

# Maximum compaction energy in a granular soil for road surfacing of the Agocucho Quarry

## Máxima energía de compactación en un suelo granular para afirmado - Cantera Agocucho.

Josecarlos Jair León Quiroz, Ing.<sup>1</sup>; Jane Álvarez-Llanos, Mg.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. [N00026174@upn.edu.pe](mailto:N00026174@upn.edu.pe)

<sup>2</sup> Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. [jane.alvarez@upn.edu.pe](mailto:jane.alvarez@upn.edu.pe)

**Abstract**—The objective of this paper is to show the results of the research Influence of compaction energy on the maximum dry density and optimal moisture content of the granular soil of the Agocucho quarry, Cajamarca - 2017, the granular soil used for road surfacing. Through an experimental design, the tests were carried out varying the compaction energy, with 56, 57, 58, 59, 60, and 61 blows; for each test the moisture content was varied 5 times. Applying the modified proctor method C under the ASTM D1557 standard. For the investigation, it was necessary to determine other parameters such as the optimum moisture content, granulometric analysis, plasticity limits, specific weight and resistance to degradation. The result was that the soil according to the SUCS system is classified as a clayey gravel (CG), and according to the AASHTO classification system it is a gravelly soil with clayey sand A-2-4, maximum dry density of 1.98 gr/cm<sup>3</sup> and optimal moisture content of 3.38%, determining that this type of soil reaches its maximum dry density at 28.73 kg-cm/cm<sup>3</sup> of compaction energy, by increasing the compaction energy the maximum dry density tends to decrease; It has been stated that each type of soil corresponds to a maximum compaction energy, so special care must be taken in the construction stage to avoid reducing the maximum dry density due to excess compaction energy.

**Keywords:** Maximum dry density, granulometry, optimum moisture content, proctor.

**Resumen**— La presente investigación se realizó con el fin de estudiar y analizar la influencia de la energía de compactación en el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima en el suelo granular de la cantera Agocucho, suelo granular utilizado para afirmado. Mediante un diseño experimental se realizaron los ensayos variando la energía de compactación, con 56, 57, 58, 59, 60, y 61 golpes; para cada ensayo se varió 5 veces el contenido de humedad, aplicando el método C de proctor modificado bajo la norma ASTM D1557. Para la investigación fue necesario determinar otros parámetros como el contenido óptimo de humedad, el análisis granulométrico, límites de plasticidad, peso específico y resistencia a la degradación. Se obtuvo que el suelo según el sistema SUCS se clasifica como una grava arcillosa (GC), y según el sistema de clasificación AASHTO es un suelo gravoso con arena arcillosa A-2-4, densidad seca máxima de 1.98 gr/cm<sup>3</sup> y óptimo contenido de humedad de 3.38 %, determinando que este tipo de suelo alcanza su densidad máxima seca a los 28.73 kg-cm/cm<sup>3</sup> de energía de compactación, al incrementar la energía de compactación la densidad máxima seca tiende a disminuir; afirmado que a cada tipo de

suelo le corresponde una máxima energía de compactación por lo que debe tenerse especial cuidado en la etapa de construcción para evitar disminuir la densidad máxima seca por exceso de energía de compactación.

**Palabras clave:** Densidad seca máxima, granulometría, óptimo contenido de humedad, proctor.

### I. INTRODUCCIÓN

El presente escrito tiene como objetivo mostrar los resultados de la tesis Influencia de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad del suelo granular de la cantera Agocucho, Cajamarca – 2017 [27]; siendo que a través del tiempo se han presentado diversos problemas relacionados con la estabilidad de suelos; en el proceso constructivo la información de mecánica de suelos se torna insuficiente para alcanzar la calidad requerida de los proyectos, debido a la poca información técnica que se tiene acerca de dichos suelos. La norma actualizada E050 (2018) [1] muestra el interés en la compactación, debido a que es una parte vital en el desarrollo de los proyectos, en los cuales se concluye que para el mejoramiento de la capacidad portante de los suelos se tienen que eliminar los vacíos que se encuentran en su interior, teniendo en cuenta que dicha fase se debe realizar de manera eficaz basándose y cumpliendo cabalmente lo especificado en las normas técnicas las cuales se aplican en los procesos de compactación; sin embargo en la etapa de operación y mantenimiento del proyecto estos presentan problemas de asentamientos, deslizamientos, entre otros; es así que en la presente investigación se analizará la influencia de la energía de compactación en la capacidad portante del suelo.

En Norte América, múltiples han sido los estudios de suelos y los efectos que tiene la compactación en ellos, de la misma manera varias son las teorías encontradas que tratan de explicar lo que pasa en este proceso en el cual la distribución de las partículas de suelo varía, así como sus propiedades y su comportamiento [2].

En Estados Unidos Proctor en 1993 [3], brindo una explicación acerca de lo que ocurría al compactar un suelo y agregarle agua. Proctor suponía que la humedad en un suelo relativamente seco crea efectos de capilaridad que une a las partículas, creando una mayor fricción que se opone a las fuerzas de la compactación.

**Digital Object Identifier (DOI):**

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.49>

**ISBN:** 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

En Cajamarca se tiene diversas variaciones de la densidad del suelo las cuales en muy pocas ocasiones son mejoradas y son adaptadas para soportar cargas a las cuales serán sometidas, como ejemplo se tomó la tesis sobre la falla de suelos en la fundación en la construcción de edificios en el condominio Residencial Las praderas Park en el cual obviaron un mejoramiento de suelos, teniendo posteriormente fallas en su proceso constructivo, si bien es cierto en la norma nos especifica el parámetro para la energía de compactación la cual varía de 25 kg-cm/cm<sup>3</sup> a 29 kg-cm/cm<sup>3</sup>, pero no nos especifica cual es la energía máxima que se debe usar para lograr alcanzar el 100% de resistencia de los suelos granulares, no teniendo en cuenta que si se aplica demasiada o poca energía al compactar el suelo no alcanzaría su máximo rendimiento [4].

La compactación de suelos es un requisito indispensable para mejorar las características físicas y mecánicas de los suelos, los costos son bastante altos durante la ejecución, mayor aún si deben rehacerse o cuando las consecuencias lo sufren la infraestructura provocando su falla [6].

Según la tesis “Estudio de factibilidad técnica económica de explotación de canteras, para optimizar la rentabilidad económica en la concesión minera cantera El Gavilán y cantera Agocucho, Cajamarca 2016”, [7], nos indica que la cantera Agocucho es la que se utiliza para el mejoramiento de los suelos en edificaciones en la ciudad de Cajamarca durante los últimos 10 años.

Una de las razones de la falla de la capacidad portante de los suelos granulares es el exceso de energía de compactación; cuando el suelo sobrepasa su resistencia máxima y se sigue aplicando más energía de compactación estadística disminuye su capacidad portante y al aumentar la energía de compactación incrementa el contenido de humedad para alcanzar la máxima densidad seca [8], [9], [10], [11] y [12].

#### Suelo

Se define como un sustrato físico sobre el cual se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas. Lo considera como un sistema multifase por estar compuesto de sólidos, líquidos y gases. Entre los parámetros de identificación son los más significativos la granulometría (distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado) y la plasticidad (la variación de consistencia del agregado en función del contenido en agua). El tamaño de las partículas va desde los tamaños granulares conocidos como gravas y arenas, hasta los finos como la arcilla y el limo. Las variaciones en la consistencia del suelo en función del contenido en agua diferencian también las mencionadas clases granulométricas principales. Los parámetros de estado fundamentales son la humedad (contenido en agua del agregado), y la densidad, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes [6].

#### Suelos Granulares

Los suelos granulares se definen como aquellos en los cuales las fuerzas intergranulares o atractivas tienen un efecto despreciable en el comportamiento mecánico observado. Esta categoría engloba a rocas, gravas y arenas. Basados en el estado de tensiones y en la estructura del suelo, normalmente definidos en función de la densidad relativa ( $D_r$ ), del índice de huecos ( $e$ )

o de la porosidad ( $n$ ), los suelos granulares además se clasifican en materiales densos o sueltos. Además, son los suelos que no poseen ninguna cohesión, y consisten en rocas, gravas, arenas y limos [11]. Para la AASHTO los suelos son los que cuentan con 35% o menos, del agregado fino que pasa el tamiz No. 200. Dichos suelos son los que constituyen 3 grupos los cuales son: A-1, A-2 y A-3.

#### Comportamiento de suelos granulares

Los suelos son materiales complejos que exhiben un rango amplio de comportamientos mecánicos que dependen de la composición y estructura del suelo, del historial de tensiones, de la densidad y de las características de la fuerza aplicada. Así como también debe considerarse otros factores como porosidad y peso específico. Esta variedad de factores permite conocer los comportamientos del suelo. Además, la rigidez de un material granular está en la relación esfuerzo deformación, es decir el comportamiento mecánico del material depende de las propiedades granulométricas del material, también tiene un efecto ante el fluido ya que se introduce dentro de sus poros al que conocemos como un suelo saturado [13].

#### Propiedades de suelos granulares

Los suelos granulares son aquellos cuyos granos no están juntos firmemente. De modo que, el suelo se desintegra en granos individuales al sumergirse en el agua. Las arenas y las gravas son suelos granulares típicos. Los limos, que contienen partículas no menores que 0.002 mm, pueden también ser considerados como granulares en algunos sistemas de clasificación. La propiedad índice más obvia de los suelos granulares estará relacionada al tamaño de los granos. Para suelos con partículas más gruesas que 0.05 mm, el análisis granulométrico se realiza por tamizado. Generalmente los suelos de grano grueso son más permeables y menos compresibles que los suelos de grano fino, y los suelos bien graduados tienden a ser menos permeables, menos compresibles y más resistentes que los suelos pobremente graduados [13].

La granulometría del suelo tiene cierta significancia, aunque a toda la curva no se le puede asignar un valor numérico simple, pero el primer punto a ser definido es el tamaño de la partícula, tal que el diez por ciento del suelo es más fino,  $D_{10}$ . Este tamaño de partícula se define como tamaño efectivo. El tamaño efectivo indica un límite inferior razonable para indicar los tamaños de partículas presentes en el suelo.

La definición de dos puntos en la curva granulométrica proporciona alguna idea sobre el rango de los tamaños de las partículas, pero no proporciona información acerca de la forma de la curva. El suelo podría consistir en una mezcla de partículas gruesas y finas con pocas partículas intermedias, es decir, podría tener una granulometría con vacíos. Para evitar una granulometría con vacíos se define el coeficiente de curvatura,  $C_c$ , que es igual a  $(D_{30})^2/D_{60}D_{10}$ , tomando un punto central de la curva granulométrica,  $0.30$  [14].

#### Límites de consistencia o de Atterberg de los suelos

Las propiedades de un suelo formado por partículas finamente divididas, como una arcilla no estructurada dependen en gran parte de la humedad. El agua forma una película alrededor de los granos y su espesor puede ser determinante del comportamiento diferente del material. Cuando el contenido de

agua es muy elevado, en realidad se tiene una suspensión muy concentrada, sin resistencia estática al esfuerzo cortante; al perder agua va aumentando esa resistencia hasta alcanzar un estado plástico en que el material es fácilmente moldeable; si el secado continuo, el suelo llega a adquirir las características de un sólido pudiendo resistir esfuerzos de compresión y tensión considerable [6].

Arbitrariamente Atterberg en 1911, marcó las fronteras de los cuatro estados en que pueden presentarse los materiales granulares muy finos mediante la fijación de los límites siguientes: Líquido (L.L), plástico (L.P.), y de contracción (L.C.) y a través de ellos, se puede comprender el tipo de suelo que se analiza. (Ocas, 2013). El límite líquido es la frontera entre el estado líquido y el plástico; el límite plástico es la frontera entre los estados plástico y el semi-sólido y la frontera de contracción divide el estado semi-sólido del sólido. Estos límites son llamados límites de consistencia [6].

#### Clasificación del suelo

Los diferentes suelos con similares propiedades pueden ser clasificados en grupos y subgrupos de acuerdo con su función ingenieril. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de manera concisa las características generales del suelo, los cuales existen en variedad infinita. La mayoría de los sistemas de clasificación de suelos que fueron desarrollados con propósitos ingenieriles están basados en un simple índice de propiedades tales como la distribución el tamaño de la partícula y la plasticidad [15].

#### Sistema de clasificación AASHTO

El sistema AASHTO de clasificación de suelos fue desarrollado en 1929 por el Public Road Administration System. Luego de varias revisiones, se tiene la propuesta por el Comité on Classification of Materials for grades and Granular Type Roads of the Highway Research Board en 1975 [16] es la que se mantiene vigente. La clasificación AASHTO usada actualmente está dada en la figura 1. De acuerdo con este proceso, se tiene un orden de 7 grupos que van desde: A-1 hasta A-7. El orden de los suelos bajo los grupos A-1, A-2 Y A-3 son agregados granulométricos de los cuales el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N° 200. Suelos de los cuales más del 35% pasan a través del tamiz N°200 se clasifican bajo los grupos A-4, A-5, A-6 Y A-7. Estos suelos son en su mayoría limos y materiales de tipo arcilloso [15]. Según se muestran los rangos de los límites líquido e índice de plasticidad para suelos que están entre los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 Y A-7.

#### Sistema unificado de clasificación del suelo (SUCS)

La forma original del sistema unificado de clasificación del suelo fue propuesta por Casagrande en 1942 para su uso en trabajos de construcción de aeropuertos por el Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros del Ejército) durante la segunda guerra mundial. En cooperación con el U.S. Bureau of Reclamation (Agencia de Reclamos de los Estados Unidos), el cuerpo (Corps) revisó este sistema en 1952. Al presente, este sistema es ampliamente usado por los ingenieros [17]. El sistema unificado de clasificación clasifica a los suelos en dos amplias categorías: suelo de granuloso-grueso y granuloso fino [6].

Suelos de granuloso-grueso, que en la naturaleza son gravosos y arenosos con menos del 50% que pasa a través del tamiz N°200. Los símbolos de grupo comienzan con los prefijos G o S o ambos. G simboliza suelo con grava o gravoso, y S es para suelos con arena o arenosos [6].

Suelos de granuloso-fino, con 50% o más que pasa a través del tamiz N°200. Los símbolos de grupo comienzan con el prefijo de M, el cual simboliza a limos inorgánicos, H para arcillas inorgánicas, y O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt es usado para la turba (peat), fango (muck), y otros suelos altamente orgánicos. “Otros símbolos usados por la clasificación son: W bien gradado, P pobremente gradado, L baja plasticidad, H alta plasticidad” [6].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrolló una investigación de tipo experimental, realizando seis ensayos con cinco resultados por cada uno, con los cuales se pudo realizar la gráfica de compactación relacionándolos a cada ensayo la energía de compactación, la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad del suelo granular perteneciente a la cantera Agocucho, cantera seleccionada por ser la de mayor uso para el mejoramiento de suelos con material granular en la localidad de Cajamarca.

Para la recolección de datos e información se utilizaron protocolos establecidos para poder registrar las propiedades de los agregados. Los datos obtenidos se llevaron a hojas de cálculo Excel para que ser procesados y analizados posteriormente. Los protocolos que se emplearon fueron para determinar los valores de granulometría, contenido de humedad, peso específico, clasificación del suelo, límites de plasticidad y proctor modificado según se detalla a continuación:

A. Reducción de muestras de tamaño de campo a tamaño de muestras de ensayo [18]

Este método refiere a la reducción de las muestras obtenidas en el campo a los tamaños de muestras requeridas para los ensayos, empleando procedimientos que minimizan la variación en la medición de las características entre las muestras de ensayo y las muestras de campo.

La reducción de muestras se obtuvo mediante los siguientes dos métodos:

#### Método A: Cuarteo mecánico

Divisor de muestras: Los divisores de muestras deberán tener un número par de cajuelas con planos inclinados de igual ancho, pero no menor que ocho para suelos gruesos, o veinte para suelos finos, con descargas alternativas a cada lado del divisor. El ancho mínimo de la cajuela debe ser aproximadamente 1,5 veces el diámetro de la partícula de mayor tamaño contenida en la muestra a ser dividida. El divisor debe estar equipado con dos recipientes para recibir las dos mitades de la muestra dividida. Asimismo, debe estar equipado con una tolva, la cual tiene un ancho igual o ligeramente menor que el ancho total de la cajuela, por la cual la muestra debe ser depositada a una velocidad controlada a las cajuelas. El equipo y sus accesorios deben ser diseñados para que la muestra fluya suavemente sin restricciones o pérdidas de material.

#### Método B: Cuarteo manual

El aparato consiste en un cucharón metálico, pala o badilejo y una lona para cubrir aproximadamente 2 m x 2,5 m.

**B. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global [19]**

La muestra de agregado fino, grueso o global fue secada en el horno a una temperatura de 110° en donde el agregado es separado por una serie de tamices y cada retenido será pesado para obtener los porcentajes mediante cálculos. De esta manera se podrá determinar los tamaños de las partículas.

**C. Contenido de humedad del agregado fino y grueso [20]**

El contenido de humedad de una muestra de suelo es la relación del peso de agua entre el peso de sólidos en un volumen dado de suelo. Sirve para obtener la masa húmeda de algún agregado.

**D. Límites de plasticidad [21]**

Son aquellos que son determinados por la cantidad mínima de agua que es necesaria para llenar tan solo los poros de muestra de suelo seco, por lo tanto, le corresponde un volumen menor de la masa de suelo

**E. Peso específico y absorción de agregado [22]**

Como relación entre el peso y su volumen, es un valor dependiente de la humedad, de los huecos de aire y del peso específico de las partículas sólidas.

**F. Resistencia a la degradación de agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles [23]**

Se refiere al procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de desgaste de los agregados gruesos hasta de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de Los Ángeles, así como también evaluar la resistencia al desgaste de los agregados gruesos, de tamaños mayores de 19 mm (¾").

**G. Proctor Modificado [24]**

Usado en laboratorio, para determinar la relación entre el contenido de agua y peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 4 ó 6 pulgadas (101,6 ó 152,4 mm) de diámetro con un pisón de 10 lbf (44,5 N) que cae de una altura de 18 pulgadas (457 mm), produciendo una Energía de Compactación de 56 000 lb-pie<sup>3</sup> (2 700 kN-m/m<sup>3</sup>)

**III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**A. Granulometría**

Para la granulometría según el análisis realizado se corroboró que el material con el que se realizó los ensayos es un suelo granular, ya que menos del 35% del material fino pasa por la malla N° 200 (clasificación AASHTO), por lo que se obtuvo la siguiente curva granulométrica.

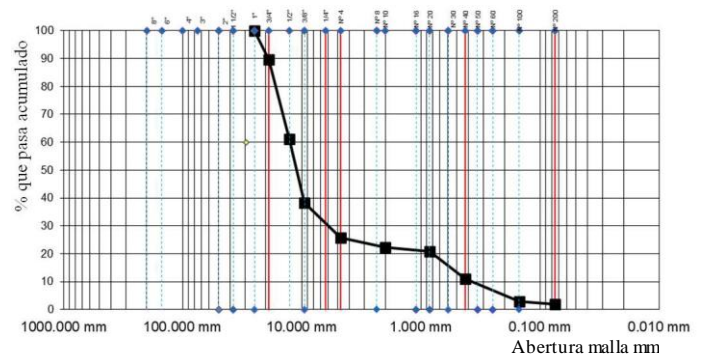


Figura 1 Curva granulométrica del material de cantera. [27]

**B. Contenido de Humedad**

El contenido de humedad obtenido en nuestro ensayo de suelo granular es de 1.18%.

TABLA 1  
CONTENIDO DE HUMEDAD

Ensayo	Cont. Hum. (%)
Contenido de Humedad promedio	1.18 %

NOTA: Contenido de humedad natural de la cantera [27]

**C. Peso Específico**

El ensayo de peso específico se realizó por separado ya siendo para material grueso y para material fino.

El peso específico de las gravas fue de 2.559 gr/cm<sup>3</sup>, y el peso específico de los finos fue de 2.477 gr/cm<sup>3</sup>, por lo tanto, el peso específico promedio es de 2.518 gr/cm<sup>3</sup>. Además, dicho material (gravas) es producto de una alteración argílica, cuya roca se le denomina comúnmente como sílice.

TABLA 2  
PESO ESPECIFICO

Material	Peso Específico Kg/cm <sup>3</sup>
Agregado grueso	2.559
Agregado fino	2.518

NOTA: Peso específico del material de cantera [27]

**D. Clasificación de suelo**

La clasificación de nuestro material según el método AASHTO nos determinó que el suelo pertenece al grupo A-2-4 (suelos granulares) y según la clasificación SUCS pertenece al grupo GC.

**E. Límites de plasticidad**

El suelo analizado presenta un límite líquido de 24.4% y un límite plástico de 15.75%, obteniendo un índice de 8.65%, el cual fue verificado con el Abaco de Casa grande para índices de plasticidad.

TABLA 3  
LÍMITES DE PLASTICIDAD

Material	%
Límite líquido	24.40
Límite plástico	15.75
Índice de plasticidad	8.65

NOTA: Límites de consistencia del material de cantera [27]

F. Resistencia a la abrasión

Se realizó los ensayos de abrasión para las gravas o material grueso obteniéndose un porcentaje de abrasión de 26.2%.

TABLA 4  
RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

Material	%
Resistencia a la abrasión	26.20

NOTA: Resistencia a la abrasión del material de cantera [27]

G. Proctor modificado

Con las distintas energías de compactación se pudo obtener densidades secas bajas al igual que los contenidos de humedad, por lo que este tipo de material podría ser recomendado para usarse como afirmado. A continuación, se muestra los resultados obtenidos de los ensayos de compactación.

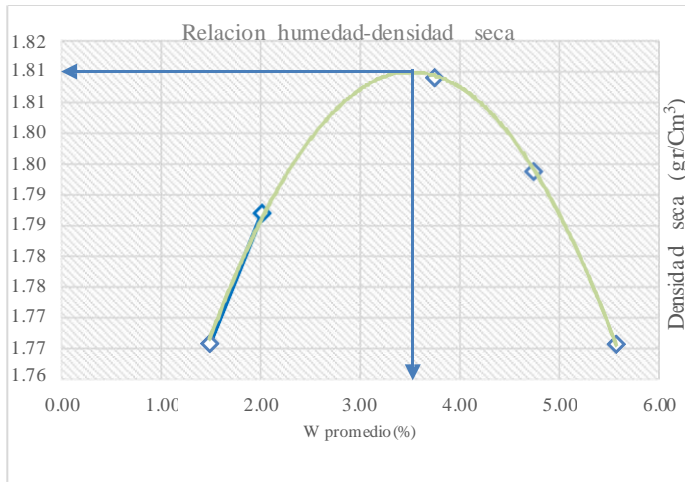


Fig. 2 Curva de compactación 56 golpes del material de cantera [27]

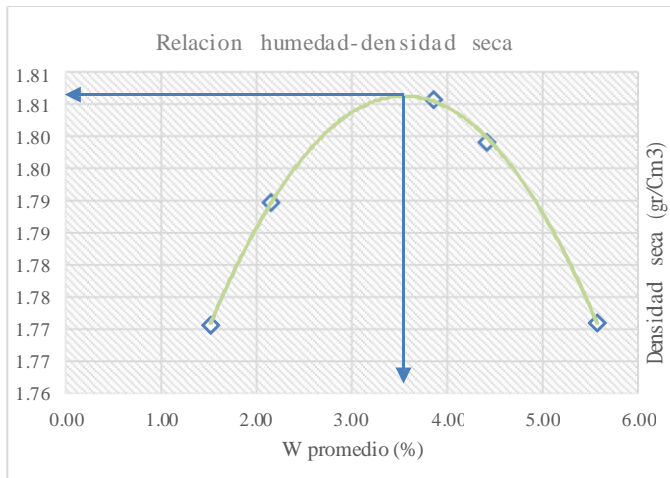


Fig. 3 Curva de compactación 57 golpes del material de cantera [27]

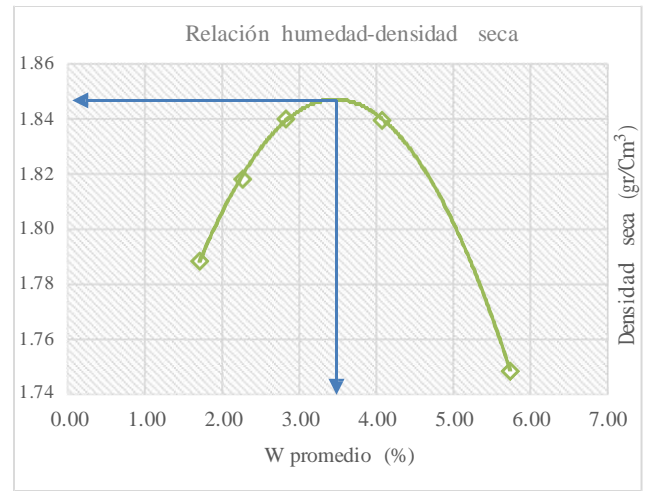


Fig. 4 Curva de compactación 58 golpes del material de cantera [27]

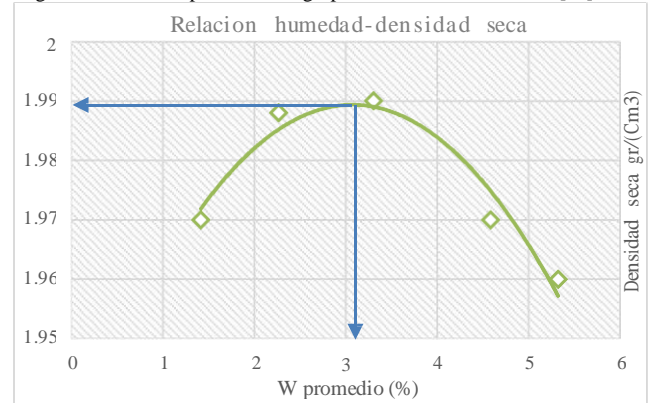


Fig. 5 Curva de compactación 59 golpes del material de cantera [27]

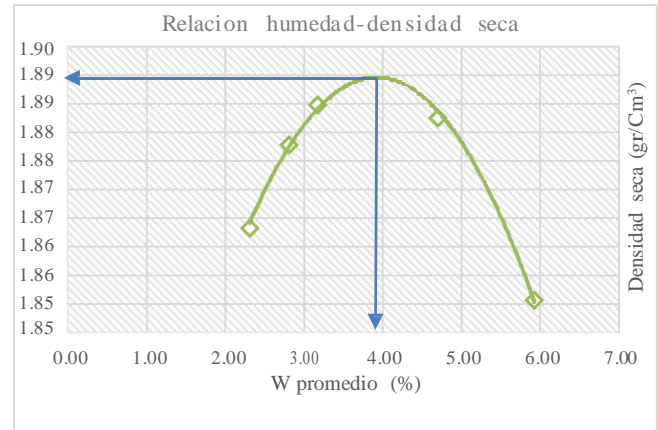


Fig. 6 Curva de compactación 60 golpes del material de cantera [27]

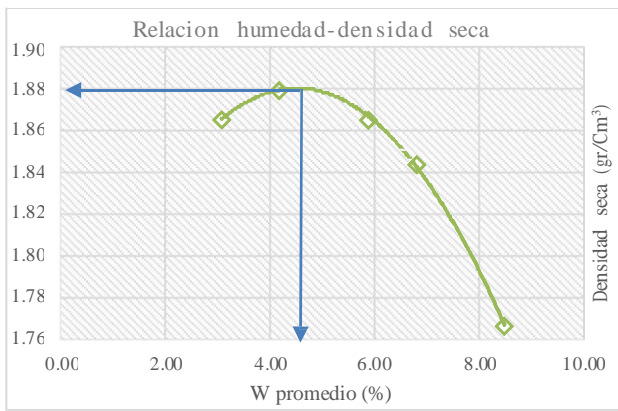


Fig. 7 Curva de compactación 61 golpes del material de cantera [27]

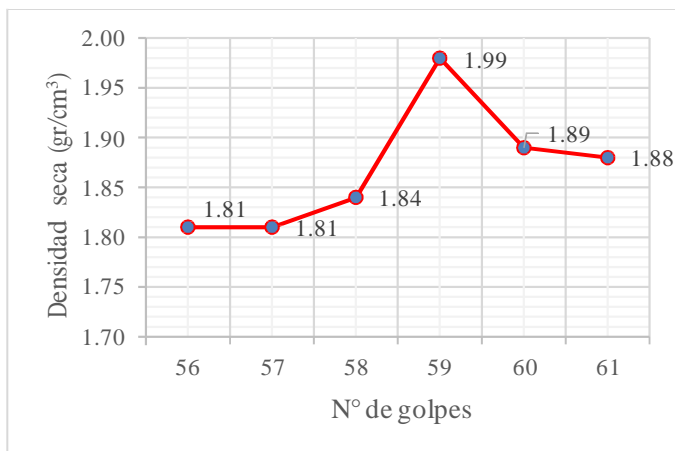


Fig. 8 Densidad seca versus número de golpes del material de cantera [27]

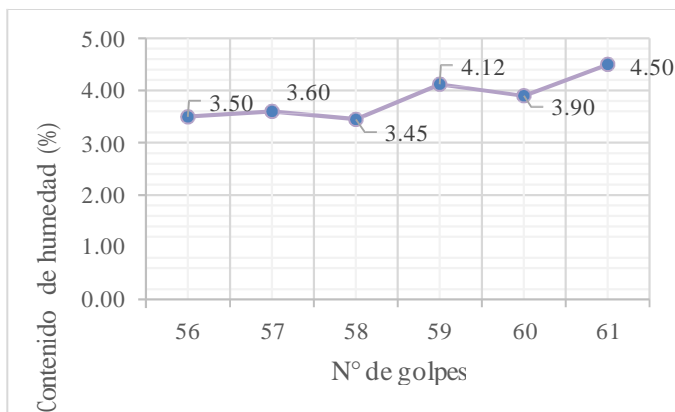


Fig. 9 Contenido de humedad versus número de golpes del material de cantera [27]

Una vez analizados los datos obtenidos de los ensayos se llegó a la deducción de que los factores más importantes que influyen en la compactación de suelo son el contenido de humedad y la energía de compactación aplicada en cada ensayo

realizado, ya que de estos depende directamente obtener una densidad seca máxima, con lo cual se pudo refutar la idea planteada en la norma E 050. Suelos y cimentaciones [1] en la cual nos especifica que el único factor influyente en la compactación de suelos granulares es el contenido de humedad, dejando de lado a los demás factores como la energía de compactación y así mismo la gradación de dichos suelos, de la misma manera se pudo hacer una breve comparación con el manual de ensayos elaborada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en el 2016 [25], en el cual se recomienda usar moldes alternativos para suelos granulares y realizar compactación por amasamiento, lo cual no fue necesario ya que en esta ocasión se realizó una compactación estática.

De la misma manera se realizó una comparación con la investigación “Energía de Compactación En Suelos Granulares” de José Ocas de la Cruz [6] realizada en la cantera Apalin, en la que se obtiene una energía de compactación máxima de 30.15 kg-cm/cm<sup>3</sup> (61 golpes) antes de que la curva empiece a decrecer, mientras que en la presente investigación se obtuvo el valor de 28.73 kg-cm/cm<sup>3</sup> (59 golpes) antes de que empiece a decrecer; lo cual evidencia una considerable variación entre las 2 canteras respecto a sus resistencias que muchas veces no cumplen con las características físico mecánicas requeridas a tener en cuenta para su posible uso, ya que esto nos muestra que un suelo tiene mayor resistencia, y muchas veces no puede cumplir con las características físico-mecánicas requeridas.

En la tesis [26] denominada “Incremento de la energía de compactación y su influencia en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad de suelos granulares de canteras en el Perú” hace una comparación a grandes rasgos con las capacidades resistentes de suelos granulares en el Perú en la cual no define o especifica un parámetro o una resistencia aproximada para la ciudad de Cajamarca, ya que solo se basa en que los suelos granulares deben exceder los 56 golpes para lograr una buena resistencia, a diferencia de esta investigación en la cual ciertamente especifica que para el suelo granular de la cantera Agocucho se necesita 59 golpes para lograr su resistencia máxima antes de empezar a fallar logrando una resistencia de 28.73 kg-cm/cm<sup>3</sup>.

De la misma manera existe una variación en los ensayos granulométricos con respecto a la tesis “Energía de Compactación En Suelos Granulares” de José Ocas de la Cruz y “Efectos de la energía de Compactación En Suelos Granulares en la cantera el Gavilán” de Juan Carlos Chirinos en la que el suelo de ambos tiene un mayor porcentaje retenido en el tamiz N° 200 lo cual indicaría que podría ser un suelo alterado (ya procesado o tamizado) según norma NTP 400.012.

La clasificación del suelo analizado en esta investigación recae en una sola categoría (A-2-4) según AASHTO de acuerdo con los resultados de los ensayos hechos, en los cuales la granulometría y los límites de plasticidad son bastante influyentes a comparación de la tesis “Energía de Compactación En Suelos Granulares” de José Ocas de La Cruz en la que su clasificación se basa en 2 categorías (A-3 y A-2-6) ya que los límites de plasticidad y su granulometría no están dentro de los parámetros.

Al comparar la resistencia a la abrasión del suelo de 26.2% con la exigencia de la NTP 400.019 [23] de 50% máximo, se puede corroborar que el suelo tiene una buena resistencia al desgaste.

#### IV. CONCLUSIONES

1. La densidad seca máxima de la cantera Agocucho es 1.98 gr/cm<sup>3</sup> mientras que el óptimo contenido de humedad fue de 3.38 %, determinando que este tipo de suelo alcanza su densidad máxima a los 59 golpes (28.73 kg-cm/cm<sup>3</sup>) mayor a los 56 golpes del ensayo de proctor modificado; significando que puede disminuir el contenido de humedad e incrementar la energía de compactación y obtener una mejor densidad del suelo y con ello mejorar sus características físicas mecánicas.
2. Al incrementarse la energía de compactación sobre los 59 golpes (28.73 kg-cm/cm<sup>3</sup>), la resistencia va a tender a disminuir (Tabla 9 y figura 5); por lo cual podemos corroborar el suelo tienen una energía máxima de compactación que debe tenerse en cuenta en los procesos constructivos y se corrobora que la energía de compactación de este suelo está comprendida entre los parámetros especificados en la norma E-050 (2018) que van desde 25 kg-cm/cm<sup>3</sup> hasta 29 kg-cm/cm<sup>3</sup>, por lo que se determina que este tipo de suelo podría servir para posteriores mejoras de suelos.
3. Se logró determinar las propiedades físico – mecánicas del suelo granular de la cantera Agocucho obteniéndose un contenido de humedad de 1.18% (Tabla 1), peso específico promedio de 2.518 gr/cm<sup>3</sup> (tabla 2 y 3), límite líquido de 24.4% (Tabla 4), límite plástico de 18.15% (Tabla 5), índice de plasticidad de 8.65% y una abrasión promedio de 26.20%.
4. La energía de compactación durante la realización de los ensayos fue desde 27.27 kg-cm/cm<sup>3</sup> hasta los 29.70 kg-cm/cm<sup>3</sup> según la tabla N° 9, la cual fue hallada por fórmula según específica la norma técnica, siendo la energía necesaria de 28.73 kg-cm/cm<sup>3</sup> para poder determinar los valores de la densidad seca máxima y el óptimo contenido de humedad, superiores a lo establecido por el ensayo de proctor modificado.
5. Si la energía de compactación es mayor a 28.73 kg-cm/cm<sup>3</sup> (59 golpes) la densidad tiende a decrecer, lo cual significa que el suelo granular tiende a fragmentarse en partículas más pequeñas y puede haber una variabilidad en el contenido de humedad (Tabla 9).
6. Al realizarse dichos ensayos se determinó que los valores de óptimo contenido de humedad disminuyen con el incremento de la energía de compactación, y esto se debe a que las partículas se fracturan y se separan, con lo cual el valor mínimo se obtiene con la energía de compactación de 28.73 kg-cm/cm<sup>3</sup> (59 golpes), lo que corresponde a la densidad seca máxima.
7. Según el sistema SUCS, el suelo analizado es gravas arcillosas (GC) y según el sistema de clasificación AASHTO es un suelo gravoso con arena arcillosa A-2-4.

A mis estimados docentes quienes fueron un ejemplo a seguir brindándome grandes enseñanzas desde el primer día de clase. A mi director de carrera, Dr. Ing. Orlando Aguilar Aliaga quien me inculco que todo esfuerzo vale la pena y siempre hay una recompensa así mismo por el apoyo que contribuyó en mi formación académica.

A mi asesora, Ing. Jane Elizabeth Álvarez Llanos, quien fue el que me ayudo en este último proceso de mi etapa universitaria ayudándome a lograr este gran cometido por el cual siempre se luchó.

#### REFERENCIAS

- [1] Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (2016). Norma Técnica de Edificación E.050 Suelos y cimentaciones. Lima, Perú.
- [2] Revolorio Gonzales, Fernando José Carlos (2013) “Incidencia de resultados del ensayo Proctor por la influencia de clima, humedad, equipo y superficie de base de compactación durante su desarrollo” Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [3] Proctor, R. (1933). Fundamental principles of soil compaction. Engineering news-record, 111(13).
- [4] Huamán, A. (2016). Falla de suelos en la fundación en la construcción de edificios en el condominio Residencial Las praderas Park Bloque A, Cajamarca-Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.
- [5] Fernández Muñoz, Wilfredo Renán (2015) Evaluación de la capacidad portante de los suelos de fundación de la Ciudad universitaria – Universidad Nacional de Cajamarca 2014.
- [6] José Luis Ocas De La Cruz (2013). Influencia de la energía de compactación en el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca en los suelos granulares. Cajamarca, Perú.
- [7] Becerra, A. (2016). estudio de factibilidad técnica económica de explotación de canteras, para optimizar la rentabilidad económica en la concesión minera cantera El Gavilán y cantera Agocucho, Cajamarca 2016.
- [8] Sagués, P. (2008). “Efectos de la sobre compactación en la resistencia y deformabilidad de suelos granulares”.
- [9] Yepes, V. (2004). Análisis numérico de problemas geotécnicos empleando diferentes modelos constitutivos para suelos granulares mediante el método de elementos finitos. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [10] Flores, G. (2014). Comportamiento de materiales granulares a bajas y altas tensiones. México. UNAM.
- [11] Chirinos, C. (2016). Efectos de la energía de compactación en la densidad seca del suelo granular de la cantera El Gavilán. Cajamarca, Perú. UPN.
- [12] Pérez, V. (2002). Materiales y procedimientos de construcción. Chile: PUCV.
- [13] Lizcano, A. (2007). Principios de la ingeniería de cimentaciones, California.
- [14] Hurtado, G. (2012). Proctor Modificado por la Influencia de la energía de compactación. México: Universidad La Salle.
- [15] ICCE S-234. (2012). Mecánica de suelos y cimentaciones. España: Universidad de Zaragoza.
- [16] ASTM D-3282. (2000). AASHTO meted M145.
- [17] ASTM designation D-2487. (1991). SUCS.
- [18] NTP 339.126 (1998) Suelos. Métodos para la reducción de las muestras de campo a tamaños de muestras de ensayo. Lima, Perú.
- [19] NTP400.012. (2001). AGREGADOS, Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global. Lima, Perú.
- [20] NTP339.185. (2002). Contenido de humedad del agregado fino y grueso. Lima, Perú.
- [21] NTP 339.129 (2019) SUELOS. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad de suelos. Lima, Perú.
- [22] NTP 339.131 (1999) SUELOS. Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo. Lima, Perú.

- [23] NTP400.019. (2002). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaño menores por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles. Lima, Perú.
- [24] ASTM-1557. American Society for Testing and Materials (2019). Annual Book of ASTM Standards: Soils and Rocks. USA.
- [25] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016) Manual de ensayo de materiales. Lima, Perú.
- [26] Huancas, D. (2020). Incremento de la energía de compactación y su influencia en la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad de suelos granulares de canteras en el Perú.
- [27] León, J (2020). Influencia de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad del suelo granular de la cantera Agocucho, Cajamarca – 2017.