dispositivo de control de calidad primeramente se tiene que realizar trabajos previos de caracterización del material y calcular una ecuación de correlación con el tipo de suelo a trabajar, una vez establecido estos pasos se podrá utilizar el DCP para hacer seguimiento de la calidad del relleno, ya sea una capa de carretera o un terraplén compactado en capas. El procedimiento descrito se repite cuando el suelo a usar cambie. Existen otras metodologías en estudios previos especialmente para arenas, sin embargo se pueden adecuar para suelos granulares. Se recomienda usar este estudio como antecedente para estudios posteriores con suelos granulares con distintas gradaciones, por otra parte, se pueda incluir la humedad en la ecuación de correlación.

6. FINANCIAMIENTO

Propio de los autores.

7. AGRADECIMIENTO

Los autores expresan sus agradecimientos a [ITM GLOBAL INGENIERIA Y SERVICIOS E.I.R.L.](#) por la colaboración en la ejecución de los ensayos básicos y específicos, así mismo por acceder al uso de su establecimiento para la realización de la pista de pruebas

8. CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

9. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Investigación, IG.; redacción, IG.; supervisión, FC

10. REFERENCIAS

- [1] H. Chennarapu, T. K. Garala, R. Chennareddy, U. Balunaini, y G. Venkata Narasimha Reddy, "Compaction Quality Control of Earth Fills Using Dynamic Cone Penetrometer," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 144, no. 9, pp. 1–10, 2018
- [2] E. Ganju, H. Kim, M. Prezzi, R. Salgado, y N. Z. Siddiki, "Quality assurance and quality control of subgrade compaction using the dynamic cone penetrometer," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 19, no. 11, pp. 966–975, 2016
- [3] L. D. Wesley, "Soil Compaction," in *Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009, pp. 391–404
- [4] Y. Gansonré, P. Breul, C. Bacconnet, M. Benz, y R. Gourvès, "Prediction of in-situ dry unit weight considering chamber boundary effects on lateritic soils using Panda® penetrometer," *Int. J. Geotech. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 408–414, 2022
- [5] R. B. Freeman, C. A. Gartrell, L. D. Wakeley, E. S. Berney, y J. R. Kelley, "Steel-shot method for measuring the density of soils," *Can. Geotech. J.*, vol. 47, no. 11, pp. 1299–1304, 2010
- [6] A. M. Hamid, O. S. B. Al-Amoudi, y S. A. Aiban, "Assessing the Effect of Density and Water Level on the Degree of Compaction of Sand Using Dynamic Cone Penetration Test," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 5, pp. 4921–4930, 2018
- [7] H. Kim, "Dynamic analysis of dynamic cone penetration test for subgrade compaction assessment," Purdue University, 2014
- [8] B. Yang, R. Zhang, X. Zha, C. Liu, y Q. Pan, "Improved testing method of dynamic cone penetrometer in laboratory for evaluating compaction properties of soil subgrade," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 17, no. 2, pp. 487–498, 2015
- [9] C. Lee, K. Kim, W. Woo, y W. Lee, "Soil Stiffness Gauge (SSG) and Dynamic Cone Penetrometer (DCP) tests for estimating engineering properties of weathered sandy soils in Korea," *Eng. Geol.*, vol. 169, pp. 91–99, 2014
- [10] F. S. Tehrani, C. L. Meehan, y F. Vahedifard, "Comparison of Density-Based and Modulus-Based In Situ Tests for Earthwork Quality Control," pp. 2345–2354, 2014
- [11] A. Mohajerani *et al.*, "A practical technique for the compaction control of sand in road construction: using a dynamic lightweight cone penetrometer," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 22, no. 1, pp. 200–214, 2019

- [12] Q. A. Tran, B. Chevalier, y P. Breul, "Spectral Analysis of the Response of Coarse Granular Material to Dynamic Penetration Test Modelled with DEM," *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 1–10, 2018
- [13] J. C. Quezada, P. Breul, G. Saussine, y F. Radjai, "Penetration test in coarse granular material using Contact Dynamics Method," *Comput. Geotech.*, vol. 55, pp. 248–253, 2014
- [14] A. S. I. Kofi y F. G. J. Yao, "The influence of water content on the Dynamic Cone Penetration Index of a lateritic soil stabilized with various percentages of a quarry by-product," *Transp. Geotech.*, vol. 5, pp. 68–85, 2015
- [15] T. B. Edil y C. H. Benson, "Investigation of DCP and SSG as alternative methods to determine subgrade stability," University of Wisconsin-Madison, 2005
- [16] P. W. Jayawickrama, A. L. Amarasiri, y P. E. Regino, "Use of dynamic cone penetrometer to control compaction of granular fill," *Transp. Res. Rec.*, no. 1736, pp. 71–80, 2000
- [17] M. A. Y. Montes, "Determinación de la ecuación de correlación entre el PDC Y CBR con muestra inalterada, en suelos a nivel de subrasante en el tramo Gallito de las Rocas-Los Olivos, región Junín," Universidad Peruana Unión, 2020
- [18] J. S. Lee, S. Y. Kim, W. T. Hong, y Y. H. Byun, "Assessing subgrade strength using an instrumented dynamic cone penetrometer," *Soils Found.*, vol. 59, no. 4, pp. 930–941, 2019