



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

“EFECTO DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EN LA DENSIDAD SECA MÁXIMA Y CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD DEL SUELO GRANULAR DE LA CANTERA EL GAVILÁN, 2015”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Autor:

Juan Carlos Chirinos Quispe

Asesor:

Dra. Ing. Rosa Llique Mondragón

Cajamarca – Perú

2016

APROBACIÓN DE LA TESIS

La asesora y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por el Bachiller **JUAN CARLOS CHIRINOS QUISPE**, denominada:

**“EFECTO DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EN LA DENSIDAD SECA MÁXIMA Y
CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD DEL SUELO GRANULAR DE LA CANTERA EL GAVILÁN”**

Dra. Ing. Rosa Haydee Llique Mondragón
ASESOR

Dr. Ing. Orlando Aguilar Aliaga
PRESIDENTE

Ing. Albertico Aladino Bada Aldave
SECRETARIO

Ing. Martha Gladys Huamán Tanta
VOCAL

DEDICATORIA

A Dios:

Esta tesis se la dedico a mi Dios quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A Mi Familia:

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy. Para mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

Gracias

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad éste sueño anhelado.

A la UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A Mi Director de carrera el Dr. Ing. Orlando Aguilar Aliaga por apoyarme en la revisión y culminación de esta tesis.

A Mi asesora de tesis, Dra. Llique Mondragón Rosa por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar la siguiente tesis con éxito.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

<u>APROBACIÓN DE LA TESIS</u>	2
<u>DEDICATORIA</u>	2
<u>AGRADECIMIENTO</u>	4
<u>ÍNDICE DE CONTENIDOS</u>	5
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	7
<u>ÍNDICE DE GRÁFICOS</u>	7
<u>RESUMEN</u>	9
<u>ABSTRACT</u>	10
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Realidad problemática	11
1.2. Formulación del problema	11
1.3. Justificación	11
1.4. Limitaciones	12
1.5. Objetivos	12
1.5.1. Objetivo general	12
1.5.2. Objetivos específicos	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. Antecedentes	13
2.2. Bases Teóricas	13
2.2.1. Compactación de suelos	13
2.2.2. Trabajo Mecánico o Energía De Compactación	14
2.2.3. Características de los suelos en compactación	14
2.2.4. Implicancia de la variación de la energía de compactación	16
2.2.5. Influencia de la energía de compactación	17
2.2.6. Curva de compactación	18
b. Suelo Saturado	20
c. Suelo Sumergido	20
2.2.7. Factores que influyen en la compactación	22
2.2.8. Propiedades de los Suelos Compactados	28
2.2.9. Ensayo mediante Proctor Modificado	30
2.2.10. Importancia y Uso	33
2.2.11. Beneficios	34
2.2.12. Control de compactación	35
2.3. Definición de términos básicos	36
CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS	38
3.1. Formulación de la hipótesis	38
3.2. Operacionalización de variables	38
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS	39

4.1.	Tipo de diseño de investigación.....	39
4.2.	Material de estudio.....	39
4.2.1.	Unidad de estudio.....	39
4.2.2.	Población.....	39
4.2.3.	Muestra.....	39
4.3.	Técnicas, procedimientos e instrumentos.....	39
4.3.1.	Para recolectar datos.....	39
	Elección de la Cantera.....	39
4.3.2.	Para analizar información.....	43
CAPÍTULO 5. RESULTADOS		44
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN		58
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....		60
CAPÍTULO 8. RECOMENDACIONES.....		61
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS		62
ANEXOS		63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557-91	32
Tabla N° 2. Operacionalización de Variables	38
Tabla N° 3. Resultados Granulometría	44
Tabla N° 4. Energía de Compactación.....	51
Tabla N° 5. Densidad Seca Máxima	52
Tabla N° 6. Contenido de Humedad	54

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1. Curva Proctor	17
Gráfico N° 2. Curva de Compactación	23
Gráfico N° 3. Contenido de humedad vs grado de saturación.....	24
Gráfico N° 4. Curvas de Compactación Proctor Estándar y Modificado	25
Gráfico N° 5. Curvas de Compactación según composición granular	26
Gráfico N° 6. Resistencia Mecánica de Compactación	30
Gráfico N° 7. Curva Proctor Modificado 56 Golpes	45
Gráfico N° 8. Curva de Saturación Proctor Modificado 56 Golpes	45
Gráfico N° 9. Curva Proctor Modificado 57 Golpes	46
Gráfico N° 10. Curva de Saturación Proctor Modificado 57 Golpes	46
Gráfico N° 11. Curva Proctor Modificado 58 Golpes	47
Gráfico N° 12. Curva de Saturación Proctor Modificado 58 Golpes	47
Gráfico N° 13. Curva Proctor Modificado 59 Golpes	48
Gráfico N° 14. Curva de Saturación Proctor Modificado 59 Golpes	48
Gráfico N° 15. Curva Proctor Modificado 60 Golpes	49
Gráfico N° 16. Curva de Saturación Proctor Modificado 60 Golpes	49
Gráfico N° 17. Curva Proctor Modificado 61 Golpes	50
Gráfico N° 18. Curva de Saturación Proctor Modificado 61 Golpes	50
Gráfico N° 19. Crecimiento Energía de Compactación.....	51
Gráfico N° 20. Variación Energía de Compactación.....	52
Gráfico N° 21. Variación Densidad Seca	53
Gráfico N° 22. Variación Ec vs Ds máx.....	54
Gráfico N° 23. Variación Contenido de Humedad	55
Gráfico N° 24. Gráfica Wop	55
Gráfico N° 25. Variación Densidad Seca máxima y óptimo Contenido de Humedad.....	56
Gráfico N° 26. Variación Energía de Compactación.....	57

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía N° 1. Fotografía Satelital, ubicación de la cantera “El Gavilán”	40
Fotografía N° 2. Material de la cantera El Gavilán	63
Fotografía N° 3. Cuarteo del suelo granular	63
Fotografía N° 4. Realización del cuarteo en laboratorio	64
Fotografía N° 5. Muestra cuarteada	64
Fotografía N° 6. Muestra Seleccionada del cuarteo	65
Fotografía N° 7. Realización del análisis granulométrico	65
Fotografía N° 8. Tamizado del material granular	66
Fotografía N° 9. Ensayo granulométrico	66
Fotografía N° 10. Recolección de información	67
Fotografía N° 11. Lavado de finos	67
Fotografía N° 12. Colocación de muestras en el horno	68
Fotografía N° 13. Preparación de muestras	68
Fotografía N° 14. Incorporación del agua en el material granular	69
Fotografía N° 15. Molde de compactación	69
Fotografía N° 16. Realización de ensayo de compactación	70
Fotografía N° 17. Muestra incorporada en el molde de compactación	70
Fotografía N° 18. Extracción de muestra para determinar el contenido de humedad	71

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación N° 1. Determinación del contenido de humedad	21
Ecuación N° 2. Peso específico o densidad	21
Ecuación N° 3. Energía de compactación	33

RESUMEN

La presente investigación tuvo la finalidad de analizar el material proveniente de la cantera El Gavilán con el objetivo de determinar la influencia de la energía de compactación con respecto a la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad. Para el desarrollo de la investigación se realizó los ensayos generales para clasificar el suelo mediante el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), con los resultados del ensayo de granulometría se determinó el método C del tipo de compactación Proctor Modificado para compactar el suelo; en el Proctor Modificado se varió la energía de compactación, empezando con 56 golpes por capa, establecido en la norma técnica ASTM D-1557, hasta los 61 golpes por capa haciendo esta variación de un golpe por cada capa en cada uno de los ensayos realizados. Se determinó que el material granular requiere de una mayor energía de compactación para obtener la densidad seca máxima y el óptimo contenido de humedad con respecto a lo mencionado por la norma técnica ASTM D-1557, determinándose una variación de 0.97 kg/cm² en la energía de compactación. Se concluye que la densidad seca máxima obtenida fue 2.18 gr/cm y el óptimo contenido de humedad de 3.5%, se obtiene con 28.24 kg/cm² de energía de compactación correspondiente a 58 golpes por capa.

ABSTRACT

The following investigation was intended to analyze the material from the quarry The Hawk order to determine the influence of compaction energy with respect to the maximum dry density and optimum moisture content. For the development of research rehearsals we were performed to classify the soil by AASHTO system (American Association of State Highway and Transportation Officials), with assay results grading method C type compaction Modified Proctor was determined to compact the floor in the modified Proctor compaction energy was varied, starting with 56 blows, established in the technical standard, up to 61 strokes per layer by this variation of one stroke for each layer in each of the tests performed by layer. It was determined that the granular material requires more energy compaction for maximum dry density and optimum moisture content relative to that mentioned by the technical ASTM D-1557, determining a variation of 0.97 kg/cm^2 in energy compaction . It is concluded that the maximum dry density obtained was 2.18 g/cm^3 and the optimum moisture content of 3.5%, is obtained with 28.24 kg/cm^2 energy corresponding to 58 strokes per layer compaction.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

A nivel global siempre se ha tenido en cuenta en los proyectos en general la compactación, debido a que es una parte fundamental del desarrollo de los mismos, interviniendo generalmente en el mejoramiento de la capacidad del suelo al eliminar los vacíos que se presenten en él, tomando en cuenta que esta fase deberá ser correctamente realizada ya que al no ser trabajada correctamente podría causar daños que a largo plazo causarían déficit en el resto de los proyectos en general, es por eso por lo que hoy en día existen normas técnicas que se aplican para el proceso de compactación de los materiales a usarse en cada zona (Sánchez, 1996).

En nuestro país generalmente se usa material de las canteras existentes en las diferentes zonas, siendo este material proveniente de las canteras, en la cual a veces éstas no se adecuan a las características requeridas bajo los parámetros de las normas técnicas referentes a la compactación, por lo que al no adecuarse según los descrito por las normas técnicas, no logran desempeñar sus funciones correctamente llevando a que presenten fallas en un tiempo temprano referente a su vida útil.

En nuestro medio se cuenta con diferentes canteras en la Ciudad de Cajamarca, siendo cada tipo de material diferente con respecto a sus características por lo que se optó hacer el análisis de la cantera más explotada en nuestra zona.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto de la energía de compactación en la densidad seca máxima y en el óptimo contenido de humedad del suelo granular de la cantera El Gavilán?

1.3. Justificación

Hoy en día los materiales utilizados con respecto a los proyectos en general no se adecúan con lo establecido por normas referentes a la compactación, siendo su comportamiento diferente a las NTP (Norma Técnica Peruana) y éstos difieren dependiendo del tipo de material a emplear, en nuestro medio generalmente se cuenta con las canteras aledañas a la ciudad de Cajamarca y éstas varían en su óptimo contenido de humedad y densidad seca máxima al realizar los ensayos teniendo como punto de partida la ASTM D-1557 referente a Proctor Modífico.

Por la razón expuesta se realizó la siguiente investigación con el fin de contribuir al análisis del material granular de la cantera seleccionada con respecto a los parámetros de densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad debido a que no se tiene en nuestro medio o se cuenta con algún tipo de investigación similar que conlleve al análisis de la cantera El Gavilán pudiendo así contribuir al conocimiento.

1.4. Limitaciones

El estudio se realizó con material de la cantera El Gavilán y los resultados son válidos sólo para el material mencionado.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la energía de compactación en la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad del suelo granular de la cantera El Gavilán.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Establecer las diferentes energías de compactación variando el número de golpes.
2. Determinar la densidad seca máxima (gr/cc) y el óptimo contenido de humedad (%) variando la energía de compactación mediante el ensayo de Proctor Modificado.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Según Yepes, 2004, estudios realizados en la facultad de Ingeniería en la Universidad Politécnica de Valencia hacen referencia al comportamiento de los materiales para su uso en procesos de relleno en los diferentes tipos de proyectos con la finalidad de determinar el comportamiento variable de éstos a fin de ser aplicados en los distintos proyectos en general de la zona y observar si éstos se adecúan según las características esperadas al ser aplicados a ensayos mediante el cumplimiento de normas técnicas referente a la compactación de suelos, los alcances para este proceso serán establecidos dependiendo del material y la forma de compactación en los proyectos, demostrando que para rellenos o mejoramiento del suelo con respecto a la compactación de suelos se tendrá en cuenta la reproducción de las propiedades de los suelos en laboratorio.

Según Sagués, 2008, para la construcción de terraplenes, rellenos artificiales para caminos y presas entre otros, el suelo se compacta, la compactación disminuye la compresibilidad, aumenta la resistencia y rigidez, mediante la disminución de los vacíos del suelo siendo ésta una fase importante en el desarrollo del estudio de suelos.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Compactación de suelos

La compactación de suelos y materiales estabilizados es el proceso por el cual se obliga a las partículas a ponerse más en contacto unas con otra. Se realiza generalmente por medios mecánicos, produciéndose la expulsión del aire de los poros. La compactación se mide cuantitativamente por la densidad seca del suelo (peso de las partículas sólidas del suelo por unidad de volumen (Escario, 1989).

Proctor, 1933, propone un ensayo empírico de compactación en laboratorio. Para un determinado trabajo de compactación, relaciona la densificación de los suelos con el contenido de humedad. Actualmente tal ensayo se encuentra normalizado con algunas variantes. Permite obtener resultados reproducibles que ofrecen la posibilidad de emplearlos como referencia de control de densificación en obra (Escario, 1989).

Existen varias 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 (Badillo, 2014).

La compactación o reducción de la relación de vacíos se produce de varias maneras tales como la reordenación de las partículas, fractura de los granos o de las ligaduras entre ellos seguida por reordenación y la flexión o distorsión de las partículas y sus capas absorbidas. La energía que se gasta en este proceso es suministrada por el esfuerzo de compactación de la máquina de compactar. La eficacia de la energía gastada depende del tipo de partículas que componen el suelo y de la manera como se aplica el esfuerzo de compactación (Georges, 2004).

2.2.2. Trabajo Mecánico o 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 primer 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, 2012).

2.2.3. Características de los suelos en compactación

Los factores inherentes al suelo que condicionan la compactación, están vinculados a las características de las partículas siendo éstas las siguientes:

a. Forma de las Partículas

La forma de las partículas de los suelos se aparta en distinto grado de la esférica y en consecuencia también de la de los anillos de agua en cada contacto. Simples consideraciones geométricas, indican que la superficie

contactada para un mismo volumen de partículas, será tanto mayor cuando la forma de las partículas se aparte más de la esférica (Jorajuria, 2004).

b. Textura de las Partículas del Suelo

La textura de la superficie de las partículas condiciona el coeficiente de fricción entre las mismas y por ende la acción de un esfuerzo exterior destinado a lograr la densificación (Sagués, 2008) .

c. Orientación relativa de las partículas

La orientación relativa de las partículas incide en la forma de los anillos de agua. Por otra parte, dependerá de la forma de entrega de la energía de compactación, (golpes, amasado, presión estática, etc.). Cuanto mayor sea el paralelismo en su distribución, mayores serán los puntos de contacto y por ende la cantidad de anillos de agua que se formen (Sagués, 2008).

d. Distribución de los tamaños del suelo

Para un mismo volumen sólido y forma de las partículas una granulometría bien graduada, provee mayor número de contactos que en una granulometría uniforme. A mayor uniformidad de tamaños, el contenido de humedad tiene menor influencia en la compactación, lo que se evidencia en curvas de forma más achatada comparativamente con suelos similares mejor graduados granulométricamente (Sagués, 2008).

e. Actividad Superficial de las Partículas del Suelo

Las fracciones finas son superficialmente activas, por lo tanto capaces de retener e inmovilizar el agua por adsorción (orientación polar). Ésta actúa como un incremento de su volumen sólido real. El agua está retenida por energías muy elevadas y la de contactos sólo puede existir, cuando el contenido de humedad supera el necesario para saturar la capacidad de absorción propia de cada suelo (Sagués, 2008).

2.2.4. Implicancia de la variación de la energía de compactación

Dependiendo de la energía de compactación a utilizarse teniendo en cuenta el tipo de suelo sobre el cual se realizará el proceso de compactación mediante métodos establecidos por normas se tendrá en cuenta el tipo de material a ensayar ya que cada muestra de suelo dependiendo de su composición, necesitará más energía dependiendo su resistencia mecánica siendo el caso de los suelos que no presenten material granular éstos cumplirán con lo establecido por las normas ASTM siempre teniendo en cuenta la granulometría del material a emplear dependiendo de las características del suelo siendo suelos granulares o suelos finos (Ruíz, 2005).

a. Suelos granulares

La resistencia mecánica puede incrementarse al aumentar la energía de compactación, elevando el punto de densidad máxima. En los suelos granulares dará lugar a una curva de resistencia también más elevada, motivado en su menor sensibilidad a la acción del agua. Por este motivo, es habitual que los suelos granulares se compacten con mayor energía que los cohesivos (Sánchez, 1996).

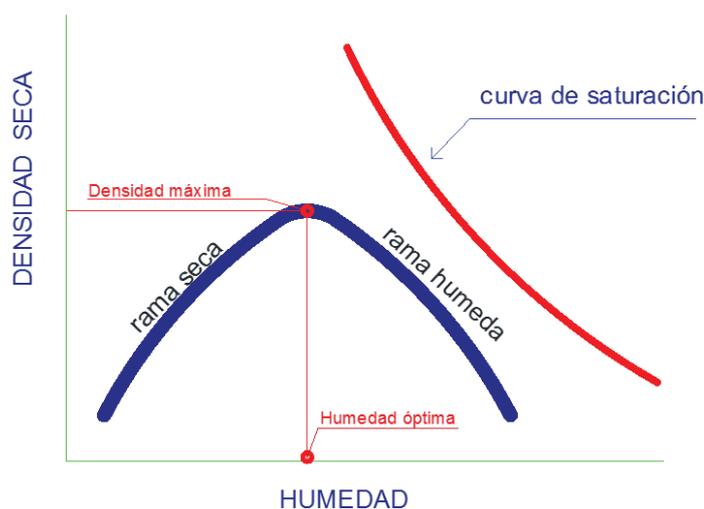
b. Suelos finos cohesivos

Son suelos que poseen características de cohesión y plasticidad. Dichos suelos pueden ser granulares con parte de arcilla o limo orgánico, que les importen cohesión y plasticidad o pueden ser arcillas o limos orgánicos sin componentes granulares. No ocurre lo propio con los suelos arcillosos donde la resistencia al corte es preponderantemente cohesiva. La tendencia de los materiales arcillosos a hincharse, si son de naturaleza expansiva, originan un aumento de volumen del conjunto de las partículas. En consecuencia, se puede alcanzar la saturación con una disminución apreciable de la densidad seca. Si el material es sometido a un proceso de secado, no se verifica una recuperación de la densidad seca inicial. Sobreviene un mecanismo de fisura por retracción del suelo. En servicio, el resultado final de una serie de ciclos de humedecimiento y secado, lleva al suelo a fluctuar en un entorno de densidad seca y humedad acotados. A ambos entornos se lo suele asociar con la humedad y densidad de equilibrio. Los mismos dependerán de factores tales como la carga exterior a que está sometido, las características expansivas de los materiales arcillosos interpuestos entre los granos, la permeabilidad del material. Además, depende del tiempo en que actúan

y que tardan en ponerse en acción cada uno de los efectos mencionados. Un exceso de densificación en un suelo arcilloso, hará evolucionar la humedad y densidad hasta que se alcance dicho ámbito de equilibrio, donde una arcilla compactada con una elevada energía, evoluciona hacia el mismo (Escobar, 2007).

En el caso inverso, una insuficiencia de densificación, provocará la consolidación del material con incremento de la densidad seca. En un terraplén, las condiciones de ingreso y egreso de agua, no son uniformes. Por lo tanto, esta situación puede derivar en expansiones y contracciones irregulares. Esta situación puede manifestarse como deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. Sobre la base de este escenario es que importa poder predecir tal ámbito antes de la construcción, lo que redundará en ventajas técnicas y económicas (Ruíz, 2005).

Gráfico N° 1. Curva Proctor



Fuente: Parano, 2012.

2.2.5. Influencia de la energía de compactación

La realización de ensayos de compactación, implica el esfuerzo de un trabajo mecánico que comprende: número de golpes, altura de caída, peso del pistón, número de capas. Además, está en juego la forma de entrega de esa energía siendo por amasado, impacto y presión estática. 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 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”. La parte descendente se conoce como “rama húmeda” (Sánchez, 1996).

Para un mismo suelo compactado con diferentes energías de compactación, los puntos correspondientes a las densidades máximas, se ordenan sobre una línea marcadamente paralela a la curva de saturación. Además, sus respectivas ramas húmedas, exhiben una considerable coincidencia y paralelismo con la curva de saturación (Sowers, 2014).

2.2.6. Curva de compactación

De los ensayos de compactación en el laboratorio se obtienen las curvas de compactación, las mismas que serán distintivas de cada tipo de suelo estudiado. Estas curvas de compactación son el resultado de graficar, en el eje de las abscisas el contenido de humedad del suelo en porcentaje y en el eje de las ordenadas, la densidad seca, obtenida en los ensayos de compactación (Pérez, 2014).

En la figura se muestra la curva de compactación, en esta gráfica se puede observar que mientras aumenta el contenido de humedad, aumenta también el peso específico seco, hasta un punto en que empieza a decrecer. En este punto, el peso específico seco es el máximo (γ_{dmax}) que se puede obtener en el ensayo de compactación. La abscisa correspondiente a este máximo, representa el contenido óptimo de humedad (w_{op}) (Escario, 1989).

A. Características De La Curva Proctor

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

Antes de comenzar a desarrollarse la rama seca de la curva de compactación, el suelo se encuentra con un contenido muy bajo de humedad. Es el tenor de agua que determina un espesor de película del orden molecular, enérgicamente unida al suelo. Corresponde al agua absorbida y en este estado se considera que el suelo está seco. El suelo debe superar ese umbral de humedad, para que el agua tome el papel de lubricante entre partículas. Hasta que ello no ocurra, la fricción entre los granos impide el deslizamiento de unas partículas sobre las otras y por consiguiente, que se densifique (Escobar, 2007).

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

La rama húmeda será aquella en la cual la curva de compactaciones del suelo se encuentra con el contenido de humedad mayor al óptimo y ésta comienza a decaer en la cual se considera en estado húmedo del suelo y es en ésta donde la curva comienza a decaer para así poder determinar el grado óptimo de humedad de la curva Proctor (Escobar, 2007).

- **Densidad seca máxima y humedad óptima**

La reducción de porosidad y el incremento de la humedad, conducen a un estado límite en el que se forma una red continua de agua. Más allá de cierto contenido de humedad, el agua comienza a tener una continuidad que cierra los poros comunicados. Como consecuencia el aire queda encerrado en forma de burbujas aisladas. Éstas son retenidas en cada poro y no es posible lograr una mayor densificación en el suelo para un mismo trabajo mecánico. A partir de este estado, surge un neto cambio de propiedades por la existencia de un componente perfectamente elástico (aire ocluido). Su presencia implica que la permeabilidad al aire tienda a valores mínimos, dado que las burbujas sólo pueden drenar junto con el agua o bien deslizándose dentro del conjunto (Escobar, 2007).

- **Lubricación y expulsión del aire**

La adición de agua al suelo que se distribuye alrededor de cada contacto, no solamente modifica la composición en volumen, sino que actúa como un lubricante entre partículas. La efectividad del trabajo de compactación, depende de este rol del agua. Alcanzado este efecto, se obliga a las partículas a desplazarse hacia un empaquetamiento más cerrado, que conduce a una reducción de los poros. La presión en la fase fluida obliga al aire a drenar hacia el exterior (González, 2013).

Este proceso ocurre en la medida que existan poros comunicados entre sí y con el exterior. Cada impacto determina un incremento positivo de la presión de poros por compresión del aire. En el comienzo de la rama seca, la permeabilidad al aire es alta y va decreciendo a medida que se aproxima al punto de máxima densidad. La presión que cada impacto provoca en el aire, se disipa rápidamente en tiempos del orden de 1/100 de segundo, más lentamente

cerca del óptimo y no llega a ser total en la rama húmeda. Paralelamente el volumen de agua presente, se subdivide en un número mayor de “anillos” de volumen individual menor. Consecuentemente se desarrollan menores radios de curvatura de los meniscos, que implican mayor succión y cohesión aparente entre partículas (Badillo, 2014).

B. Contenido de humedad y densidad del suelo

1. Contenido de Humedad

El contenido de humedad, es un factor que afectará directamente en la compactación de suelos, siendo así que éstos se encuentran en la naturaleza parcialmente saturada, saturada o sumergida (Jorajuria, 2004).

a. Suelo Parcialmente Saturado

El suelo presenta tres fases: la fase sólida, compuesta por las partículas minerales; la fase líquida compuesta por el agua, pueden existir otros líquidos de menor significación y la fase gaseosa, que ocupa el espacio que la fase líquida deja libre en la porosidad presente en el suelo, compuesta por aire, pueden estar presentes otros gases como el anhídrido carbónico (Escobar, 2007).

b. Suelo Saturado

Se encuentra sobre el nivel freático y todos sus vacíos están ocupados por agua, por lo tanto consta sólo de dos fases, la sólida y la líquida (Escobar, 2007).

c. Suelo Sumergido

Se encuentra bajo el nivel freático por lo tanto todos sus vacíos están ocupados por agua. Un suelo en tal circunstancia consta, sólo de dos fases, la sólida y la líquida (Jorajuria, 2004).

d. Determinación del Contenido de Humedad

En una muestra de suelo, es la relación del peso del agua entre el peso de sólidos en volumen dado de suelo. Se representa con W . Esta propiedad física del suelo es de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están regidos, por la cantidad de agua que contienen. El contenido de humedad de un suelo se determina como la relación que existe entre el peso del agua (W_w) contenida en la

muestra y el peso de su fase sólida (W_s). Se expresa en porcentaje (Sánchez, 2006).

El proceso de la obtención del contenido de humedad de una muestra se hace en laboratorios

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad \text{Ecuación N° 1. Determinación del contenido de humedad}$$

Dónde:

W = contenido de humedad en porcentaje.

W_w = peso del agua.

W_s = peso de sólidos.

2. Peso Específico o Densidad

El poder determinar la densidad que posee un suelo en estado natural o de un terraplén, ha sido siempre un gran reto para los investigadores de mecánica de suelos. Se realiza esta determinación para determinar las relaciones gravimétricas y volumétricas de un suelo en estado natural y para comprobar el grado de compactación en rellenos compactados artificialmente (Sánchez, 1996).

$$Y = \frac{W}{V} \quad \text{Ecuación N° 2. Peso específico o densidad}$$

Donde:

γ = peso específico o densidad.

W = peso del suelo.

V = volumen unitario.

Para determinar la densidad existe dos métodos, cada uno se aplica de acuerdo al tipo de material.

a. Método volumétrico

Éste se utiliza cuando el material es fino, si hay presencia de piedras éstas deben tener un diámetro máximo de 1/10 del diámetro del muestreador (Sowers, 2014).

Material

Muestra inalterada del estrato en estudio

Equipo

Balanza con aproximación de 0.01 gr.

Molde cilindro de acero de 4cm de diámetro y 6 cm. de altura.

Extractor de muestra.

Espátula.

Procedimiento

Determinar el peso (W_c), el diámetro (F) y la altura (h) del muestreador cilíndrico.

Extraer la muestra inalterada del estrato en estudio, con el molde cilíndrico, enraizar con la espátula y pesar ($W_m + c$).

Determinar el peso de la muestra inalterada $W_m = (W_m + c) - W_c$.

Determinar el volumen del molde cilíndrico (V_c), el cual es el volumen de la muestra (V_m).

b. Método de reemplazo de arena

En el caso de suelos sin cohesión (gravas y arenas), los cuales, por lo general no permiten obtener muestras inalteradas, la densidad se determina con métodos indirectos, entre ellos el cono de arena, el cual consiste en realizar un orificio en el suelo, determinar el peso del material y el volumen que dicho material ocupaba (Sagués, 2008).

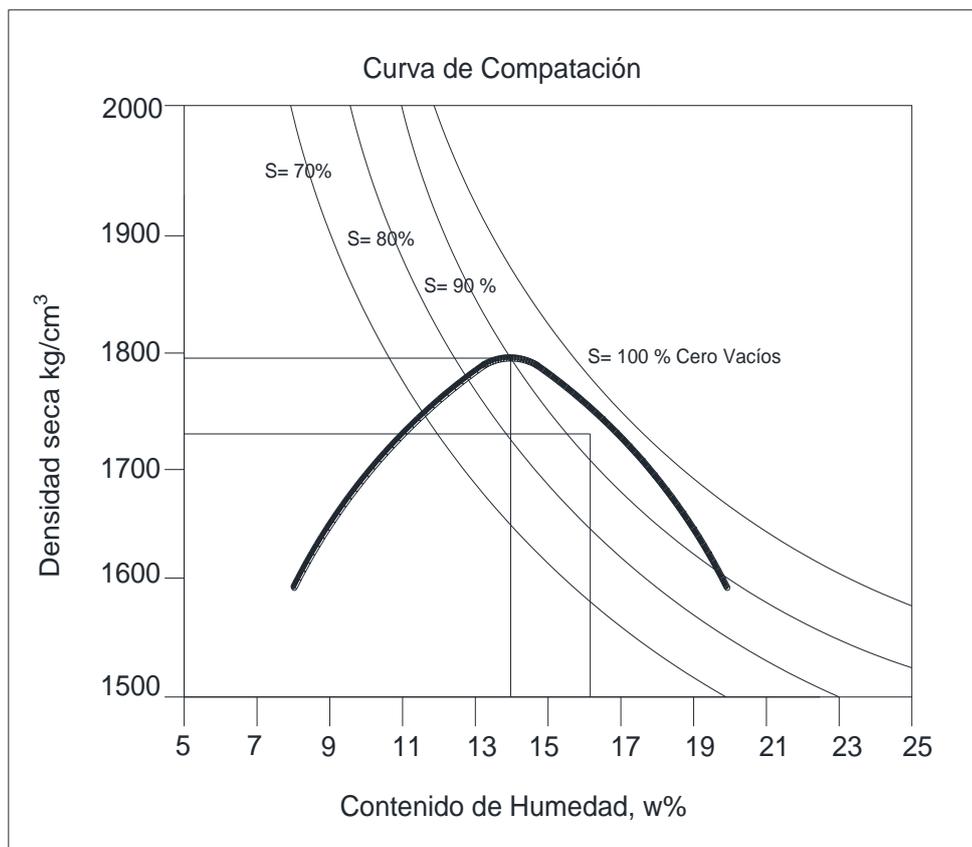
2.2.7. Factores que influyen en la compactación

De todos los factores que influyen e intervienen en la compactación de los suelos, los más importantes son el contenido de humedad y la energía de compactación aplicada en los ensayos. Hay también otros factores distintos a continuación se describe cómo afectan éstos en la compactación del suelo (Georges, 2004).

A. Efecto del contenido de humedad

El contenido de humedad influye directamente en el peso específico seco, obtenido en el proceso de compactación. Como se puede ver en la figura, mientras que el contenido de humedad aumenta, mayor es el peso específico seco obtenido, hasta llegar al pico de la curva, que es donde el contenido de humedad óptimo proporciona el máximo valor de peso específico del ensayo. Después de este contenido de humedad óptimo, los pesos específicos disminuyen (Sagués, 2008).

Gráfico N° 2. Curva de Compactación

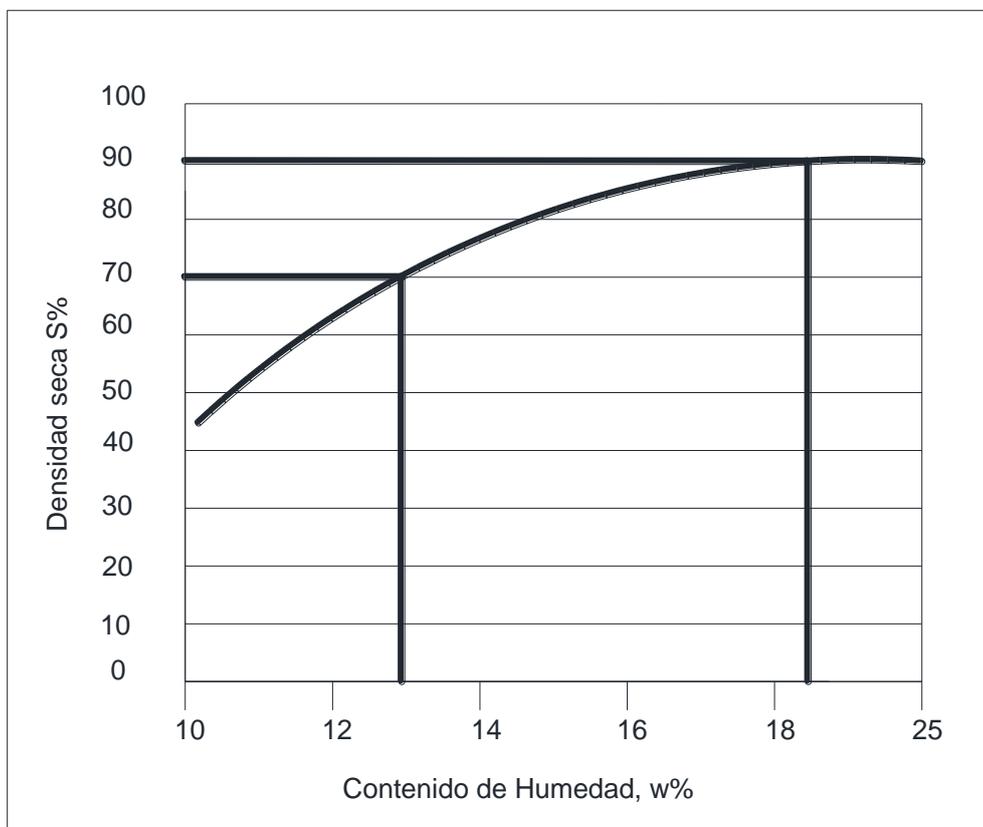


Fuente: Badillo, 2014.

En la figura se puede ver que el grado de saturación aumenta con el aumento de la humedad. En esta gráfica, para la densidad de sólidos del suelo y al ser éste compactado, alcanza un grado de saturación del 80% en el punto de peso específico seco máximo y humedad óptima (línea horizontal superior). A partir de este punto, el grado de saturación sigue en aumento con la adición de agua, hasta que llega a su mayor grado de saturación aproximadamente del 90% (línea horizontal inferior). A partir de este punto, el grado de saturación decrece, permaneciendo más o menos constante (Ruíz, 2005).

La siguiente figura muestra también lo explicado en el párrafo anterior; puede verse en la línea horizontal inferior la humedad óptima y en la línea horizontal superior la humedad de máxima saturación (Sánchez, 1996).

Gráfico N° 3. Contenido de humedad vs grado de saturación



Fuente: (Badillo, 2014).

El contenido de agua, además afecta a la estructura del suelo que está siendo compactado. Cuando hay poco agua en el suelo, éste ejerce una fuerza de resistencia al esfuerzo de compactación, debido a la alta concentración de iones en el agua, a los esfuerzos efectivos producidos por la tensión capilar y a la poca repulsión entre las partículas (Badillo, 2014).

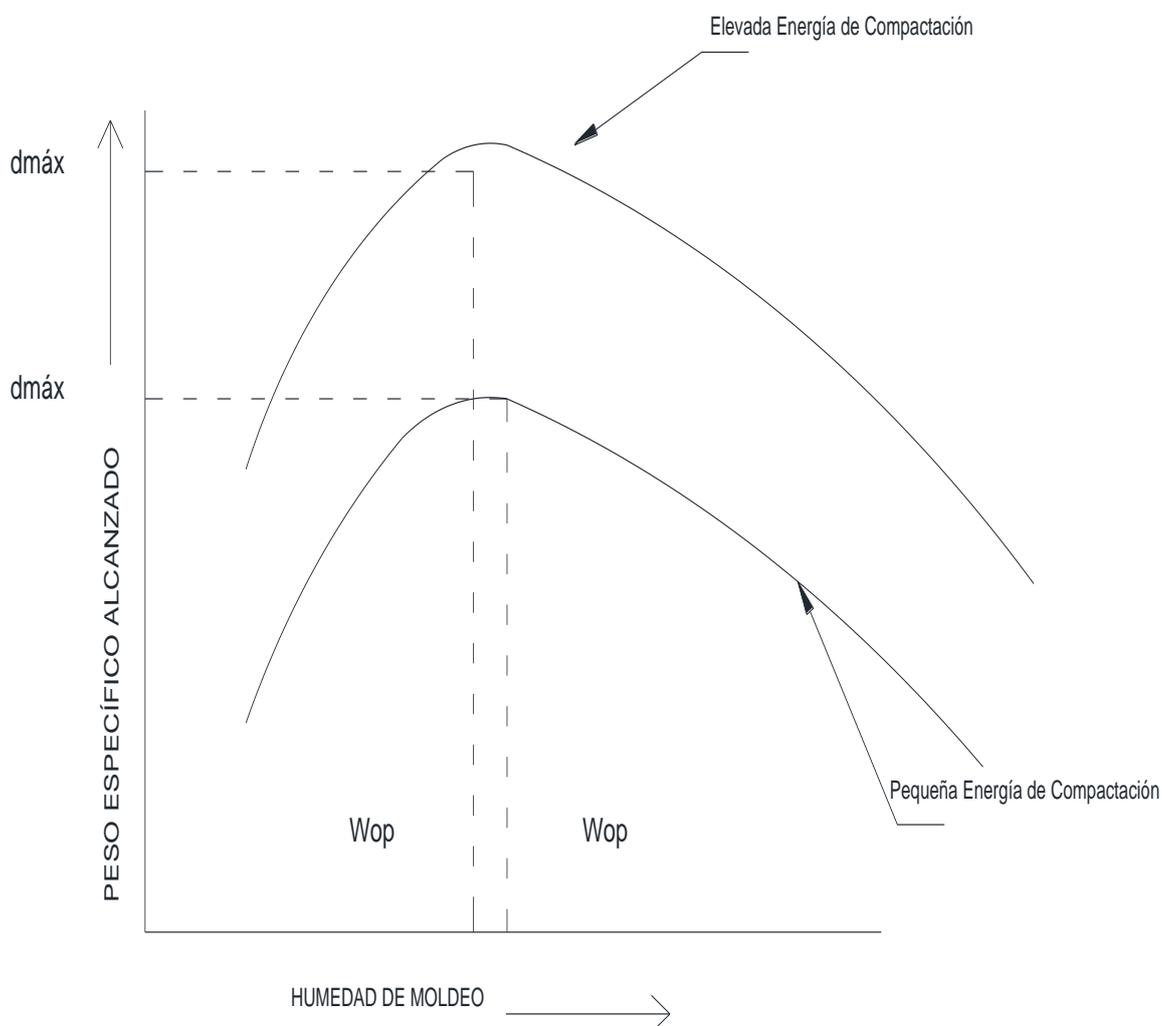
B. Efecto de la energía de compactación

La energía con que se compacta el suelo afecta considerablemente a los pesos específicos secos obtenidos en los ensayos. Como se puede observar en la figura si se compacta el suelo con una energía de compactación baja, se obtienen pesos específicos más bajos. Por el contrario, si la energía de compactación es alta, las curvas de compactación se recorren hacia arriba y a la izquierda, siguiendo la parte descendente de las mismas más o menos paralelas a la curva de cero vacíos, obteniéndose así pesos específicos secos máximos

mayores. En esta figura se puede apreciar también que cuando aumenta la energía de compactación, disminuye el contenido de humedad óptimo (Sagués, 2008).

Cabe mencionar que para valores mayores al contenido óptimo de humedad, la energía de compactación solamente deforma angularmente al suelo y no disminuye su volumen. Esto se debe a que un suelo que contiene más agua, es más deformable pero menos compresible por su bajo contenido de aire (Sowers, 2014).

Gráfico N° 4. Curvas de Compactación Proctor Estándar y Modificado

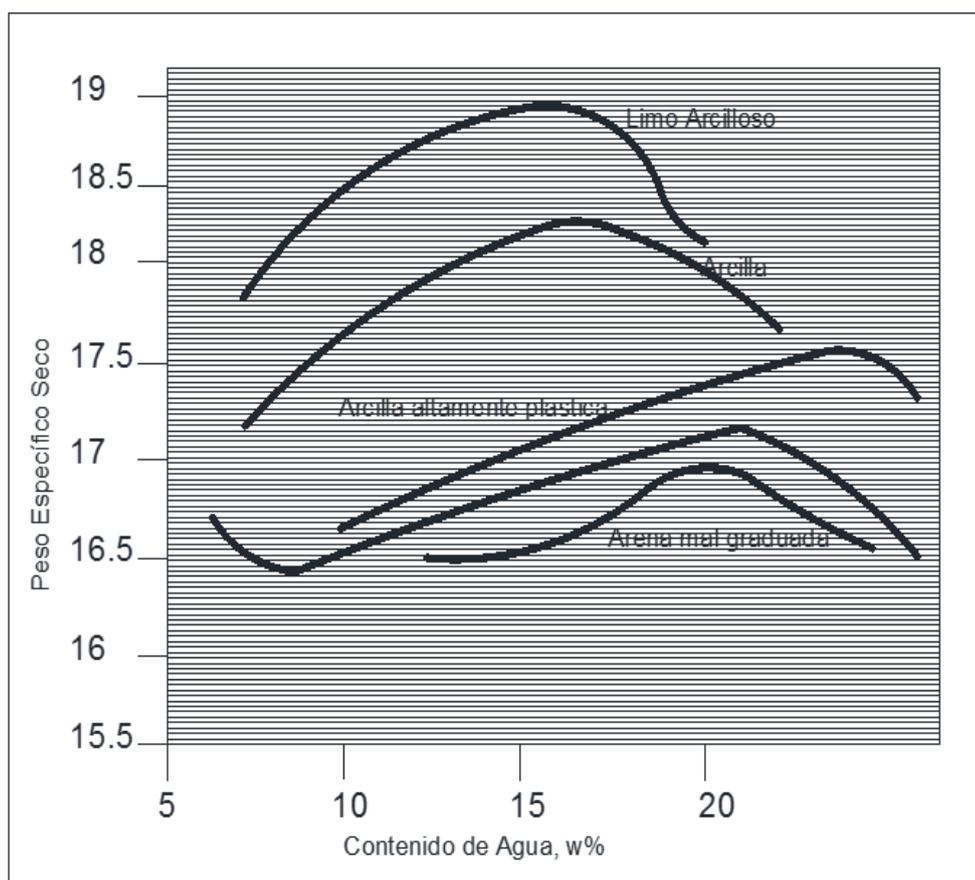


Fuente: Georges, 2004.

C. Efecto del tipo de suelo a compactar

El tipo de suelo, su granulometría, la forma de sus partículas, la densidad de sólidos y la cantidad y tipo de finos presentes, influyen en el peso específico seco y humedad óptima del suelo al ser compactado. En la figura se muestran las curvas de compactación de cinco diferentes tipos de suelos. Se puede ver que los suelos finos como el limo arenoso y la arcilla limosa, tienen mayores pesos específicos secos que las arenas (Georges, 2004).

Gráfico N° 5. Curvas de Compactación según composición granular



Fuente: Jorajuria, 2004.

D. Efecto del método de compactación

La diferencia entre un método de compactación y otro se puede decir que radica en la magnitud de las deformaciones angulares que cada uno de ellos provoque. La compactación por amasado es la aplicación de una presión dada, un cierto número de veces y simula la estructura obtenida en suelos finos con

compactadores. En la compactación estática se aplica una presión hasta obtener una densidad especificada, produce una compactación o compresión unidimensional y crea en suelos finos una estructura con partículas orientadas (González, 2013).

a. Compactación mecánica.

La compactación mecánica es aquella en la que el suelo bajo una carga, donde se le aplica una carga, hace que se formen unos bulbos de esfuerzos en la zona donde se ha compactando provocando que las partículas se alejen (López, 2011).

Si se aumenta la carga al doble, es decir $2P$, sin que se altere las dimensiones del área, los esfuerzos aumentan al doble lo que puede ocasionar fracturas en las partículas del suelo variando grandemente su granulometría, además no se incrementa la distribución de esfuerzo esquematizadas por las semicircunferencias, lo que se concluye que no es conveniente sobrecargar los equipos más allá de las especificaciones de los fabricantes, pues también pueden llegar a dañarse al aplicarles cargas que sobre pasen a las de diseño (López, 2011).

Pero si se aumenta la carga y el área al doble el esfuerzo es el mismo que el primero, pero la profundidad de las distribuciones si aumenta, con lo que se concluye que si se desean capas de mucho mayor espesor deben usarse equipos más pesados y con áreas de contacto mayores (Jorajuria, 2004).

b. Compactación estática

Se tiene que tener un control en el espesor de las capas para poder suministrar de mejor manera la energía necesaria para poder obtener la compactación requerida en el proyecto, es de vital importancia contar con un estricto control de calidad para garantizar que esta compactación cumplirá con la vida útil de la obra en cuestión. Se tomará en cuenta que no se podrá aumentar significativamente el espesor de la capa haciendo que se les aplique una carga en demasía a los equipos de compactación, lo que provoque que éstos sufran descomposturas (Badillo, 2014).

E. Efecto de la preparación de las muestras

Al momento de preparar una muestra para llevar a cabo un ensayo de compactación, el procedimiento utilizado influye en los resultados. Se puede partir de un suelo relativamente seco e ir agregando la cantidad necesaria de agua para obtener las muestras necesarias para el ensayo o se puede proceder al revés, partiendo de un suelo húmedo que se va secando (ASTM D-1557, 2000).

Utilizando el primer método, se obtienen pesos específicos secos más elevados. Esto se debe a que cuando se agrega agua, se crea un exceso que hace que la tensión capilar entre los grumos sea menor que la de los grumos de un suelo en el que se ha hecho evaporar el agua. Por lo mismo, la energía de compactación es más eficiente en el primer caso. Para disminuir esta diferencia de resultados entre los dos procedimientos, para el caso de empezar con una muestra seca, se debe dejar pasar algún tiempo después de agregada el agua, para que el suelo iguale en condiciones de tensión capilar al suelo húmedo (González, 2013).

Por otro lado, el uso repetido de las muestras no es conveniente, debido a que éstas dejarían de ser representativas de las condiciones de los suelos compactados en el campo, ya que éstos no son re-compactados (ASTM D-1557, 2000).

2.2.8. Propiedades de los Suelos Compactados

El suelo, al ser compactado, cambia y mejora en sus propiedades físicas y mecánicas, lo que es deseable puesto que la tierra suelta o los suelos sin compactar no son adecuados para soportar cargas y resistir otras condiciones requeridas por la obra. A continuación se explican algunas de las propiedades que presentan los suelos (Sagués, 2008).

a. Permeabilidad

La propiedad de un suelo al no presentar resistencia al paso de agua se llama permeabilidad. La permeabilidad se representa con la letra k , que es un coeficiente que se obtiene experimentalmente. Mientras los valores de k son menores, mayor es la impermeabilidad del suelo. La permeabilidad depende de la relación de vacíos, la estructura del suelo y el grado de saturación (Ruíz, 2005). Cuando disminuye la relación de vacíos disminuye también la permeabilidad de un suelo, debido a que con la eliminación de vacíos se cierran los canales por

donde pasa el agua. Sin embargo, la permeabilidad aumenta mientras aumenta el grado de saturación del suelo; esto a cualquier contenido de humedad. El factor que más afecta la permeabilidad de un suelo es la estructura que éste ha adquirido, después de haber sido sometido al proceso de compactación. Por lo tanto, las condiciones bajo las cuales ha sido compactado el suelo influyen en la permeabilidad. Cuanto mayor es la orientación que ha adquirido las partículas, debido a contenidos de humedad y la alta distorsión lograda por el método de compactación, menor es la permeabilidad del suelo (Pérez, 2014).

b. Compresibilidad

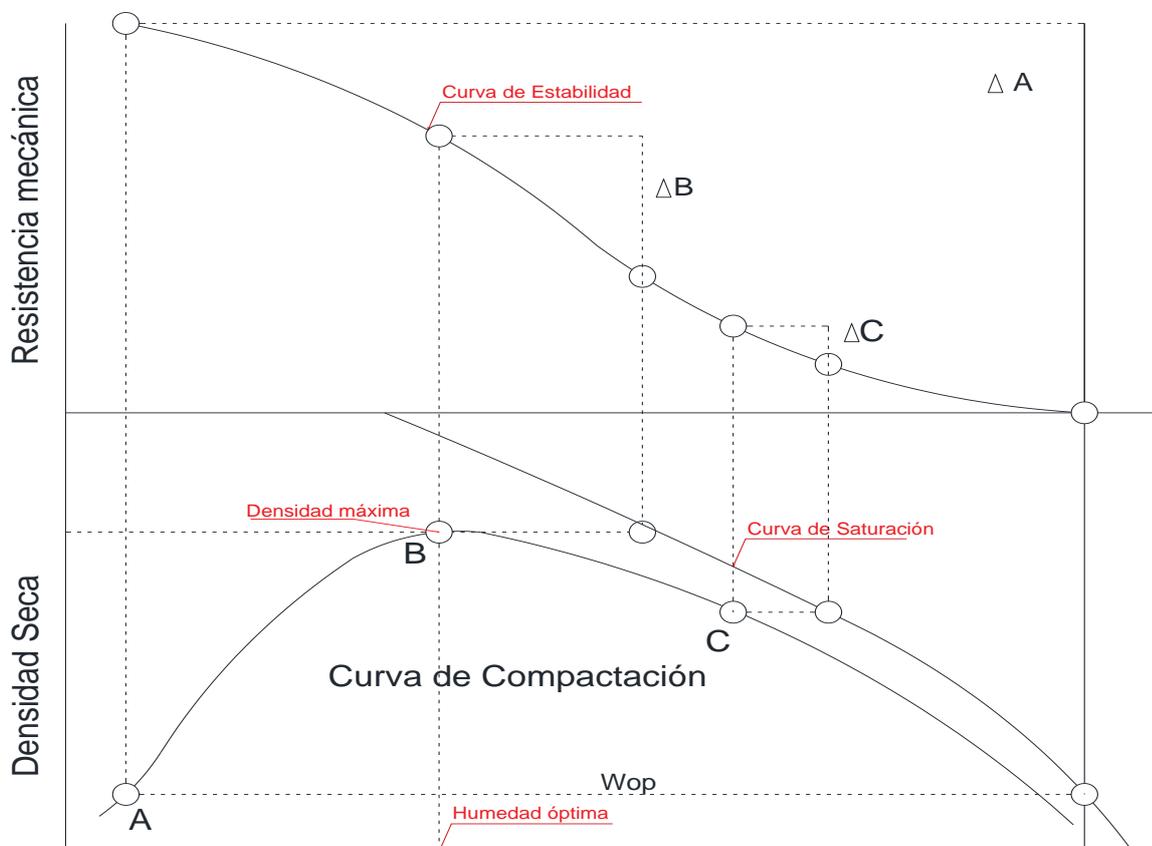
La compresibilidad del suelo es la relación que existe entre la carga de compresión aplicada al mismo y la deformación o cambio de volumen. La deformación por acción de una carga depende de la magnitud de ésta, de la relación de vacíos y el contenido de humedad. La compresión o consolidación de un suelo puede continuar por varios años, bajo la acción de una carga constante aplicada, como por ejemplo lo que sucede en un relleno pesado (Jorajuria, 2004).

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

Se han representado una curva Proctor y la resistencia mecánica del suelo para diferentes condiciones de densidad y humedad. Se ha considerado que el suelo puede saturarse manteniendo su densidad seca, hipótesis que dista significativamente de la realidad, particularmente en presencia de suelos cohesivos (Parano, 2012).

En la rama seca, punto “A”, el suelo alcanza una elevada resistencia mecánica. Esta situación puede evolucionar hacia una muy baja resistencia si el suelo se satura, dando como resultado una diferencia de resistencias “ ΔA ”. Para el punto “B”, correspondiente a la densidad seca máxima y humedad óptima, ocurre algo similar. No obstante, ser la resistencia mecánica inferior a la que proporciona el punto “A”, la pérdida por saturación “ ΔB ”, resulta menor. (Parano, 2012).

Gráfico N° 6. Resistencia Mecánica de Compactación



Fuente: Parano, 2012.

2.2.9. Ensayo mediante Proctor Modificado

A partir de 1933, el Ing. Ralph Proctor dio inicio al estudio racional de la Compactación. Este investigador verificó, que un mismo suelo, conforme su Contenido de Humedad, reacciona de manera diferente a la Compactación, alcanzando valores diversos de densidad. Proctor compactó muestras de suelo en un recipiente cilíndrico, utilizando diferentes contenidos de humedad. Después de Compactar la muestra pudo obtener los valores referentes al contenido de humedad y densidad seca (González, 2013).

Según la norma ASTM-1557 el ensayo de Proctor Modificado se hará en un cilindro para determinar la densidad y contenido de humedad el cual a diferencia del Proctor estándar tendrá un mayor peso ya que el pistón será de 10 lb. Y para su realización dependiendo del ensayo granulometría se procederá a elegir el método a utilizar.

La compactación es la operación o procedimiento de estabilización mecánica, cuyo objetivo fundamental es aumentar la densidad del suelo, por medio de una mayor aproximación de sus partículas, lo que se consigue con una disminución del Índice de Vacíos. Mediante el proceso de compactación del suelo se persiguen los siguientes objetivos prácticos:

- Aumentar la resistencia a la compresibilidad y al corte.
- Obtener de mayor uniformidad y homogeneidad.
- Conseguir que el suelo sea menos susceptible a las variaciones 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.

Especificaciones del ensayo Proctor Modificado (ASTM D1557)

Método "A"

Este método consiste de un molde de 4 pulgadas de diámetro (101,6mm), el material a emplearse es el que pasa por el tamiz N° 4 (4,75 mm) mediante 5 capas y con 25 golpes por capa.

Se usa cuando el 20% o menos del peso del material es retenido en el tamiz N° 4 (4,75 mm), también se usa otros métodos, cuando el método no es especificado; los materiales que cumplen estos requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando Método B o C. (ASTM)

Método "B"

Este método consiste de un molde de 4 pulgadas de diámetro (101,6mm), el material a emplearse es el que pasa por el tamiz 3/8 pulgadas (9,5 mm) mediante 5 capas y con 25 golpes por capa.

Se usa cuando el 20% o menos del peso del material es retenido en el tamiz N° 4 (4,75 mm) y 20% o menos de peso del material es retenido en el tamiz 3/8 pulgadas (9,5 mm), también se usa otros métodos, cuando el método no es especificado; los materiales que cumplen estos requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando Método C. (ASTM)

Método "C"

Este método consiste de un molde de 6 pulgadas de diámetro (152,4mm), el material a emplearse es el que pasa por el tamiz $\frac{3}{4}$ pulgadas (19,0 mm) mediante 5 capas y con 50 golpes por capa.

Se usa cuando más del 20% en peso del material se retiene en el tamiz $\frac{3}{8}$ pulgadas (9,53 mm) y menos de 30% en peso es retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$ pulgadas (19,0 mm)

El molde de 6 pulgadas (152,4 mm) de diámetro no será usado con los métodos A o B. (ASTM)

Tabla N° 1. Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557-91

Concepto	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C
Molde	101,60 mm (4 in)	101,60 mm (4 in)	152,40 mm (6 in)
Volumen del molde	944 cm ³ (1/30 ft ³)	944 cm ³ (1/30 ft ³)	2124 cm ³ (0,075 ft ³)
Peso del martillo	4,54 kg (10 lb)	4,54 kg (10 lb)	4,54 kg (10 lb)
Altura de caída del martillo	457,20 mm (18 in)	457,20 mm (18 in)	457,20 mm (18 in)
Número de golpes	25	25	56
Número de capas	5	5	5
Energía de compactación	2700 kNm/m ³ (56000 ft-lbf/ft ³)	2700 kNm/m ³ (56000 ft-lbf/ft ³)	2700 kNm/m ³ (56000 ft-lbf/ft ³)
Material a ser usado	Porción que pasa por el tamiz No.4, se usa si 20% o menos por peso es retenido en el tamiz No.4	Porción que pasa por el tamiz $\frac{3}{8}$, se usa si el suelo retenido en el tamiz No.4 es más del 20% y 20% o menos por peso es retenido en el tamiz $\frac{3}{8}$	Porción que pasa por el tamiz $\frac{3}{4}$, se usa si más de 20% por peso del material es retenido en el tamiz $\frac{3}{8}$ y menos del 30% por peso es retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$

Fuente: ASTM D-1557.

Cálculo de la Energía de Compactación

La energía de compactación aplicada con respecto al ensayo de Proctor Modificado se hará aplicando la siguiente ecuación para el cálculo de la energía de compactación (Escario, 1989).

$$E_c = \frac{N * n * W * h}{V} \quad \text{Ecuación N° 3. Energía de compactación}$$

Donde:

E = Energía de compactación específica.

N = Número de golpes por capa.

n = Número de capas.

W = Peso del martillo.

h = Altura de caída del pisón.

v = Volumen de suelo compactado.

2.2.10. Importancia y Uso

El suelo utilizado como relleno en Ingeniería (terraplenes, rellenos de cimentación, bases para caminos) se compacta a un estado denso para obtener propiedades satisfactorias de Ingeniería tales como: resistencia al esfuerzo de corte, compresibilidad o permeabilidad. También los suelos de cimentaciones son a menudo compactados para mejorar sus propiedades de Ingeniería. Los ensayos de compactación en Laboratorio proporcionan las bases para determinar el porcentaje de compactación y contenido de agua que se necesitan para obtener las propiedades de Ingeniería requeridas y para el control de la construcción para asegurar la obtención de la compactación requerida y los contenidos de agua (Escario, 1989).

La importancia de la compactación radica en tener un suelo apto para la construcción, compactamente homogéneo, firme, resistente y principalmente que cumpla con los parámetros de resistencia para las distintas cargas a las que este suelo sea sometido. Para esto es necesario aplicar al suelo a distintas técnicas de compactación, disminuir la presencia de vacíos y darle las características aptas para la construcción (Sánchez, 1996).

Durante el diseño de los rellenos de Ingeniería, se utilizan los ensayos de corte consolidación permeabilidad u otros ensayos que requieren la preparación de

especímenes de ensayo compactado a algún contenido de agua para algún Peso Unitario. Es práctica común, primero determinar el óptimo contenido de humedad (w_o) y el Peso Unitario Seco, mediante un ensayo de compactación. Los especímenes de compactación a un contenido de agua seleccionado (w), sea del lado húmedo o seco del óptimo (w_o) al óptimo (w_o) y a un Peso Unitario seco seleccionado relativo a un porcentaje del Peso Unitario Seco máximo. La selección del contenido de agua (w), sea del lado húmedo o seco del óptimo (w_o) o al óptimo (w_o) y el Peso Unitario Seco se debe basar en experiencias pasadas o se deberá investigar una serie de valores para determinar el porcentaje necesario de compactación (Sowers, 2014).

2.2.11. Beneficios

Entre los beneficios que produce la compactación en suelos se pueden resaltar los siguientes:

- a. **Impide el hundimiento del suelo:** Las construcciones edificadas sobre un suelo sin compactar pueden mostrar hundimientos, asentamiento de la estructura, deformación e incluso colapso de la misma. En tal sentido la compactación del suelo es parte importante en el inicio de una construcción (Jorajuria, 2004).
- b. **Reduce el escurrimiento del agua (permeabilidad):** Un suelo compactado reduce la penetración del agua, la reducción de vacíos después del compactado impide el escurrimiento del agua, evitando así que el suelo se convierta en deleznable e inestable (Sowers, 2014).
- c. **Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo:** Si hay vacíos en las capas del suelo el agua puede penetrar en el suelo y llenar estos vacíos provocando su inestabilidad. El resultado sería el esponjamiento del suelo durante la estación de lluvias y contracción del mismo durante la estación seca (Pérez, 2014).
- d. **Impide el daño de las heladas:** El agua se expande y aumenta el volumen al congelarse, esta acción a menudo causa que el pavimento se hinche y a su vez las capas del piso de agrieten. La correcta compactación reduce estas cavidades de agua en el suelo evitando posteriores problemas a causa de bajas temperaturas (González, 2013).

2.2.12. Control de compactación

La compactación es el Proceso de aplicación de energía mecánica al suelo para disminuir su volumen por reducción de relación de vacíos debida a eliminación de aire de poros, dicho proceso permite aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de un suelo.

Una de las pruebas para lograr una buena compactación de un suelo es el llamado Prueba de Proctor, es decir al aumentar la energía de compactación para un mismo suelo aumenta su peso volumétrico seco máximo y disminuye su humedad óptimas, esta prueba tiene como finalidad determinar el peso volumétrico seco máximo que puede alcanzar un material, así como la humedad óptima a que deberá hacerse la compactación (Sánchez, 1996).

a. Compactación de campo

La compactación de campo, al igual que la de laboratorio, es función de la humedad, del peso específico seco y de la energía de compactación. La energía de compactación en el campo depende de:

1. Tipo, peso y número de pases del equipo de compactación
2. Tipo de suelo
3. Espesor de capa

Sin embargo, esta energía de compactación de campo no puede ser cuantificada como hicimos en el laboratorio con la energía dinámica, tipo Proctor, entre otras cosas porque la energía que se aplica en el campo es de tipo estática, por vibración y por amasado o una combinación de éstas en la mayoría (Georges, 2004).

Es por ello que para controlar la compactación en el campo se recurre a un parámetro que relaciona el peso específico seco que se alcanza en el terraplén con el peso específico seco máximo obtenido en el laboratorio con el Proctor correspondiente, usado como patrón (Sánchez, 1996).

b. Grado de compactación

Al igual que los conceptos de humedad óptima y peso específico seco máximo, el grado de compactación requiere referirlo a un patrón de laboratorio: Proctor Estándar o Modificado (Sagués, 2008).

c. Control de compactación en el campo

El control de compactación en el campo, como parte del control de calidad de los proyectos en general, consiste en alcanzar un grado de compactación en un rango de humedades fijado, para garantizar las propiedades mecánicas por las que se compacta, de la forma más económica (Parano, 2012).

Como quiera que la energía de compactación a utilizarse se define por el tipo de propiedad mecánica a mejorar, el grado de compactación se fija en función de la importancia económica del compactado y con relación al patrón de compactación a utilizarse en el laboratorio. Así por ejemplo, se fija en carreteras alcanzar un $G_c=95\%$ de la energía del Proctor Modificado (Georges, 2004).

Aunque en muchos proyectos solo denota como control de compactación alcanzar el grado de compactación deseado, sin fijar en qué rango de humedades se debe obtener, esto se demuestra que es un grave error, en el aspecto económico y en el aspecto técnico (Escario, 1989).

2.3. Definición de términos básicos

Compactación: Proceso realizado generalmente por medios mecánicos por el cual se obliga a las partículas de suelo a ponerse más en contacto con otras, mediante la expulsión del aire de los poros, lo que implica una reducción más o menos rápida de los vacíos, lo que produce en el suelo cambios de volumen (Escobar, 2007).

Granulometría: Según NTP 339.128 se refiere a las proporciones en las que se encuentran las diferentes partículas minerales del suelo (grava, arena, limo y arcilla) expresada con base al peso seco del suelo.

Energía de compactación: Energía producida por el trabajo mecánico de un instrumento el cual proporciona una energía producida por un equipo a una determinada altura o proporcionada por un peso determinado de una maquinaria como el caso de rodillos (Sowers, 2014).

Densidad seca máxima: Define como densidad seca la relación entre el contenido de humedad óptimo y su densidad de ésta al ser expuesto a una variación por trabajo mecánico externo (ASTM D1557).

Contenido de Agua Óptimo modificado: Es el contenido de agua al que el suelo será compactado al peso unitario seco máximo utilizando un esfuerzo de compactación modificado (ASTM D1557).

Curva de saturación: Es la curva de equilibrio, entre los estados con respecto a la densidad seca máxima y el óptimo contenido de humedad de la muestra a, es decir, donde se ubicará el estado líquido saturado, corresponde al material granular (ASTM D 635).

Contenido de Humedad: La humedad o contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada como porcentaje, del peso de agua en una masa dada de suelo, al peso de las partículas sólidas (NTP 339.127).

Muestreo: Determinación del material a analizar con respecto a una unidad de volumen necesaria para el ensayo utilizando los procedimientos descritos en la práctica normalizada. La muestra para el ensayo será aproximadamente de la cantidad deseada cuando esté seca y deberá ser el resultado final de la reducción (NTP 400.012).

Gravedad específica: Es la relación entre el peso en aire del volumen de un material, a una temperatura indicada y el peso en aire de idéntico volumen de agua destilada a la misma temperatura (NTP 339.131).

Cantera: Zona de extracción de materia prima utilizada en la construcción, dependiendo del tipo de explotación empleada (Escobar, 2007).

Comprensibilidad: Propiedad que tienen los suelos que sufren disminución de volumen cuando son sobre ellos aplicadas fuerzas externas. Una de las principales causas de los asentamientos es la comprensibilidad del suelo y principios de la compactación de suelos (Sánchez, 1996).

Textura de suelo: Es la propiedad física derivada de la composición granulométrica, constituida por arena, limo y arcilla, cuyos diámetros están contempladas en la escala de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (Escario, 1989).

CAPÍTULO 3. HIPÓTESIS

3.1. Formulación de la hipótesis

Si se incrementa la energía de compactación, entonces la densidad seca máxima es mayor y el óptimo contenido de humedad es menor.

VARIABLES

- Variable Independiente: Energía de compactación.
- Variable Dependiente: Densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad

3.2. Operacionalización de variables

Tabla N° 2. Operacionalización de Variables

Variables	Definición	Dimensiones	Sub Dimensión	Medición
Energía de compactación	Energía producida por la aplicación de una fuerza determinada producto de una fuerza aplicada	Volumen de la muestra. Número de golpes. Número de capas del martillo.	Ensayo de Granulometría	Muestra de material Granular de la Cantera El Gavilán
			Ensayo de Proctor Modificado	
Densidad Seca Máxima	Valor Máximo obtenido del a curva Proctor	Peso seco del suelo. Volumen total de la muestra.	Determinación mediante curva Proctor	Formato
Contenido de Humedad	Contenido de humedad de la muestra obtenida en estado natural	Peso húmedo del suelo Peso seco del suelo	Ensayo de contenido de Humedad	Formato

Fuente: Elaboración propia, 2015.

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Tipo de diseño de investigación.

Experimental: Es el tipo de investigación aplicada que manipula variables basándose en el método científico, para determinar la relación entre las variables existentes y su validación científica en la cual el investigador busca demostrar su hipótesis mediante la realización práctica de ésta.

4.2. Material de estudio

4.2.1. Unidad de estudio.

Suelo granular de la cantera El Gavilán.

4.2.2. Población.

Suelos granulares de las canteras de Cajamarca.

4.2.3. Muestra.

Suelo granular de la cantera El Gavilán.

4.3. Técnicas, procedimientos e instrumentos.

La recolección de datos se realizó mediante protocolos para registrar las propiedades de los agregados

4.3.1. Para recolectar datos.

Elección de la Cantera

Se eligió la cantera de “El Gavilán” debido a que es la cantera más concurrida y la más explotada de la zona de Cajamarca.

Ubicación

Se encuentra a 3250 m.s.n.m, al sur este de la ciudad de Cajamarca en las faldas del cerro Ventanilla cerca del Abra El Gavilán al costado derecho de la carretera Cajamarca – Pasamano, cuyas coordenadas son 779137.82 E y 9198820.48 N.

Accesibilidad

Su accesibilidad es buena con Cajamarca y alrededores para el transporte de los agregados. Conectándose a la ciudad por medio de la carretera interprovincial

asfaltada a la costa. La distancia promedio es de 18 km con respecto a la ciudad de Cajamarca.

Identificación Geológica

Las muestras correspondientes al primer estrato están construidas por arenas y gravas aluviales con material orgánico que le da un color gris oscuro, las muestras de los estratos más profundos son areniscas cuarzós bastante profundas de color blanquecino amarillento o rojizo.

Fotografía N° 1. Fotografía Satelital, ubicación de la cantera "El Gavilán"



Fuente: Google Earth, 2016.

Procesamiento de Información

Para la recolección de datos se procedió a obtener muestras del suelo granular de la cantera El Gavilán, 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 teniendo en cuenta las NTP (Normas Técnicas Peruanas) con respecto al análisis granulométrico y Proctor Modificado.

En primera instancia se realizó el análisis granulométrico de la muestra de material extraído teniendo como base la NTP 400.012

a. Para desarrollar el ensayo de granulometría:

Se realizó según la NTP 400.012 que consistió en transportar los agregados en bolsas u otros contenedores construidos como para prevenir pérdidas o contaminación de alguna parte de la muestra o daños al contenido por el manipuleo durante el transporte.

Limitar la cantidad de material sobre el tamiz utilizado de tal manera que todas las partículas tenga la oportunidad de alcanzar la abertura del tamiz un número de veces durante la operación de tamizado. Para tamices con aberturas menores que 4,75 mm (Nº 4), la cantidad retenida sobre alguna malla al completar el tamizado no excederá a 7 kg/cm² de área superficial de tamizado (NOTA 5). Para tamices con aberturas de 4,75 mm (Nº 4) y mayores, la cantidad retenida en kg no deberá sobrepasar el producto de 2,5 x (abertura del tamiz en mm x (área efectiva de tamizado, cm²).

Esta cantidad se muestra para dimensiones de tamices de uso común. En ningún caso la cantidad retenida será mayor como para causar deformación permanente al tamiz.

Luego de haber realizado el procedimiento establecido por la NTP 400.012 se obtiene los resultados del análisis granulométrico para así poder determinar el método a ensayar con respecto al Proctor Modificado.

Luego de haber realizado el ensayo de granulometría se determinó que para realizar el ensayo de Proctor Modificado se realizaría mediante el método C. Para eso se tomó como referencia la NTP 339.141 referente al ensayo de Proctor Modificado para lo cual se realizó el siguiente procedimiento.

b. Para desarrollar el ensayo de Proctor Modificado:

- Para el ensayo de Proctor Modificado se siguió las indicaciones de la NTP 339.141 para los cual se realizó lo siguiente:
- 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 del ensayos anterior.

- 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%, 6% y 8% 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 5 kg del material extraído de la Cantera El Gavilán.
- 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 + la muestra contenido 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.

c. Para determinar el contenido de humedad :

Para determinar el contenido de humedad del material (w%): según la NTP 339.185 se realizó lo siguiente:

- Se pesó la tara (wt)
- Se colocó una porción del material granular extraída del molde
- Luego se puso la tara con el material a secar en el horno durante 24 horas
- Transcurrido ya el tiempo de secado, se sacó del horno y se procedió a pesar obteniendo el peso seco (Ws).

- Para determinar el porcentaje de agua se utilizó la siguiente formula y se realizó 6 veces

d. Para determinar el peso específico :

Para determinar el peso específico del material se tuvo en cuenta la NTP 400.022

Material:

Muestra de grava kg

Equipo:

- Molde del ensayo de Proctor
- Balanza
- Varilla

Procedimiento:

- Se obtuvo el volumen del molde midiendo las dimensiones del mismo.
- Se enrasó el material con la varilla y se pesó el molde (w_{mol} + muestra)
- Se realizó en los 6 ensayos para determinar el peso específico
- Para el cálculo del peso específico se usó la siguiente fórmula.

$$P_u = \frac{W_{muestra}}{V_{molde}}$$

Donde:

P_u = Peso específico.

W muestra= Peso de la muestra.

V molde= Volumen del recipiente.

4.3.2. Para analizar información.

Para el análisis de los datos obtenidos de los ensayos de Proctor se procedió a registrar en los formatos para luego poder procesar los datos obtenidos en laboratorio y realizar su procesamiento en gabinete mediante la utilización de herramientas informáticas y hojas de cálculo, para procesar la información de forma adecuada y así poder obtener los resultados de la investigación y poder desarrollar y encontrar todas las variables que se plantearon en la presente investigación.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

De acuerdo a los ensayos realizados en laboratorio, se registraron los datos obtenidos de los ensayos hechos en la Universidad Privada del Norte durante la ejecución de la tesis, procediendo a realizar los cálculos necesarios para la obtención de resultados, obteniendo los siguientes resultados producto de ensayar el material granular extraído de la cantera “El Gavilán” determinando que el contenido de humedad y densidad seca máxima varían al aumentar la energía de compactación procedente de la caída del pistón obteniendo los siguientes resultados :

Se realizó el análisis granulométrico para determinar el método a ensayar, el cual fue el método C.

Tabla N° 3. Resultados Granulometría

Material	Desing. del Tamiz US	% Acumulado	% Pasante
GRUESA	4		
	3	0,00	
	2 1/2	0,00	
	2	2,07	97,93
	1 1/2	2,07	97,93
	1	9,76	90,24
	3/4	18,70	81,30
	1/2	36,36	63,54
	3/8	45,40	54,60
FINA	Nº 4	76,76	23,24
	Nº 10	78,80	21,20
	Nº 20	82,09	17,91
	Nº 30	82,51	17,49
	Nº 40	91,90	8,10
	Nº 60	97,53	2,47
	Nº 100	99,08	0,92
Nº 200	99,71	0,29	

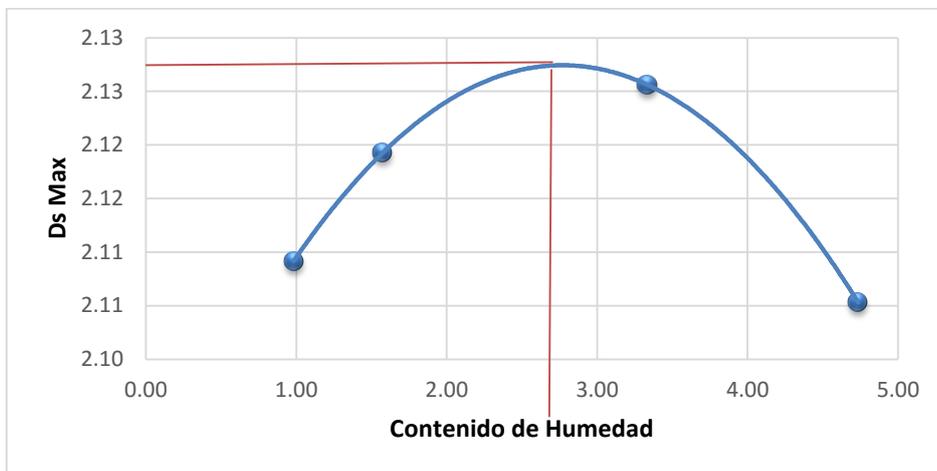
Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Al realizar los ensayos de Proctor variando el número de golpes desde los 56 hasta los 61 golpes por capa se obtuvo las gráficas respectivas las cuales son:

Ensayo Proctor Modificado 56 golpes

Se graficó la curva Proctor de 56 golpes establecidos según la Norma ASTM-1557.

Gráfico N° 7. Curva Proctor Modificado 56 Golpes

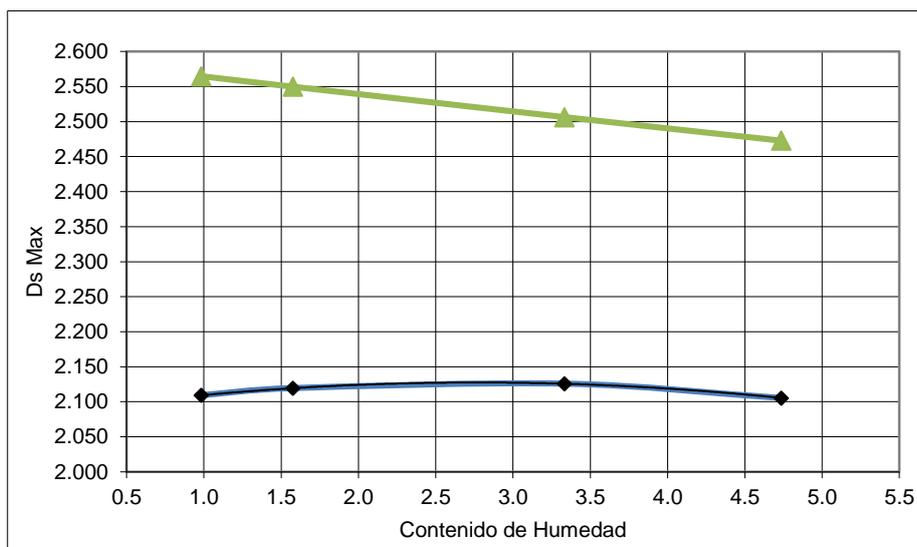


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Densidad máxima =	2.13 gr/cm
Humedad óptima =	2.70%

También se realizó la curva de saturación la cual deberá ser paralela a la curva Proctor indicando que el material no está completamente saturado.

Gráfico N° 8. Curva de Saturación Proctor Modificado 56 Golpes

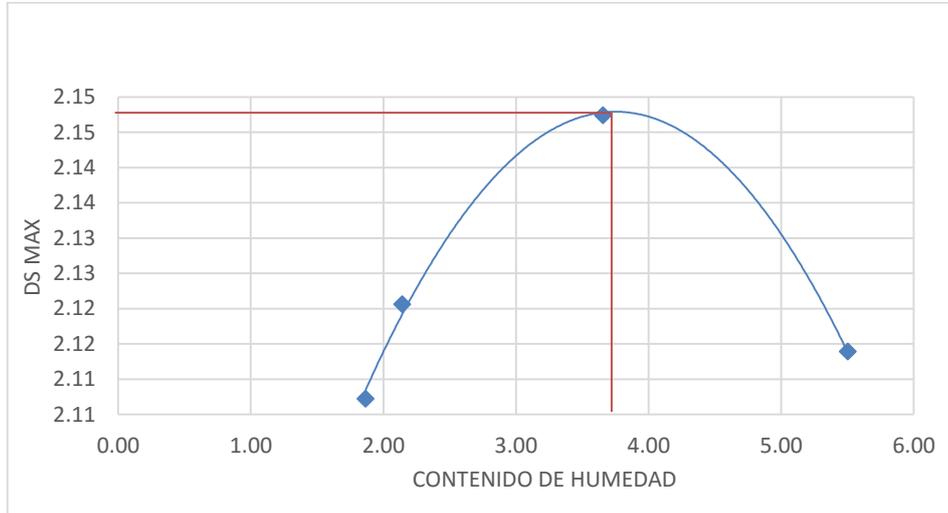


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Ensayo Proctor Modificado 57 golpes

Curva Proctor resultante de la variación de golpes por capa a 57 golpes.

Gráfico N° 9. Curva Proctor Modificado 57 Golpes

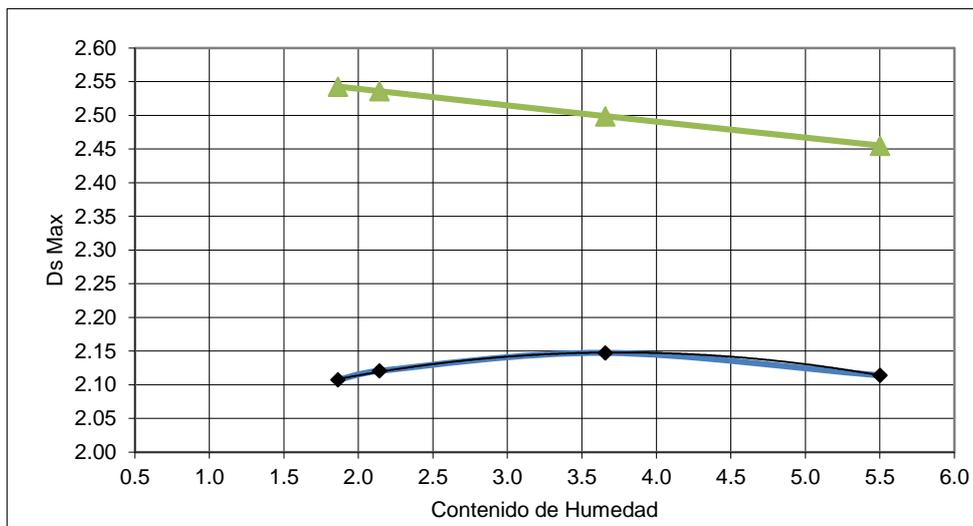


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Densidad máxima =	2.15 gr/cm
Humedad óptima =	3.80%

También se realizó la curva de saturación la cual deberá ser paralela a la curva Proctor indicando que el material no está completamente saturado.

Gráfico N° 10. Curva de Saturación Proctor Modificado 57 Golpes

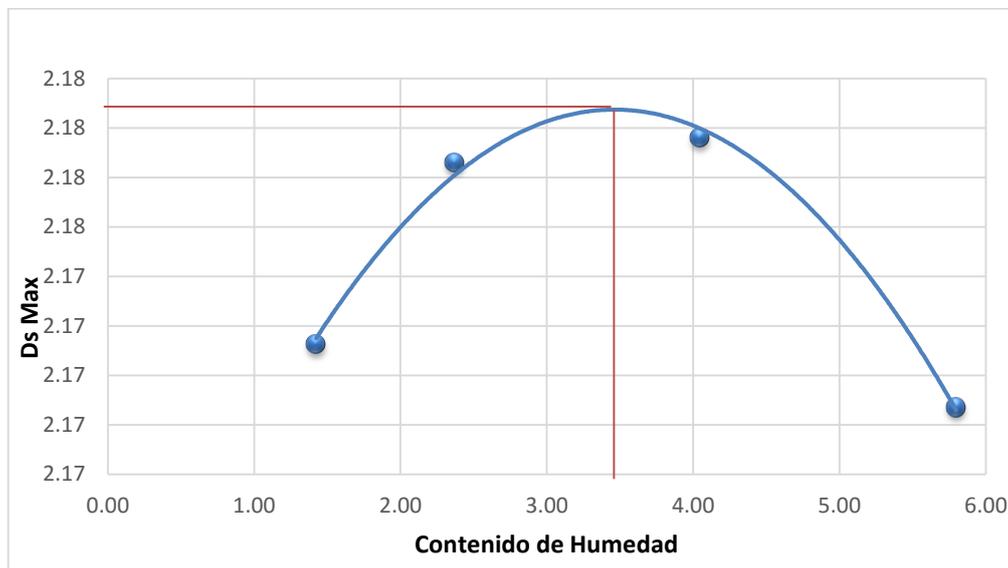


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Ensayo Proctor Modificado 58 golpes

Curva Proctor resultante de la variación de golpes por capa a 58 golpes.

Gráfico N° 11. Curva Proctor Modificado 58 Golpes

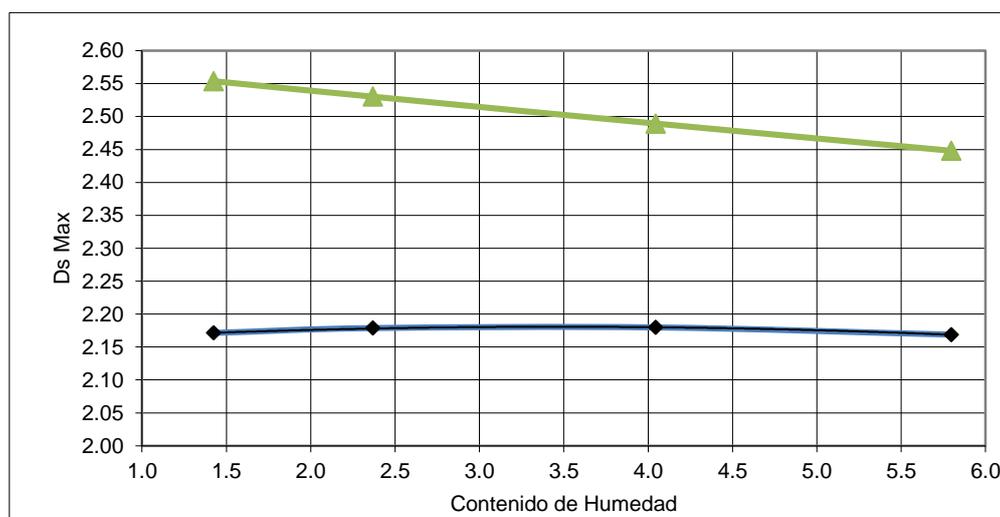


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Densidad máxima =	2.18 gr/cm
Humedad óptima =	3.50%

También se realizó la curva de saturación la cual deberá ser paralela a la curva Proctor indicando que el material no está completamente saturado

Gráfico N° 12. Curva de Saturación Proctor Modificado 58 Golpes

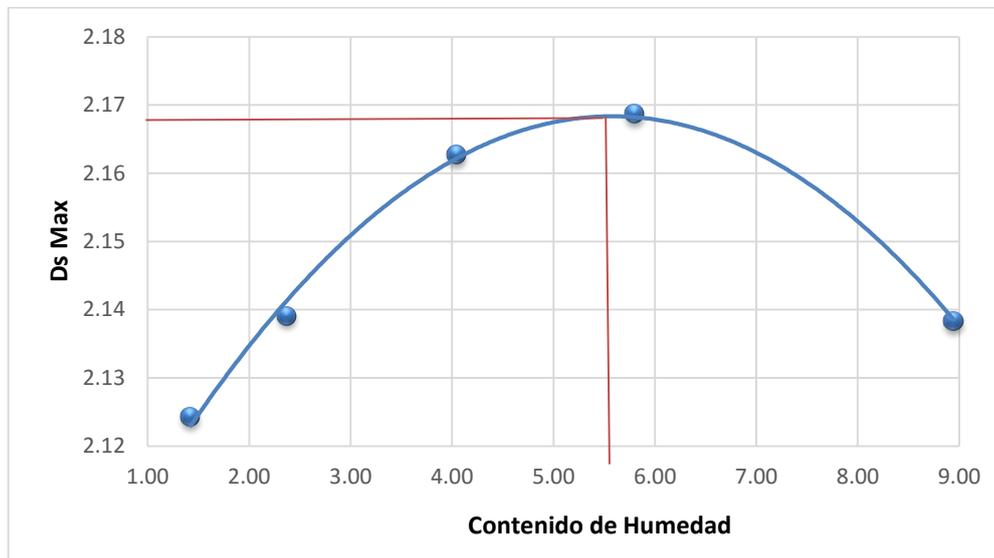


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Ensayo Proctor Modificado 59 golpes

Curva Proctor resultante de la variación de golpes por capa a 59 golpes.

Gráfico N° 13. Curva Proctor Modificado 59 Golpes

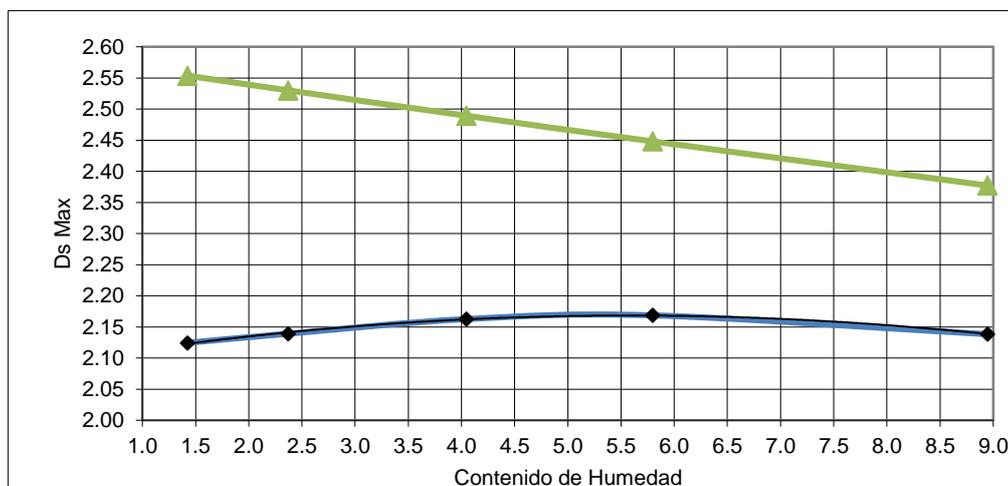


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Densidad máxima =	2.16 gr/cm
Humedad óptima =	5.85%

También se realizó la curva de saturación la cual deberá ser paralela a la curva Proctor indicando que el material no está completamente saturado

Gráfico N° 14. Curva de Saturación Proctor Modificado 59 Golpes

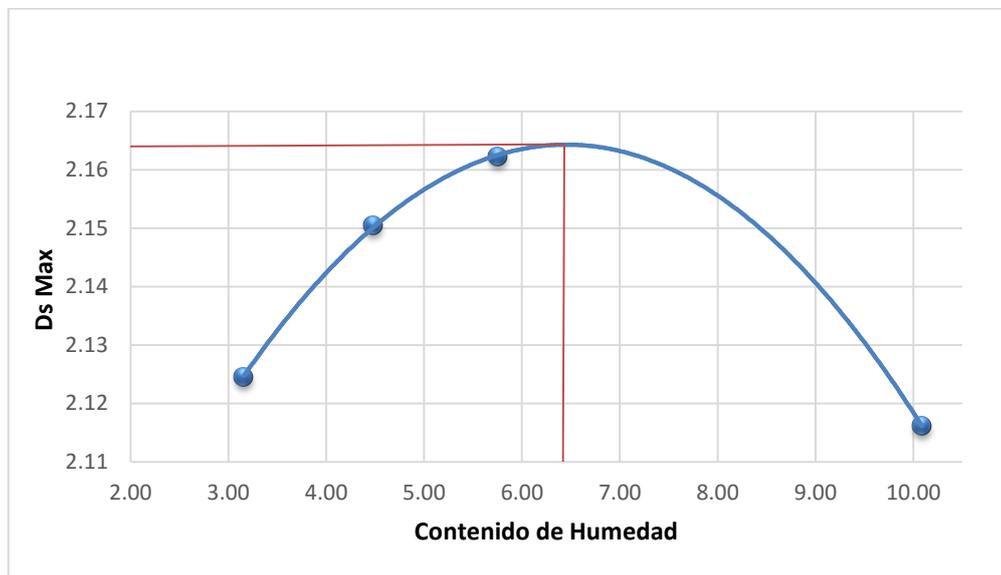


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Ensayo Proctor Modificado 60 golpes

Curva Proctor resultante de la variación de golpes por capa a 60 golpes.

Gráfico N° 15. Curva Proctor Modificado 60 Golpes

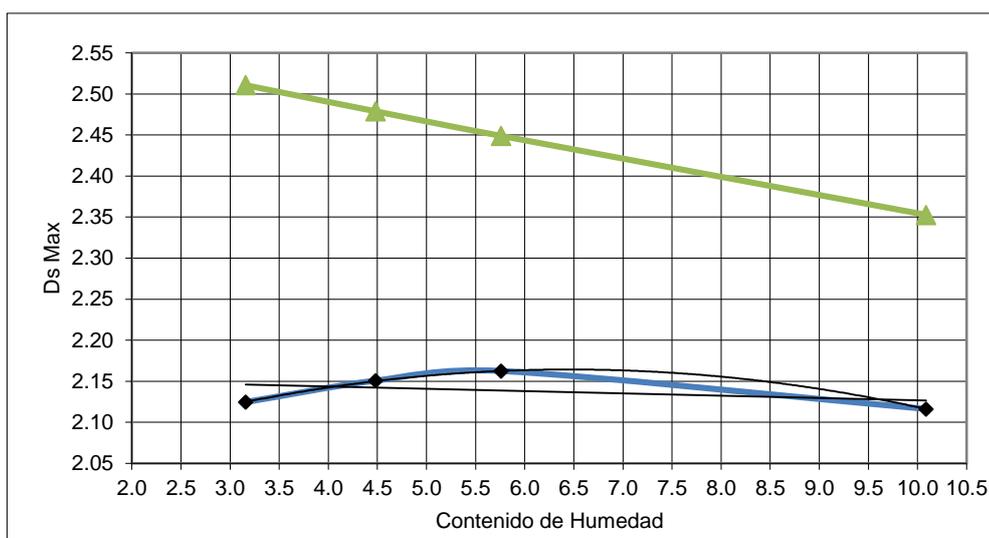


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Densidad máxima =	2.165 gr/cm
Humedad óptima =	6.30%

También se realizó la curva de saturación la cual deberá ser paralela a la curva Proctor indicando que el material no está completamente saturado.

Gráfico N° 16. Curva de Saturación Proctor Modificado 60 Golpes

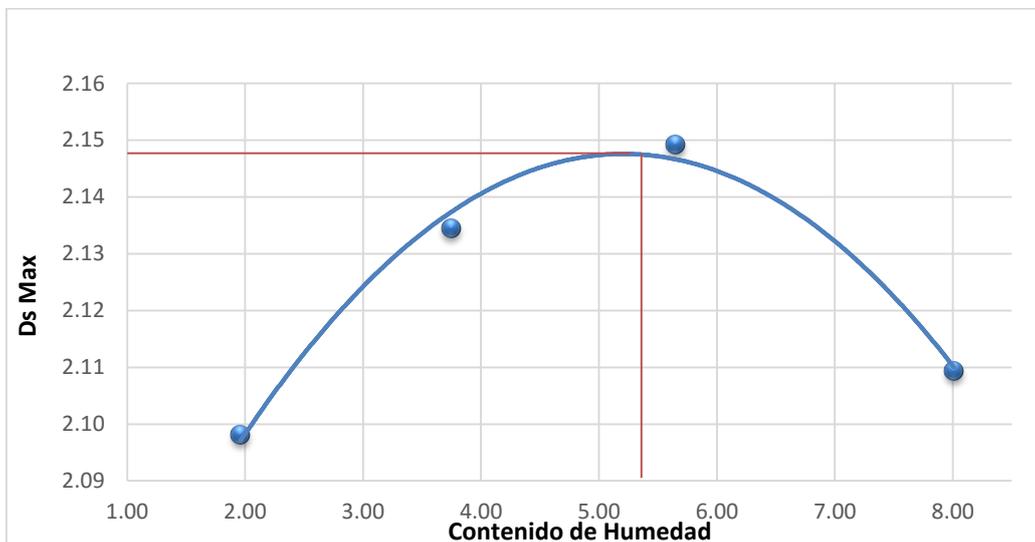


Fuente: Elaboración Propia, 2015.

Ensayo Proctor Modificado 61 golpes

Curva Proctor resultante de la variación de golpes por capa a 61 golpes.

Gráfico N° 17. Curva Proctor Modificado 61 Golpes

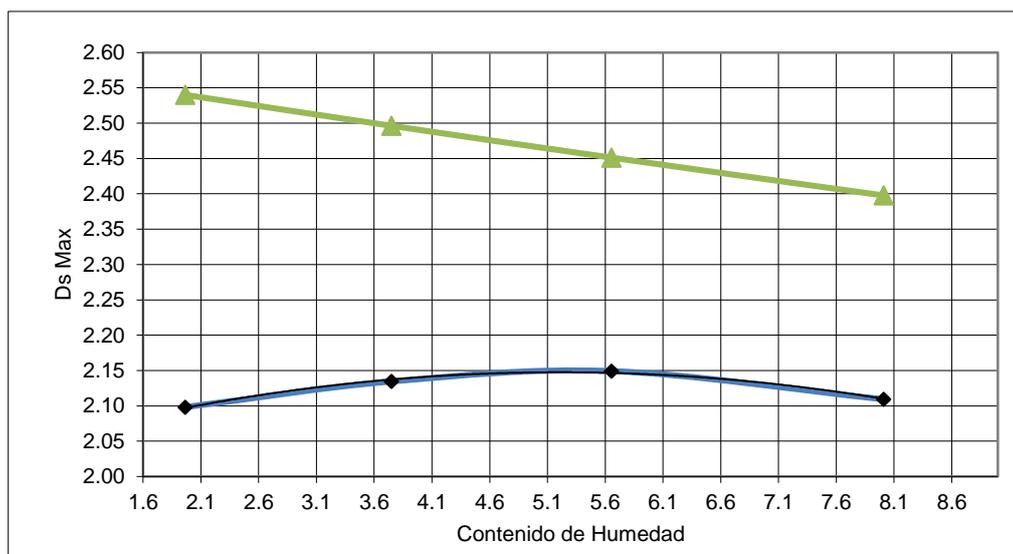


Fuente: Elaboración propia, 2015.

Densidad máxima =	2.148 gr/cm
Humedad óptima =	5.40%

También se realizó la curva de saturación la cual deberá ser paralela a la curva Proctor indicando que el material no está completamente saturado.

Gráfico N° 18. Curva de Saturación Proctor Modificado 61 Golpes



Fuente: Elaboración propia, 2015.

De cada ensayo de Proctor realizado se obtuvo la energía de compactación obteniendo el siguiente cuadro

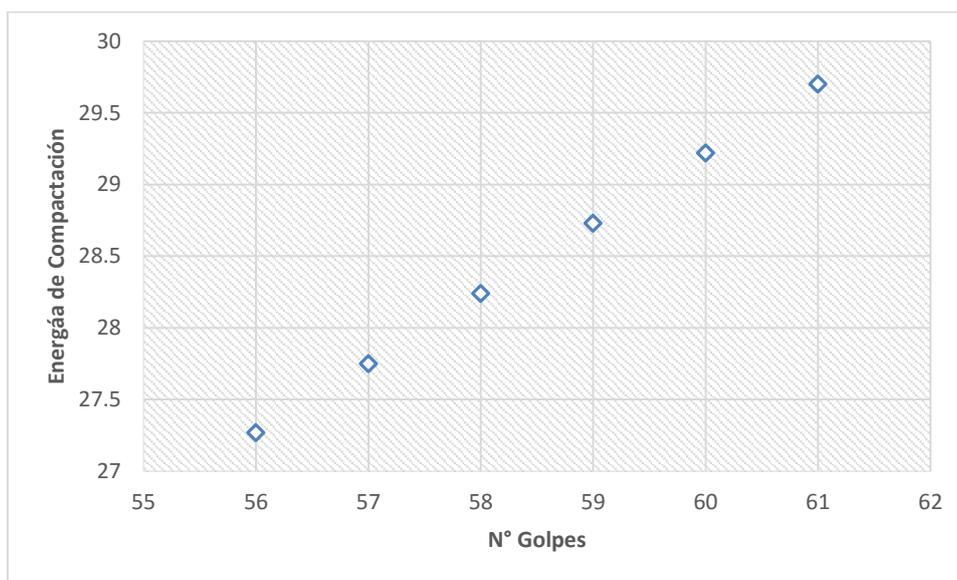
Tabla N° 4. Energía de Compactación

Ensayo	N°gol/capa	Energía compactación
1	56	27.27
2	57	27.75
3	58	28.24
4	59	28.73
5	60	29.22
6	61	29.70

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Como se puede observar en la siguiente gráfica el aumento de la energía de compactación con respecto al número de golpes tiene un crecimiento lineal constante.

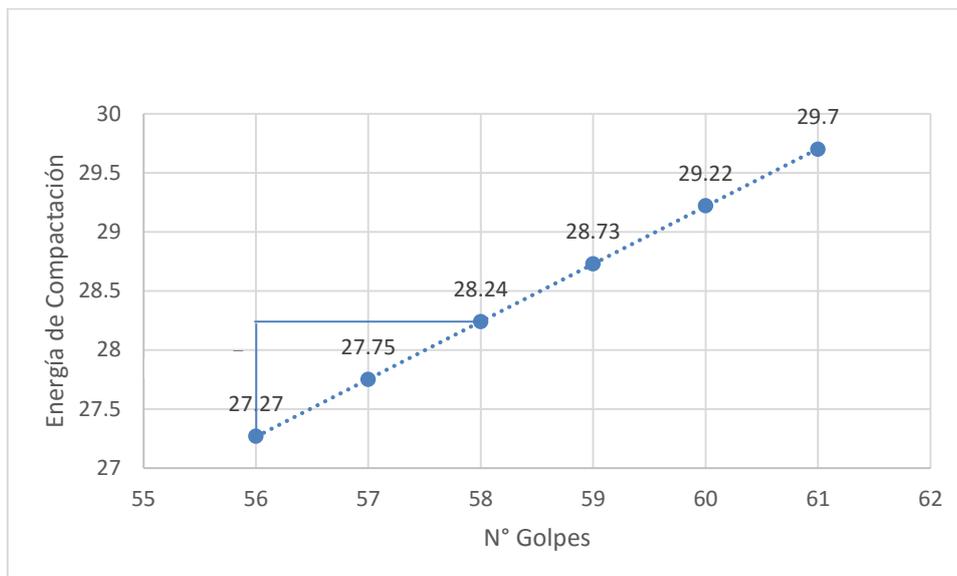
Gráfico N° 19. Crecimiento Energía de Compactación



Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la gráfica mostrada se ve que la variación de la energía partiendo desde lo establecido por la norma ASTM D-1557 con respecto a la variación del número de golpes por capa hasta los 61 golpes se ve la variación de 0.97 kg/cm² con respecto al ensayo N° 3 donde se encontró los valores óptimos con respecto a la Densidad Seca y el Contenido de Humedad.

Gráfico N° 20. Variación Energía de Compactación



Fuente: Elaboración propia, 2015.

Al tener esta variación al aumentar el número de golpes según lo establecido por el ASTM D 1557 (Proctor Modificado) se tendrá una variación en un la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad del material granular en el cual para la densidad se obtuvo:

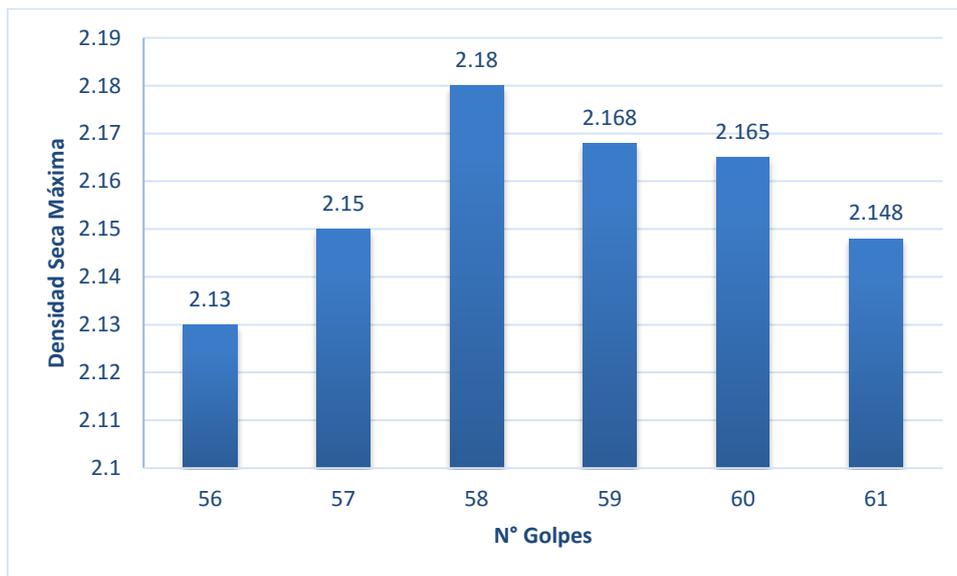
Tabla N° 5. Densidad Seca Máxima

	N°gol/capa	Energía compact.	Ds máx
1	56	27.27	2.13
2	57	27.75	2.15
3	58	28.24	2.18
4	59	28.73	2.168
5	60	29.22	2.165
6	61	29.70	2.148

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Debido a la variación de la energía de compactación y del número de golpes por capa se obtiene el siguiente cuadro viendo su variación respecto a la norma técnica ASTM D 1557.

Gráfico N° 21. Variación Densidad Seca



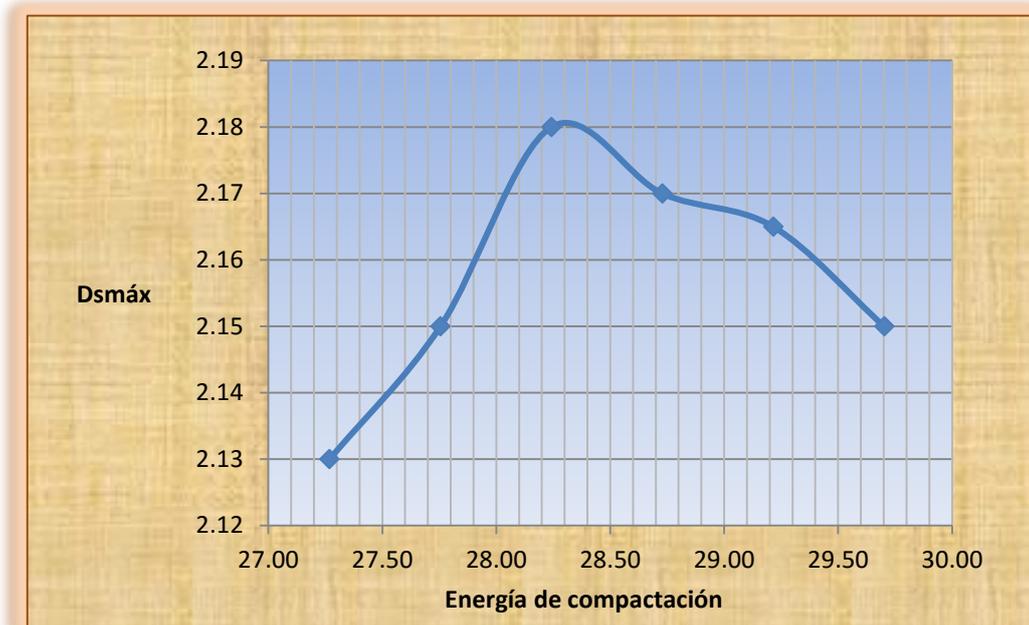
Fuente: Elaboración propia, 2015.

Se puede observar que la variación entre lo establecido por la norma con respecto al parámetro encontrado durante el desarrollo de la tesis difiere en 0.05 con respecto al valor inicial obtenido con lo establecido por la norma.

En el siguiente cuadro se puede apreciar como al aumentar la energía de compactación el material granular no obtiene su máxima densidad seca a los 56 golpes como debería ser según la ASTM D-1557 sino que su densidad seca máxima se obtuvo al aumentar la energía de compactación en 58 golpes siendo ésta 2.18 gr/cm siendo el punto óptimo mientras que al aumentar en un el número de golpes ésta tiende ya a decaer siendo su punto de quiebre de la curva.

En los resultados obtenido se observa que el material granular tiende a requerir mayor energía de compactación debido a que tiene mayor resistencia mecánica por lo que para su compactación ésta será mayor mientras el número de golpes incremente con respecto a la Densidad Seca Máxima la cual alcanzará el valor óptimo para luego decaer al perder sus propiedades de resistencia mecánica.

Gráfico N° 22. Variación E_c vs D_s máx



Fuente: Elaboración propia, 2015.

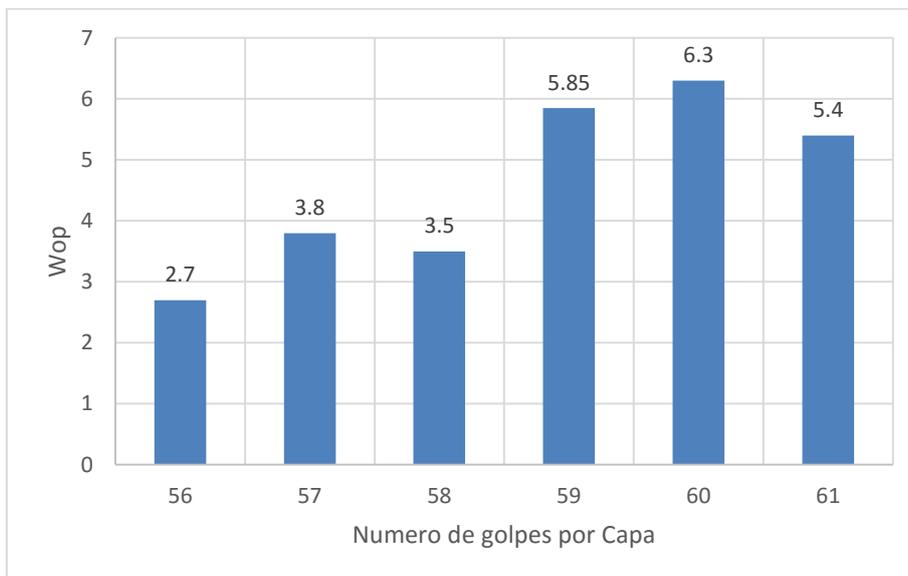
En el caso del contenido de humedad se observó una variación en su comportamiento denotando que al aumentar el número de golpes su porcentaje de humedad varía según la energía de compactación teniendo lo siguiente:

Tabla N° 6. Contenido de Humedad

Ensayo	N°gol/capa	Energía compact.	Wop
1	56	27.27	2.7
2	57	27.75	3.8
3	58	28.24	3.5
4	59	28.73	5.85
5	60	29.22	6.3
6	61	29.70	5.4

Fuente: Elaboración propia, 2015.

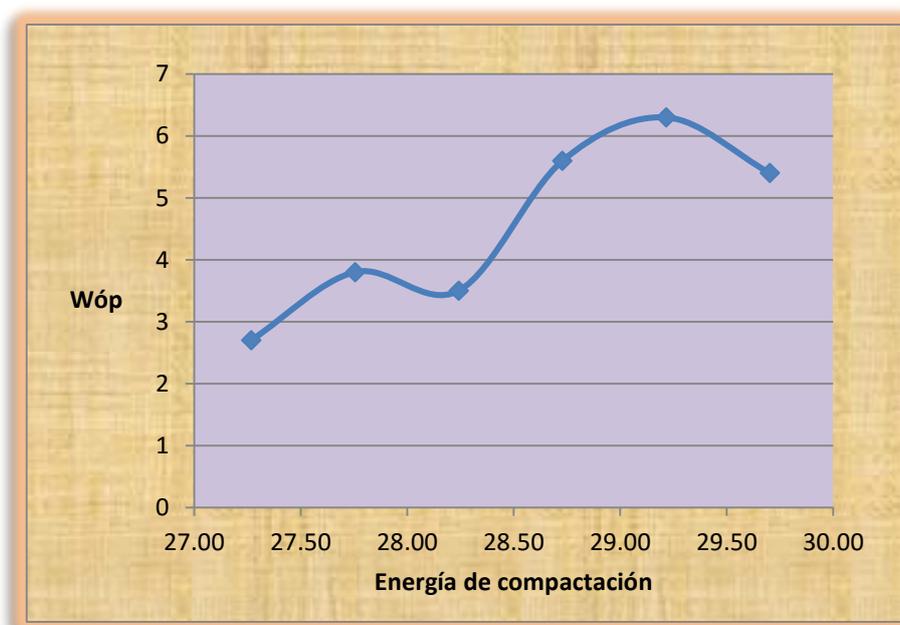
Gráfico N° 23. Variación Contenido de Humedad



Fuente: Elaboración propia, 2015.

Con respecto a la variación del contenido óptimo de humedad no mostró la misma variación que la densidad seca máxima si no que mostró que dependiendo de la energía de compactación y el contenido de humedad (%) ésta varía obteniendo un crecimiento variable según se aumente la energía de compactación.

Gráfico N° 24. Gráfica Wop

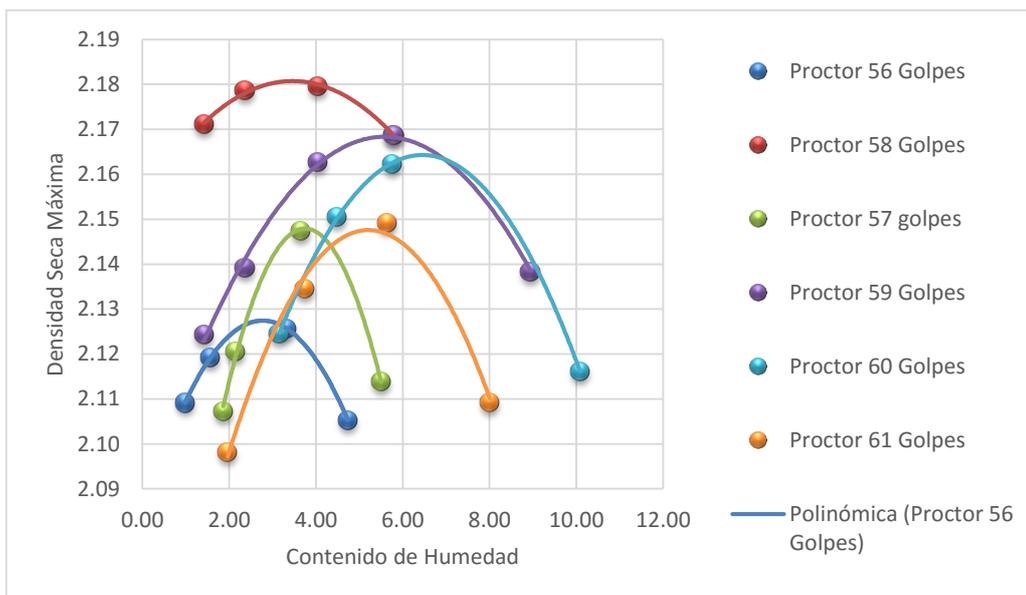


Fuente: Elaboración propia, 2015.

En el caso del comportamiento del contenido de humedad al variar el número de golpes observándose un quiebre con respecto al ensayo N° 3; sin embargo a partir del siguiente éste asciende de nuevo en la curva de Wop hasta el último ensayo donde comienza a decaer siendo éste ya el punto donde tanto la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad decaen ambos y es su punto más crítico donde ya no existe unificación de las partículas del suelo.

También se puede observar la variación de la Densidad Seca Máxima y el Contenido de Humedad con respecto a lo establecido por la norma ASTM D-1557 y la variación de ella hasta los 58 golpes en el cual se encontraron la densidad seca máxima y el óptimo contenido de humedad mostrando una variación de 0.05 gr/cc en la densidad máxima y 0.8% en el contenido de humedad mostrado en la siguiente gráfica.

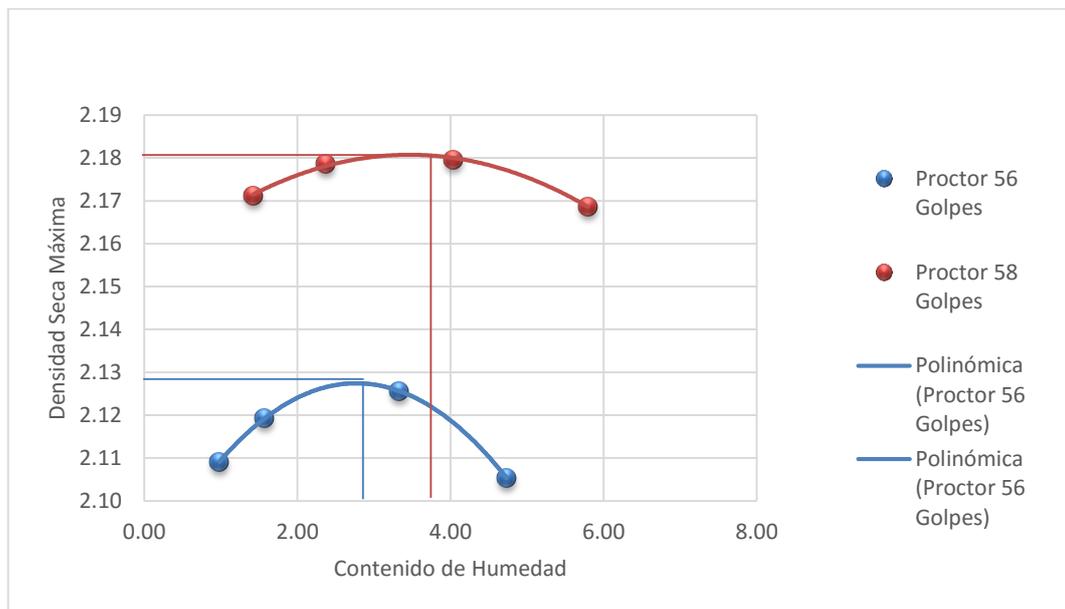
Gráfico N° 25. Variación Densidad Seca máxima y óptimo Contenido de Humedad



Fuente: Elaboración propia, 2015

Como se puede observar la interacción de la energía de compactación con respecto a la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad variará según el trabajo mecánico entregado en cual difiere con respecto a lo establecido por la norma técnica como se muestra en el siguiente gráfico.

Gráfico N° 26. Variación Energía de Compactación



Fuente: Elaboración propia, 2015

Parámetros	58 golpes	56 golpes	Variación
Densidad máxima =	2.18 gr/cc	2.13 gr/cc	0.05 gr/cm
Humedad óptima =	3.5%	2.7%	0.80%

En el gráfico anterior se observa la variación de la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad con respecto a la variación del número de golpes por capa como al incremento de la energía de compactación demostrando que para un material granular, el cual tiene mayor resistencia mecánica se requiere mayor energía de compactación.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

Según los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se observó que el comportamiento del suelo granular varía con respecto al trabajo mecánico realizado en cada ensayo de compactación que se desarrolló en el laboratorio de la Universidad Privada del Norte, observando que un material granular difiere con respecto a un suelo cohesivo, el cual tiene una granulometría más uniforme, teniendo menor resistencia mecánica haciendo que su resistencia al corte del suelo sea menor, debido a la uniformidad de las partículas; mientras que un suelo granular debido a su granulometría tiene una mayor resistencia al corte del suelo. Por lo que necesita una mayor energía de compactación para poder lograr obtener su densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad, por lo que se realizó la investigación del suelo granular procedente de la cantera El Gavilán. Se hicieron los ensayos tomando como base la norma referente a compactación del Proctor Modificado (ASTM D1557), observando que el material granular al tener una mayor resistencia necesita mayor energía de compactación con respecto al trabajo mecánico entregado en cada ensayo realizado.

Se observó que el suelo granular difiere con respecto a la norma ASTM D-1557 con respecto al ensayo de Proctor Modificado, debido que al presentar mayor resistencia al corte fue necesario aumentar el trabajo mecánico, variando el número de golpes por cada, para alcanzar la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad.

En el caso del Proctor Modificado, al aumentar la energía de compactación, la densidad seca máxima obtendrá su valor máximo al alcanzar el punto más alto de la curva al igual que su contenido de humedad, se puede observar en la Gráfica N° 23.

Durante la investigación se observó que la densidad seca máxima y su óptimo contenido de humedad, según lo especificado por la norma técnica ASTM D-1557 no logran alcanzar los valores reales debido a que se necesitó incrementar la energía de compactación en 0.97 kg/cm^2 para poder encontrar los parámetros de densidad y humedad. Debido a que la norma técnica referente a Proctor Modificado no fue realizada para los suelos existentes en nuestro país, siendo tomada como referencia por las normas técnicas peruanas, por lo cual al ser realidades diferentes el material granular requiere mayor energía de compactación. Razón por la cual el incremento en el número de golpes por capa variando desde los 56 hasta los 61, donde se observó que la densidad seca máxima y el contenido de humedad obtuvieron valores próximos con respecto a lo establecido por el Proctor Modificado, por lo que se tomó la variación desde 56 hasta 61 golpes por cada capa

compactada ya que al seguir compactando la curva Proctor va obtener tendría valores menores a la norma, observando que en el ensayo N° 3 donde se aumentó el número de golpes por capa a 58, se obtuvo la densidad seca máxima como se demuestra en la Gráfica N° 23 y 24, se observa que la densidad seca máxima tiende a obtener un crecimiento parabólico debido a que al llegar al valor óptimo donde el suelo a encontrado su densidad seca, comienza a descender debido a que comienza a perder su resistencia mecánica con respecto a la unificación de partículas.

Mientras que se observó que el contenido de humedad tuvo un comportamiento diferente al de la densidad seca máxima debido a que ésta no mostró un crecimiento parabólico como la densidad, sino que mientras más se aumentaba la energía de compactación ésta mostró una variación con respecto al ensayo N° 3 mostrando un punto de inflexión y comenzando a subir lo cual no mostró la misma secuencia debido a factores como el contenido de humedad o la saturación del material.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

1. Al realizar la variación de la energía de compactación aumentando el número de golpes por capa se obtuvo que la densidad seca máxima aumento a 2.18 gr/cm mientras que el óptimo contenido de humedad fue menor siendo 3.5% siendo mayor la Densidad Seca Máxima demostrando que la hipótesis planteada fue correcta.
2. La energía de compactación durante la realización de los ensayos fueron desde 27.27 kg/cm² encontrada según la norma técnica hasta los 29.70 kg/cm², siendo la energía necesaria de 28.24 kg/cm² para poder determinar los valores de la densidad seca máxima y el óptimo contenido de humedad.
3. Con la variación de la energía de compactación se observó un incremento de 0.05 gr/cm en la densidad seca máxima obteniendo 2.18 gr/cm y 0.8% en el contenido de humedad obteniendo 3.5%, con respecto a la densidad seca de 2.13 gr/cm y 2.7% del contenido de humedad obtenidos de acuerdo a la norma técnica ASTM D-1557.

CAPÍTULO 8. RECOMENDACIONES

1. Se recomendaría seguir realizando el análisis de los suelos granulares con respecto a la Densidad Seca Máxima y Óptimo Contenido de Humedad teniendo como referencia la energía de compactación determinada en la siguiente investigación para poder encontrar un valor estándar con respecto a los parámetros de compactación en la Densidad Seca Máxima y Óptimo Contenido de Humedad.
2. En esta investigación se realizó el análisis de la cantera El Gavilán siendo la más explotada, sin embargo se recomienda el análisis de otras canteras existentes en nuestra localidad de la cual se extraiga con frecuencia el material granular.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

1. Sowers, G. (2014). Introducción a la Mecánica de los Suelos y Cimentación. Madrid: Llmusa-Wiley.
2. Jorajuria, D. (2004). Resistencia mecánica del suelo como parametro mecanico del suelo. Buenos Aires: Lumen.
3. Yepes, V. (2004). Compactación Dinámica y control con ensayos de penetración Dinámica. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
4. Badillo, J. (2014). Fundamentos de la Mecánica de Suelos. México: Limusa.
5. Escario, U. (1989). Terraplenes y pedraplenes. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transporte.
6. Escobar, C. (2007). Mecanida de Suelos. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
7. Georges, A. (2004). Compactación en carreteras y aeropuertos. Barcelona: Tecnicos Asociados.
8. González, J. C. (2013). Incidencia de Resultados del ensayo Proctor Modificado por la Influencia del Clima. México: UNAM.
9. López, W. (2011). slideshare. Recuperado el 15 de 09 de 2016, de <http://es.slideshare.net/wlopezalmarza/compactacion-de-suelos>
10. Parano, J. (2012). Compatación de Suelos y Materiales Estabilizados. México: UNAM.
11. Pérez, J. (2014). Introduccion a la Mecánica de Suelos. La Coruña: Universidad La Coruña.
12. Ruíz, C. (2005). Mecanismo de Compatación de Suelos. Mar de Plata: EUBEDA.
13. Sagués, P. (2008). Propiedades de los Suelos Compactados. Buenos Aires: LMS-FIUBA.
14. Sagués, P. (2008). Tesis: Rigidez a baja deformación en el Pampeado Compactado. Buenos Aires: FIUBA.
15. ASTM D-1557. (2000). Proctor Modificado. West Conshohocken: ASTM.
16. Sánchez, V. (1996). Dinámica y Mecánica de Suelos. Madrid: Ediciones.

ANEXOS

PANEL FOTOGRÁFICO

Fotografía N° 2. Material de la cantera El Gavilán



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 3. Cuarteo del suelo granular



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 4. Realización del cuarteo en laboratorio



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 5. Muestra cuarteada



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 6. Muestra Seleccionada del cuarteo



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 7. Realización del análisis granulométrico



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 8. Tamizado del material granular



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 9. Ensayo granulométrico



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 10. Recolección de información



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 11. Lavado de finos



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 12. Colocación de muestras en el horno



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 13. Preparación de muestras



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 14. Incorporación del agua en el material granular



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 15. Molde de compactación



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 16. Realización de ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 17. Muestra incorporada en el molde de compactación



Fuente: Elaboración propia, 2015

Fotografía N° 18. Extracción de muestra para determinar el contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia, 2015



FACULTAD DE INGENIERÍA
LAB, MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO DE COMPACTACIÓN - CONTENIDO DE HUMEDAD

Ensayo N° 01: 56 Golpes

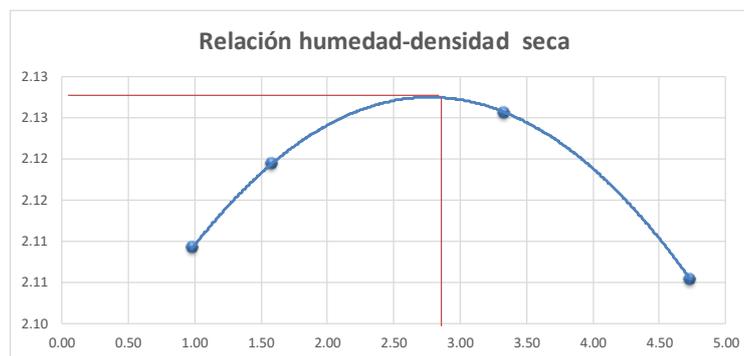
Molde N°	1	2	3	4				
PESO ESPECÍFICO								
peso molde	6612	6612	6612	6612				
pmh + molde	11090	11138	11230	11248				
Peso muestra humeda	4478	4526	4618	4636				
Volumen del molde	2102.48	2102.48	2102.48	2102.48				
Densidad Humeda	2.13	2.15	2.20	2.21				
CONTENIDO DE HUMEDAD								
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h
Peso tara	74.1	85.5	84	74	68	70	38	38
Peso húmedo+tara	456	464.2	546	518	440	442	270	240
Peso seco + tara	451	458	540	510	428	430	258	232.2
Pmh	381.9	378.7	462	444	372	372	232	202
Pms	378.1	375.1	456	436	360	360	220	194.2
Peso del agua	3.8	3.6	6	8	12	12	12	7.8
Contenido de humedad	1.01	0.96	1.32	1.83	3.33	3.33	5.45	4.02
W prom	0.98		1.58		3.33		4.74	
Densidad seca Gr/c.c	2.11	2.12	2.13	2.11				

RESUMEN

W promedio	0.98	1.58	3.33	4.74
Densidad Seca	2.11	2.12	2.13	2.11

altura del molde	cm	11.5
diámetro del molde	cm	15.6
volumen del molde	cm ³	2102.48

cantidad de agua	cm ³
1°	60
2°	120
4°	240
6°	360



Densidad máxima	=	2.13 gr/cc
Humedad óptima	=	2.70 %



FACULTAD DE INGENIERÍA
LAB, MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO DE COMPACTACIÓN - CONTENIDO DE HUMEDAD

Ensayo N° 02: 57 Golpes

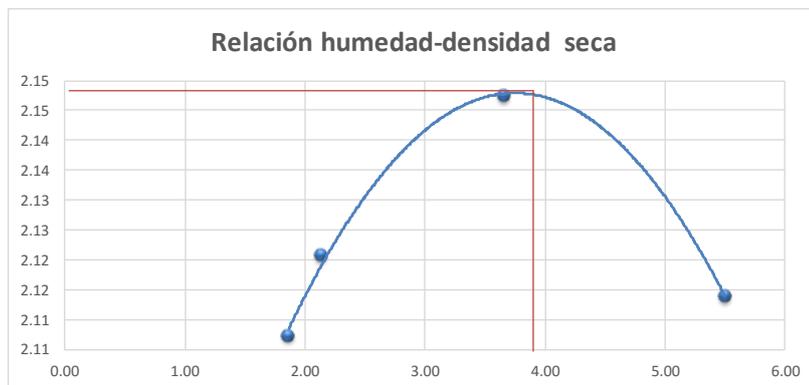
Molde N°	1	2	3	4				
PESO ESPECÍFICO								
peso molde	6612	6612	6612	6612				
pmh + molde	11125	11166	11292	11301				
Peso muestra humeda	4513	4554	4680	4689				
Volumen del molde	2102.48	2102.48	2102.48	2102.48				
Densidad Humeda	2.15	2.17	2.23	2.23				
CONTENIDO DE HUMEDAD								
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h
Peso tara	38	38	38	38	38	38	38	38
Peso húmedo+tara	299	239.2	294	308	315.6	272.8	277.6	277.9
Peso seco + tara	294.9	235	288.2	302.8	306.3	264.1	264.3	266.2
Pmh	261	201.2	256	270	277.6	234.8	239.6	239.9
Pms	256.9	197	250.2	264.8	268.3	226.1	226.3	228.2
Peso del agua	4.1	4.2	5.8	5.2	9.3	8.7	13.3	11.7
Contenido de humedad	1.60	2.13	2.32	1.96	3.47	3.85	5.88	5.13
W prom	1.86		2.14		3.66		5.50	
Densidad seca Gr/c.c	2.11		2.12		2.15		2.11	

RESUMEN

W promedio	1.86	2.14	3.66	5.50
Densidad Seca	2.11	2.12	2.15	2.11

altura del molde	cm	11.5
diámetro del molde	cm	15.6
volumen del molde	cm ³	2102.48

cantidad de agua	cm ³
1°	60
2°	120
4°	240
6°	360



Densidad máxima	=	2.15 gr/cc
Humedad óptima	=	3.80 %



FACULTAD DE INGENIERÍA
LAB. MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO DE COMPACTACIÓN - CONTENIDO DE HUMEDAD

Ensayo N° 03: 58 Golpes

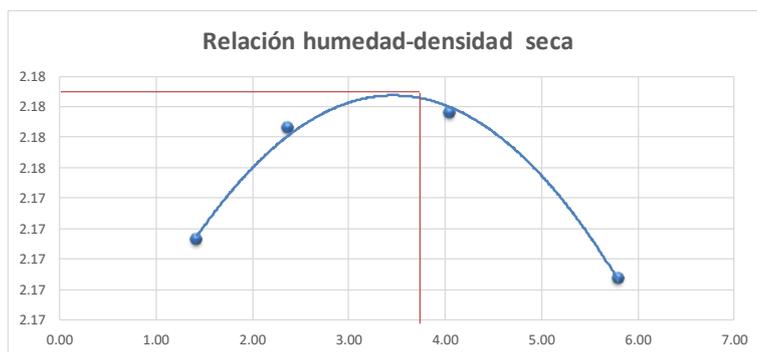
Molde N°	1	2	3	4				
PESO ESPECÍFICO								
peso molde	6612	6612	6612	6612				
pmh + molde	11242	11301	11380	11436				
Peso muestra humeda	4630	4689	4768	4824				
Volumen del molde	2102.48	2102.48	2102.48	2102.48				
Densidad Humeda	2.20	2.23	2.27	2.29				
CONTENIDO DE HUMEDAD								
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h
Peso tara	38	38	85.1	75.5	38	38	38	38
Peso húmedo+tara	253.6	284.1	456.2	429.5	240.8	256.2	280	277.9
Peso seco + tara	250.7	280.5	447.2	421.7	232.1	248.6	265.3	266.2
Pmh	215.6	246.1	371.1	354	202.8	218.2	242	239.9
Pms	212.7	242.5	362.1	346.2	194.1	210.6	227.3	228.2
Peso del agua	2.9	3.6	9	7.8	8.7	7.6	14.7	11.7
Contenido de humedad	1.36	1.48	2.49	2.25	4.48	3.61	6.47	5.13
W prom	1.42		2.37		4.05		5.80	
Densidad seca Gr/c.c	2.17		2.18		2.18		2.17	

RESUMEN

W promedio	1.42	2.37	4.05	5.80
Densidad Seca	2.17	2.18	2.18	2.17

altura del molde	cm	11.5
diámetro del molde	cm	15.6
volumen del molde	cm ³	2102.48

cantidad de agua	cm ³
1°	60
2°	120
4°	240
6°	360



Densidad máxima =	2.18 gr/cc
Humedad óptima =	3.50 %



FACULTAD DE INGENIERÍA
LAB. MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPACTACIÓN - CONTENIDO DE HUMEDAD

Ensayo N° 04: 59 Golpes

Molde N°	1	2	3	4	5
PESO ESPECÍFICO					
peso molde	6612	6612	6612	6612	6612
pmh + molde	11142	11216	11343	11436	11510
Peso muestra humeda	4530	4604	4731	4824	4898
Volumen del molde	2102.48	2102.48	2102.48	2102.48	2102.48
Densidad Humeda	2.15	2.19	2.25	2.29	2.33

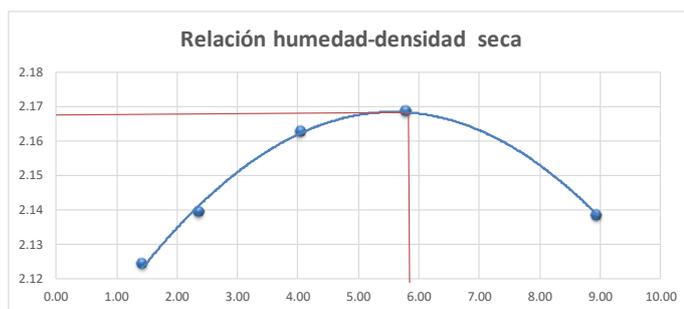
CONTENIDO DE HUMEDAD												
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j		
Peso tara	38	38	85.1	75.5	38	38	38	38	38	38	38	38
Peso húmedo+tara	253.6	284.1	456.2	429.5	240.8	256.2	280	277.9	284.1	279.12		
Peso seco + tara	250.7	280.5	447.2	421.7	232.1	248.6	265.3	266.2	262.1	261.1		
Pmh	215.6	246.1	371.1	354	202.8	218.2	242	239.9	246.1	241.12		
Pms	212.7	242.5	362.1	346.2	194.1	210.6	227.3	228.2	224.1	223.1		
Peso del agua	2.9	3.6	9	7.8	8.7	7.6	14.7	11.7	22	18.02		
Contenido de humedad	1.36	1.48	2.49	2.25	4.48	3.61	6.47	5.13	9.82	8.08		
W prom	1.42		2.37		4.05		5.80		8.95			
Densidad seca Gr/c.c	2.12		2.14		2.16		2.17		2.14			

RESUMEN

W promedio	1.42	2.37	4.05	5.80	8.95
Densidad Seca	2.12	2.14	2.16	2.17	2.14

altura del molde	cm	11.5
diámetro del molde	cm	15.6
volumen del molde	cm ³	2102.48

cantidad de agua	cm ³
1°	60
2°	120
4°	240
6°	360



Densidad máxima =	2.168 gr/cc
Humedad óptima =	5.85 %



FACULTAD DE INGENIERÍA
LAB. MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO DE COMPACTACIÓN - CONTENIDO DE HUMEDAD

Ensayo N° 05: 60 Golpes

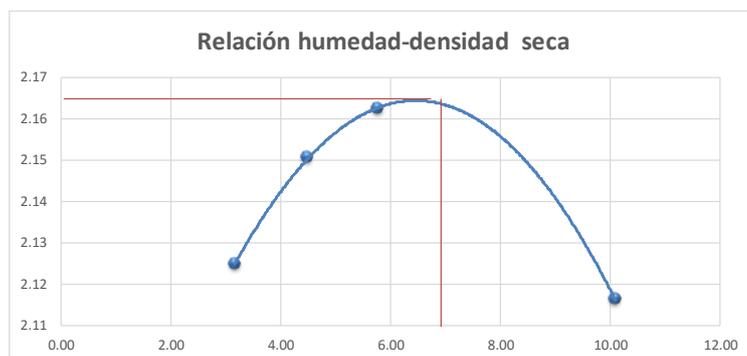
Molde N°	1	2	3	4				
PESO ESPECÍFICO								
peso molde	6612	6612	6612	6612				
pmh + molde	11220	11336	11420	11510				
Peso muestra humeda	4608	4724	4808	4898				
Volumen del molde	2102.48	2102.48	2102.48	2102.48				
Densidad Humeda	2.19	2.25	2.29	2.33				
CONTENIDO DE HUMEDAD								
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h
Peso tara	38	38	38	38	85.3	74.2	69	69.5
Peso húmedo+tara	273.5	286.7	248.3	277.6	470.8	438.1	424.7	372.1
Peso seco + tara	268.1	277.2	240.1	266.4	448	420	380.1	355.4
Pmh	235.5	248.7	210.3	239.6	385.5	363.9	355.7	302.6
Pms	230.1	239.2	202.1	228.4	362.7	345.8	311.1	285.9
Peso del agua	5.4	9.5	8.2	11.2	22.8	18.1	44.6	16.7
Contenido de humedad	2.35	3.97	4.06	4.90	6.29	5.23	14.34	5.84
W prom	3.16		4.48		5.76		10.09	
Densidad seca Gr/c.c	2.12		2.15		2.16		2.12	

RESUMEN

W promedio	3.16	4.48	5.76	10.09
Densidad Seca	2.12	2.15	2.16	2.12

altura del molde	cm	11.5
diámetro del molde	cm	15.6
volumen del molde	cm ³	2102.48

cantidad de agua	cm ³
1°	60
2°	120
4°	240
6°	360



Densidad máxima =	2.165 gr/cc
Humedad óptima =	6.30 %



FACULTAD DE INGENIERÍA
LAB. MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO DE COMPACTACIÓN - CONTENIDO DE HUMEDAD

Ensayo N° 06: 61 Golpes

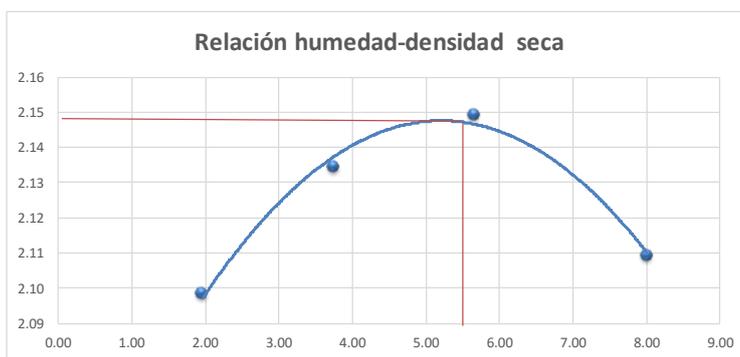
Molde N°	1	2	3	4				
PESO ESPECÍFICO								
peso molde	6612	6612	6612	6612				
pmh + molde	11110	11268	11386	11402				
Peso muestra humeda	4498	4656	4774	4790				
Volumen del molde	2102.48	2102.48	2102.48	2102.48				
Densidad Humeda	2.14	2.21	2.27	2.28				
CONTENIDO DE HUMEDAD								
Tara	a	b	c	d	e	f	g	h
Peso tara	38	38	38	38	38	38	83.4	82.7
Peso húmedo+tara	214	231.8	216.5	235.7	225.9	264.9	462.3	386.2
Peso seco + tara	210.4	228.3	210.1	228.5	215.4	253.3	429.1	367.9
Pmh	176	193.8	178.5	197.7	187.9	226.9	378.9	303.5
Pms	172.4	190.3	172.1	190.5	177.4	215.3	345.7	285.2
Peso del agua	3.6	3.5	6.4	7.2	10.5	11.6	33.2	18.3
Contenido de humedad	2.09	1.84	3.72	3.78	5.92	5.39	9.60	6.42
W prom	1.96	3.75	5.65	8.01				
Densidad seca Gr/c.c	2.10	2.13	2.15	2.11				

RESUMEN

W promedio	1.96	3.75	5.65	8.01
Densidad Seca	2.10	2.13	2.15	2.11

altura del molde	cm	11.5
diámetro del molde	cm	15.6
volumen del molde	cm ³	2102.48

cantidad de agua	cm ³
1°	60
2°	120
4°	240
6°	360



Densidad máxima	=	2.148 gr/cc
Humedad óptima	=	5.40 %



FACULTAD DE INGENIERÍA
LAB. MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Material : Material Granular Cantera El Gavilán

		Desing. del Tamiz US	A Peso Retenido gr,	A Peso Retenido gr, REAL	B % Retenido	% Acumulado	% Pasante		
PIEDRA O CANTOS		4							
		3							
GRAVA	GRUESA	2 1/2							
		2	165.00	165.00	2.07	2.07	97.93		
		1 1/2	0.00	0.00	0.00	2.07	97.93		
		1	611.40	611.40	7.68	9.76	90.24		
		3/4	711.40	711.40	8.94	18.70	81.30		
		1/2	1405.90	1405.90	17.67	36.36	63.64		
		3/8	719.30	719.30	9.04	45.40	54.60		
		Nº 4	2508.60	2495.22	31.35	76.76	23.24		
		FINA		Nº 10	163.40	162.53	2.04	78.80	21.20
				Nº 20	263.40	262.00	3.29	82.09	17.91
	Nº 30		33.90	33.72	0.42	82.51	17.49		
	Nº 40		751.15	747.14	9.39	91.90	8.10		
	Nº 60		450.15	447.75	5.63	97.53	2.47		
	Nº 100		124.10	123.44	1.55	99.08	0.92		
	Nº 200		50.30	50.03	0.63	99.71	0.29		

PESO TOTAL DE LA MUESTRA
(P.T.M.)
7958 gr

ENERGÍA DE COMPACTACIÓN MEDIANTE PROCTOR MODIFICADO

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

- E= Energía específica de compactación
 N= Número de golpes por capa
 n= Número de capas
 W= Peso pistón
 H= altura
 V= Volumen

Proctor modificado 1 (56 golpes)		Proctor modificado 2 (57 golpes)		Proctor modificado 3 (58 golpes)	
Nº golpes	56	Nº golpes	57	Nº golpes	58
Nº capas	5	Nº capas	5	Nº 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 (59 golpes)		Proctor modificado 5 (60 golpes)		Proctor modificado 6 (61 golpes)	
Nº golpes	59	Nº golpes	60	Nº golpes	61
Nº capas	5	Nº capas	5	Nº 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

RELACION DE LA INFLUENCIA DE LA ENERGÍA EN EL ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD Y LA MÁXIMA DENSIDAD SECA

- Energía de Compactación

$$Ec = N \cdot n \cdot W \cdot h$$

V

N: número de golpes por capa

n: número de capas de suelo

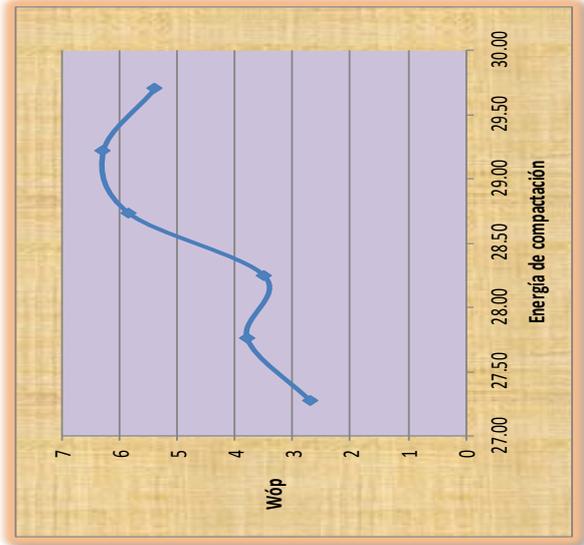
W: peso del martillo (Kg)

h: altura de caída del martillo (cm)

V: volumen del suelo compactado

Ensayo	Nº gol/capa	Energía comp	Dsmáx
1	56	27.27	2.13
2	57	27.75	2.15
3	58	28.24	2.18
4	59	28.73	2.168
5	60	29.22	2.165
6	61	29.70	2.1485

Ensayo	Nº gol/capa	Energía compa	W _{óp}
1	56	27.27	2.7
2	57	27.75	3.8
3	58	28.24	3.5
4	59	28.73	5.85
5	60	29.22	6.3
6	61	29.70	5.4



VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN

RESUMEN

PROCTOR MODIFICADO 56 GOLPES				
W promedio	0.98	1.58	3.33	4.74
Densidad Seca	2.11	2.12	2.13	2.11

PROCTOR MODIFICADO 57 GOLPES				
W promedio	1.86	2.14	3.66	5.50
Densidad Seca	2.11	2.12	2.15	2.11

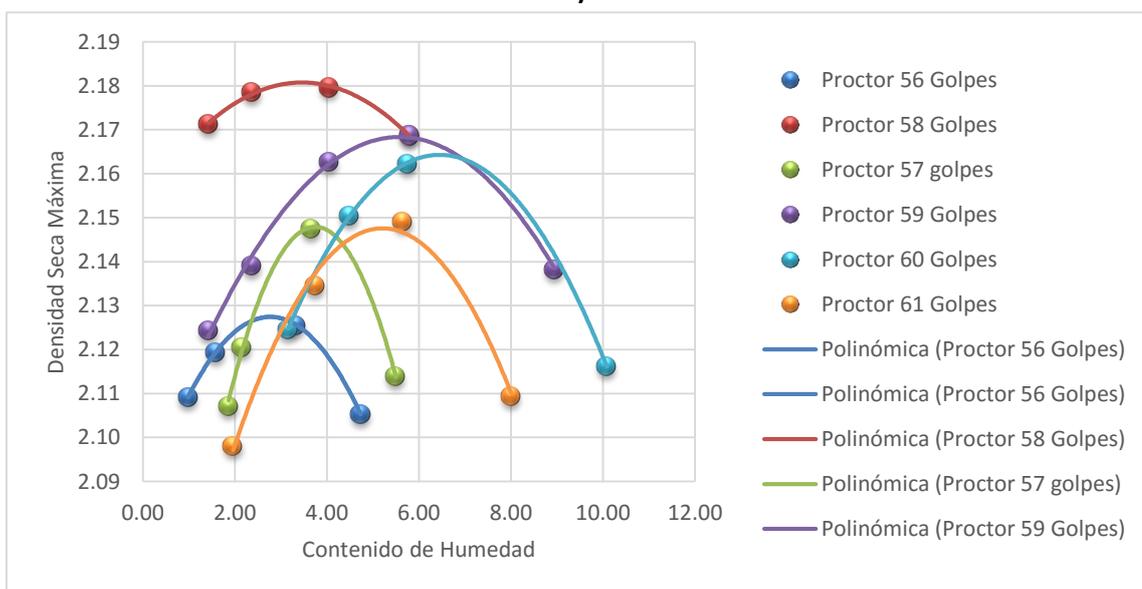
PROCTOR MODIFICADO 58 GOLPES				
W promedio	1.42	2.37	4.05	5.80
Densidad Seca	2.17	2.18	2.18	2.17

PROCTOR MODIFICADO 59 GOLPES					
W promedio	1.42	2.37	4.05	5.80	8.95
Densidad Seca	2.12	2.14	2.16	2.17	2.14

PROCTOR MODIFICADO 60 GOLPES				
W promedio	3.16	4.48	5.76	10.09
Densidad Seca	2.12	2.15	2.16	2.12

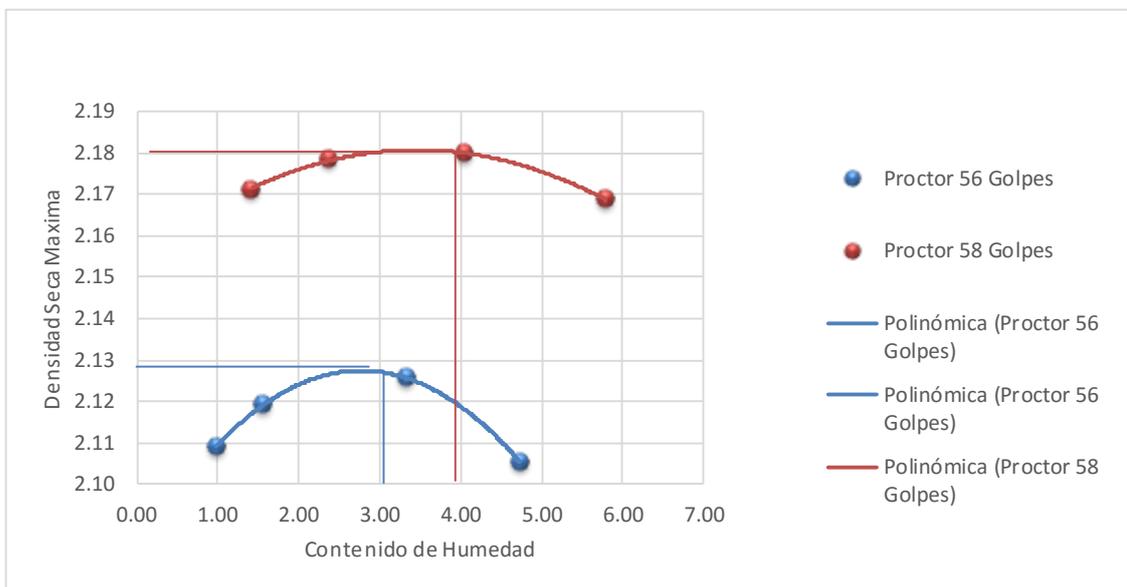
PROCTOR MODIFICADO 61 GOLPES				
W promedio	1.96	3.75	5.65	8.01
Densidad Seca	2.10	2.13	2.15	2.11

Variación Densidad Seca Máxima y Contenido de Humedad



COMPARACIÓN DSMAX Y CONTENIDO DE HUMEDAD

Variación Densidad Seca y Humedad Óptima



Parametros	58 golpes	56 golpes	Variacion
Densidad máxima	2.18 gr/cc	2.13 gr/cc	0.05 gr/cc
Humedad optima	3.5 %	2.7 %	0.80 %

Densidad máxima	2.13 gr/cc
Humedad optima	2.7 %

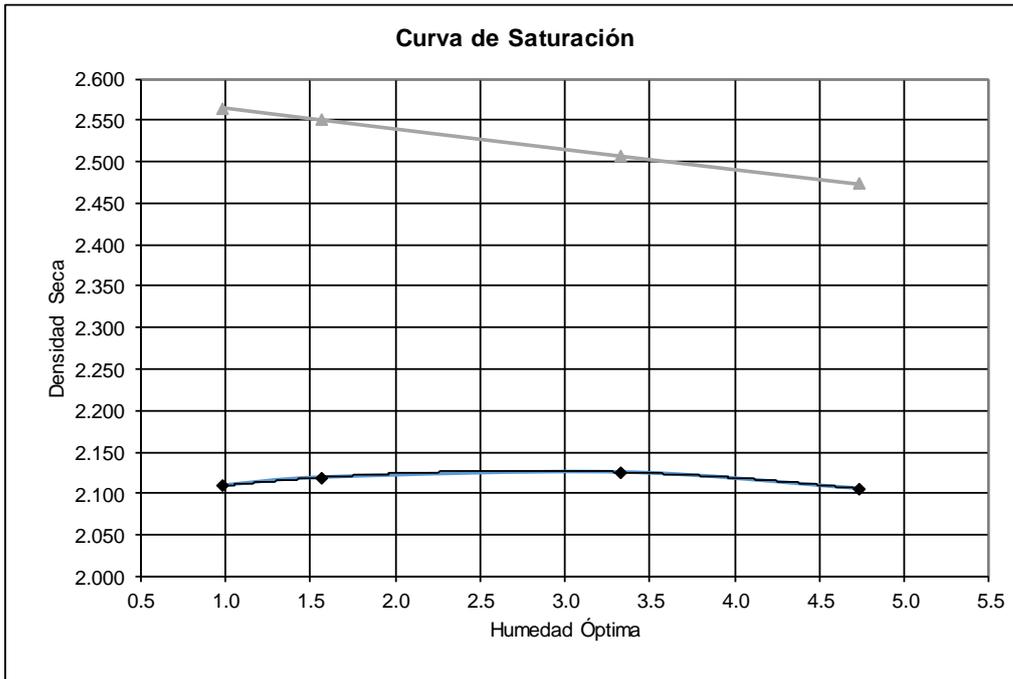
Curva Proctor y Curva de Saturación 56 golpes

Gs	2.590	gr/cc
----	-------	-------

Contenido de humedad	gr/cc	0.982	1.575	3.333	4.736
----------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Densidad seca	gr/cc	2.109	2.119	2.126	2.105
---------------	-------	-------	-------	-------	-------

Curva de Saturación	gr/cc	2.565	2.550	2.506	2.473
---------------------	-------	-------	-------	-------	-------



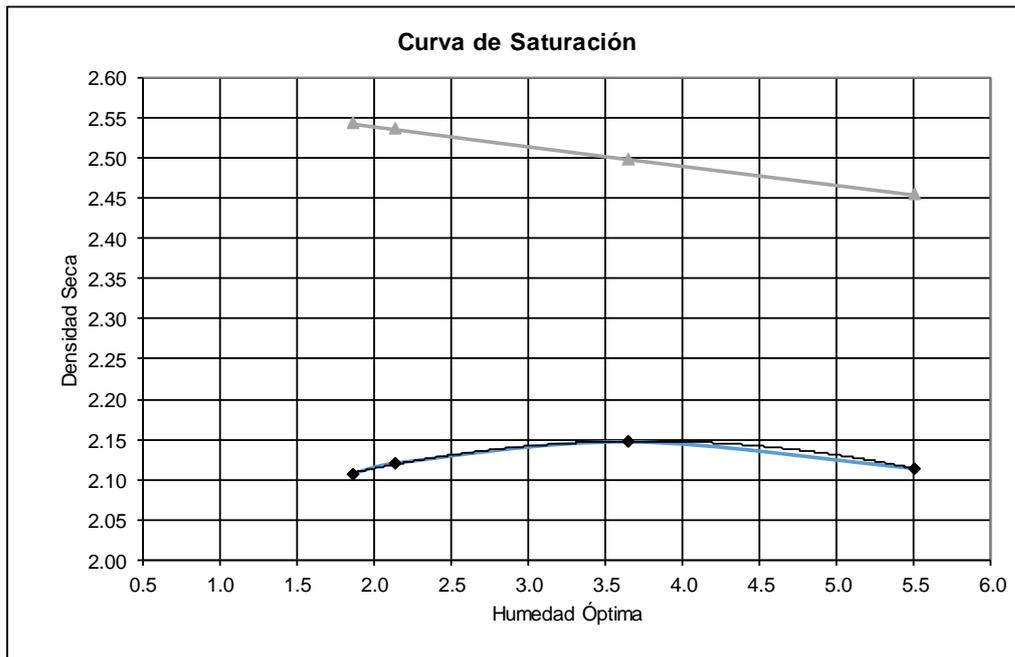
Curva Proctor y Curva de Saturación 57 golpes

Gs	2.590
----	-------

Contenido de humedad	gr/cc	1.86	2.14	3.66	5.50
----------------------	-------	------	------	------	------

Densidad seca	gr/cc	2.11	2.12	2.15	2.11
---------------	-------	------	------	------	------

Curva de Saturación	gr/cc	2.543	2.536	2.499	2.455
---------------------	-------	-------	-------	-------	-------



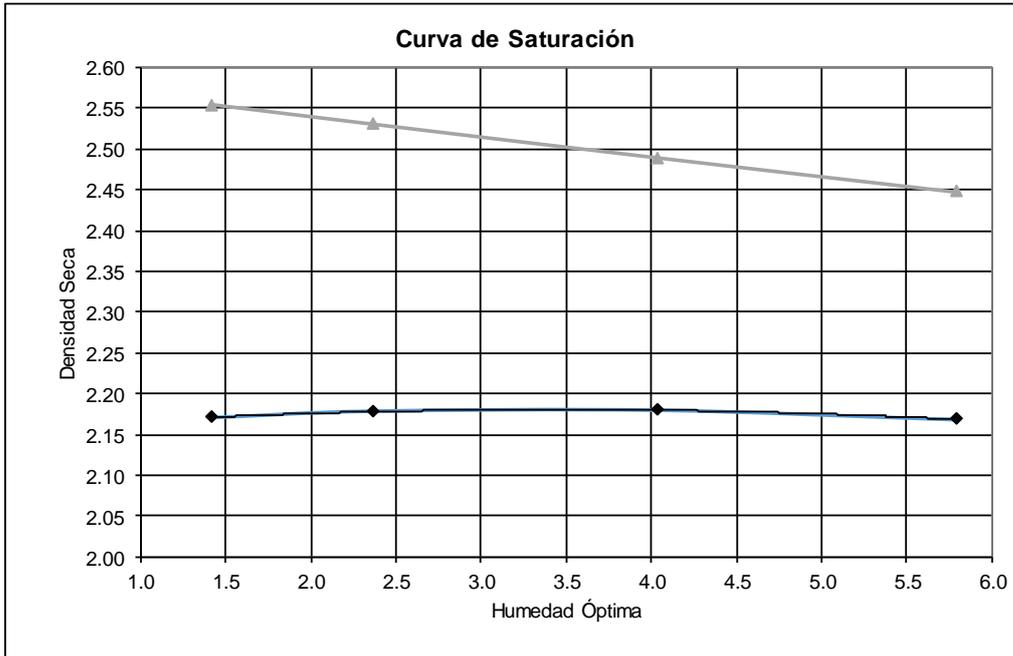
Curva Proctor y Curva de Saturación 58 golpes

Gs	2.590
----	-------

Contenido de humedad	gr/cc	1.42	2.37	4.05	5.80
----------------------	-------	------	------	------	------

Densidad seca	gr/cc	2.17	2.18	2.18	2.17
---------------	-------	------	------	------	------

Curva de Saturación	gr/cc	2.55	2.53	2.49	2.45
---------------------	-------	------	------	------	------



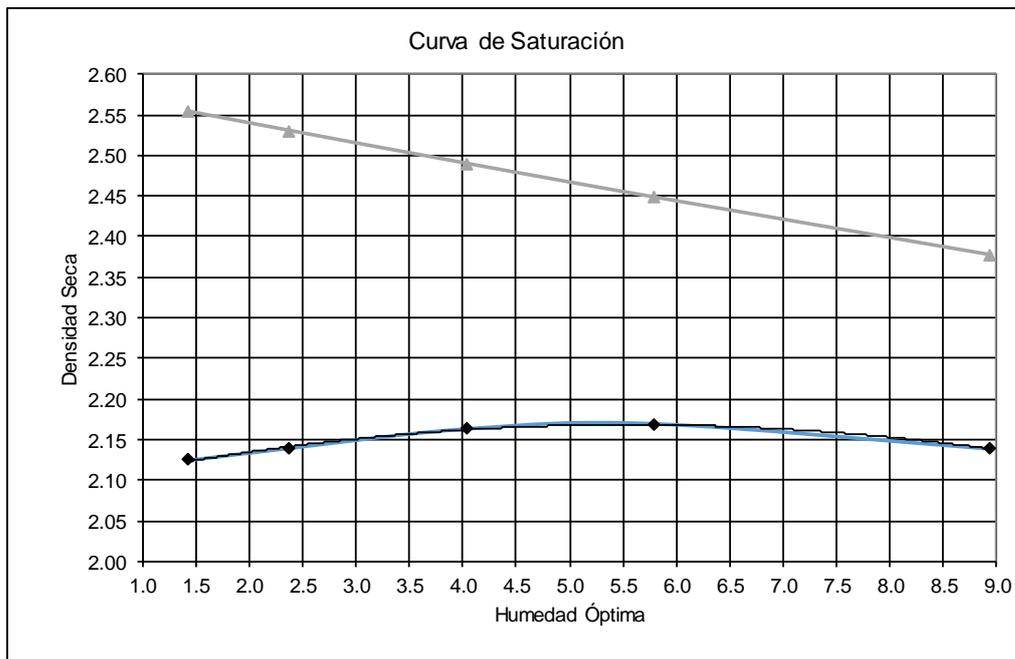
Curva Proctor y Curva de Saturación 59 golpes

Gs	2.590
----	-------

Contenido de humedad	gr/cc	1.42	2.37	4.05	5.80	8.95
----------------------	-------	------	------	------	------	------

Densidad seca	gr/cc	2.12	2.14	2.16	2.17	2.14
---------------	-------	------	------	------	------	------

Curva de Saturación	gr/cc	2.554	2.530	2.489	2.448	2.377
---------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



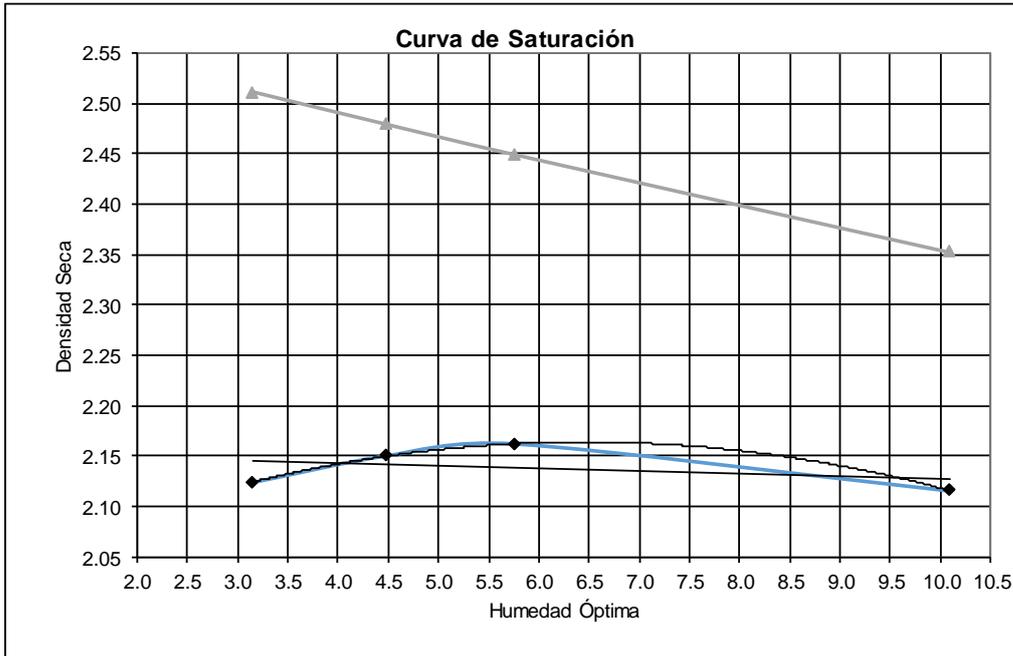
Curva Proctor y Curva de Saturación 60 golpes

Gs	2.590
----	-------

Contenido de humedad	gr/cc	3.16	4.48	5.76	10.09
----------------------	-------	------	------	------	-------

Densidad seca	gr/cc	2.12	2.15	2.16	2.12
---------------	-------	------	------	------	------

Curva de Saturación	gr/cc	2.511	2.479	2.449	2.353
---------------------	-------	-------	-------	-------	-------



Curva Proctor y Curva de Saturación 61 golpes

Gs	2.590
----	-------

Contenido de humedad	gr/cc	1.96	3.75	5.65	8.01
----------------------	-------	------	------	------	------

Densidad seca	gr/cc	2.10	2.13	2.15	2.11
---------------	-------	------	------	------	------

Curva de Saturación	gr/cc	2.540	2.496	2.451	2.398
---------------------	-------	-------	-------	-------	-------

