

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería Civil

“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.”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Autor:

Josecarlos Jair León Quiroz

Asesor:

Ing. Jane Elizabeth Álvarez Llanos

Cajamarca - Perú

2021

DEDICATORIA

A mi madre Rosa Quiroz Cabrera que a pesar de todos los inconvenientes de la vida se esforzó para que yo pueda tener la mejor educación y todo lo que está a su alcance.

A mis hermanos que son un pilar muy importante en mi vida, apoyándome día a día para que pueda ser el mejor.

A mi esposa Alba Becerra Miranda la cual fue y será mi bastión para poder afrontar todos los momentos difíciles que se nos puedan presentar.

A mi amado hijo Caleb León Becerra quien es mi fortaleza del día a día para seguir luchando y conseguir nuestras metas.

A mis suegros Luis Becerra y Angélica Miranda quienes fueron un gran apoyo en mi etapa universitaria y en mi crecimiento personal.

AGRADECIMIENTO

A Dios por no haberme dejado caer en momentos difíciles y desistir en mis sueños.

A mi familia quienes fueron un apoyo incondicional a lo largo de este gran camino universitario.

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.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Realidad problemática.....	11
1.2. Formulación del problema	48
1.3. Objetivos	48
1.4. Hipótesis.....	49
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	50
2.1. Tipo de investigación	50
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos).....	51
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	51
2.4. Procedimiento	53
CAPÍTULO III. RESULTADOS	63
1.1. Granulometría:	63
3.1. Contenido de Humedad:.....	63
3.2. Peso Específico:.....	64
3.3. Clasificación de suelo:	65
3.4. Límites de plasticidad:	68
3.5. Resistencia a Abrasión:	69
3.6. Proctor modificado:	69
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	75
4.1. Discusión.....	75
4.2. Conclusiones.....	78
REFERENCIAS.....	80
ANEXOS	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Granulometría de la muestra de agregado para ensayo de abrasión.....	60
Tabla 2: Contenido de Humedad	63
Tabla 3: Peso específico agregado grueso	64
Tabla 4: Peso específico agregado fino	64
Tabla 7: Límite Líquido	68
Tabla 8: Límite Plástico.....	68
Tabla 9: Resistencia a la Abrasión	69
Tabla 10: Proctor Modificado 56 golpes	69
Tabla 11: Proctor Modificado 57 golpes	70
Tabla 12: Proctor Modificado 58 golpes	71
Tabla 13: Proctor Modificado 59 golpes	71
Tabla 14: Proctor Modificado 60 golpes	72
Tabla 15: Proctor Modificado 61 golpes	73
Tabla 16: Relación de la energía de compactación con la máxima densidad seca y el contenido óptimo de humedad.....	73
Tabla 17: Granulometría.....	83
Tabla 18: Contenido de humedad	83
Tabla 19: Peso específico agregado grueso	84
Tabla 20: Peso específico agregado fino	84
Tabla 21: Límites de plasticidad	84
Tabla 22: Abrasión.....	85
Tabla 23: Ensayo Proctor modificado por 56 golpes	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 24: Energía de Compactación mediante Proctor modificado.....	85
Tabla 25: Ensayo Proctor modificado por 57 golpes	86
Tabla 26: Ensayo Proctor modificado por 58 golpes	87
Tabla 27: Ensayo Proctor modificado por 59 golpes	87
Tabla 28: Ensayo Proctor modificado por 60 golpes	88

Tabla 29: Ensayo Proctor modificado por 61 golpes88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Rango del límite líquido e índice de plasticidad	22
Figura 2 Carta de plasticidad	23
Figura 3 Fases de la curva de compactación.....	26
Figura 4 Curva Proctor	32
Figura 5 Curva de Compactación	33
Figura 6 Contenido de humedad versus grado de saturación	34
Figura 7 Resistencia mecánica de compactación.....	38
Figura 8 Curvas de compactación proctor estándar y Modificado	43
Figura 9 Curva granulométrica	63
Figura 10 Clasificación de suelo según AASHTO	66
Figura 11 Clasificación de suelos según SUCS.....	67
Figura 12 Abaco Casagrande para índice de plasticidad.....	68
Figura 13 Curva de compactación 56 golpes.....	70
Figura 14 Curva de compactación 57 golpes.....	70
Figura 15 Curva de compactación 58 golpes.....	71
Figura 16 Curva de compactación 59 golpes.....	72
Figura 17 Curva de compactación 60 golpes.....	72
Figura 18 Curva de compactación 61 golpes.....	73
Figura 19 Densidad seca versus número de golpes.....	74
Figura 20 Contenido de humedad versus número de golpes.....	74
Figura 21 Índice de plasticidad	85
Figura 22 Extracción de muestra de cantera Agocucho	89
Figura 23 Cuarteo Manual	89
Figura 24 Cuarteo Mecánico	90
Figura 25 Separación por cuarteo mecánico.....	90
Figura 26 Tamizado de suelo granular	91
Figura 27 Tamizado para ensayo de plasticidad	91

Figura 28 Taras en horno para contenido de humedad	92
Figura 29 Ensayo Copa de Casagrande	92
Figura 30 Taras para limite liquido	93
Figura 31 Limite líquido y limite plástico	93
Figura 32 Muestra Proctor	94
Figura 33 Proctor Modificado	94
Figura 34 Extracción de muestra de proctor modificado	95

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Contenido de humedad del agregado fino y grueso	55
Ecuación 2: Peso específico nominal	59
Ecuación 3: Absorción.....	59
Ecuación 4: Resistencia a la degradación de agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles	60
Ecuación 5: Energía de compactación.....	73

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, se extrajo muestras de la cantera antes mencionada para lograr realizar los diversos ensayos establecidos para esta investigación los cuales son análisis granulométrico, contenido de humedad, límites de plasticidad, peso específico, resistencia a la degradación y el ensayo del que es dependiente mayoritariamente, proctor modificado, se obtuvo un contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima aplicando distintas energías de compactación, por el método C de proctor modificado que se tuvo en cuenta por la norma ASTM D1557. Uno de los factores de vital importancia que intervienen para este análisis es la energía de compactación. Cabe mencionar que la hipótesis que se planteo fue que, si se incrementa la energía de compactación, entonces la densidad seca máxima aumenta y el contenido de humedad optimo disminuye. Se procedió a realizar seis ensayos con cinco puntos cada uno, con los cuales se pudo realizar la gráfica de compactación relacionándolos a cada ensayo, por consiguiente, el trabajo consistió en realizar diversos ensayos de proctor modificado aplicando distintas energías la energía la densidad de compactación permitiendo obtener la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad del suelo granular perteneciente a la cantera Agocucho.

Palabras clave: Densidad, granulometría, plasticidad, optimo, granular, proctor, energía.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

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 E 050 (2018) 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 varia, así como sus propiedades y su comportamiento (Revolorio, 2013).

En Estados Unidos Proctor (1993), 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.

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/cm³ a 29 kg-cm/cm³, 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 se alcanzaría su máximo rendimiento (Huamán, 2016, p.48).

De la misma manera se ha obviado las distintas características que puede presentar un suelo granular, tales como su granulometría, contenido de humedad, etc., Cajamarca en la actualidad se está expandiendo muy rápidamente por lo cual sería de mucha utilidad, saber si el suelo donde se empezará un proyecto es apto, ya que en nuestra Ciudad en su gran mayoría la zona de expansión son suelos pantanosos, o suelos con muy poca capacidad portante, según Fernández, (2015), nos da a conocer unas posibles fallas en fundaciones en la ciudad universitaria, siendo una de las principales el asentamiento de estructuras.

En nuestro país se usa el material de las canteras aledañas a las diferentes zonas en donde se requiere material por lo que a veces éstos materiales no cumplen con las características requeridas para su adecuado uso estando dentro de las exigencias de la norma técnica nacional e internacional sobre la compactación, por lo cual no llegaría a cumplir con su principal propósito y lo cual conllevaría a presentar fallas a priori por lo que en muchos casos se optaría por una mejora de suelo lo cual en algunos casos presentaría una elevación de costo y no se llevaría a cabo es por ende que se realiza nuevas tentativas de mejoras como en este caso la de compactación de suelos (Ocas, 2013).

Según Becerra (2015), en sus 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” nos indica que la cantera Agocucho es la que se utiliza para el mejoramiento de los suelos en edificaciones en la ciudad de Cajamarca en los últimos 10 años.

Se ha encontrado diversas investigaciones referentes a la Influencia de la energía de compactación, la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad del suelo granular, los que se detalla a continuación:

Según Sagués (2008) en su tesis “Efectos de la sobre compactación en la resistencia y deformabilidad de suelos granulares”, concluye que: en la construcción de terraplenes, rellenos artificiales para vías y presas, etc., el suelo se tiende a compactar, la compactación reduce la compresibilidad, crece la resistencia y rigidez, mediante la

reducción de los vacíos del suelo siendo ésta una etapa vital en el desarrollo del estudio de suelos”.

Según Yepes (2004) en su tesis “Análisis numérico de problemas geotécnicos empleando diferentes modelos constitutivos para suelos granulares mediante el método de elementos finitos”, estudios realizados en la facultad de Ingeniería en la Universidad Politécnica de Valencia mencionan que los materiales que se usan en rellenos en los proyectos para determinar la confiabilidad de estos para ser usados en diversos proyectos de la zona y determinar si es posible utilizarlos si cumple con la norma técnica peruana concernientes a la compactación de suelos, los procesos serán establecidos en función del material y la forma de compactación, manifestando que para rellenos o mejoramiento del suelo relacionados en función a la compactación de suelos se determinara el aumento de las propiedades de los suelos en laboratorio.

Según Flores (2014) en su tesis “Comportamiento de materiales granulares a bajas y altas tensiones”, se describe a la compactación de suelos como el proceso mecánico por el cual se busca una mejora en las características de la resistencia, compresibilidad y del esfuerzo de deformación de los suelos granulares. En donde se implica una reducción más eficaz de los espacios vacíos, por lo tanto, se han producido cambios considerables de volumen en el suelo, principalmente relacionados con la pérdida de volumen de aire. La compactación netamente está ligada con la densidad máxima o peso volumétrico seco máximo del suelo que para que se puedan producir es necesario que la masa del suelo conste con una humedad determinada que se conoce como humedad óptima.

Flores (2014) en su tesis “Comportamiento de materiales granulares a bajas y altas tensiones” analizó el aumento de la densidad seca máxima dependiendo directamente de la energía de compactación utilizada, a lo cual determino que a mayor incremento de energía de compactación mayor será su resistencia hasta lograr el pico máximo de resistencia del suelo ya que al sobrepasar su resistencia máxima y seguir aplicando más energía de compactación esta tiende reducir su capacidad portante.

Según Chirinos (2015) en la tesis “Efectos de la energía de compactación en la densidad seca del suelo granular de la cantera El Gavilán”, realiza una similitud al resultado de la energía de compactación en la densidad máxima seca y el contenido de humedad en suelos granulares para su uso en subbases con la finalidad de determinar el comportamiento variable en proyectos y determinar si se adecuan a las características esperadas. A lo que concluyó que al aumentar la energía de compactación aumentó el contenido de humedad.

Para el desarrollo de la investigación ha sido preciso tener en cuenta las siguientes teorías y conceptos:

- **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 (Ocas 2013, p.33).

- **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 (Pérez, 2002, p.18).

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 (Lizcano, 2007, p.15).

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 (Lizcano, 2007, p.33).

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, D10. 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 de 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, 030 (Hurtado, 2012).

El coeficiente de curvatura debe estar entre 1 y 3 para evitar la granulometría con vacíos. Por lo tanto, para que un suelo sea definido como bien graduado, debe tener un coeficiente de uniformidad lo suficientemente alto y un coeficiente de curvatura entre 1 y 3. Aunque el proceso de definir puntos en la curva granulométrica puede ser infinito, para propósitos de ingeniería es suficiente el definir los valores de D_{10} , C_u y C_c . Entonces la densidad relativa y los parámetros granulométricos son propiedades índice muy útiles para clasificar en el laboratorio las arenas y gravas. También son útiles y ampliamente utilizados en el campo cuando es posible medir la relación de vacíos o densidad in-situ, es decir en calicatas superficiales o en rellenos compactados (Hurtado, 2012).

Los parámetros granulométricos están correlacionados de modo general con las propiedades ingenieriles de los suelos y pueden definirse de manera simple, así como también pueden determinarse las propiedades utilizando muestras completamente alteradas, ya que no se toman en cuenta las condiciones in-situ, por esta razón es que existe una gran limitación en la significancia de la clasificación granulométrica. Una

arena muy densa se clasifica de igual modo que una arena muy suelta, aunque está claro que tienen propiedades diferentes (Hurtado, 2012, p.24).

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 (Ocas, 2013).

Arbitrariamente Atterberg (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 (Ocas,2013).

El mismo que considera los siguientes objetivos:

- Introducir al estudiante al procedimiento de la determinación de los límites; líquidos, plásticos y de contracción de una muestra de suelo.
- Determinar experimentalmente los diferentes límites de consistencia de un suelo.
- Determinar mediante fórmulas los diferentes índices de consistencia de un suelo. (Borfitz, 2008).

El LL “es el contenido de humedad, manifestado en porcentaje del peso del suelo seco, prevaleciente en un suelo en la frontera entre los estados plástico y líquido del mismo. “Este límite se especifica arbitrariamente como el contenido de humedad que se necesita” para que las dos mitades de una pasta de suelo de 1 cm. de espesor fluyan y se unan en una longitud de 12 mm., aproximadamente, en el fondo de la muesca que separa las dos mitades, cuando la capsula que la contiene golpea 25 veces desde una altura de 1 cm., a la velocidad de 2 golpes por segundo. De la misma manera se describe al límite plástico, como la cantidad de humedad, reflejándose en porciento del peso del suelo seco, prevaleciente en un suelo en la frontera entre los estados plástico y semi-sólido del mismo. Este límite se define arbitrariamente como el más bajo contenido de humedad con el cual el suelo, al ser moldeado en barritas cilíndricas de menor diámetro cada vez, comienza a agrietarse cuando las barritas alcanzan a tener 3 mm. de diámetro (Borfitz, 2008).

Clasificación del suelo

Los diferentes suelos con similares propiedades pueden ser clasificados en grupos y subgrupos de acuerdo a 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 (ICCE 2012).

Sistema de clasificación AASHTO

El sistema AASHTO de clasificación de suelos fue desarrollado en 1929 por el Public Road Administration System. Este experimento tuvo varias revisiones, con la presente versión propuesta por el Committee on Classification of Materials for grades and Granular Type Roads of the Highway Research Board en 1975 (ASTM designation D-3282; AASHTO meted M145).

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-S, A-6 Y A-7. Estos suelos son en su mayoría limos y materiales de tipo arcilloso (ICCE 2012).

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.

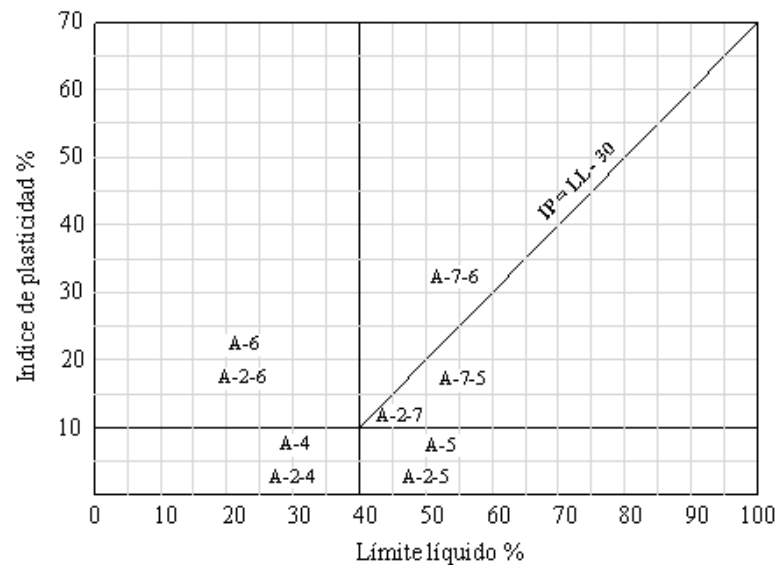


Figura 1 Rango del límite líquido e índice de plasticidad

Fuente: ICCE, 2003.

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) reviso este sistema en 1952. Al presente, este sistema es ampliamente usado por los ingenieros (ASTM designation D-2487; ASTM, 1991). El sistema unificado de clasificación es presentado en la Figura 2 y Tabla 3, con referencia a la Figura 3, este sistema clasifica a los suelos en dos amplias categorías:

- Suelos de granulado-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 (Ocas 2013).

- Suelos de granulado-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, e 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” (Ocas 2013).

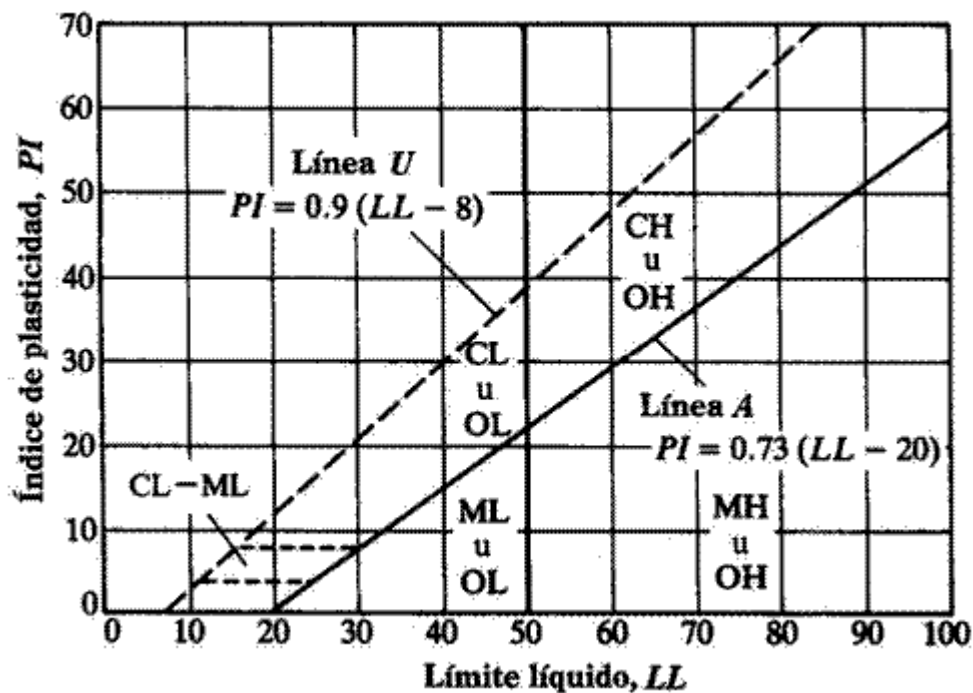


Figura 2 Carta de plasticidad

Fuente: ICCE, (2003).

Compactación de suelos

La compactación es un proceso que habitualmente se realiza por medios mecánicos, por el cual se produce una densificación del suelo, disminuyendo su relación de vacíos. El objetivo de la compactación es el mejoramiento de las propiedades geotécnicas del suelo, de tal manera que presente un comportamiento mecánico adecuado. La compactación se tiende a calcular de manera cuantitativa por la densidad seca del suelo es decir el peso de las partículas sólidas del suelo por unidad de volumen. La humedad del suelo es el peso del agua que contiene expresado con respecto al peso del suelo seco (Sánchez, 1998).

R.R Proctor, 1933, plantea un estudio experimental de compactación en laboratorio. En un específico trabajo de compactación, enlaza la evolución de los suelos con el contenido de humedad. Hoy por hoy dicho estudio se encuentra estandarizado con algunas diferencias. Logrando hallar datos reproducibles que muestran una oportunidad de usarlos como referencia de control de densificación en obras (Georges, 2004).

Actualmente hay distintas definiciones para la compactación de los suelos: para Juárez Badillo la “compactación” de los suelos es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos (Juárez, 2014).

La compactación o disminución de la relación de vacíos se da de diversas maneras tales como la acomodación de las partículas, fisura de los granos o de las ligaduras

entre ellos seguida por reubicación y la flexión o variación de las partículas y sus capas absorbidas. La energía que se usa en este proceso es abastecida por el esfuerzo de compactación de la máquina de compactar. La eficacia de la energía usada depende del tipo de partículas que conforman el suelo y de la manera como se aplica el esfuerzo de compactación (Georges, 2004).

Teorías de compactación

Existen varias teorías que tratan de explicar lo que sucede en este proceso en el cual la distribución de las partículas de suelo cambia, así como sus propiedades y comportamiento. A continuación, se presentan algunas de esas teorías generales sobre la compactación:

Se dio una explicación sobre lo que pasaba al compactar un suelo y agregarle agua. Proctor creía que la humedad en un suelo relativamente seco crea efectos de capilaridad que une a las partículas, creándose una mayor fricción que se opone a las fuerzas de compactación. Según Proctor, al compactar un suelo con una mayor cantidad de agua, se fuerza a una mayor lubricación entre sus partículas, provocando que estas se reordenen con mayor facilidad y el suelo sea más denso. El proceso de compactación termina cuando el contenido de humedad del suelo combinado con el aire que no ha sido expulsado, llena todos los vacíos. En este punto se puede decir que el suelo alcanza su mayor densidad. Con un mayor contenido de humedad la compactación se limita a un punto en el que los vacíos igualan al volumen de aire y agua, aumentando los vacíos, disminuyendo la densidad e incrementando la plasticidad (Winterkorna, 2007).

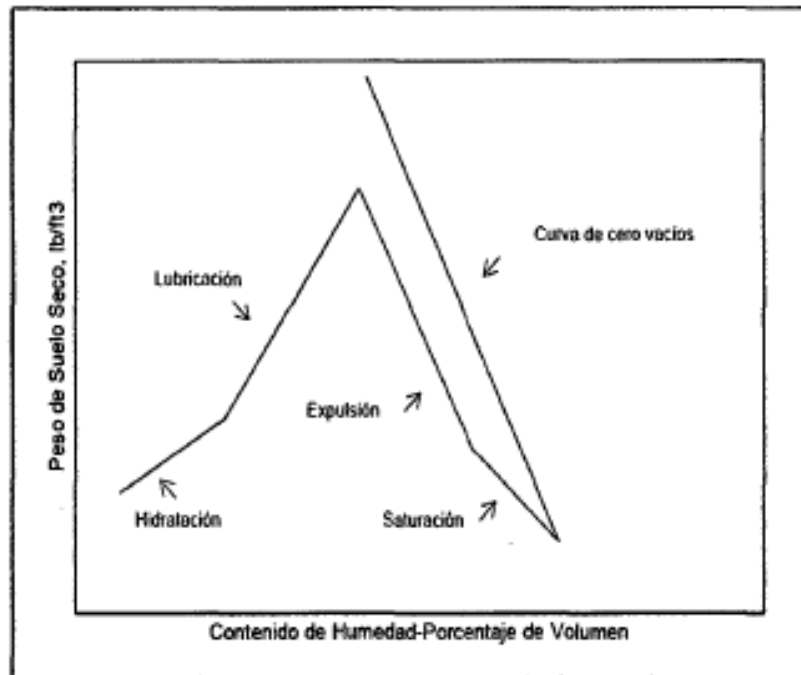


Figura 3 Fases de la curva de compactación

Fuente: Winterkorna,(2007).

La teoría de Hogentogler planteó acerca del proceso de mojado de una muestra de suelo al ser compactado en la que intervienen cuatro etapas: hidratación, lubricación, expulsión y saturación. Estas etapas se pueden ver en la Figura 3, La hidratación es la etapa en la que el agua entra en las partículas de suelo y se crea una película alrededor de ellas. En la etapa de lubricación se produce el reacomodamiento de las partículas debido a que el agua adherida a ellas como una película facilita este proceso. Al terminar la: etapa de lubricación y causada por el exceso de agua, se inicia la etapa de expulsión. En esta se expulsa el agua, debido a que la cantidad de aire retenida en el suelo no cambia desde el final de la lubricación y solamente se remueven partículas de suelo. Durante la saturación, teóricamente los vacíos de aire son ocupados completamente por el agua y se llega a obtener la curva de cero vacíos (Hogentogler, 1936).

El incremento en la densidad del suelo se da con el mayor número de golpes en el ensayo, concentrando los esfuerzos cortantes en una zona que se densifica cada vez más. Con respecto al contenido de agua, mientras este crece, la permeabilidad del aire disminuye ocasionando grandes presiones de aire en los poros. Esto causa que los canales de aire ya no sean continuos y el mismo quede atrapado llevando a que la permeabilidad del aire sea cero y no se pueda densificar más el suelo (Winterkorna, 2007).

Características de los suelos en compactación

Los factores relacionados al suelo que supeditan la compactación, están relacionados a las características de las partículas siendo éstas las siguientes:

- **Forma de las partículas**

La forma de las partículas de los suelos se aísla en distinto grado de la esférica y en consecuencia también de la de los anillos de agua en cada contacto. Simples condiciones geométricas, referencian que la superficie ubicada para un mismo volumen de partículas, será mucho mayor cuando la forma de las partículas se aparte más de la esférica (Jorajuria, 2004).

- **Textura de las partículas del suelo**

La textura de la superficie de una partícula depende del coeficiente de fricción entre las partículas y la acción de una fuerza externa dedicada para realizar el proceso de solidificación. (Sagués, 2008) .

- **Orientación relativa de las partículas**

La orientación relativa de las partículas se produce en forma de anillo de agua. De lo contrario, se requiere alguna forma de transferencia de energía de compactación (golpes, amasado, presión, estática, etc.), Cuanto mayor sea la distribución paralela, mayores serán los puntos de contacto y mayor será la filtración de agua. (Sagués, 2008).

- **Distribución de los tamaños del suelo**

Para un similar volumen sólido y estructura de las partículas una granulometría bien graduada, provee mejor cantidad de número de contactos que en una granulometría uniforme. A mayor uniformidad de tamaños, el contenido de humedad tiene baja influencia en la compactación, lo que se tiene en cuenta en curvas de forma más achatada comparativamente con suelos similares con mejor graduación granulométrica

Si el volumen y la estructura de grano del sólido son similares, si el tamaño de partícula se ajusta apropiadamente, se pueden obtener más exposiciones que un tamaño de partícula uniforme. Cuanto mayor sea la uniformidad dimensional, menos humedad afectará el proceso de mezcla. Se considera que es una curva con una forma más plana que suelos similares con buena distribución del tamaño de las partículas (Sagués, 2008).

- **Actividad superficial de las partículas del Suelo**

Las partículas finas son someramente activas, por lo que están aptas de conservar y detener el agua por absorción. Ésta opera como una variación de su volumen sólido real. El agua está detenida por energías muy altas y la de contactos sólo puede prevalecer, cuando el contenido de humedad excede el necesario para colmar la capacidad de absorción propia de cada suelo (Sagués, 2008).

Curva de compactación

La curva de determinación se obtiene en una prueba de laboratorio y se clasifica según el tipo de suelo estudiado. Estas curvas de compactación son el resultado de la humedad del suelo (%) y el desplazamiento vertical (densidad seca) obtenidos durante la prueba de compactación (Pérez, 2014).

Esta figura muestra la curva de compactación. Se puede ver en el gráfico que a medida que aumenta el contenido de humedad, la densidad seca también aumenta hasta el punto en que comienza a disminuir. En esta etapa, la densidad seca es el valor máximo (γ_{dmax}) que se puede medir en la prueba de compactación. El eje horizontal correspondiente a este máximo representa el nivel de humedad óptima (Escario, 1989).

Características de la curva proctor

- **Rama seca de la curva de compactación**

Antes de comenzar a realizarse la rama seca de la curva de compactación la humedad del suelo es muy baja. La humedad determina el espesor de la película

molecular con alta adherencia al suelo. Esta es agua que se absorbe y en este estado el suelo se considera seco. Para que el agua actúe como lubricante entre los granos, el suelo debe superar este umbral de humedad. Hasta ese momento la fricción entre las partículas evita que algunas partículas se deslicen sobre otras y se solidifiquen. (Escobar, 2007).

- **Rama húmeda de la curva de compactación**

La rama húmeda es el punto en el que la curva de compactación del suelo se eleva por encima del contenido de humedad óptima y comienza a descender. En condiciones de suelo húmedo, la curva proctor comienza a disminuir para obtener la humedad óptima (Escobar, 2007).

- **Densidad seca máxima y humedad óptima**

La porosidad reducida y el contenido de agua aumentado conducen a limitaciones en la formación de una red continua de agua. Por encima de un cierto nivel de humedad, el agua comienza a cerrar constantemente los poros comunicados. Como resultado, el aire está rodeado de burbujas aisladas. Se detienen en cada vacío y el mismo trabajo mecánico no permitirá que el suelo se endurezca. En este estado, tener un componente completamente elástico (reductor de aire) cambia sus propiedades. Su presencia hace que se tienda a minimizar la permeabilidad al aire, dado que las burbujas y el agua drenan juntos o bien deslizándose dentro del conjunto (Escobar, 2007).

- **Lubricación y expulsión del aire**

Agregar agua al suelo distribuye alrededor de cada contacto no solo cambia la estructura del volumen, sino que también actúa como lubricante entre las partículas. La efectividad de la compactación depende del papel del agua. Cuando se logra este efecto, las partículas se moverán hacia una capa de encapsulación mas cerrada y los poros se volverán mas estrechos. La presión en el liquido empuja el aire hacia el exterior (González, 2013).

Este proceso se da en la medida en que existen poros que se comunican entre si y con el mundo exterior. Cada impacto determina un aumento significativo de la presión del agua intersticial debido a la compactación del aire. En el inicio de las ramas secas es muy permeable y disminuye a medida que se acerca al punto de máxima densidad. Con cada impacto, la presión creada en el aire se disipa rápidamente a una velocidad del orden de una centésima de segundo, acercándose al optimo mas lentamente y no del todo en una rama húmeda. La cantidad de agua presente al mismo tiempo se subdivide en más anillos con volúmenes independientes mas pequeños. Como resultado, se reduce el radio de curvatura del menisco y se maximizan las fuerzas de atracción y adhesión entre partículas (Juárez, 2014).

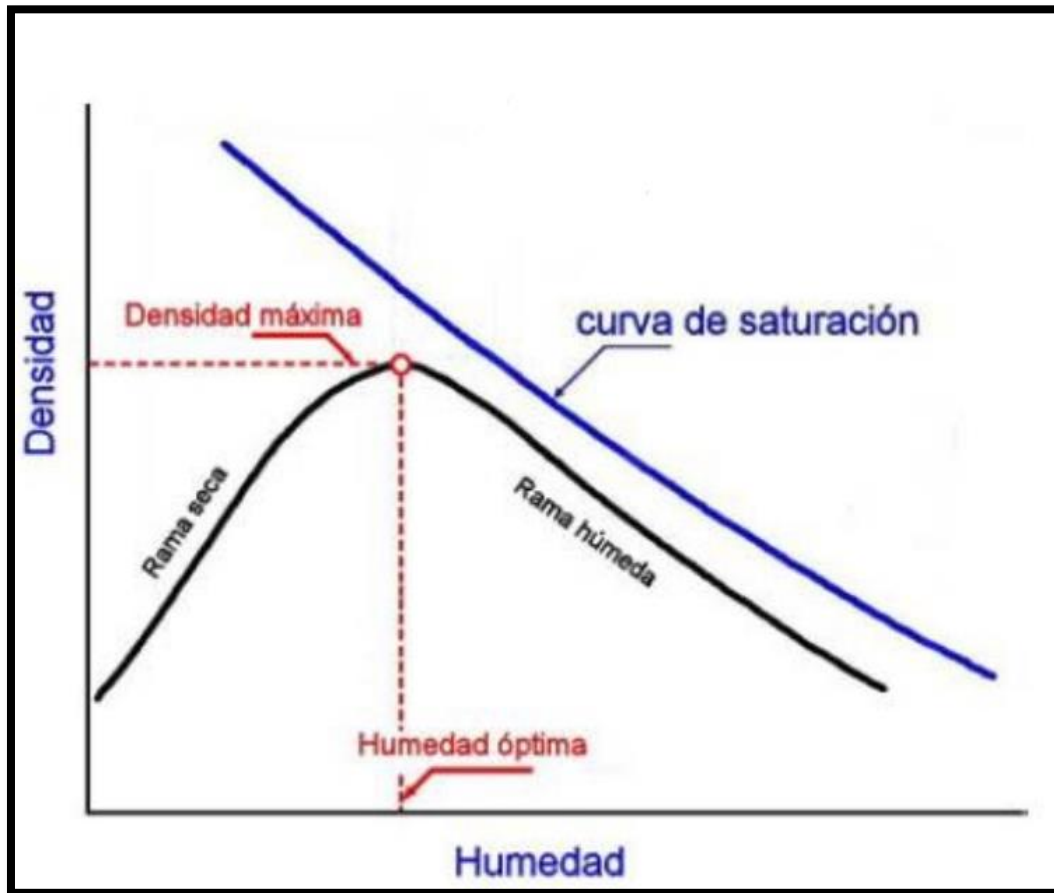


Figura 4 Curva Proctor

Fuente: Parano, (2013).

Factores que influyen en la compactación

De todos los factores que influyen e interfieren con la compactación del suelo, los más importantes son: el contenido de humedad y la energía de compactación aplicada a los ensayos. También hay muchos otros factores, las secciones siguientes describen los efectos sobre la compactación del suelo (Georges, 2004).

➤ Efecto del contenido de humedad

La humedad afecta directamente a la densidad seca obtenida durante la compresión.

Como puede ver, la densidad seca se incrementa con la variación del contenido de

agua hasta que la humedad optima alcanza el vértice de la curva que muestra la prueba de masa máxima. Después de esta humedad optima, se reducen algunos defectos (Sagués, 2008).

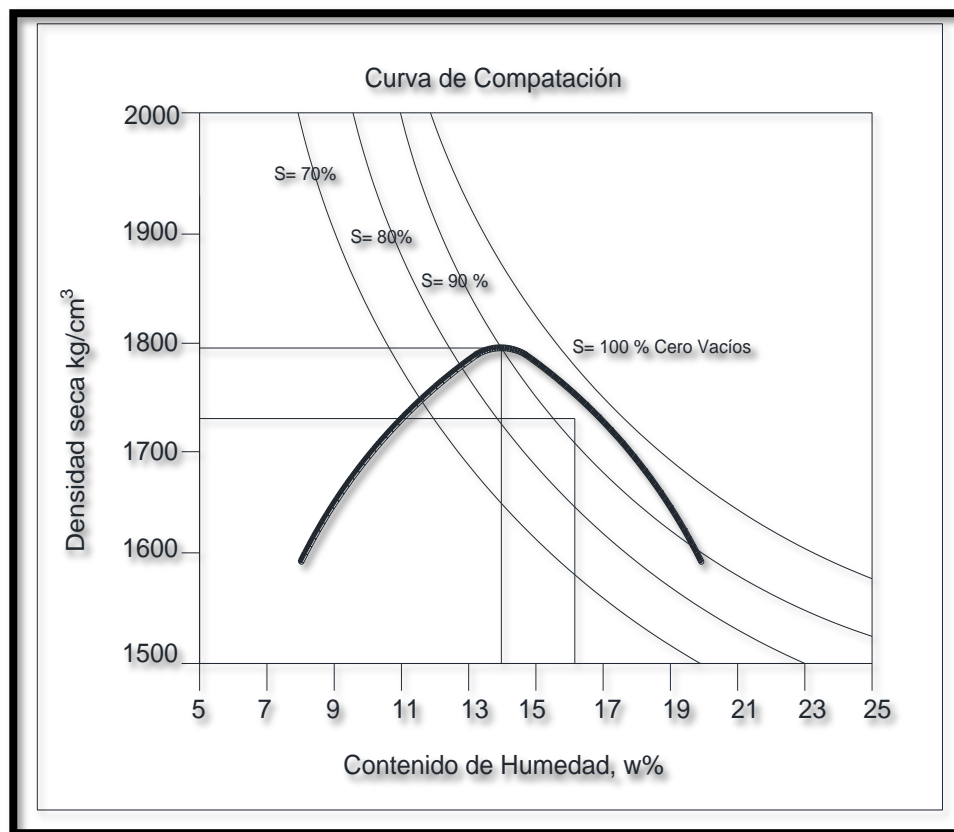


Figura 5 Curva de Compactación

Fuente: Juárez, (2014).

En esta figura, se puede ver que la saturación aumenta a medida que incrementa la humedad. En este gráfico, la densidad de sólidos del suelo se empaqueta al 80% de saturación en el punto de máxima densidad seca y humedad óptima (línea horizontal superior), e indica el nivel allí. La saturación aumenta a medida que aumenta el agua, alcanzando un pico de saturación del 90% (línea horizontal inferior). En este punto, la saturación disminuye y es casi constante (Ruíz, 2005).

La siguiente figura también muestra los descrito en el párrafo anterior. La línea horizontal inferior muestra la humedad óptima y la línea horizontal superior muestra la humedad de saturación máxima (Sánchez, 1996).

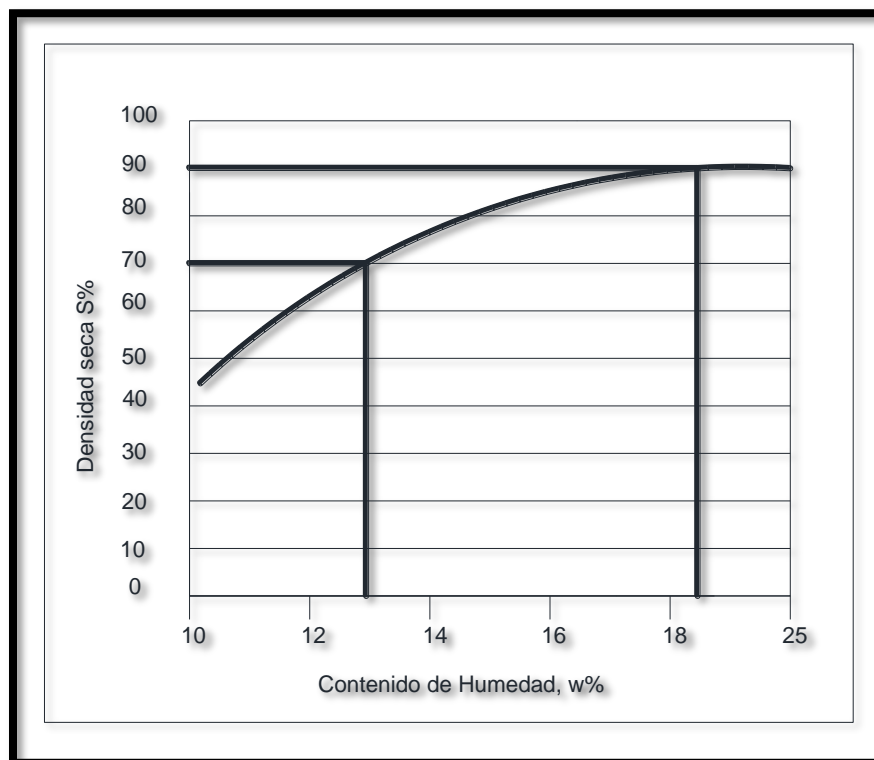


Figura 6 Contenido de humedad versus grado de saturación

Fuente: Juárez, (2014).

La humedad también afecta la estructura del suelo compactado. Cuando hay poca agua en el suelo, la concentración de iones en el agua es alta y el estrés efectivo causado por la tensión capilar y la repulsión intergranular es baja, lo que lo hace resistente al estrés compresivo (Juárez, 2014).

➤ **Efecto del método de compactación**

Se puede decir que la diferencia entre este método de compresión y otros métodos de compresión esta en el tamaño de cada deformación causada por cada método. La

compactación es la aplicación de una presión constante a un número constante de veces y el uso de un compactador para simular la estructura obtenida en suelo fino. En la compactación estática, se crea una fuerza de compresión compacta o unidireccional aplicando presión a una densidad específica para crear una estructura con partículas direccionales en suelo fino (González, 2013).

a. Compactación mecánica.

La compactación mecánica ejerce presión sobre el suelo formando unos bulbos de esfuerzos en el área compactada, lo que provoca que las partículas se desintegren o se separen (López, 2011).

Si la carga se duplica sin cambiar el tamaño del área, es decir, $2P$, la doble tensión puede causar grietas en las partículas del suelo y cambiar significativamente la granulometría de las partículas. Sobrecargar el equipo que excede las especificaciones del fabricante es malo porque el estrés puede dañarlo. Uso de cargas que exceden las especificaciones de diseño (López, 2011).

Sin embargo, si se duplica la carga y el área, el mismo esfuerzo que en el primer caso, pero con una profundidad de distribución aumentada y una capa más gruesa, concluimos que se debe utilizar un dispositivo nuevo y más pesado con mayores áreas de contacto (Jorajuria, 2004).

➤ Efecto de la preparación de las muestras

Los pasos utilizados al preparar una muestra para una prueba de compactación afectarán los resultados. Puede comenzar con suelo relativamente seco y agregar tanta agua como necesite para obtener las muestras que necesita para las pruebas, o

comenzar con suelo húmedo y seco y trabajar en la dirección opuesta (ASTM D-1557, 2000).

El primer método permite lograr una mayor densidad en seco. De hecho, la adición de agua provoca un exceso y la tensión capilar entre las masas de suelo es menor que la fuerza capilar de la masa de suelo de la que se evapora el agua. Por la misma razón, la energía comprimida es mas eficiente que la primera. Para reducir la diferencia entre los resultados de estos dos pasos, comience con una muestra seca y tómesese un tiempo después de agregar agua (González, 2013).

Por otro lado, usar la muestra varias veces no es practico ya que la muestra no esta compactada y ya no representa la condición del suelo compactado en el sitio (ASTM D-1557, 2000).

Propiedades de los suelos compactados

La compactación del suelo cambia y mejora los parámetros físicos y mecánicos. Esto se debe a que el suelo suelto o sin comprimir no es adecuado para soportar las otras condiciones requeridas para las operaciones de carga. Algunas propiedades del suelo se describen a continuación (Sagués, 2008).

a. Permeabilidad

La propiedad del suelo que no resiste el flujo de agua se llama permeabilidad. La transmitancia indicada por la letra k es un coeficiente obtenido experimentalmente. Cuanto menor sea el valor k , mas impermeable será el suelo.

La permeabilidad depende de la porosidad, la estructura del suelo y la saturación (Ruíz, 2005).

A medida que disminuye la porosidad también disminuye la permeabilidad del suelo. De hecho, cuando la brecha desaparece, el canal que deja pasar el agua se cierra. Sin embargo, a medida que el suelo se vuelve más saturado aumenta la tasa de penetración. Esa es toda la humedad. El factor más influyente en la permeabilidad del suelo es la estructura obtenida después de la compactación. Por tanto la compactación del suelo afecta a la permeabilidad. Debido al alto contenido de humedad y la deformación obtenida por el método de compactación, cuanto más grandes son las partículas orientadas obtenidas, menos permeable es el suelo (Pérez, 2014).

b. Compresibilidad

La capacidad compresiva de un suelo es la relación entre la carga compresiva que actúa sobre el suelo y la deformación o cambio de volumen. La deformación bajo carga depende de su tamaño, porosidad y contenido de humedad. La compactación o fijación del suelo puede persistir durante muchos años bajo cargas continuas (Jorajuria, 2004).

c. Aplicación de los valores de densidad máxima y humedad óptima

Las curvas de proctor y la resistencia del suelo se trazan para diferentes condiciones de densidad y humedad. Se cree que el suelo puede saturarse

manteniendo una densidad seca, pero esto es una suposición inverosímil, especialmente cuando el suelo es pegajoso (Parano, 2012).

En la rama seca, punto A cuando el suelo este seco, la resistencia mecánica aumenta. Esta condición puede resultar en una resistencia muy baja cuando el suelo esta saturado, resultando en una diferencia en la resistencia " ΔA ". Lo mismo ocurre con el punto B que corresponde a la máxima densidad seca y a la higrometría optima. Sin embargo, la presencia de sol coherente se reduce debido a la perdida por saturación " ΔB " debido a que la resistencia mecánica es menor que la prevista en el punto A (Parano, 2012).

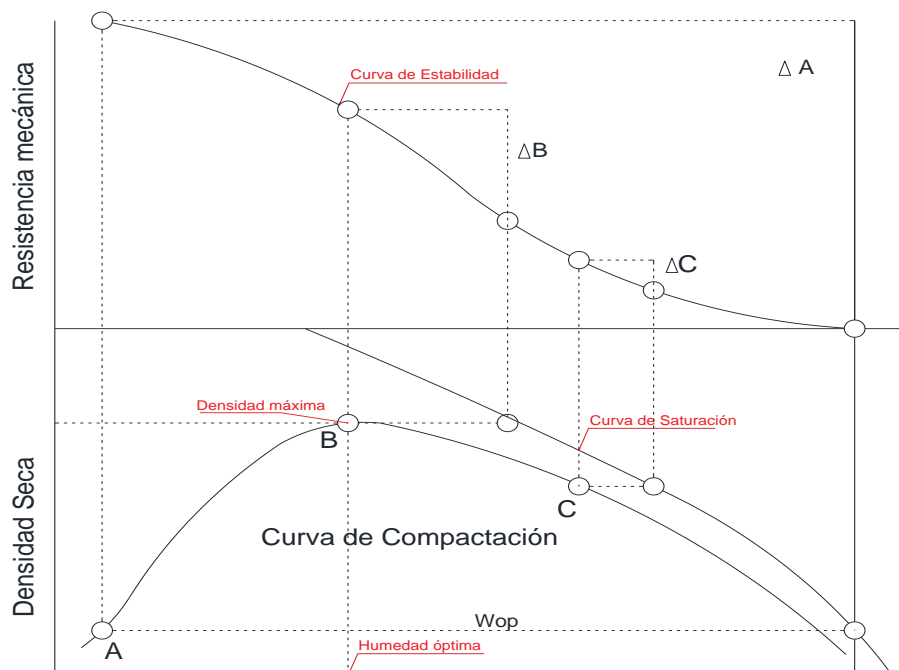


Figura 7 Resistencia mecánica de compactación

Fuente: Parano, (2012).

Energía de compactación

La realización de ensayos de compactación implica la entrega de un trabajo mecánico que comprende: número de golpes, altura de caída, peso del pisón, número de capas. Además, está en juego la forma de entrega de esa energía: amasado, presión estática, impacto. La entrega unitaria de trabajo debe ser suficiente para vencer la resistencia al corte del suelo y por lo tanto, poder deformarlo de manera irreversible (Escario, 1989).

Este trabajo determina la orientación de las partículas con modificación de las características mecánicas de los suelos y materiales estabilizados. La representación gráfica N° 1 de la relación densidad seca - humedad, da lugar a lo que habitualmente se denomina “curva de compactación” o “curva Proctor”. La primera parte ascendente se denomina “rama seca”. El punto máximo superior es un punto singular, del cual se obtiene el valor de la densidad seca máxima y la humedad óptima (Parano 2013).

La energía específica de compactación se define como la cantidad de golpes por capa inducida por el peso del pistón y la altura, e inversamente proporcional al volumen (ASTM – D 1557).

Implicancia de la variación de la energía de compactación

Dependiendo de la energía de compactación utilizada, se considera el tipo de material a ensayar, teniendo en cuenta el tipo de suelo en el que se realiza la compactación mediante métodos estandarizados establecidos. Cada muestra de suelo depende de su composición. Requiere más energía dependiendo de la resistencia mecánica. Si el suelo está libre de partículas, siga las regulaciones del ASTM y siempre considere el

tamaño de partículas del material utilizado, dependiendo de las características del suelo sientos suelos granulares o suelos cohesivos (Ruíz, 2005).

a. Suelos granulares

La resistencia mecánica se puede aumentar al incrementar la energía de compactación y aumentando el punto de densidad máxima. Los suelos granulares son menos sensibles a los efectos del agua y por lo tanto tienen una curva de resistencia mas alta. Por esta razón los suelos granulares suelen compactarse con mayor energía que los suelos cohesivos. (Sánchez, 1996).

b. Suelos finos cohesivos

Es un suelo con estas propiedades plásticas y de cohesión. El suelo puede ser apreciado con algo de arcilla o aluvión orgánico importante para la aglutinación y ductilidad, o puede ser arcilla o aluvión orgánico sin composición granular. Tampoco genera arcilla, que es principalmente un refuerzo de la resistencia al cizallamiento. La tendencia a la expansión de los materiales arcillosos aumenta esencialmente el volumen de todas las partículas cuando se expanden. Por lo tanto, puede saturarse si la densidad de secado se reduce significativamente. No se confirmó la recuperación de la densidad seca original después del proceso de secado. Se produce un mecanismo de agrietamiento debido a la contracción del suelo. Durante el uso, el resultado final de una serie de ciclos de humedecimiento y secado hace que el suelo fluctúe en ambientes con densidad seca y humedad limitadas. Ambos ambientes suelen estar relacionados con la humedad

y la densidad de equilibrio. Dependen de factores como la carga externa que reciben, las propiedades de expansión del material arcilloso intercalado entre las partículas y la permeabilidad del material. También depende de tu historial de actuación y de cuánto tiempo tardan en aparecer cada uno de los efectos anteriores. La densidad excesiva de la arcilla altera el contenido de humedad y la densidad hasta que se alcanza este equilibrio. Aquí, la arcilla comprimida de mayor energía crece en la misma dirección (Escobar, 2007).

Por el contrario, una consistencia insuficiente aumenta la densidad de secado y fortalece el material. Las condiciones de entrada y salida de agua no son uniformes en el relleno. Como resultado, la enfermedad puede provocar una expansión y contracción anormales. Esta condición puede aparecer como una deformación permanente de la superficie de la carretera. Es importante poder predecir estas áreas antes de confiar en este escenario, que ofrece ventajas económicas y técnicas (Ruíz, 2005).

Influencia de la energía de compactación

El desarrollo de pruebas de compactación que incluyen restricciones mecánicas como el número de deslizamientos, la altura de caída, el peso del pistón y el número de capas. Además de jugar un papel importante, los golpes y la presión estática ponen en peligro esta forma de distribución de energía. El aporte de trabajo unitario debe ser suficiente para superar la resistencia al corte del suelo y deformarlo irreversiblemente (Escario, 1989).

Esta operación modifica las propiedades mecánicas del suelo y el material estabilizado para determinar la orientación de las partículas. Los gráficos de densidad seca y contenido de humedad a menudo se denominan curvas de compactación o curvas proctor. La primera parte ascendente se llama rama seca. El límite superior es 1 punto para obtener la máxima densidad seca y el valor de humedad óptimo. La parte inferior se llama rama húmeda.

Esta operación ajusta las propiedades mecánicas del suelo y el material estabilizado para determinar la orientación de las partículas. Los gráficos de humedad también se conocen como densidad seca, curva de compactación o curvas proctor. La primera parte que sobresale se llama rama seca. El límite superior es el punto en el que se pueden alcanzar la máxima densidad seca y los valores óptimos de humedad. La parte inferior se llama rama húmeda (Sánchez, 1996).

“Para el mismo suelo compactado con diferentes energías de compactación, el punto correspondiente a la densidad máxima se coloca en una línea aproximadamente paralela a la curva de saturación. Además, cada rama húmeda presenta una considerable coincidencia y paralelismo con la curva de saturación” (Sowers, 2014).

A. Efecto de la energía de compactación

La energía de compactación afecta en gran medida la densidad seca obtenida en la prueba de energía de compactación del suelo. Como puede verse en la siguiente figura, se puede lograr una menor densidad compactando el suelo con una menor

energía de compactación. Por el contrario, si la energía de compactación es alta, sube por encima y hacia la izquierda de la curva de compactación, descendiendo casi en paralelo a la curva hueca cero, y alcanza una densidad seca máxima mas alta. Puede verse en esta figura que el contenido de humedad optimo disminuye a medida que aumenta la energía de compactación (Sagués, 2008).

Se tiene que tener en cuenta y recalcar que para valores superiores al contenido de humedad optimo, la energía de compactación solo deforma el suelo en un ángulo y no reduce su volumen. Claro los suelos con mas agua son mas susceptibles a la deformación, pero su menor contenido de aire los hace más difíciles de comprimir (Sowers, 2014).

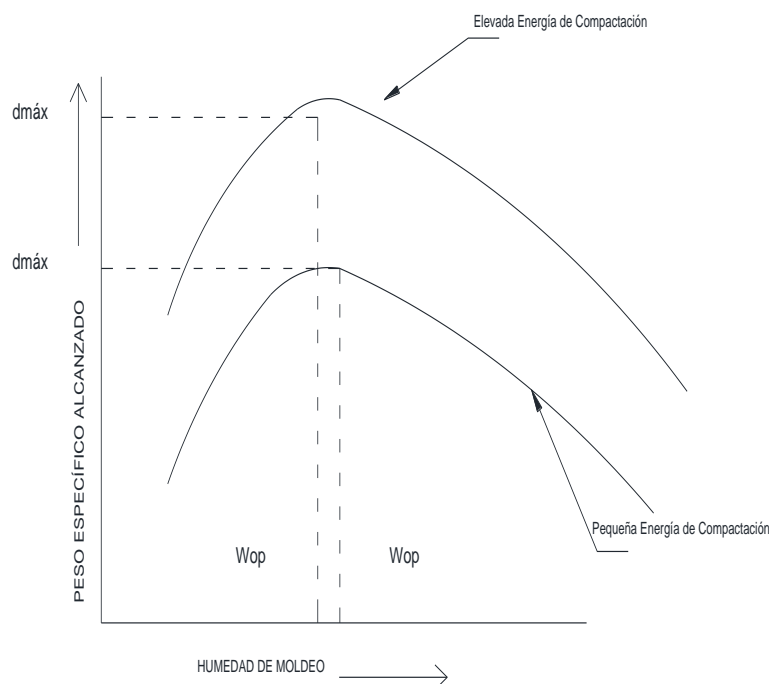


Figura 8 Curvas de compactación proctor estándar y Modificado

Fuente: Georges, (2004).

Ensayo mediante proctor modificado

A partir de 1933, el ingeniero Ralph Proctor inicio un estudio racional de la compactación. Los investigadores han descubierto que el mismo suelo responde de manera diferente a la compactación y alcanza diferentes valores de densidad según el contenido de humedad. Proctor compacta muestras de suelo en recipientes cilíndricos utilizando diferentes cantidades de agua. Los valores de humedad y densidad seca se pueden obtener después (González, 2013).

Según la norma ASTM-1557, el pistón pesa 10 libras, por lo que a diferencia del proctor estándar es mas pesado, se realiza una prueba Proctor modificado en el cilindro para determinar la densidad y la humedad. Luego, el método que se utilizara se seleccionara de acuerdo al ensayo granulométrico.

La compactación es una tarea o proceso de estabilización mecánica, cuyo propósito principal es utilizar una mayor aproximación de las partículas para aumentar la densidad del suelo lo que se logra reduciendo el índice de vacíos. Mediante la compactación del suelo, se persiguen objetivos prácticos como:

- Incrementar la resistencia a la compresibilidad y al corte.
- Obtener de mayor uniformidad y homogeneidad.
- Obtener que el suelo sea menos susceptible a las varianzas de humedad.
- Con la finalidad de que este aporte en la construcción de caminos y aeropuertos.
- Construcción de represas de tierra, fundación de presas de tierra, fundación de estructuras.

Cálculo de la energía de compactación

La energía de compactación aplicada a la prueba de Proctor Modificado se realizará calculando la energía de compresión aplicando la siguiente ecuación (Escario, 1989).

Importancia y uso

El suelo utilizado como terraplén está diseñado (relleno, terraplén, calzada) para ser compactado en un estado compacto para tener características técnicas satisfactorias como resistencia al corte, compresibilidad o permeabilidad. Además, la subcapa a menudo se comprime para mejorar las especificaciones. Las pruebas de compresión de laboratorio proporcionan la base para obtener las especificaciones requeridas y determinar la resistencia a la compresión y el contenido de humedad requerido (Escario, 1989).

La importancia de la compactación es tener una capa de suelo compacta, homogénea, firme y resistente a la presión apta para la construcción, que cumpla principalmente con los parámetros de resistencia de las distintas cargas a las que está sometido el suelo. Esto requiere la aplicación de varias técnicas de compactación al suelo para reducir la presencia de vacíos y proporcionar propiedades favorables para la construcción (Sánchez, 1996).

En el diseño técnico del relleno, se utilizan ensayos de corte, permeabilidad u otros ensayos que requieren la preparación de especímenes comprimidos a un contenido de humedad específico por unidad de peso. Es una Práctica común determinar primero el

contenido óptimo de agua (w_o) y el peso unitario seco mediante una prueba de compresión. Las muestras de compresión tienen un contenido de humedad seleccionado (w), húmedo o seco de óptimo (W_o), con un peso unitario seco seleccionado como un porcentaje del peso unitario seco. La selección del peso unitario del contenido de humedad (w), óptimo (w_o), húmedo seco y debe basarse en la experiencia pasada, debiendo considerarse como un conjunto de valores, determinar la relación de compresión requerida (Sowers, 2014).

Beneficios

Entre las ventajas que se da cuando se realiza la compactación del suelo, se pueden destacar las siguientes:

a. **Impide el hundimiento del suelo:**

Los trabajos de construcción en suelos no compactados pueden provocar hundimientos, asentamiento de la estructura, deformaciones y colapso estructural. en este sentido, la compactación del suelo es un paso importante en el proceso de inicio de la construcción (Jorajuria, 2004).

b. **Reduce el escurrimiento del agua (permeabilidad):**

El suelo compactado ayuda a reducir la infiltración de agua, reduce los vacíos después del compactado impidiendo el escurrimiento de agua, evitando que el agua se agote y se vuelva inestable en la estación seca (Sowers, 2014).

c. **Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo:**

Si hay vacíos en la capa de suelo, el agua se filtrara y rellenara los vacíos, provocando inestabilidad. Como resultado, el se expande durante la temporada de lluvias y se contrae durante la temporada de estiaje (Pérez, 2014).

Contenido de humedad y densidad del suelo

1. Contenido de humedad

El contenido de humedad es un componente que afecta directamente la compactación del suelo, encontrándose en la naturaleza hasta cierto punto saturada o sumergida (Jorajuria, 2004).

- Determinación del contenido de humedad

De una muestra de suelo, es la relación entre el peso del agua y el peso de un sólido en un volumen dado de suelo. Esto se representa con W . Estas propiedades físicas del suelo son útiles en la ingeniería civil y se pueden obtener simplemente porque dependen de las propiedades del suelo durante la construcción y de la disponibilidad de agua que contiene. El contenido de agua del suelo determina su relación con el peso del agua (W_w) contenida en el espécimen y la carga en su etapa solida (W_s). Expresado en porcentaje (Sánchez, 2006).

2. Peso específico o densidad

Ser capaz de determinar el estado natural del suelo o la densidad del suelo relleno siempre ha sido un gran desafío para los indagadores sobre la mecánica de suelos. Esta determinación se realiza para determinar la relación entre el peso y el volumen del

suelo en su estado natural y para determinar el grado de compresión del relleno artificial (Sánchez, 1996).

“Al aumentar la energía de compactación para un mismo suelo aumenta su peso volumétrico seco máximo y disminuye su humedad óptima” (Crespo, 2004).

1.1.4 Justificación de la investigación

Según lo anteriormente mencionado nace la necesidad de realizar la presente tesis, para poder tener como referencia el estudio de suelos granulares de la Cantera Agocucho, siendo la más explotada y más accesible en la ciudad de Cajamarca. Así mismo se analizará la importancia de la energía de compactación en la capacidad portante del suelo como variable que complementa al estudio de suelos y asegurar de esta manera la calidad del proyecto.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la influencia de la energía de compactación según norma ASTM – 1557 mediante la variación de golpes, en la densidad seca máxima y en el óptimo contenido de humedad de suelo granular de la cantera Agocucho?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la energía de compactación en la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad del suelo granular de la cantera Agocucho.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Determinar las propiedades físico – mecánicas de agregado proveniente de la cantera Agocucho.
2. Definir las diferentes energías de compactación variando según el número de golpes aplicados a las muestras.
3. Determinar la densidad seca máxima (gr/cc) y el óptimo contenido de humedad (%) variando la energía de compactación mediante el ensayo de proctor modificado. (según norma ASTM – 1557, la que relaciona la energía de compactación y el número de golpes)
4. Determinar cuál es el valor mínimo para que dicho suelo empiece a fracturarse.
5. Determinar a qué clase y tipo pertenece el suelo analizado, mediante SUCS Y AASHTO.

1.4. Hipótesis

A mayor energía de compactación, la densidad seca máxima aumenta y el contenido óptimo de humedad disminuye.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación.

La investigación es aplicada ya que está orientada a solucionar o mejorar diversos problemas que se presentan (Sampieri, 2018), en este caso ayuda a mejorar la calidad del suelo usando diversos ensayos siendo el más importante el de proctor modificado.

Por su profundidad es correlacional ya que se verá cómo influye una variable en otra (Palacios y valdivia, 2012), en este caso la energía de compactación, el contenido de humedad que influye para alcanzar la densidad seca máxima.

Por la naturaleza de datos, cuantitativa, porque se recopiló datos usando herramientas matemáticas para medirlas, en este caso (Sampieri, 2018), para esta investigación se hizo el uso de protocolos para la granulometría, contenido de humedad, límites de plasticidad, entre otros, para poder medir y obtener los resultados.

Según Sampieri (2018) los medios utilizados pueden ser de: campo, documental, laboratorio entre otros. En la investigación fue documental para establecer los instrumentos de investigación, de campo para poder recolectar las muestras y laboratorio para poder determinar sus características y posteriormente procesar los datos.

Por la manipulación de sus variables, experimental, no probabilística, ya que se realizó una variación en la energía de compactación así mismo se hizo una variación en el contenido de humedad.

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

Población:

Suelo granular de la cantera Agocucho.

Se eligió esta cantera basándose en 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”, en la cual nos indica que es la mas usada para el mejoramiento de suelos con material granular.

Muestra:

200 kilos de suelo granular de la cantera Agocucho (2 Costales)

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Para la recolección de datos e información se realizó por medio de protocolos para poder registrar las propiedades de los agregados.

2.3.1 Elección de la Cantera

Se eligió la cantera “Agocucho” debido a que esta cantera está aumentando su producción por lo que empieza a ser una de las más concurrida y más explotadas de la zona de Cajamarca.

2.3.2 Ubicación

Se encuentra ubicada al sur este de la ciudad de Cajamarca, tiene dos zonas como son A y B, y se encuentra a una altitud de 2850 m.s.n.m cerca de la hacienda la Colpa. Con coordenadas UTM:

- Este: 775497

- Norte: 9202512

2.3.3 Accesibilidad

Esta cantera tiene una buena accesibilidad y comunicación con Cajamarca y con los distritos de esta ciudad lo cual es fácil el transporte de los agregados y se encuentra a una distancia de 9 Km de la ciudad de Cajamarca.

2.3.4 Identificación Geológica

La zona en estudio está conformada por unidades litológicas sedimentarias, representadas por un abanico aluvial. El canal natural en estudio es del tipo de Avenamiento primario y pertenece a la cuenca Cajamarquino que se formó en el último.

Es un gran depósito de material aluvial de areniscas cuarzosas a lo largo de la quebrada, la roca se encuentra fracturada debido al diastrófismo intenso que sufrió en las abruptas cañadas del afloramiento del El Gavilán, su textura es de granos finos y gruesos, su color varía de ocre claro a oscuro o rojo indio debido a la presencia de óxido de fierro. El material es acarreado por las avenidas en las épocas de lluvias, por lo general se compone de fragmentos gruesos como piedras, gravas, guijarros insertados en una matriz más fina de arenas, limos y arcillas.

Las rocas tienen formas semiangular de textura afanítica preponderantemente. El suelo de la cantera es un material granular de partículas gruesas, no presenta estratos bien definidos.

Hay presencia de meteorización química y física, temperatura, lluvias, vientos, etc.; dentro de los factores que intervienen en esta meteorización se encuentran el clima, la topografía, naturaleza de la roca existente, tiempo, etc.

2.4. **Procedimiento**

Para la recolección de datos se procedió a obtener muestras del suelo granular de la cantera Agocucho, de la cual se extrajo el material para poder realizar los ensayos en los laboratorios de la Universidad Privada del Norte, los cuales se realizaron en base a las normas técnicas peruanas y ASTM.

a. Reducción de muestras de tamaño de campo a tamaño de muestras de ensayo (NTP339.126, 2002).

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: Cuarteador 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 de 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 (NTP400.012, 2001)

• **Equipos:**

- ✓ Tamices 1'', ¾'', ½'', 3/8'', N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°100, N°200, cazoleta
- ✓ Balanzas con aproximación de 0.1 gr

• **Materiales:**

- ✓ Suelo granular seco 8522.00 gr
- ✓ Taras

• **Procedimiento:**

- ✓ Se secó la muestra a temperatura constante.
- ✓ Se colocó el material en los tamices, en la tabla 1 se muestra la cantidad de muestra según su tamaño máximo nominal del agregado.
- ✓ Se agitó los tamices por un período suficiente.

- ✓ Se determinó la masa de cada incremento de medida sobre una balanza. La masa total de material luego del tamizado deberá ser verificada con la masa de la muestra colocada sobre cada tamiz.
- ✓ Se dibujó la curva granulométrica en escala semilogarítmica, en el eje de las abscisas se registró la abertura de las mallas en milímetros y en el eje de las ordenadas se registró los porcentajes acumulados.

c. Contenido de humedad del agregado fino y grueso (NTP339.185, 2002)

- ✓ Se calculó aproximadamente la cantidad de muestra con la cual se va a trabajar.
- ✓ Se pesó correctamente las taras para realizar la investigación.
- ✓ Se colocó en las taras la muestra húmeda y se pesó.
- ✓ Se llevó al horno por un tiempo de 24 horas, a una temperatura de 110°C, para la eliminación del agua.
- ✓ Cumplidas las 24 horas, se sacaron las muestras del horno y se dejaron enfriar hasta la temperatura ambiente para pesarlas.
- ✓ Finalmente se calculó el porcentaje de contenido de humedad, utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación 1: Contenido de humedad del agregado fino y grueso

$$W(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Donde:

Ph: Peso de la muestra húmeda

Ps: Peso de la muestra secada al horno

d. Límites de plasticidad (NTP339.130,2002)

i. Limite liquido

- **Material:**

- Suelo seco que pasa la malla N° 40

- **Equipo:**

- Malla N° 40
- Copa de Casagrande
- Ranurador
- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Horno a 100°C (+-10)
- Espátula
- Probeta 100 ml
- Capsula de porcelana
- Taras

- **Procedimiento**

- En una cápsula de porcelana se mezcló el suelo con agua mediante una espátula hasta obtener una pasta uniforme.

- Se Colocó una porción de la pasta en la copa de Casagrande, nivelar mediante la espátula hasta obtener un espesor de 1 cm.
- En el centro hacer una ranura con el acanalador de tal manera que la muestra queda dividida en dos partes.
- Se elevó y dejó caer la copa mediante la manivela a razón de 2 caídas por segundo hasta que las dos mitades de suelo se pongan en contacto en la parte inferior de la ranura y a lo largo de 1.27 cm, registrar el número de golpes.
- Mediante la cápsula se retiró la porción de suelo que se ha puesto en contacto en la parte inferior de la ranura y colocarlo en una tara para determinar su contenido de humedad.
- Se retiró el suelo de la copa de Casagrande y se colocó en la capsula de porcelana, agregar agua si el número de golpes del ensayo anterior ha sido alto, o agregar suelo si el número de golpes ha sido bajo. (el número de golpes debe estar comprendido entre 6 y 35).
- Se repitió el ensayo 6 veces.
- Se Dibujó a curva de fluidez (la recta) en escala semilogarítmica, en el eje de las abscisas se registrará el número de golpes en escala logarítmica, en el eje de ordenadas los contenidos de humedad en escala natural.
- Se determinó la ordenada correspondiente a los 25 golpes en la curva de fluidez, este valor será el límite líquido del suelo.

ii. Límite plástico

- **Material:**

- Se usó una porción de la mezcla preparada para el límite líquido.

- **Equipo:**

- Balanza
- Horno
- Espátula
- Capsula de porcelana
- Placa de vidrio
- Taras

- **Procedimiento:**

- A la porción de la mezcla preparada para el límite líquido se agregó suelo seco de tal manera que la pasta baje su contenido de humedad.
- Se enrolló la muestra con la mano sobre una placa de vidrio hasta obtener cilindros de 3 mm de diámetro y que presenten agrietamientos, determinar su contenido de humedad.
- Se repitió el ensayo 6 veces más.
- El límite plástico es el promedio de los 2 valores de contenidos de humedad.

e. Peso específico y absorción de agregado

- ✓ Se pesó la tara
- ✓ Luego se pesó la muestra con la tara

- ✓ Se colocó la muestra en un balde de metal y se colocó en un gancho para después sumergirla totalmente
- ✓ Finalmente se anotó el peso sumergido totalmente de la muestra y se aplicaron las siguientes fórmulas para obtener los resultados:

- Peso específico:

Ecuación 2: Peso específico

$$\frac{A}{A - C}$$

- Absorción:

Ecuación 3: Absorción

$$\frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde:

A: Peso en el aire de la muestra seca en gramos.

B: Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca, en gramos.

C: Peso sumergido en agua de la muestra saturada, en gramos.

f. Resistencia a la degradación de agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles. (NTP400.019,2002)

- ✓ Se lavó y secó al horno la muestra.

- ✓ Se colocó la muestra de ensayo y la carga en la máquina de Los Ángeles y se roto a una velocidad entre 30 rpm a 33 rpm, por 500 revoluciones.
- ✓ Se descargó el material de la máquina y se realizó una separación preliminar de la muestra sobre el tamiz normalizado N° 12.
- ✓ Se pesó la muestra.

Ecuación 4: Resistencia a la degradación de agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles

$$\% \text{ Desgaste} = 100 \times \frac{(P1 - P2)}{P1}$$

Donde:

P1= Peso muestra seca antes de ensayo

P2= Peso muestra seca después del ensayo.

Tabla 1: Granulometría de la muestra de agregado para ensayo de abrasión

Pasa tamiz	Retenido en tamiz		Pesos y granulometrías de la muestra para ensayo (g)				
	mm (alt.)	mm	mm (alt.)	A	B	C	D
37.5	1 1/2"	-25	1"	1250 ± 25			
25	1"	-19	3/4"	1250 ± 25			
19	3/4"	-12.5	1/2"	1250 ± 10	2500 ± 10		
12.5	1/2"	-9.5	3/8"	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.5	3/8"	-6.3	1/4"			2500 ± 10	

6.3	1 1/4"	-4.75	Nº4			2500 ± 10	
4.75	Nº 4	-2.36	Nº8				5000 ± 10
TOTALES				5000 ± 10	2500 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: NTP 400.019,2002.

g. Proctor Modificado (NTP339.141, 2000)

- Se seleccionó el molde de compactación apropiado de acuerdo con el Método (A, B o C), en el siguiente caso se usó el método C debido a los valores de Granulometría que se obtuvo.
- Se tomó las dimensiones del molde C y se registraron los datos en los formatos de recolección de información.
- Se prepararon las muestras con contenido de humedad de 1%, 2%, 4% y 6% los cuales fueron agregados al material granular y dejados en reposo por un periodo de 24 horas para que cada muestra tenga homogéneamente el contenido de humedad siendo cada muestra preparada de 6 kg del material extraído de la Cantera Agocucho.
- Luego de haber incorporado el contenido de humedad se procedió a compactar la muestra en 5 capas, partiendo según lo especificado en la norma técnica desde los 56 golpes hasta los 61 golpes.
- Se tomó en cuenta que, para cada ensayo realizado, se hiciera con las mismas condiciones físicas para evitar que esto afecte con respecto a la entrega del trabajo mecánico realizado en cada ensayo de Proctor Modificado.

- Cuando se terminó de hacer la compactación en el molde, se procedió a enrazar y pesar en la balanza el molde más la muestra contenida el, para luego extraer una muestra y así poder determinar el contenido de humedad y densidad seca máxima por cada uno de los ensayos realizados y así poder obtener los datos para procesar la curva Proctor para el análisis en gabinete de la información obtenida en laboratorio.

 - Se realizó 6 veces el procedimiento descrito.
- **Energía de compactación (ASTM – D1557)**
- Para media la energía de compactación se basó en la elección de método de proctor modificado en este caso siendo el método C ya que los datos a usarse para hallar la energía de compactación dependen directamente del método que se usó.
 - Posteriormente se determinó la formula a usar la cual está definida en la norma ASTM – D 1557.
 - Se prosiguió a corroborar los datos necesarios de los instrumentos a usar, es decir el peso del pistón y el volumen del molde.
 - Posteriormente se procedió a hallar la energía de compactación mediante la fórmula con la variación de golpes especificada partiendo desde los 56 golpes como especifica la norma ASTM - 1557.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. 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.

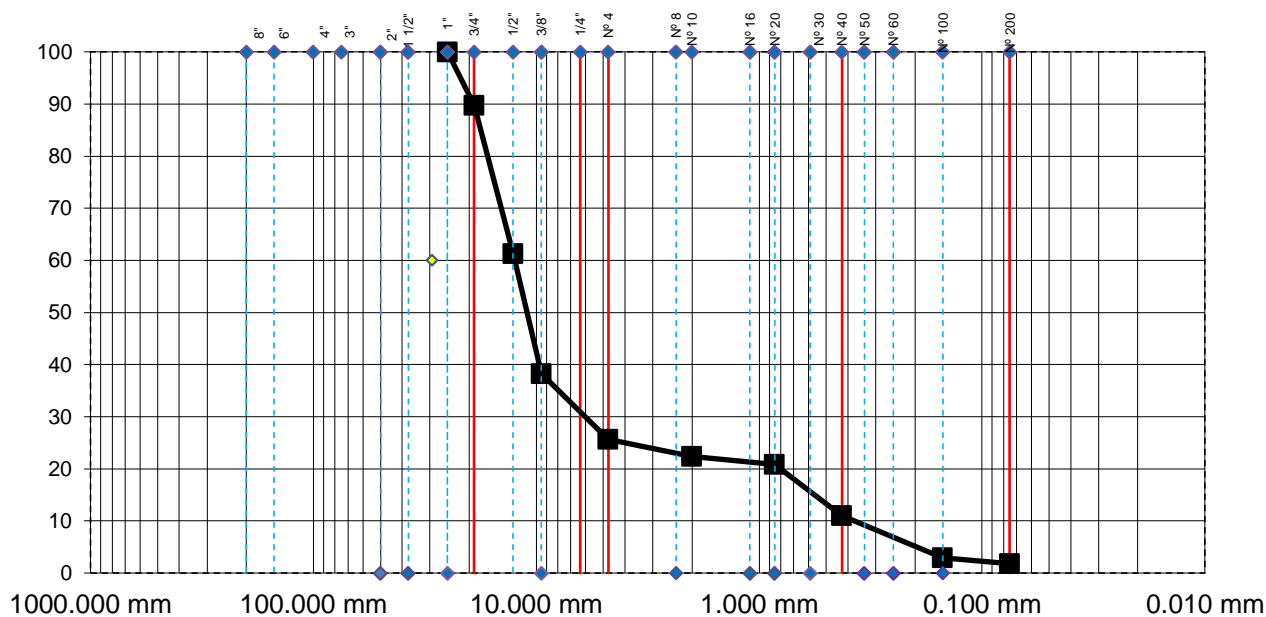


Figura 9 Curva granulométrica

3.2. Contenido de Humedad:

El contenido de humedad obtenido en nuestro ensayo de suelo granular es de:

Tabla 2: Contenido de Humedad

Número de muestra	Cont. Hum. (%)
Muestra n° 01	1.19 %
Muestra n° 02	1.17 %
Muestra n° 03	1.19 %
Muestra n° 04	1.18 %
Muestra n° 05	1.17 %
Muestra n° 06	1.20 %
Promedio	1.18 %
Contenido de humedad	1.18 %

3.3. 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/cm³, y el peso específico de los finos fue de 2.477 gr/cm³, por lo tanto, el peso específico promedio es de 2.518 gr/cm³. Además, dicho material (gravas) es producto de una alteración argílica, cuya roca se le denomina comúnmente como sílice.

3.3.1. Peso específico agregado grueso

Tabla 3: Peso específico agregado grueso

Número de muestra	P. esp. Grueso (gr/cm ³)
Muestra n° 01	2.561
Muestra n° 02	2.559
Muestra n° 03	2.563
Muestra n° 04	2.558
Muestra n° 05	2.557
Muestra n° 06	2.553
Promedio	2.559

Peso esp.	2.559 gr/cm ³
-----------	--------------------------

3.3.2. Peso específico agregado fino

Tabla 4: Peso específico agregado fino

Número de muestra	P. esp. Fino (gr/cm ³)
Muestra n° 01	2.476
Muestra n° 02	2.479
Muestra n° 03	2.478
Muestra n° 04	2.477
Muestra n° 05	2.475
Muestra n° 06	2.479
Promedio	2.477

Peso esp.	2.477 gr/cm ³
-----------	--------------------------

3.4. Clasificación de suelo:

Para la clasificación de nuestro material se hizo uso de las tablas y ábacos de clasificación de suelos tanto para AASHTO como para SUCS

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.

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)							Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2-4				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0,425mm) N° 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - ≤35	- - ≤35	- - ≤35	- - ≤35	- - 36 min	- - 36 min	- - 36 min	- - 36 min
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											
Límite líquido Índice de plasticidad	- 6 máx	- NP (1)	- NP (1)	≤40 ≤10	≥41 ≤10	≤40 ≥11	≥41 ≥11	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín (2) 11 mín
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado	Excelente a bueno							Pobre a malo			

Figura 10 Clasificación de suelo según AASHTO

Fuente: NTP 400.019,2002.

DIVISIONES PRINCIPALES			Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO			
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5% ->GW,GP,SW,SP. >12% ->GM,GC,SM,SC. 5 al 12% ->casos límite que requieren usar doble símbolo.	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3		
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.		
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$. Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.		
			GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.		
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3		
			SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.		
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$. Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos que precisan		
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.		
			SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50		ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plásticidad.	
						CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.	
OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.							
Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.						
	CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.						
	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.						
Suelos muy orgánicos		PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.					

Figura 11 Clasificación de suelos según SUCS

Fuente: NTP 400.019,2002.

3.5. 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 5: Límite Líquido

Número de muestra	Lim. Liq. (%)
Muestra n° 01	24.41
Muestra n° 02	24.44
Muestra n° 03	24.39
Muestra n° 04	24.42
Muestra n° 05	24.39
Muestra n° 06	24.36
Promedio	24.4

Lim. Liq.	24.4%
-----------	-------

Tabla 6: Límite Plástico

Número de muestra	Lim. plast. (%)
Muestra n° 01	19.95
Muestra n° 02	15.75
Muestra n° 03	28.6
Muestra n° 04	13.3
Muestra n° 05	16.25
Muestra n° 06	15.05
Promedio	15.75

Lim. Plast.	18.55%
-------------	--------

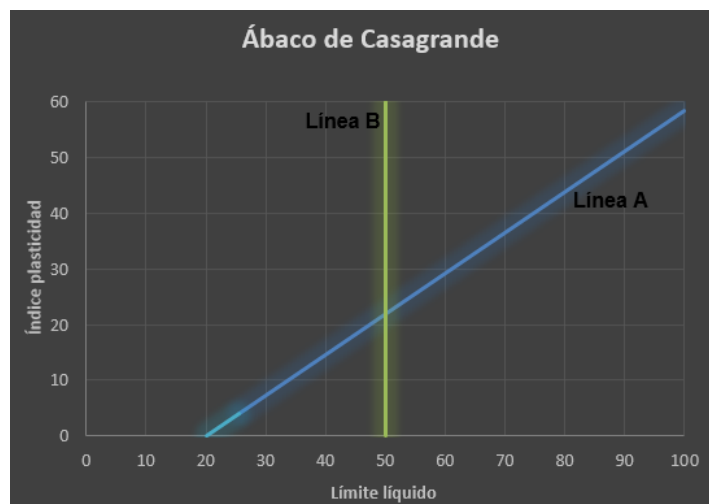


Figura 12 Abaco Casagrande para índice de plasticidad

3.6. Resistencia a Abrasión:

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

Tabla 7: Resistencia a la Abrasión

Número de muestra	Abrasión (%)
Muestra n° 01	26.21
Muestra n° 02	26.18
Muestra n° 03	26.23
Muestra n° 04	26.19
Muestra n° 05	26.18
Muestra n° 06	26.21
Promedio	26.20

Abrasión	26.20%
----------	--------

3.7. 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.

Tabla 8: Proctor Modificado 56 golpes

RESUMEN					
W promedio (%)	1.50	2.02	3.75	4.74	5.57
Densidad Seca (Cm³)	1.77	1.79	1.81	1.79	1.77

Densidad máxima =	1.81 gr/cm³
Humedad óptima =	3.65 %

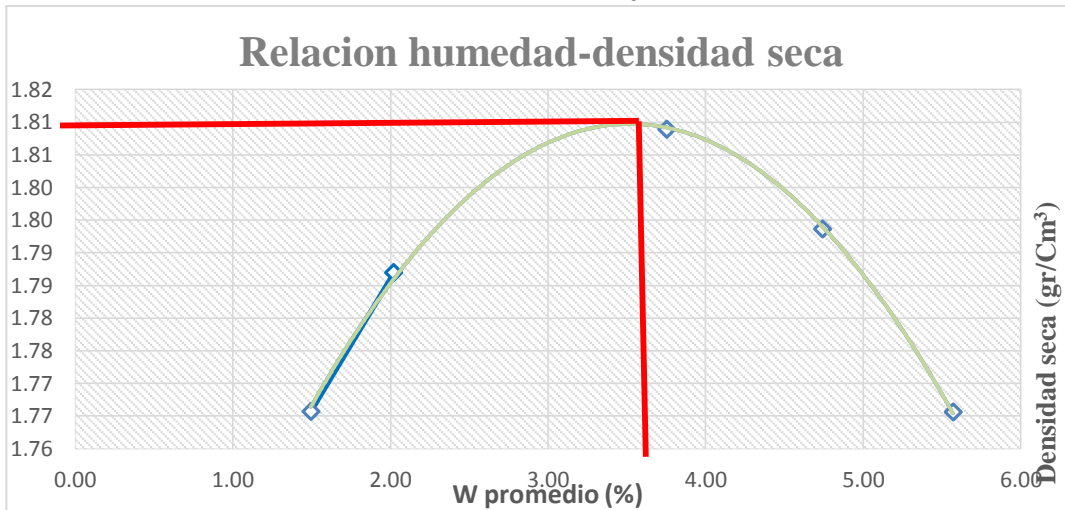


Figura 13 Curva de compactación 56 golpes

Tabla 9: Proctor Modificado 57 golpes

RESUMEN					
W promedio (%)	1.52	2.16	3.86	4.42	5.57
Densidad Seca (Cm³)	1.77	1.79	1.81	1.80	1.77

Densidad máxima =	1.81 gr/cm ³
Humedad óptima =	3.6 %

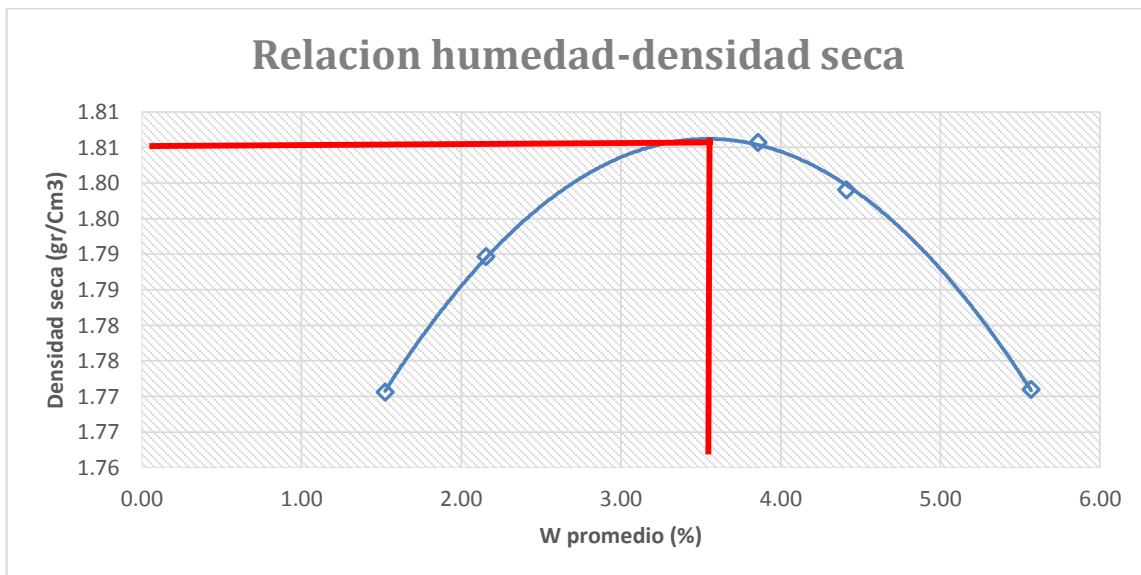


Figura 14 Curva de compactación 57 golpes

Tabla 10: Proctor Modificado 58 golpes

RESUMEN					
W promedio (%)	1.71	2.26	4.07	2.83	5.74
Densidad Seca (Cm³)	1.79	1.82	1.84	1.84	1.75

Densidad máxima =	1.84	gr/cm³
Humedad óptima =	3.45	%

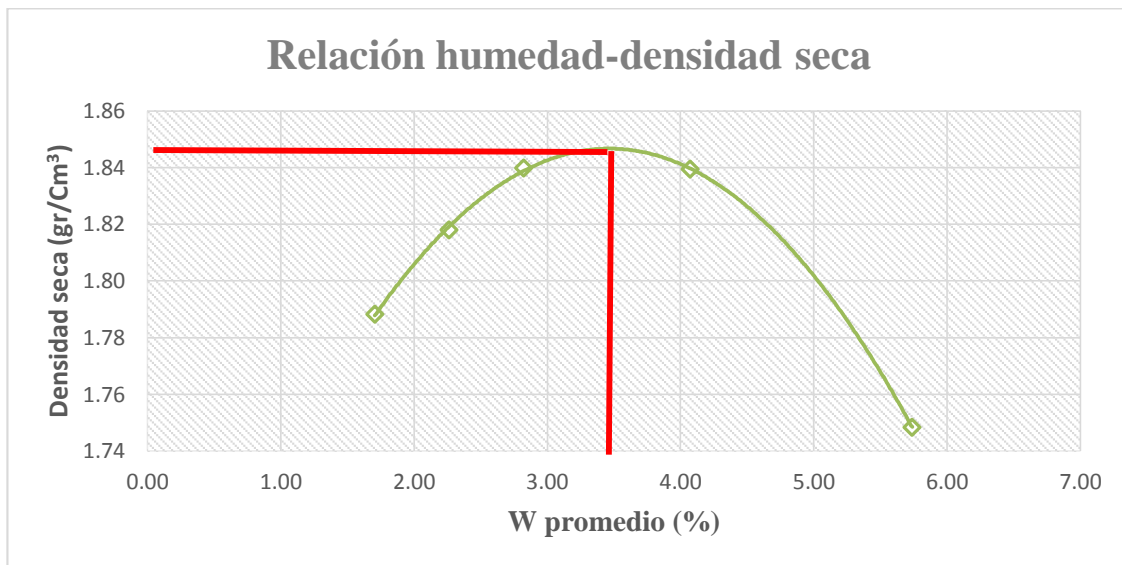


Figura 15 Curva de compactación 58 golpes

Tabla 11: Proctor Modificado 59 golpes

RESUMEN					
W promedio (%)	1.42	2.27	3.31	4.59	5.33
Densidad Seca (Cm³)	1.97	1.99	1.99	1.97	1.96

Densidad máxima =	1.99	gr/cm³
Humedad óptima =	3.38	%

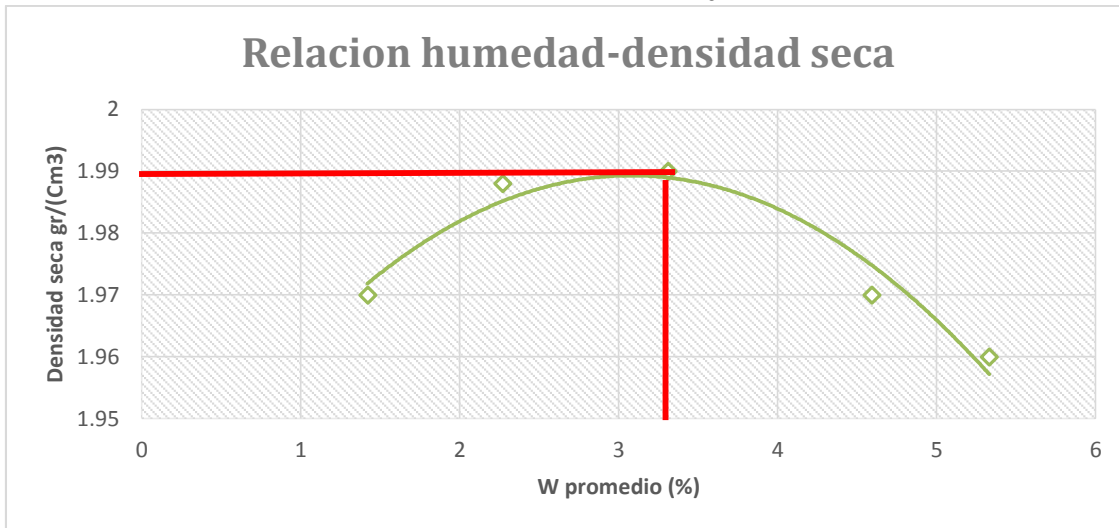


Figura 16 Curva de compactación 59 golpes

Tabla 12: Proctor Modificado 60 golpes

60 GOLPES					
RESUMEN					
W promedio (%)	2.32	2.81	4.70	5.92	3.18
Densidad Seca (Cm³)	1.86	1.88	1.88	1.85	1.88

Densidad máxima =	1.89	gr/cm³
Humedad óptima =	3.90	%

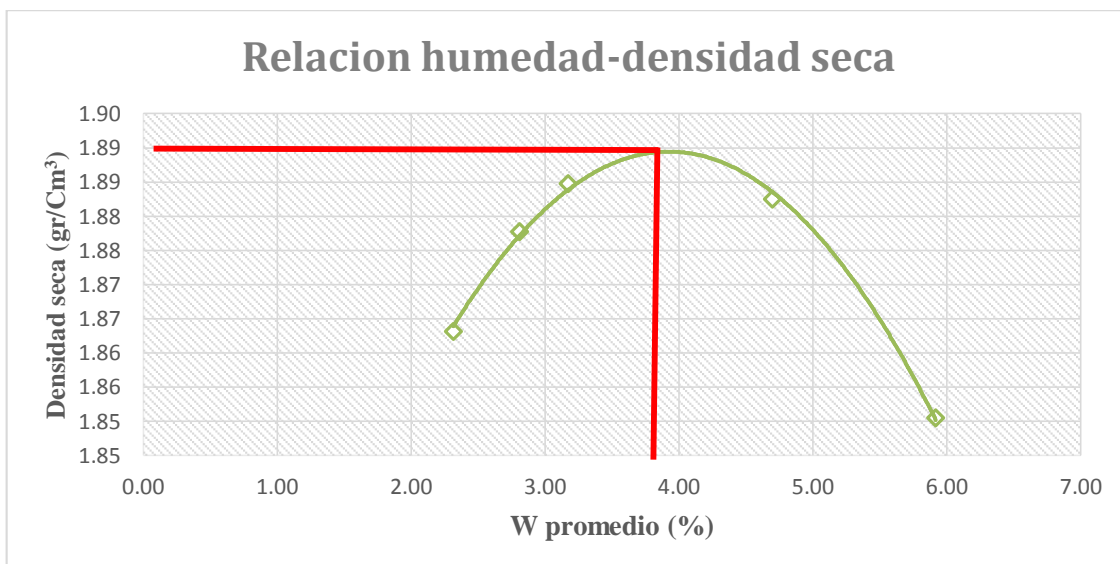


Figura 17 Curva de compactación 60 golpes

Tabla 13: Proctor Modificado 61 golpes

RESUMEN					
W promedio (%)	3.08	4.18	5.89	6.81	8.49
Densidad Seca (Cm³)	1.87	1.88	1.87	1.84	1.77
Densidad máxima	=	1.88	gr/cm³		
Humedad óptima	=	4.50	%		

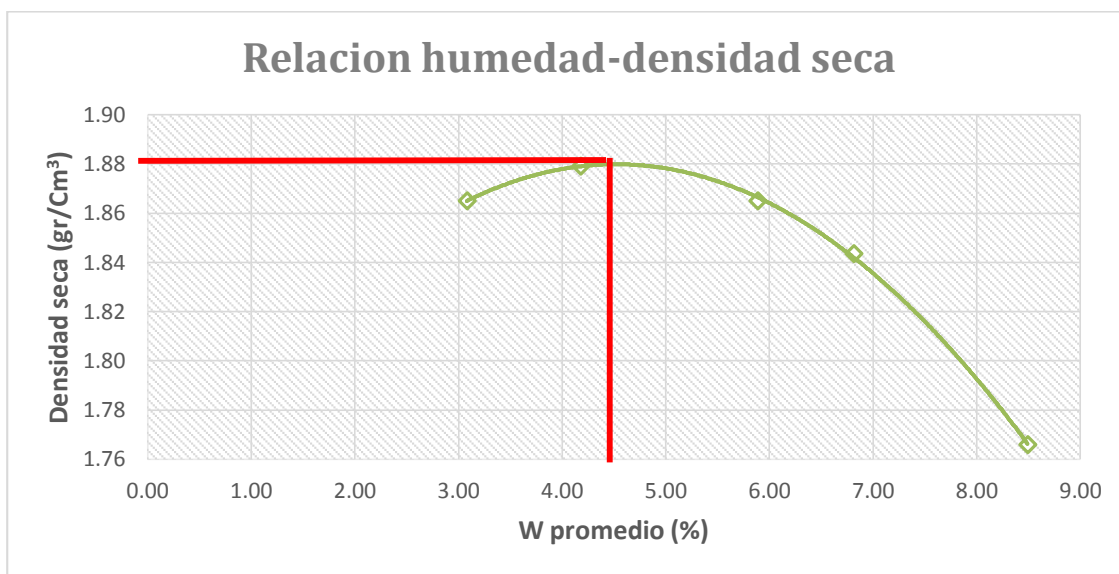


Figura 18 Curva de compactación 61 golpes

Ecuación 5: Energía de compactación

$$E = \frac{N * n * w * h}{V}$$

E: Energía específica de compactación, N: número de golpes por capa, n: número de capas, W: peso pistón, H: altura, V: volumen.

Tabla 14: Relación de la energía de compactación con la máxima densidad seca y el contenido óptimo de humedad

Nº Ensayo	Nº golpe/ capa	E. comp.	Ds. Máx.	Wóp. (%)
1	56	27.27 (kg-cm/cm ³)	1.81 (gr/cm ³)	3.65 (%)
2	57	27.75 (kg-cm/cm ³)	1.81 (gr/cm ³)	3.60 (%)
3	58	28.24 (kg-cm/cm ³)	1.84 (gr/cm ³)	3.45 (%)

4	59	28.73 (kg-cm/cm ³)	1.98 (gr/cm ³)	3.38 (%)
5	60	29.22 (kg-cm/cm ³)	1.89 (gr/cm ³)	3.90 (%)
6	61	29.70 (kg-cm/cm ³)	1.88 (gr/cm ³)	4.50 (%)

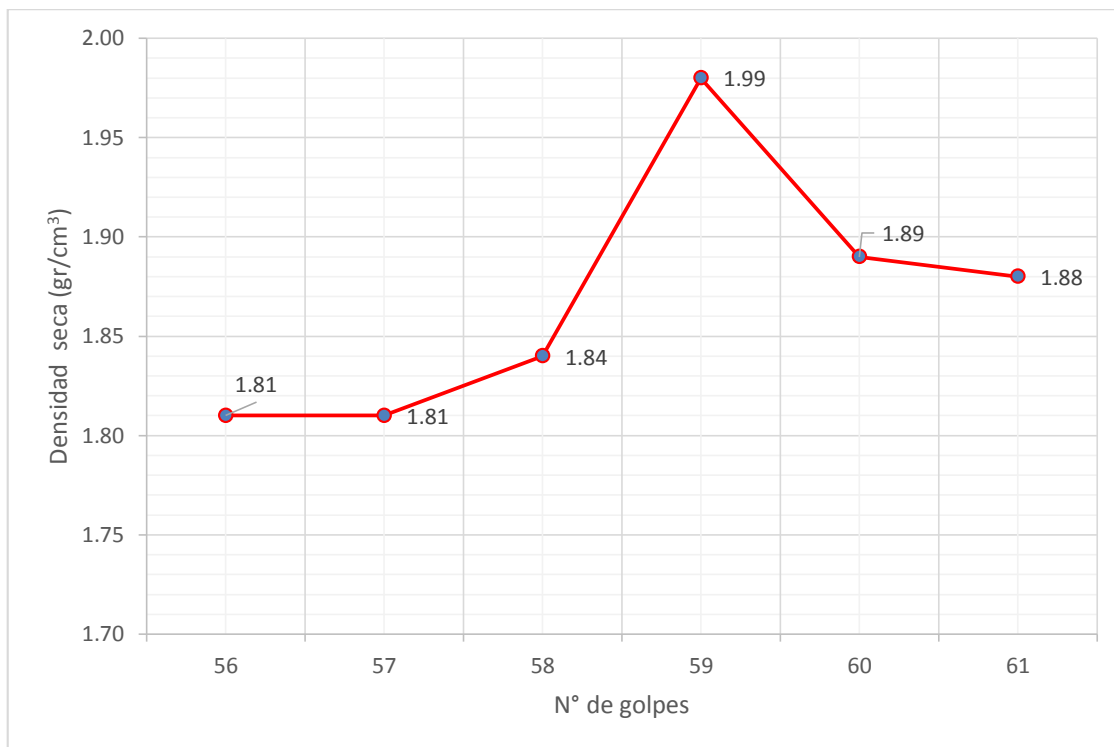


Figura 19 Densidad seca versus número de golpes

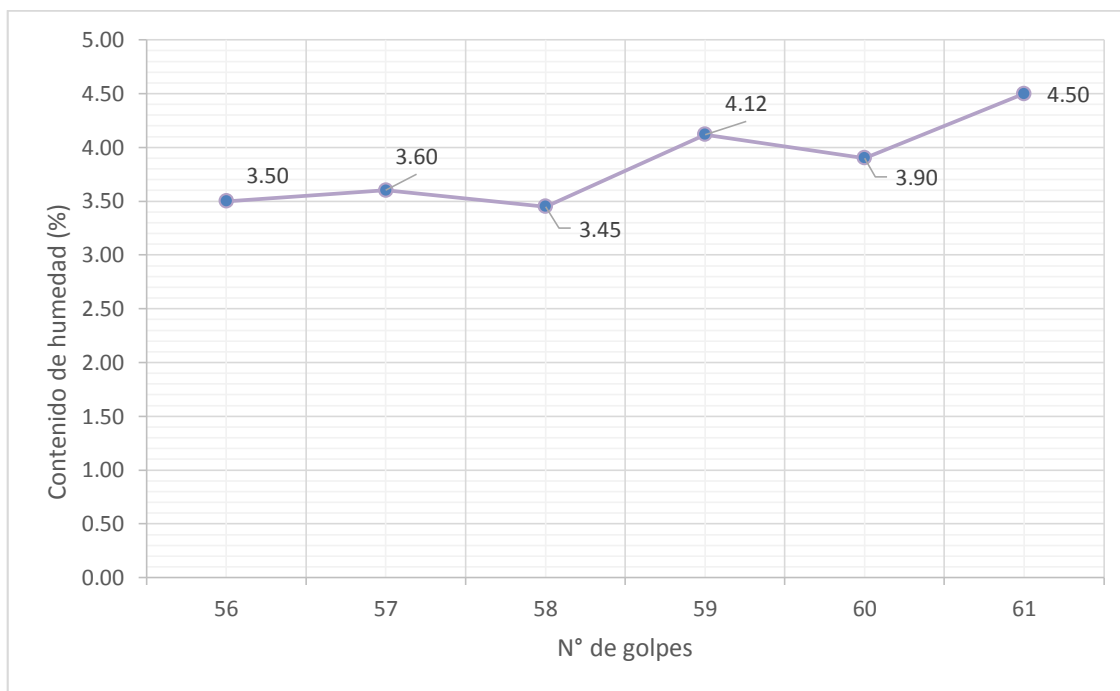


Figura 20 Contenido de humedad versus número de golpes

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

4.1.1. Limitaciones:

Una de las limitaciones que se pudo determinar fue la falta de información acerca de estudios realizados con suelos granulares para la aplicación de mejoramiento de fundaciones de estructuras, estabilidad de taludes y en pavimentos, en la localidad de Cajamarca, ya que si hubiera antecedentes sobre suelos analizados se podría obtener unos parámetros para corroborar si los suelos granulares son usados correctamente y saber si su calidad es óptima para su uso.

Así mismo la investigación se limitó a analizar un suelo granular ya que en Cajamarca netamente no se tiene información acerca de la capacidad que puede tener un suelo granular, es decir no se sabe con exactitud cuanto podría resistir dicho suelo para alcanzar su máxima capacidad portante, antes de empezar a fallar (presentar fracturas o agrietarse), por lo que se optó por realizar dicho estudio para que talvez se pueda tener como base de datos y posteriormente establecer unos parámetros para dichos suelos en Cajamarca.

4.1.2. Discusión con otras investigaciones

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 (2018) 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 MTC(2017), 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 (2013) realizada en la cantera Apalín, en la que se obtiene una energía de compactación máxima de 30.15 kg-cm/cm³ (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/cm³ (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 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” (2020) 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/cm³.

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.

En esta investigación se realizó el ensayo de resistencia a la abrasión para poder ver si dicho suelo estaba entre los parámetros establecidos en la norma del MTC E 207 la cual indica un porcentaje de desgaste menor al 30% para que pueda cumplir con su función, en esta investigación se obtuvo una resistencia a la abrasión de 26.2%, a comparación de otras investigaciones en las cuales no se realizó dicho ensayo por lo que no se puede corroborar si su suelo tiene una menor o mayor resistencia al desgaste.

4.1.3. Implicancias

La influencia de este estudio en la ingeniería civil, es de manera vital, ya que el suelo debe de ser funcional en los proyectos de ingeniería ya sea cuando conforma taludes de corte y de terraplenes, y su funcionalidad se vincula con la conservación de la humedad y de la plasticidad para soportar la vegetación que lo protege y conservar sus cualidades que permiten la estabilidad del talud, o cuando el proyecto trata netamente

sobre pavimentos o vías de acceso y se tienen que realizar distintos ensayos cuando el suelo es granular o cohesivo o del mismo modo cuando el suelo sea para fundaciones de edificaciones.

Como se puede observar en las gráficas la energía de compactación tiene gran influencia respecto a las variaciones de las densidades secas lo que quiere decir que mientras mayor sea la energía de compactación, más eficaz será la eliminación de espacios vacíos, pero como se puede observar que si seguimos aumentando la energía de compactación pasado los 59 golpes la densidad tiende a disminuir para este tipo de suelo granular y el contenido de humedad no varía significativamente, por lo que se llega a entender de que un suelo granular difiere con respecto a los suelos cohesivos, ya que no contiene una granulometría uniforme y por ende tiene una uniformidad de partículas.

4.2. Conclusiones

1. Se logró determinar la influencia de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad del suelo granular de la cantera Agocucho – Cajamarca; obteniéndose una densidad seca máxima de 1.98 gr/cm^3 mientras que el óptimo contenido de humedad fue de 3.38 %, con lo que podemos determinar que este tipo de suelo alcanza su densidad máxima a los 59 golpes (28.73 kg-cm/cm^3), ya que si se sigue aumentando los golpes la resistencia va a tender a disminuir (Tabla 13 y gráfico 9) por lo cual podemos corroborar que los suelos tienen una energía máxima de compactación que debe tenerse en cuenta en los procesos constructivos para alcanzar su máxima capacidad y evitar la disminución por exceso de energía de compactación; de la misma manera se puede corroborar 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^3 hasta 29 kg-cm/cm^3 , por lo que

se determina que este tipo de suelo podría servir para posteriores mejorías de suelos; demostrando que la hipótesis planteada fue correcta y la hipótesis si se cumplió.

2. Se logró determinar las propiedades físico – mecánicas del suelo granular de la cantera Agocucho obteniéndose un contenido de humedad de 1.18% (Tabla 2 y 3), peso específico promedio de 2.518 gr/cm^3 , limite liquido de 24.4% (Tabla 7), limite plástico de 18.15% (Tabla 8), índice de plasticidad de 8.65% y una abrasión promedio de 26.20% (Tabla 9).
3. La energía de compactación durante la realización de los ensayos fue desde 27.27 kg-cm/cm³ hasta los 29.70 kg-cm/cm³ según la tabla N° 3, la cual fue hallada por fórmula según especifica la norma técnica, siendo la energía necesaria de 28.73 kg-cm/cm³ para poder determinar los valores de la densidad seca máxima y el óptimo contenido de humedad.
4. Si la energía de compactación es mayor a 28.73 kg-cm/cm³ (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 13).
5. Al realizarse dichos ensayos se determinó que los valores de óptimo contenido de humedad aumentan 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/cm³ (59 golpes), lo que corresponde a la densidad seca máxima.
6. 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.

REFERENCIAS

- ASTM D-1557. (2000). Proctor Modificado. West Conshohocken: ASTM.
- Borfitz, H. (2008). Preparacion de muestras y ensayos de compactacion. Costa rica: Instituto tecnologico de Costa Rica.
- Crespo, C. (2004). Mecanica de suelos y cimentaciones. México: UNAM.
- Escario, U. (1989). Terraplenes y pedraplenes. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transporte.
- Escobar, C. (2007). Mecanica de Suelos. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Georges, A. (2004). Compactación en carreteras y aeropuertos. Barcelona: Tecnicos Asociados.
- González, J. C. (2013). Incidencia de Resultados del ensayo Proctor Modificado por la Influencia del Clima. México: UNAM.
- Hurtado, G. (2012). Proctor Modificado por la Influencia de la energia de compactacion. México: Universidad La Salle.
- ICCE S-234. (2012). Mecanica de suelos y cimentaciones. España: Universidad de Zaragoza.
- Jorajuria, D. (2004). Resistencia mecanica del suelo como parametro mecanico del suelo. Buenos Aires: Lumen.
- Juárez, E. (2014). Fundamentos de la Mecánica de Suelos. México: Limusa.
- Lizcano, A. (2007). Principios de la ingenieria de cimentaciones, California.
- López, W. (2011). slideshare. Recuperado el 15 de 09 de 2016, de <http://es.slideshare.net/wlopezaltarza/compactacion-de-suelos>

- Parano, J. (2013). *Compatación de Suelos y Materiales Estabilizados*. México: UNAM.
- Pérez, J. (2014). *Introduccion a la Mecánica de Suelos*. La Coruña: Universidad La Coruña.
- Pérez, V. (2002). *Materiales y procedimientos de construccion*. Chile: PUCV.
- Ruíz, C. (2005). *Mecanismo de Compatación de Suelos*. Mar de Plata: EUBEDA.
- Sagués, P. (2008). *Propiedades de los Suelos Compactados*. Buenos Aires: LMS-FIUBA.
- Sagués, P. (2008). *Tesis: Rigidez a baja deformación en el Pampeado Compactado*. Buenos Aires: FIUBA.
- ASTM D-1557. (2000). *Proctor Modificado*. West Conshohocken: ASTM.
- Badillo, J. (2014). *Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: Limusa.
- Escario, U. (1989). *Terraplenes y pedraplenes*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transporte.
- Escobar, C. (2007). *Mecanida de Suelos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Georges, A. (2004). *Compactación en carreteras y aeropuertos*. Barcelona: Tecnicos Asociados.
- González, J. C. (2013). *Incidencia de Resultados del ensayo Proctor Modificado por la Influencia del Clima*. México: UNAM.
- Jorajuria, D. (2004). *Resistencia mecanica del suelo como parametro mecanico del suelo*. Buenos Aires: Lumen.
- López, W. (2011). *slideshare*. Recuperado el 15 de 09 de 2016, de <http://es.slideshare.net/wlopezaltarza/compactacion-de-suelos>
- NTP339.185. (2002). *Contenido de humedad del agregado fino y grueso*. Lima, Perú.
- NTP400.012. (2001). *AGREGADOS, Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global*. Lima, Perú.
- NTP400.017. (1999). *Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado* . Lima, Perú
- 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.

NTP400.021. (2002). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción de agregado grueso*. Lima, Perú.

Parano, J. (2012). *Compactación de Suelos y Materiales Estabilizados*. México: UNAM.

Pérez, J. (2014). *Introducción a la Mecánica de Suelos*. La Coruña: Universidad La Coruña.

Ruíz, C. (2005). *Mecanismo de Compactación de Suelos*. Mar de Plata: EUBEDA.

Sagués, P. (2008). *Propiedades de los Suelos Compactados*. Buenos Aires: LMS-FIUBA.

Sagués, P. (2008). *Tesis: Rigidez a baja deformación en el Pampeado Compactado*. Buenos Aires: FIUBA.

Sánchez, V. (1996). *Dinámica y Mecánica de Suelos*. Madrid: Ediciones.

Sowers, G. (2014). *Introducción a la Mecánica de los Suelos y Cimentación*. Madrid: LImusa-Wiley.

Yepes, V. (2004). *Compactación Dinámica y control con ensayos de penetración Dinámica*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

Sowers, G. (2014). *Introducción a la Mecánica de los Suelos y Cimentación*. Madrid: LImusa-Wiley.

Yepes, V. (2004). *Compactación Dinámica y control con ensayos de penetración Dinámica*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

Winterkorna, M. (2007). *Conceptos generales de mecánica de suelos*. Santiago: Universidad de Chile.

ANEXOS

Tabla 15: Granulometría

Malla	Abertura	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
2 1/2	63.5	-	-	-	-
2	50.00	-	-	-	-
1 1/2	37.5	-	-	-	-
1	25.0	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4	19.0	874.60	10.26	10.26	89.74
1/2	12.7	2426.70	28.48	38.74	61.26
3/8	9.5	1958.10	22.98	61.72	38.28
Nº 4	4.75	1073.90	12.60	74.32	25.68
Nº 10	2.0	283.80	3.33	77.65	22.35
Nº 20	0.875	132.40	1.55	79.20	20.80
Nº 40	0.425	834.30	9.70	88.99	11.01
Nº 60	0.25	455.10	5.34	94.33	5.67
Nº 100	0.15	232.10	2.72	97.05	2.95
Nº 200	0.075	94.30	1.11	98.16	1.84
	<200	156.90	1.84	100.00	0.00

PESO TOTAL DE LA MUESTRA

8522.00 gr.

Tabla 16: Contenido de humedad

	Suelo Granular					
Peso de la tara (gr.)	101.4	101.5	101.5	101.3	101.1	102.1
Peso de la muestra humedad + peso de la tara (gr.)	1601.4	1601.5	1601.5	1601.3	1601.1	1602.1
Peso de la muestra secada al horno+ peso de la tara (gr.)	1583.9	1583.7	1582.3	1582.8	1581.9	1583.7

Tabla 17: Peso específico agregado grueso

Peso en el aire de la muestra seca en gramos	3000	3004.3	3012.2	3001.4	3007.5	3004.7
Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca, en gramos	3266.7	3271.6	3288.4	3278.5	3269.7	3267.2
Peso sumergido en agua de la muestra saturada, en gramos	1827.6	1830.4	1831.4	1829.5	1827.9	1828.6

Tabla 18: Peso específico agregado fino

Wo = Peso en el aire de la muestra secada en el horno (gr.)	486.4	486.1	486.5	486.2	485.8	485.8
V = Volumen del frasco en cm ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Va = Peso en gramos o volumen en cm ³ de agua añadida al frasco.	803.6	803.8	803.2	803.6	803.1	802.8

Tabla 19: Límites de plasticidad

<i>Determinación Límite Líquido (LL)</i>				
Ident. Bandeja (N°)	T-02	T-04	L-36	-
Suelo Húmedo + Tara (g)	30.80	29.60	31.10	-
Suelo Seco + Tara (g)	27.70	26.70	27.60	-
Peso de Tara (g)	14.0	14.60	14.50	-
Peso del Agua (g)	3.10	2.90	3.50	-
Peso Suelo Seco (g)	13.7	12.10	13.10	-
Número de Golpes (N)	37	24	13	-
Contenido de Humedad (%)	22.63	23.97	26.72	24.44
<i>Determinación Límite Plástico (PL)</i>				
Ident. Bandeja (N°)	L-27	L-31		-
Suelo Húmedo+ Tara (g)	20.60	21.50		-
Suelo Seco + Tara (g)	19.70	20.60		-
Peso de Tara (g)	14.30	14.50		-
Peso del Agua (g)	0.90	0.90		-
Peso Suelo Seco (g)	5.40	6.10		-
Contenido Humedad (%)	16.7	14.8		-
Promedio Límite Plástico (PL)				15.75

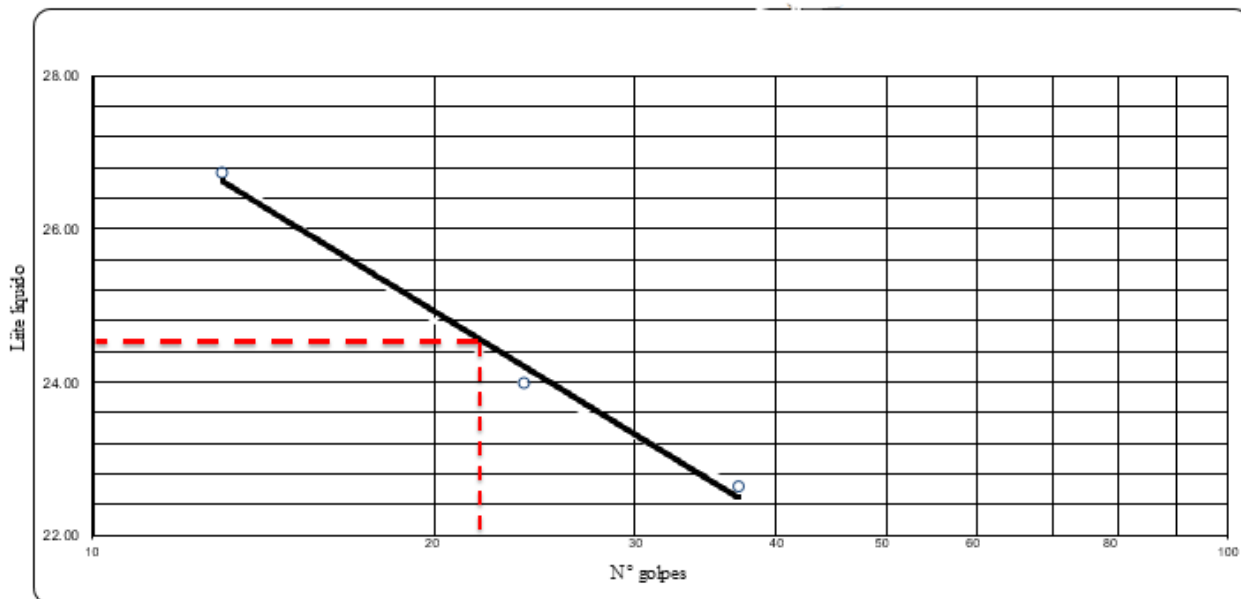


Figura 21 Índice de plasticidad

Tabla 20: Abrasión

Peso muestra seca antes de ensayo gr	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Peso muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz N° 12	3690	3691	3688.5	3690.5	3691	3689.5
Porcentaje de abrasión	26.2	26.18	26.23	26.19	26.18	26.21

Tabla 21: Energía de Compactación mediante Proctor modificado

Proctor modificado 1 con 56 golpes		Proctor modificado 2 con 57 golpes		Proctor modificado 3 con 58 golpes	
N° golpes	56	N° golpes	57	N° golpes	58
N° capas	5	N° capas	5	N° capas	5
W pistón	4.50	W pistón	4.50	W pistón	4.50
H=	45.5	H=	45.5	H=	45.5
Volumen=	2102.48	Volumen=	2102.48	Volumen=	2102.48
E=	27.27	E=	27.75	E=	28.24

Proctor modificado 4 con 59 golpes		Proctor modificado 5 con 60 golpes		Proctor modificado 6 con 61 golpes	
N° golpes	59	N° golpes	60	N° golpes	61
N° capas	5	N° capas	5	N° capas	5
W pistón	4.50	W pistón	4.50	W pistón	4.50
H=	45.5	H=	45.5	H=	45.5
Volumen=	2102.48	Volumen=	2102.48	Volumen=	2102.48
E=	28.73	E=	29.22	E=	29.70

E: Energía específica de compactación, N: número de golpes por capa, n: número de capas, W: peso pistón, H: altura, V: volumen.

Tabla 22: Ensayo Proctor modificado por 56 golpes

Molde N°	1		2		3		4		5	
PESO ESPECIFICO										
peso molde	6612		6612		6612		6612		6612	
pmh + molde	10380		10445		10558		10562		10531	
Peso muestra humeda	3768		3833		3946		3950		3919	
Volumen del molde	2102.48		2102.48		2102.48		2102.48		2102.48	
Densidad Humeda	1.79		1.82		1.88		1.88		1.86	
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Peso tara	54.1	65.5	64.1	54.3	48.2	50.1	18.2	18.2	48.3	50.1
Peso humedo+tara	436	444.2	528	501	423	422	250	220	250	220
Peso seco + tara	431	438	520	491	408	410	238	212.2	238	212.2
Pms	376.9	372.5	455.9	436.7	359.8	359.9	219.8	194	189.7	162.1
Peso del agua	5	6.2	8	10	15	12	12	7.8	12	7.8
Contenido de humedad	1.33	1.66	1.75	2.29	4.17	3.33	5.46	4.02	6.33	4.81
W prom	1.50		2.02		3.75		4.74		5.57	
Densidad seca Gr/c.c	1.77		1.79		1.81		1.79		1.77	

Tabla 23: Ensayo Proctor modificado por 57 golpes

Molde N°	1		2		3		4		5	
PESO ESPECIFICO										
peso molde	6612		6612		6612		6612		6612	
pmh + molde	10391.4		10456		10555		10561.6		10542.8	
Peso muestra humeda	3779.4		3844		3943		3949.6		3930.8	
Volumen del molde	2102.48		2102.48		2102.48		2102.48		2102.48	
Densidad Humeda	1.80		1.83		1.88		1.88		1.87	
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Peso tara	48.2	52.2	48.1	54.3	48.2	50.7	47.4	54.3	48.3	50.1
Peso humedo+tara	423	430.3	508	482.4	405	404.5	350	228	250	220
Peso seco + tara	418	424	499	472.7	390.6	392.5	338	220.2	238	212.2
Pms	369.8	371.8	450.9	418.4	342.4	341.8	290.6	165.9	189.7	162.1
Peso del agua	5	6.3	9	9.7	14.4	12	12	7.8	12	7.8
Contenido de humedad	1.35	1.69	2.00	2.32	4.21	3.51	4.13	4.70	6.33	4.81
W prom	1.52		2.16		3.86		4.42		5.57	
Densidad seca Gr/c.c	1.77		1.79		1.81		1.80		1.77	

Tabla 24: Ensayo Proctor modificado por 58 golpes

Molde N°	1		2		3		4		5	
PESO ESPECIFICO										
peso molde	6612		6612		6612		6612		6612	
pmh + molde	10436		10521		10637		10589.6		10499	
Peso muestra humeda	3824		3909		4025		3977.6		3887	
Volumen del molde	2102.48		2102.48		2102.48		2102.48		2102.48	
Densidad Humeda	1.82		1.86		1.91		1.89		1.85	
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Peso tara	38.8	42.3	54	54.3	42.3	53.8	28.4	36.4	48.3	54
Peso humedo+tara	331	407.4	417	453.3	433	295	324.3	220	246	232
Peso seco + tara	326	401.4	411.7	441.5	417	286	319.9	212.7	234	223.5
Pms	287.2	359.1	357.7	387.2	374.7	232.2	291.5	176.3	185.7	169.5
Peso del agua	5	6	5.3	11.8	16	9	4.4	7.3	12	8.5
Contenido de humedad	1.74	1.67	1.48	3.05	4.27	3.88	1.51	4.14	6.46	5.01
W prom	1.71		2.26		4.07		2.83		5.74	
Densidad seca Gr/c.c	1.79		1.82		1.84		1.84		1.75	

Tabla 25: Ensayo Proctor modificado por 59 golpes

Molde N°	1		2		3		4		5	
Peso molde	6612		6612		6612		6612		6612	
pmh + molde	10754.5		10801.8		10788.4		10758.7		10756.7	
Peso muestra humeda	4142.5		4189.8		4176.4		4146.7		4144.7	
Volumen del molde	2101.48		2102.48		2102.48		2102.48		2102.48	
Densidad humeda	1.97		2.01		2.03		2.05		2.07	
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Peso tara	38	38	85	75.5	38	38	38	38	38	38
Peso humedo + tara	253.6	284.1	456.2	429.5	239.7	256.2	284	279	284.1	279.1
Peso seco + tara	250.7	280.5	447.8	421.8	233.5	249.4	275.3	266.8	271.2	267.3
Pms	2.9	3.6	8.4	7.7	6.2	6.8	8.7	12.2	12.9	11.8
Peso del agua	212.7	242.5	364.2	346.2	184.1	210.6	227.3	228.2	234.1	229.1
Contenido de humedad	1.36	1.48	2.31	2.22	3.37	3.25	3.83	5.35	5.51	5.15
W prom	1.42		2.27		3.31		4.59		5.33	
Densidad seca Gr/cc	1.97		1.99		1.99		1.97		1.96	

Tabla 26: Ensayo Proctor modificado por 60 golpes

Molde N°	1		2		3		4		5	
PESO ESPECIFICO										
peso molde	6612		6612		6612		6612		6612	
pmh + molde	10620		10671		10756		10733		10700.6	
Peso muestra humeda	4008		4059		4144		4121		4088.6	
Volumen del molde	2102.48		2102.48		2102.48		2102.48		2102.48	
Densidad Humeda	1.91		1.93		1.97		1.96		1.94	
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Peso tara	74.1	85.5	84	74	68	70	38	38	48.3	50.1
Peso humedo+tara	225	286.3	336.4	389	323	432	286	220	376	220
Peso seco + tara	222	281.2	329	381	306	424	269	212.2	369	213.2
Pms	147.9	195.7	245	307	238	354	231	174.2	320.7	163.1
Peso del agua	3	5.1	7.4	8	17	8	17	7.8	7	6.8
Contenido de humedad	2.03	2.61	3.02	2.61	7.14	2.26	7.36	4.48	2.18	4.17
W prom	2.32		2.81		4.70		5.92		3.18	
Densidad seca Gr/c.c	1.86		1.88		1.88		1.85		1.88	

Tabla 27: Ensayo Proctor modificado por 61 golpes

Molde N°	1		2		3		4		4	
PESO ESPECIFICO										
peso molde	6612		6612		6612		6612		6612	
pmh + molde	10658		10732		10768		10756		10644	
Peso muestra humeda	4046		4120		4156		4144		4032	
Volumen del molde	2104.48		2104.48		2104.48		2104.48		2104.48	
Densidad Humeda	1.92		1.96		1.97		1.97		1.92	
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Peso tara	75.5	38	38	74	68	70	75.5	38	85.3	74.2
Peso humedo+tara	319	336	435	497	325	335	251	222	250	235.7
Peso seco + tara	311.8	327	421	478	310	321	238	212.2	238	222.2
Pms	236.3	289	383	404	242	251	162.5	174.2	152.7	148
Peso del agua	7.2	9	14	19	15	14	13	9.8	12	13.5
Contenido de humedad	3.05	3.11	3.66	4.70	6.20	5.58	8.00	5.63	7.86	9.12
W prom	3.08		4.18		5.89		6.81		8.49	
Densidad seca Gr/c.c	1.87		1.88		1.87		1.84		1.77	



Figura 22 Extracción de muestra de cantera Agocucho



Figura 23 Cuarteo Manual



Figura 24 Cuarteo Mecánico



Figura 25 Separación por cuarteo mecánico



Figura 26 Tamizado de suelo granular



Figura 27 Tamizado para ensayo de plasticidad



Figura 28 Taras en horno para contenido de humedad

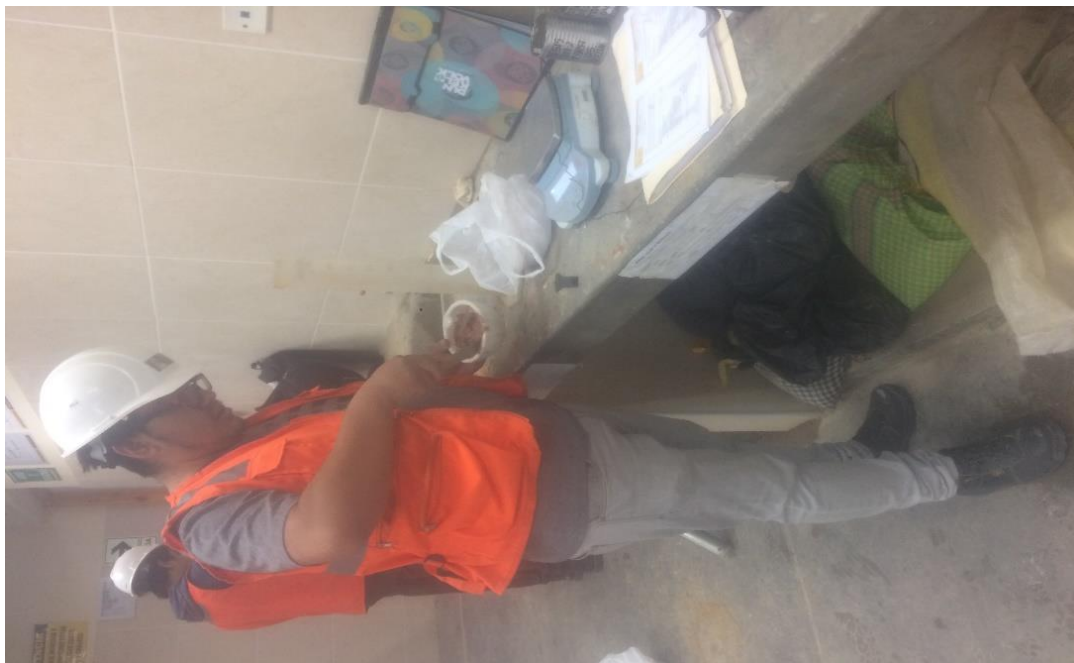


Figura 29 Ensayo Copa de Casagrande



Figura 30 Taras para limite liquido



Figura 31 Limite líquido y limite plástico



Figura 32 Muestra Proctor



Figura 33 Proctor Modificado



Figura 34 Extracción de muestra de proctor modificado