

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“INFLUENCIA DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EN EL
ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD Y LA MÁXIMA DENSIDAD
SECA EN LOS SUELOS GRANULARES”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

JOSÉ LUIS OCAS DE LA CRUZ

ASESOR:

DRA. ING. ROSA HAYDEE LLIQUE MONDRAGÓN

CAJAMARCA - PERU 2013

Dedicatoria:

A mis padres;

a mis hermanos;

a mis familiares y amigos.

Agradezco:

Primeramente a Dios por darme la vida.

A mis profesores, por sus enseñanzas, especialmente a mi asesora y coordinador de tesis y en general a todas las personas que colaboraron en la elaboración de éste trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido	Pág.
Dedicatoria	II
Agradecimiento	III
Índice de contenidos	IV
Índice de tablas	V
Índice de figuras	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
Introducción	IX
Capítulo I: Marco Teórico	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Bases Teóricas	2
Capítulo II: Planteamiento Metodológico	24
2.1 Aspectos Generales	24
2.2 Problema de Investigación	26
2.2.1 Planteamiento del problema	26
2.2.2 Formulación del problema	27
2.2.3 Justificación de la investigación	27
2.2.4 Limitaciones y restricciones	28
2.3 Objetivos de la investigación	28
2.4 Hipótesis y variables	29
2.5 Tipos de Investigación y Análisis	29
2.6 Diseño Metodológico	29
2.6.1 El Universo de la Investigación	29
2.6.2 Técnicas, instrumentos para obtener los datos	29
2.6.3 Población de informantes	30
2.6.4 Forma de Tratamiento de los Datos	30
2.6.5 Forma de los Análisis de las informaciones	31
2.7 Metodología y procedimientos	31
2.7.1 Obtención de muestras de suelo	31
2.7.2 Ensayos Generales	31

2.7.3 Ensayos Especiales	35
Capítulo III: Análisis y Discusión de Resultados	37
3.1 Resultado de la Investigación	37
3.2 Análisis de la Información	44
3.3 Contrastación de Hipótesis	44
3.4 Interpretación de la Información	45
Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones	46
Conclusiones	46
Recomendaciones	46
Referencias bibliográficas	47
Anexos	49
Panel fotográfico	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de suelos AASHTO	8
Tabla 2. Clasificación de suelos SUCS	10
Tabla 3. Simbolización SUCS	11
Tabla 4. ASTM D 1557 Proctor Modificado	22
Tabla 5. Métodos de compactación	22
Tabla 6. Resultados del contenido de humedad	37
Tabla 7. Resultados del análisis granulométrico combinado	37
Tabla 8. Resultado del límite líquido	38
Tabla 9. Resultado a los 56 golpes	39
Tabla 10. Resultado a los 57 golpes	39
Tabla 11. Resultado a los 58 golpes	40
Tabla 12. Resultado a los 59 golpes	40
Tabla 13. Resultado a los 60 golpes	41
Tabla 14. Resultado a los 61 golpes	41
Tabla 15. Resultado a los 62 golpes	42
Tabla 16. Relación de la energía de compactación	42
Tabla 17. Contenido de humedad	50
Tabla 18. Análisis granulométrico combinado	50
Tabla 19. Peso específico	51

Tabla 20. Límites de consistencia	51
Tabla 21. Energía de compactación 27.24 Kg.cm/cm ³	52
Tabla 22. Energía de compactación 27.72 Kg.cm/cm ³	53
Tabla 23. Energía de compactación 28.21 Kg.cm/cm ³	54
Tabla 24. Energía de compactación 28.70 Kg.cm/cm ³	55
Tabla 25. Energía de compactación 29.18 Kg.cm/cm ³	56
Tabla 26. Energía de compactación 29.67 Kg.cm/cm ³	57
Tabla 27. Energía de compactación 30.15 Kg.cm/cm ³	58
Tabla 28. Estadísticas descriptivas de la densidad máxima	59
Tabla 29. Estadísticas descriptivas del óptimo contenido de humedad	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Rangos del límite líquido	7
Figura 2. Carta de plasticidad	9
Figura 3. Fases de la curva de compactación	13
Figura 4. Menisco en un suelo	14
Figura 5. Relación densidad seca y contenido de humedad	16
Figura 6. Curvas de compactación a 25 y 56 golpes	17
Figura 7. Curva de compactación	19
Figura 8. Cantera Otuzco - Apalín	25
Figura 9. Curva análisis granulométrico	37
Figura 10. Límite líquido	38
Figura 11. Energía de compactación 27.24 Kg.cm/cm ³	39
Figura 12. Energía de compactación 27.72 Kg.cm/cm ³	39
Figura 13. Energía de compactación 28.21 Kg.cm/cm ³	40
Figura 14. Energía de compactación 28.70 Kg.cm/cm ³	40
Figura 15. Energía de compactación 29.18 Kg.cm/cm ³	41
Figura 16. Energía de compactación 29.67 Kg.cm/cm ³	41
Figura 17. Energía de compactación 30.15 Kg.cm/cm ³	42
Figura 18. Densidad seca vs N° de golpes	43
Figura 19. Contenido de humedad vs N° de golpes	43
Figura 20. Resumen de la densidad máxima	59
Figura 21. Resumen del contenido óptimo de humedad	60

RESUMEN

OCAS DE LA CRUZ, José Luis (2013). Influencia de la Energía de Compactación en el Óptimo contenido de Humedad y la Máxima Densidad Seca en los Suelos Granulares. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería. Universidad nacional de Cajamarca, 76 páginas.

El estudio se ha realizado en suelos gravosos de la cantera de Apalín del Distrito de los Baños del Inca. Se determinó la influencia de la energía de compactación en el óptimo contenido de humedad y la densidad seca máxima, en esta investigación se usó el método experimental clásico que permitió establecer relaciones de tipo causa efecto entre la variable dependiente y la variable independiente, estableciendo un sistema ortogonal de acuerdo al método aplicado. Los ensayos realizados fueron: Análisis granulométrico, pesos específicos, límite líquido, límite plástico y el ensayo de compactación de proctor modificado, este último trabajado a diferentes energías de compactación aumentando en proporción de un golpe por cada ensayo. Obteniéndose una densidad seca máxima de 1.172 gr/cm³ y un óptimo contenido de humedad del 25% con una energía de compactación de 29.18 Kg.cm/cm³ (60 golpes).

PALABRAS CLAVES

Energía de compactación, densidad seca máxima, humedad óptima.

ABSTRACT

OCAS DE LA CRUZ, José Luis (2013). Influence of compaction energy in the optimum moisture content and maximum dry density in granular soils. Professional thesis. Faculty of Engineering. National University of Cajamarca, 76 pages.

The study was conducted on burdensome soil of the quarry Apalín Distrito de los Baños del Inca. The influence of the compaction energy at the optimum moisture content and maximum dry density, in this research we used the classical experimental method could establish cause-effect relationships between the dependent variable and the independent variable, establishing a system orthogonal according to the method used. The soil tests were: Granulometric analysis, specific weights, liquid limit, plastic limit and the Proctor compaction test modified latter worked at different energies increasing compaction hit ratio for each essay. Obtaining a maximum dry density of 1.172 g/cm³ and optimum moisture content of 25% with an energy of compression 29.18 Kg.cm/cm³ (60 strokes).

Keywords

Compaction energy, maximum dry density, optimum moisture.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación estudió la influencia de la energía de compactación en el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca en los suelos granulares, del cual se formuló la siguiente pregunta ¿Cómo influye la energía de compactación en el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca en suelos granulares? Se extrajo muestras de la cantera de la localidad de Apalín del Distrito de Los Baños del Inca. Se obtuvo un óptimo contenido de humedad y una máxima densidad seca aplicando diferentes energías de compactación, por el método C de Proctor Modificado. Uno de los factores más importantes que intervienen para este análisis es la energía de compactación. Cabe mencionar que la hipótesis planteada fue si se incrementa la energía de compactación, entonces la densidad seca máxima es mayor y el óptimo contenido de humedad es menor. Se realizó siete ensayos con cinco puntos cada uno, lo que permitió dibujar un gráfico relacionándolos a cada ensayo. Por tanto, el trabajo consistió en realizar varios ensayos de proctor modificado aplicando diferentes energías de compactación, permitiendo obtener la máxima densidad seca y un óptimo contenido de humedad.

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Internacionales

Varios han sido los estudiosos de los suelos y los efectos que tiene la compactación en ellos, así como varias son las teorías existentes que tratan de explicar lo que sucede en este proceso en el cual la distribución de las partículas de suelo cambia, así como sus propiedades y comportamiento.

Proctor en 1933, dio una explicación sobre lo que pasaba al compactar un suelo y agregarle agua. Proctor creía que la humedad en un suelo relativamente seco crea efectos de capilaridad que une a las partículas, creándose una mayor fricción que se opone a las fuerzas de compactación (Hogentogler, 1936).

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

Se define también energía de compactación a una energía mecánica suministrada al suelo por unidad de volumen, también comúnmente conocida como energía específica (López, 2009).

1.1.2. Nacionales

En el Perú el tema compactación corresponde a un mejoramiento de suelos tanto para estructuras viales y edificaciones, no se ha encontrado temas de investigación respecto a la influencia de la energía de compactación, ya que se rigen a normas del Reglamento Nacional de Edificaciones, así como el Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial.

1.1.3. Locales

No existen temas de investigación acerca de la influencia de la energía de compactación, tan solo existen ensayos realizados para expedientes técnicos, los cuales cumplen los rangos de la normatividad y especificaciones técnicas.

1.2. Bases Teóricas

1.2.1 Suelo

Se define al suelo como un sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas. Lo considera como un sistema multifase por estar compuesto de sólidos, líquidos y gases. Entre los parámetros de identificación son los más significativos la granulometría (distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado) y la plasticidad (la variación de consistencia del agregado en función del contenido en agua). El tamaño de las partículas va desde los tamaños granulares conocidos como gravas y arenas, hasta los finos como la arcilla y el limo. Las variaciones en la consistencia del suelo en función del contenido en agua diferencian también las mencionadas clases granulométricas principales. Los parámetros de estado fundamentales son la humedad (contenido en agua del agregado), y la densidad, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes (V. Pérez 2004).

1.2.2 Suelos Granulares

Los suelos granulares se definen como aquellos en los cuales las fuerzas intergranulares o atractivas tienen un efecto despreciable en el comportamiento mecánico observado. Esta categoría engloba a rocas, gravas y arenas. Basados en el estado de tensiones y en la estructura del suelo, normalmente definidos en función de la densidad relativa D_r , del índice de huecos (e) o de la porosidad (n), los suelos granulares además se clasifican en materiales densos o sueltos. Además son los suelos que no poseen ninguna cohesión, y consisten en rocas, gravas, arenas y limos (S. Pérez, 2002).

Para la AASHTO son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz No. 200. Estos suelos forman los grupos A-1, A-2 y A-3.

1.2.3 Comportamiento de suelos granulares

Los suelos son materiales complejos que exhiben un rango amplio de comportamientos mecánicos que dependen de la composición y estructura del suelo, del historial de tensiones, de la densidad y de las características de la fuerza aplicada. Así como también debe considerarse otros factores como porosidad y peso específico. Esta variedad de factores permite conocer los comportamientos del suelo. Además la rigidez de un material granular está en la relación esfuerzo deformación, es decir el comportamiento mecánico del material depende de las propiedades granulométricas del material, también tiene un efecto ante el fluido ya que se introduce dentro de sus poros al que conocemos como un suelo saturado (Lizcano 2007).

1.2.4 Propiedades de suelos granulares

Los suelos granulares son aquellos cuyos granos no están juntos firmemente. De modo que, el suelo se desintegra en granos individuales al sumergirse en el agua. Las arenas y las gravas son suelos granulares típicos. Los limos, que contienen partículas no menores que 0.002 mm, pueden también ser considerados como granulares en algunos sistemas de clasificación. La propiedad índice más obvia de los suelos granulares estará relacionada al tamaño de los granos. Para suelos con partículas más gruesas que 0.05 mm, el análisis granulométrico se realiza por tamizado. Generalmente los suelos de grano grueso son más permeables y menos compresibles que los suelos de grano fino, y los suelos bien graduados tienden a ser menos permeables, menos compresibles y más resistentes que los suelos pobremente graduados (Lizcano 2007).

La granulometría del suelo tiene cierta significancia, aunque a toda la curva no se le puede asignar un valor numérico simple, pero el primer punto a ser definido es el tamaño de la partícula, tal, que el diez por ciento del suelo es más fino, D₁₀. Este tamaño de partícula se define como tamaño efectivo. El tamaño efectivo

indica un límite inferior razonable para indicar los tamaños de partículas presentes en el suelo. La definición de dos puntos en la curva granulométrica proporciona alguna idea sobre el rango de los tamaños de las partículas, pero no proporciona información acerca de la forma de la curva. El suelo podría consistir de una mezcla de partículas gruesas y finas con pocas partículas intermedias, es decir, podría tener una granulometría con vacíos. Para evitar una granulometría con vacíos se define el coeficiente de curvatura, C_c , que es igual a $(D_{30})^2 / D_{60} \cdot D_{10}$, tomando un punto central de la curva granulométrica, D_{30} . El coeficiente de curvatura debe estar entre 1 y 3 para evitar la granulometría con vacíos. Por lo tanto, para que un suelo sea definido como bien graduado, debe tener un coeficiente de uniformidad lo suficientemente alto y un coeficiente de curvatura entre 1 y 3. Aunque el proceso de definir puntos en la curva granulométrica puede ser infinito, para propósitos de ingeniería es suficiente el definir los valores de D_{10} , C_u y C_c . Entonces la densidad relativa y los parámetros granulométricos son propiedades índice muy útiles para clasificar en el laboratorio las arenas y gravas. También son útiles y ampliamente utilizados en el campo cuando es posible medir la relación de vacíos o densidad in-situ, es decir en calicatas superficiales o en rellenos compactados. Los parámetros granulométricos están correlacionados de modo general con las propiedades ingenieriles de los suelos y pueden definirse de manera simple, así como también pueden determinarse las propiedades utilizando muestras completamente alteradas, ya que no se toman en cuenta las condiciones in-situ, por esta razón es que existe una gran limitación en la significancia de la clasificación granulométrica. Una arena muy densa se clasifica de igual modo que una arena muy suelta, aunque está claro que tienen propiedades diferentes.

La densidad propiamente dicha no es un parámetro adecuado, ya que es muy difícil de interpretar. Si una arena tiene una densidad seca de 1600 Kg/m³, podría ser una arena densa pobremente graduada o una arena suelta bien graduada. Sería mejor definir la densidad relativa de una arena particular a las condiciones más densa y más suelta. Se designa la densidad relativa como D_r , y ésta se define en términos de relaciones de vacíos como:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \dots\dots\dots (\alpha)$$

Donde: $e_{m\acute{a}x}$ es la relación de vacíos de la arena en la condición más suelta posible y $e_{m\acute{i}n}$ es la relación de vacíos correspondiente a la condición más densa posible. Se ha encontrado que los valores de $e_{m\acute{a}x}$ y $e_{m\acute{i}n}$ dependen de los detalles de los métodos de ensayo y no pueden definirse como condiciones absolutas. Las normas ASTM han establecido un método de ensayo que la mayoría de laboratorios utilizan. Puede ocurrir que un espécimen de arena de laboratorio o de campo tenga una densidad relativa menor que cero, o mayor que uno (Hurtado, 2012).

1.2.5 Límites de consistencia o de Atterberg de los suelos.

Las propiedades de un suelo formado por partículas finamente divididas, como una arcilla no estructurada dependen en gran parte de la humedad. El agua forma una película alrededor de los granos y su espesor puede ser determinante del comportamiento diferente del material. Cuando el contenido de agua es muy elevado, en realidad se tiene una suspensión muy concentrada, sin resistencia estática al esfuerzo cortante; al perder agua va aumentando esa resistencia hasta alcanzar un estado plástico en que el material es fácilmente moldeable; si el secado continua, el suelo llega a adquirir las características de un sólido pudiendo resistir esfuerzos de compresión y tensión considerable.

Arbitrariamente Atterberg (1911) marcó las fronteras de los cuatro estados en que pueden presentarse los materiales granulares muy finos mediante la fijación de los límites siguientes:

Líquido (L.L), plástico (L.P.), y de contracción (L.C.) y mediante ellos se puede dar una idea del tipo de suelo en estudio.

El límite líquido es la frontera entre el estado líquido y el plástico; el límite plástico es la frontera entre el estado plástico y el semi-sólido y el límite de contracción separa el estado semi-sólido del sólido. A estos límites se les llama límites de consistencia. El mismo que considera los siguientes objetivos:

- ✓ Introducir al estudiante al procedimiento de la determinación de los límites; líquidos, plásticos y de contracción de una muestra de suelo.
- ✓ Determinar experimentalmente los diferentes límites de consistencia de un suelo.

- ✓ Determinar mediante fórmulas los diferentes índices de consistencia de un suelo. (Borfitz, 2008).

El límite líquido es el contenido de humedad, expresado en porciento del peso del suelo seco, existente en un suelo en el límite entre el estado plástico y el estado líquido del mismo. Este límite se define arbitrariamente como el contenido de humedad necesario para que las dos mitades de una pasta de suelo de 1 cm. de espesor fluyan y se unan en una longitud de 12 mm., aproximadamente, en el fondo de la muesca que separa las dos mitades, cuando la capsula que la contiene golpea 25 veces desde una altura de 1 cm., a la velocidad de 2 golpes por segundo. También define al límite plástico, como el contenido de humedad, expresado en porciento del peso del suelo seco, existente en un suelo en el límite entre el estado plástico y el estado semi-sólido del mismo. Este límite se define arbitrariamente como el más bajo contenido de humedad con el cual el suelo, al ser moldeado en barritas cilíndricas de menor diámetro cada vez, comienza a agrietarse cuando las barritas alcanzan a tener 3 mm. de diámetro (Borfitz, 2008).

1.2.6 Clasificación del suelo

Los diferentes suelos con similares propiedades pueden ser clasificados en grupos y subgrupos de acuerdo a su función ingenieril. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de manera concisa las características generales del suelo, los cuales existen en variedad infinita. La mayoría de los sistemas de clasificación de suelos que fueron desarrollados con propósitos ingenieriles están basados en un simple índice de propiedades tales como la distribución el tamaño de la partícula y la plasticidad (ICCE 2012).

a) Sistema de clasificación AASHTO

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

La clasificación AASHTO usada actualmente está dada en la Tabla 01. De acuerdo con este sistema, el suelo es clasificado en siete grupos principales: A-1 hasta A-7. Los suelos clasificados bajo los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares de los cuales el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N° 200. Suelos de los cuales más del 35% pasan a través del tamiz N°200 se clasifican bajo los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Estos suelos son en su mayoría limos y materiales de tipo arcilloso.

En la Figura 1, muestra unos trazos de los rangos del límite líquido e índice de plasticidad para suelos que caen en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7.

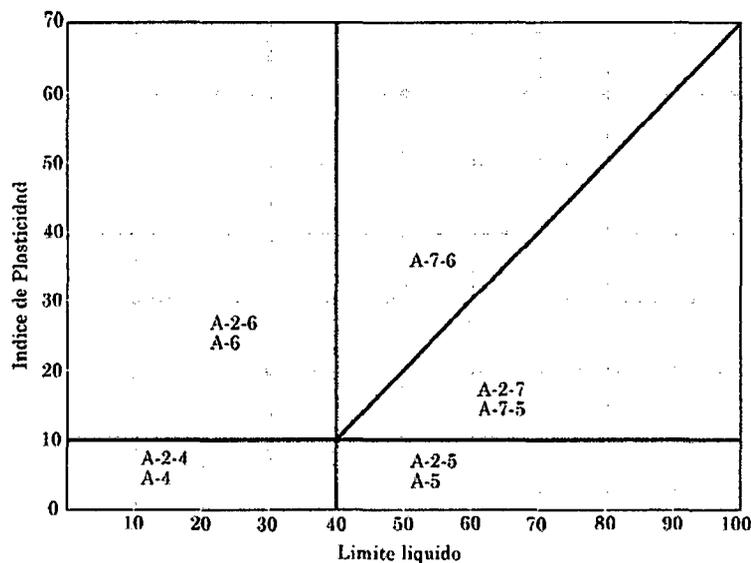


Figura 1. Rango del límite líquido e índice de plasticidad

Fuente: ICCE, 2003.

Para evaluar la calidad de un suelo como el material de la sub rasante de una carretera, además se debe incorporar un número llamado *índice de grupo (GI)* con los grupos y subgrupos del suelo.

Finalmente, el índice de grupo (IG) está dada por la siguiente fórmula:

$$IG = (P_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(P_{200} - 15)(IP - 10) \dots\dots\dots(\beta)$$

Donde:

P_{200} : Es el porcentaje de suelo que pasa el tamiz N° 200

LL: Es el Límite Líquido.

IP: Es el índice de Plasticidad.

Tabla 1. Clasificación de suelos AASHTO

DIVISIÓN GENERAL	Materiales Granulares (pasa menos del 35% por el tamiz ASTM #200)							Materiales Limo-arcillosos (más del 35% por el tamiz ASTM #200)						
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7			
Subgrupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (% que pasa por cada tamiz)														
Serie ASTM	#10	≤ 50												
	#40	≤ 30	≤ 50	≥ 51										
	#200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36	
ESTADO DE CONSISTENCIA (de la fracción de suelo que pasa por el tamiz ASTM #40)														
Límite líquido			NP	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	>41 (IP<LL-30)	>41 (IP>LL-30)
Índice de plasticidad		≤ 6		≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≥ 11	≥ 11	≥ 11
ÍNDICE DE GRUPO		0	0	0		≤ 4		≤ 8	≤ 12	≤ 20		≤ 20		
TIPOLOGÍA	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos				
CALIDAD	EXCELENTE A BUENA							ACEPTABLE A MALA						

Fuente: Bañón Blázquez, 2000.

b) Sistema unificado de clasificación del suelo (SUCS)

La forma original del sistema unificado de clasificación del suelo fue propuesta por Casagrande en 1942 para su uso en trabajos de construcción de aeropuertos por el Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros del Ejército) durante la segunda guerra mundial. En cooperación con el U.S. Bureau of Reclamation (Agencia de Reclamos de los Estados Unidos), el cuerpo (Corps) reviso este sistema en 1952. Al presente, este sistema es ampliamente usado por los ingenieros (ASTM designation D-2487; ASTM, 1991). El sistema unificado de clasificación es presentado en la Tabla 2 y Tabla 3, con referencia a la Figura 3, este sistema clasifica a los suelo en dos amplias categorías:

1. Suelos de granulado-grueso, que en la naturaleza son gravosos y arenosos con menos del 50% que pasa a través del tamiz N°200. Los símbolos de grupo comienzan con los prefijos **G** ó **S** o ambos. **G** simboliza suelo con grava o gravoso, y **S** es para suelos con arena o arenosos.
2. Suelos de granulado-fino, con 50% o más que pasa a través del tamiz N°200. Los símbolos de grupo comienzan con el prefijo de **M**, el cual simboliza a limos inorgánicos, **C** para arcillas inorgánicas, y **O** para limos y arcillas orgánicos. El símbolo **Pt** es usado para la turba (peat), fango (muck), y otros suelos altamente orgánicos. Otros símbolos usados por la clasificación son: **W** bien gradado, **P** pobremente gradado, **L** baja plasticidad, **H** alta plasticidad.

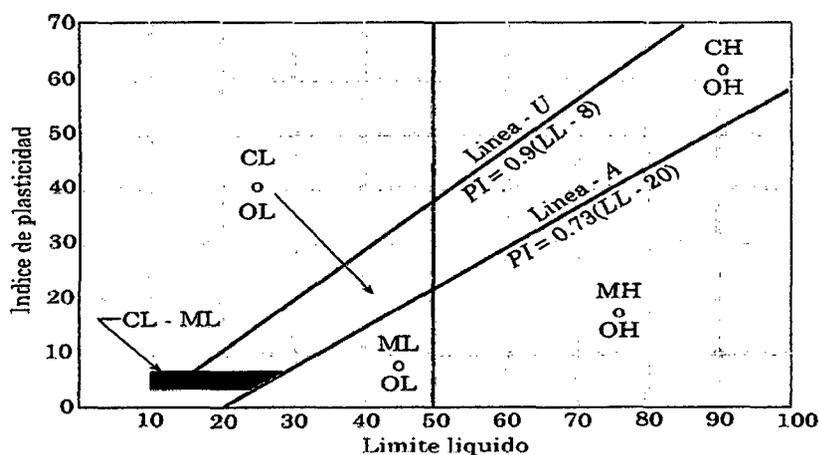


Figura 2. Carta de plasticidad.

Fuente: ICCE ingeniería, 2003.

Tabla 2. Clasificación de suelos (SUCS)

Divisiones principales		Símbolo del grupo	Nombre clásico	Método de identificación en campo excluyendo partículas mayores de 75 mm	Clasificación de laboratorio		
1	2	3	4	5	6		
Suelos de grano grueso Más de la mitad del material es mayor que el t. n°200	GRAVAS Más de la mitad de los gruesos es > 5mm Para clasificación visual el tamiz n°4 equivale a 5 mm	Gravas limpias (poco ó ningún fino)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, poco ó ningún fino	Amplio margen de variación del grano y cantidades importantes de todos los tamaños intermedios de los granos		
		Gravas limpias (poco ó ningún fino)	GP	Gravas pobremente graduadas, mezclas de grava y arena, poco ó ningún fino	Predomina un tamaño ó una serie de tamaños faltando algunos tamaños intermedios		
		Gravas con finos (apreciable cantidad)	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	Finos no plásticos ó con baja plasticidad (para procedimiento de identificación ver grupo ML)		
		Gravas con finos (apreciable cantidad)	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla	Finos plásticos (para procedimiento de identificación ver grupo CL)		
		Arenas limpias (poco ó ningún fino)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, poco ó ningún fino	Amplio margen de variación del grano y cantidades importantes de todos los tamaños intermedios de los granos		
		Arenas limpias (poco ó ningún fino)	SP	Arenas pobremente graduadas, arenas con grava, poco ó ningún fino	Predomina un tamaño ó una serie de tamaños faltando algunos tamaños intermedios		
	ARENAS Más de la mitad de los gruesos es < 5 mm	Arenas con finos (apreciable cantidad)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	Finos no plásticos ó con baja plasticidad (para procedimiento de identificación ver grupo ML)		
		Arenas con finos (apreciable cantidad)	SC	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla	Finos plásticos (para procedimiento de identificación ver grupo CL)		
					Método de identificación en la fracción menor de tamiz n°40 (0.4 mm)		
					Resistencia a la rotura	Dilatancia	Plasticidad
Suelos de grano fino Más de la mitad del material es menor que el t. n°200	Limos y arcillas. Límite líquido menor que 50	ML	Limos inorgánicos de baja compresibilidad	Ninguna a ligera	Rápida a lenta	Ninguna	
		CL	Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad arcillas con gravas, arcillas arenosas, arcillas limosas	Media a alta	Ninguna a muy lenta	Media	
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja compresibilidad	Ligera a media	Lenta	Ligera	
	Limos y arcillas. Límite líquido mayor que 50	MH	Limos inorgánicos de alta compresibilidad	Ligera a media	Lenta a ninguna	Ligera a media	
		CH	Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad	Alta a muy alta	Ninguna	Alta	
		OH	Arcillas y limos orgánicos de media a alta compresibilidad	Media a alta	Ninguna a muy lenta	Ligera a media	
Suelos altamente orgánicos		Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos	Fácilmente identificable por el color, olor, tacto esponjoso y a menudo textura fibrosa			

Determinar los % de grava y arena después de la curva granulométrica y después el % de finos (fracción menor que el tamiz n°200)

Usar la curva granulométrica para identificar las fracciones

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$$

$$1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$$

Los límites de Atterberg bajo la línea A ó IP < 4

Los límites de Atterberg sobre la línea A ó IP > 7

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$$

$$1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$$

Los límites de Atterberg bajo la línea A ó IP < 4

Los límites de Atterberg sobre la línea A ó IP > 7

Los límites que caen en la zona rayada, con IP entre 4 y 7, son casos límite que requieren doble símbolo

Los límites que caen en la zona rayada, con IP entre 4 y 7, son casos límite que requieren doble símbolo

CARTA DE PLASTICIDAD

Fuente: Iván Matus, 2012.

El sistema unificado de clasificación de suelos, utiliza como identificación los siguientes símbolos:

Tabla 3. Simbolización SUCS

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos o arcillas orgánicas	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Fuente: Iván Matus, 2012.

1.2.7 Compactación de suelos

Existen varias definiciones para la compactación de los suelos:

La compactación viene a ser la operación previa, para aumentar la resistencia superficial de un terreno sobre el cual deba construirse una carretera y otra obra. Aplicando una cantidad de energía la cual es necesaria para producir una disminución apreciable del volumen de hueco del material utilizado. La compactación presenta los siguientes objetivos:

- ✓ Debe tener suficiente resistencia para soportar con seguridad su propio peso y el de la estructura o las cargas de las ruedas.
- ✓ No debe asentarse o deformarse tanto, por efecto de la carga, que se dañe el suelo o la estructura que soporta.
- ✓ No debe ni retraerse ni expandirse excesivamente.
- ✓ Debe conservar siempre su resistencia e incompresibilidad.
- ✓ Debe tener la permeabilidad apropiada o las características de drenaje para su función (Luengo , 1998).

La compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, ya que requiere energía mecánica. También es un 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, [gr/cm³]; [Kg/dm³]). La humedad del suelo es el peso del agua que contiene, expresado con respecto al peso del suelo seco. La densidad seca se puede determinar entonces, a partir de determinar la densidad húmeda del suelo y su porcentaje de humedad (Páramo, 2002).

La compactación de los suelos es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos (Juárez, 2005).

También lo definen como el proceso en el cual el volumen de una masa de suelo formado por partículas sólidas, aire y agua es reducida por la aplicación momentánea de cargas aplicadas con rodillos, golpes o vibración (Winterkorna, 2007).

Algunas definiciones coinciden con Das, que la compactación corresponde a la densificación del suelo por remoción de aire, esto incrementa las características de resistencia del suelo y ayuda a prevenir posibles asentamientos. Para lograr esta densificación se requiere comúnmente energía mecánica (Rousé, 2010).

En resumen se puede definir a la compactación de los suelos como: el proceso en el cual se mejoran las propiedades mecánicas y el funcionamiento del suelo por medio de la aplicación de una energía a través de medios mecánicos, induciéndose así a una disminución en el volumen de la masa de suelo, con lo cual se reducen los vacíos existentes por la presencia de aire obteniendo como resultado final un paquete de tierra más denso y resistente.

1.2.8 Teorías de compactación

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

Se dio una explicación sobre lo que pasaba al compactar un suelo y agregarle agua. Proctor creía que la humedad en un suelo relativamente seco crea efectos de capilaridad que une a las partículas, creándose una mayor fricción que se opone a las fuerzas de compactación. Según Proctor, al compactar un suelo con una mayor cantidad de agua, se fuerza a una mayor lubricación entre sus partículas, provocando que estas se reordenen con mayor facilidad y el suelo sea

más denso. El proceso de compactación termina cuando el contenido de humedad del suelo combinado con el aire que no ha sido expulsado, llenan todos los vacíos. En este punto se puede decir que el suelo alcanza su mayor densidad. Con un mayor contenido de humedad la compactación se limita a un punto en el que los vacíos igualan al volumen de aire y agua, aumentando los vacíos, disminuyendo la densidad e incrementando la plasticidad (Winterkorna, 2007).

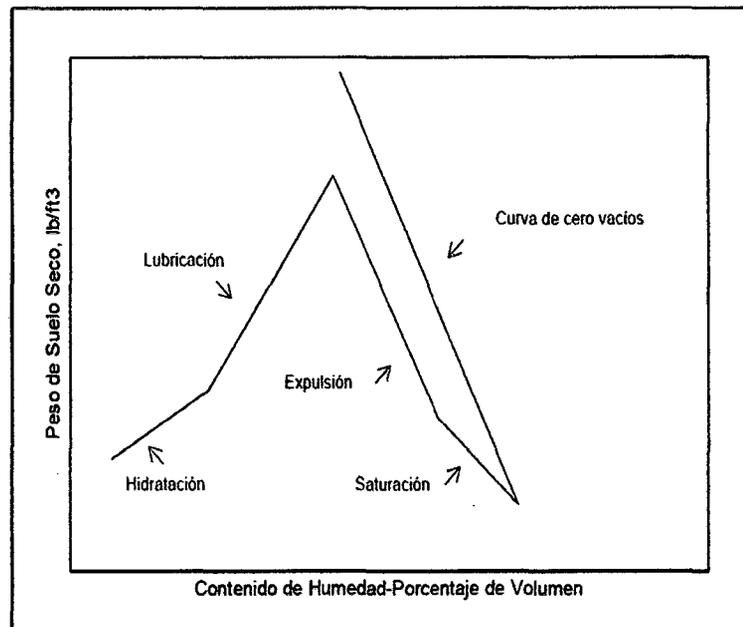


Figura 3. Fases de la Curva de Compactación

Fuente: Winterkorna, 2007

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

La teoría de la presión de agua en los poros en suelos no saturados de Hilf, plantea la idea sobre el proceso de compactación. También menciona que los suelos secos son difíciles de compactar debido a la apreciable fuerza de fricción que causa la gran curvatura de los meniscos formados por el agua que cubre los granos en la parte de contacto de los mismos, Figura 4. Al compactar el suelo a un mayor contenido de agua, los meniscos entre las partículas de suelo se aplanan o destruyen resistiendo menos el esfuerzo de compactación e incrementándose la densidad del suelo de ahí en adelante hasta alcanzar su máximo (Hilf en 1956).

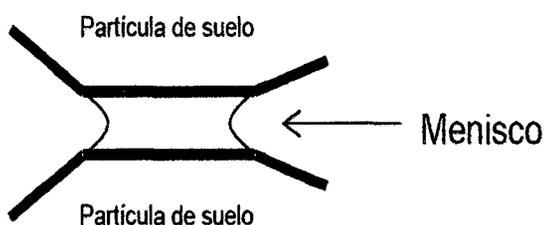


Figura 4. Menisco formado entre granos de suelo provoca fricción resistente al esfuerzo de compactación (Winterkorna, 2007).

El científico Lambe en 1960, intentó explicar el fenómeno de la compactación argumentando que a bajos contenidos de agua la floculación de las partículas (que es un proceso químico mediante el cual y por medio de sustancias floculantes se aglutinan las sustancias coloidales del agua) se produce debido a la alta concentración de electrolitos. La floculación es causa de bajas densidades, lo que mejora al aumentar el agua, la misma que disminuye la concentración de electrolitos lográndose un estructura más dispersa y con menos vacíos. Esto es lo que permite a las partículas acomodarse de manera más orientada y densa. Esto se da en suelos finos (Luengo, 1998).

Otro científico Olson en 1963, trató de explicar la compactación del suelo basándose en el concepto del esfuerzo efectivo entre partículas de suelo. Explicó que con el incremento de agua, crece el grado de saturación y a su vez esto aumenta la presión de aire y agua en los poros del suelo. Esto debilita al suelo reduciendo el esfuerzo efectivo entre las partículas. A continuación las partículas

se deslizan una sobre otra hasta alcanzar los esfuerzos laterales y horizontales de corte suficientemente grandes con la capa previamente compactada, para dar al suelo el esfuerzo efectivo requerido (Luengo, 1998).

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

1.2.9 Características de la compactación de los suelos

La compactación de los suelos se produce por la reorientación de las partículas o por la distorsión de las partículas y sus capas absorbidas. En un suelo no cohesivo la compactación ocurre mayormente por la reorientación de los granos para formar una estructura más densa. La presión estática no es muy efectiva en este proceso porque los granos se acuñan unos contra otros y resisten el movimiento. Si los granos se pueden liberar momentáneamente, las presiones, aun las ligeras, son efectivas para forzarlos a formar una distribución más compacta. El agua que fluye también reduce el rozamiento entre las partículas y hace más fácil la compactación, sin embargo el agua en los poros también impide que las partículas tomen una distribución más compacta. Por esta razón la corriente de agua sólo se usa para ayudar a la compactación, cuando el suelo es de granos tan gruesos que el agua abandona los poros o huecos rápidamente. Del enunciado anterior se deduce que los suelos granulares en el proceso de compactación produce una reorientación, distorsión de granos o partículas en todas sus capas absorbidas, Como consecuencia de aplicar una fuerza o energía mecánica (Luengo, 1998).

1.2.10 El proceso de densificación

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. En este proceso se determina la orientación de las partículas con modificación de las características mecánicas de los suelos y materiales estabilizados. La representación gráfica (Figura 5) 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. La parte descendente se conoce como rama húmeda (Páramo 2002).

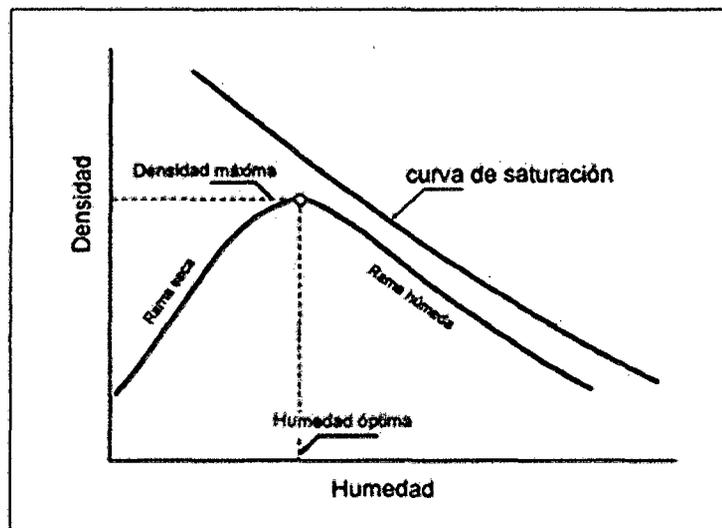


Figura 5. Relación densidad seca – Contenido de humedad.

Fuente: Jorge páramo, 2002.

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. En la figura 6, muestra las curvas de compactación para dos energías diferentes. A mayor trabajo mecánico de compactación, se obtiene una mayor densidad seca máxima y una menor humedad óptima.

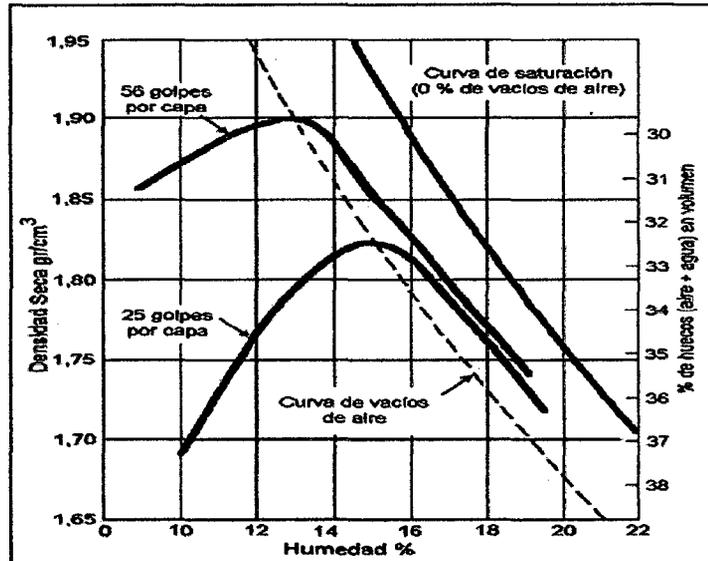


Figura 6. Curvas de compactación a 25 y 56 golpes

Fuente: Jorge páramo, 2002.

La aplicación de energía a un espécimen de suelo, con el fin de incrementar su densidad o peso seco unitario y reducir el volumen de vacíos, se le conoce como compactación de suelos, las cuales aportan las siguientes ventajas:

- ✓ Aumenta la resistencia al corte y así mismo mejora la capacidad de soporte de vías y subestructuras.
- ✓ Reduce o previene la compresibilidad y los asentamientos.
- ✓ Reduce el volumen de vacíos.
- ✓ Permite reducir y controlar los potenciales de expansión, contracción por congelamiento (Camacho, 2007).

1.2.11 Contenido de humedad y densidad seca

La humedad óptima corresponde al contenido de humedad en el material que permite obtener el máximo peso específico, generalmente este valor de humedad está entre un 15 y el 20% debajo del límite líquido del suelo (Fournier 2011).

El contenido de humedad, la densidad y el grado de compactación son los factores más importantes en la compactación de suelos. A continuación se presentan sus conceptos (Fournier 2011):

- ✓ *Contenido de humedad.*- El contenido de humedad de una muestra de suelo es la relación del peso de agua entre el peso de sólidos en un volumen dado de suelo. Se representa con w .

$$w = \frac{W_w}{W_s} \dots\dots\dots (1)$$

El contenido de humedad se representa como un porcentaje.

- ✓ *Peso específico o densidad.*- El peso específico (γ) es el peso del suelo por volumen unitario

$$\gamma = \frac{W}{V} \dots\dots\dots (2)$$

Este peso específico dado por la ecuación anterior se lo denomina *peso específico húmedo* y se expresa también en términos del peso de sólidos, contenido de humedad y volumen total con la ecuación:

$$\gamma = \frac{W_s(1+w)}{V} \dots\dots\dots (3)$$

En el estudio de la compactación de suelos, es necesario conocer el denominado *peso específico seco o densidad seca* γ_d , que es el peso por volumen unitario pero de suelo seco, es decir excluyéndose el agua de la misma. Si el contenido de humedad y el peso específico húmedo de una muestra de suelo son conocidos, se puede obtener el valor del peso específico seco con la ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \dots\dots\dots (4. a)$$

En la figura 7, 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 ($\gamma_{d \text{ Máx.}}$) que se puede obtener en el ensayo de compactación. La abscisa correspondiente a este máximo, representa el contenido óptimo de humedad (w_{opt}). Contenidos de humedad mayores al óptimo, arrojan valores menores de peso específico seco.

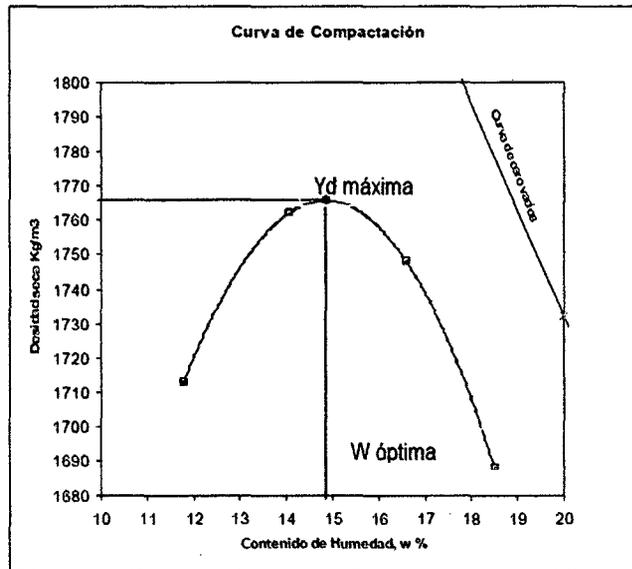


Figura 7. Curva de compactación obtenida del ensayo Proctor modificado.
Fuente: Jorge páramo ,2002.

1.2.12 La energía de compactación

La energía de compactación aplicada, afecta a la estructura de los suelos ya que por sus medios se logra reducir el volumen y ocasionar deformaciones angulares. A mayor energía de compactación, acompañada también por un aumento del contenido de humedad, mayor es la remoción de vacíos de aire (disminución de volumen) y mayores son también las deformaciones angulares. Esto se logra excepto a valores de contenido de agua superiores al óptimo. Si al aumentar la energía de compactación para un mismo suelo aumenta su peso volumétrico seco máximo y disminuye su humedad óptima (Crespo, 2004).

Similarmente Juárez Badillo menciona que la energía específica de compactación viene dada por la siguiente formula:

$$E_c = \frac{N \cdot n \cdot W \cdot h}{V} \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

E_c = Energía específica (kg.cm/cm³).

N = Número de golpes por capa.

n = Número de capas de suelo.

W = peso del pisón (kg).

h = Altura de caída libre del pisón (cm).

V = Volumen total del suelo compactado (cm³).

Los datos que determinan la energía específica en la prueba, fueron establecidos originalmente por Proctor como los adecuados para reproducir los pesos específicos secos que podían lograrse económicamente con el equipo comercialmente disponible en aquella época.

Proctor puso de manifiesto que, para un suelo dado y usando el procedimiento descrito, existe una humedad inicial, llamada la "óptima", que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con el procedimiento de compactación (Juárez, 2005).

Se define como energía de compactación a una energía mecánica suministrada al suelo por unidad de volumen, también comúnmente conocida como energía específica. De entre todos los factores que influyen en la compactación, resaltan dos importantes: el contenido de agua del suelo, antes de iniciarse el proceso de compactación y la energía específica empleada en dicho proceso (López, 2009).

1.2.13 Ensayo de compactación Proctor

En mecánica de suelos, el ensayo de compactación Proctor es uno de los más importantes procedimientos de estudio y control de calidad de la compactación de un terreno. A través del cual es posible determinar la compactación máxima de un terreno en relación con su grado de humedad, condición que optimiza el inicio de la obra con relación al costo y el desarrollo estructural e hidráulico. Existen dos tipos de ensayo Proctor normalizados; el "Ensayo Proctor Normal", y el "Ensayo Proctor Modificado". La diferencia entre ambos estriba en la distinta energía utilizada, debido al mayor peso del pisón y mayor altura de caída en el Proctor Modificado.

Ambos ensayos se deben al ingeniero que les da nombre, Ralph R. Proctor (1933), y determinan la máxima densidad que es posible alcanzar para suelos o áridos, en unas determinadas condiciones de humedad, con la condición de que no tengan excesivo porcentaje de finos, pues la prueba Proctor está limitada a los suelos que pasen totalmente por la malla No 4, o que tengan un retenido máximo del 10 % en esta malla, pero que pase (dicho retenido) totalmente por la malla 3/8". Cuando el material tenga retenido en la malla 3/8" deberá determinarse la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo con la prueba de Proctor estándar.

La prueba del Proctor se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad (Crespo, 2004).

Las principales normativas que definen estos ensayos son las normas americanas ASTM D-698 (ASTM es la American Society for Testing Materials, Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales) para el ensayo Proctor Estándar y la ASTM D-1557 para el ensayo Proctor modificado. En España existen las normas UNE 103-500-94 que define el ensayo de compactación Proctor Normal y la UNE 103-501-94 que define el ensayo Proctor Modificado (Rosetti, Begliardo, 2005).

Esta prueba tiene por objeto:

- a) Determinar el peso volumétrico seco máximo que puede alcanzar un material, así como la humedad óptima a que deberá hacerse la compactación.
- b) Determinar el grado de compactación alcanzado por el material durante la construcción o cuando ya se encuentran construidos los caminos, aeropuertos y calles relacionando el peso volumétrico obtenido en el lugar con el peso volumétrico máximo Proctor.

Tabla 4. ASTM D 1557 Proctor Modificado

ASTM D 1557 Proctor Modificado			
Ec = Energía de Compactación	=	56,250 Lb.ft/ft ³	
W = Peso del martillo	=	10 lb	
h = Altura de caída del martillo	=	18 pulgadas	
N = Número de golpes por capas	=	depende del molde	
n = Número de Capas	=	5	
V = Volumen de molde cm ³	=	depende del método de prueba	

Fuente: Cismid, 2010

Tabla 5. Métodos de compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557-91			
Concepto	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C
Molde	101.6mm (4 in)	101.6mm (4 in)	152.4mm (6 in)
Volumen del molde	944cm ³ (1/30ft ³)	944cm ³ (1/30ft ³)	2124cm ³ (0.075ft ³)
Peso del martillo	4.54kg (10lb)	4.54kg (10lb)	4.54kg (10lb)
Altura de Caída del martillo	457.2mm (18 in)	457.2mm (18 in)	457.2mm (18 in)
Número de golpes	25	25	56
Número de capas	5	5	5
Energía de compactación	2700kNm/m ³ (56000ft-lbf/ft ³)	2700kNm/m ³ (56000ft-lbf/ft ³)	2700kNm/m ³ (56000ft-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 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 3/8.	Porción que pasa por el tamiz 3/4. Se usa si más de 20% por peso del material es retenido en el tamiz 3/8, y menos del 30% por peso es retenido en el tamiz 3/4.

Fuente: Raúl Hidalgo – 2007

Nota:

- ✓ Aplicable a material con 30% máximo retenido en tamiz ¾"
- ✓ Si el material tiene más del 5% en peso de tamaño mayor al utilizado en la prueba, se debe corregir los resultados.

El ensayo Proctor consiste en compactar una porción de suelo en un cilindro con volumen conocido, haciéndose variar la humedad para obtener el punto de compactación máxima en el cual se obtiene la humedad óptima de compactación. El ensayo puede ser realizado en tres niveles de energía de compactación, conforme las especificaciones de la obra: normal, intermedia y modificada (Lambe y Whitman, 2012).

1.2.14 Óptimo contenido de humedad y densidad seca máxima

La importancia de realizar una adecuada compactación es justamente calcular la cantidad de agua, significa la “humedad óptima” que ha de tener un suelo, a fin de obtener una buena lubricación que permita, al compactarlo, alcanzar la mayor densidad posible, es decir, la Densidad Máxima (Rosetti, 2005).

La densidad seca se determina a partir de la densidad húmeda con la siguiente fórmula:

$$Ds = \frac{Dh}{(100 + W\%)} * 100 \dots\dots\dots (4.b)$$

Donde:

Ds: Densidad seca.

Dh: Densidad húmeda.

W%: Contenido de humedad.

CAPITULO II. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

2.1 Aspectos generales

a) Ubicación política y acceso:

La cantera de Apalín se encuentra en un Sitio de la localidad de Apalín del Distrito de baños del Inca Provincia y departamento de Cajamarca.

Geográficamente está en la sierra y dentro de la cuenca el Chonta específicamente en el flanco derecho de la quebrada el Suso. El área en estudio está delimitada dentro de las coordenadas UTM Latitud 7° 2' 16.00"S y Longitud 78°26'32.72"O y alcanza una altitud de 3350 msnm, la superficie aproximada es de 60 Has.

Acceso: Existe solo una Vía de acceso a la cantera de Apalín que es la de Otuzco y Apalín, a unos 20 Km del Distrito de Baños del Inca.

✓ Ubicación Geográfica.

Departamento/Región: Cajamarca

Provincia: Cajamarca

Distrito: Los Baños del Inca

Localidad: Apalín

Región Geográfica: Sierra

Altitud: 2717.80 – 3350 msnm.

✓ Plano de Ubicación



Figura 8. Cantera Otuzco – Apalín; fuente google earth 2013.

b) Estado de Arte

Existen aportaciones científicas que se ha encontrado y que han tratado con más difusión la relación entre el mejoramiento de suelos como base de toda estructura de ingeniería. A partir de la incorporación de nuevos materiales para el mejoramiento de los suelos, se ha generado un fuerte desarrollo tecnológico durante todo el siglo XX y, debido a ello, han aparecido nuevas alternativas de solución como complemento a las de uso más tradicional. El avance alcanzado en el desarrollo de estas estructuras ha pasado por la incorporación de nuevos materiales para su diseño, la definición de nuevos métodos constructivos y la creación de nuevos elementos estructurales.

Actualmente existen investigaciones acerca de la energía de compactación en mezclas asfálticas publicado por el Grupo Investigación Geotecnia del Centro de Investigaciones Facultad de Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá D. C. con el tema: In The temperature of compacting and energy influence

in dynamics properties of an asphalt mixture (Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica), fuente: Universidad de Antioquia, 2013.

c) Temporada de la investigación

Esta investigación se realizó en los meses Octubre y Noviembre del 2012. Consistió en visitas de campo, recolección de información y extracción de muestras para los respectivos ensayos en laboratorio.

2.2 Problema de investigación

2.2.1. Planteamiento del problema

En todo proyecto de ingeniería se realiza un plan para resolver los problemas técnicos, económicos y humanos. Pero se da el caso en el que no se logra alcanzar los resultados que exige la normatividad, como prueba de ello existen a nivel nacional estructuras con diferentes tipos de fallas y lo más grave con riesgos a colapsos, debido a que no se llevó un correcto control de calidad en el terreno de fundación.

El presente estudio trata de la influencia de la energía de compactación en el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca en los suelos granulares, como se sabe la compactación es el mejoramiento artificial de las propiedades mecánicas de un suelo y su mayor importancia radica en el aumento de resistencia y disminución de deformaciones del suelo. Se extraerán muestras de una cantera del Distrito de Los Baños del Inca, específicamente de la Localidad de la Apalín en la cual se buscará obtener un óptimo contenido de humedad y una máxima densidad seca aplicando diferentes energías de compactación alas comúnmente conocidas del Proctor Modificado.

Para un suelo dado y a una determinada energía de compactación existe un valor de humedad óptima con la cual puede alcanzarse la máxima densidad seca, permitiendo conocer una mayor resistencia de ese tipo de suelo.

El trabajo de investigación consiste en realizar varios ensayos de Proctor Modificado por el método C y ver la influencia de las diferentes energías de compactación para alcanzar la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad.

Al aumentar el contenido de humedad facilita la separación de las partículas, haciendo que la energía de compactación produzca mejores resultados en el grado de compactación. Así como también al aumentar excesivamente el agua provocará una disminución en la eficiencia de compactación; tal es el caso que existirá un determinado suelo para una determinada compactación, pero al encontrar la humedad óptima con una determinada energía de compactación producirá la máxima densidad seca, por lo que nuestro trabajo consistirá en encontrar una explicación coherente en los resultados que obtengamos al realizar los ensayos de Proctor a diferentes energías de compactación. Para lo cual se realizarán varias pruebas las que nos permitirán definir un cierto número de golpes o el número de pasadas o el peso de un equipo seleccionado para poder cumplir con las especificaciones técnicas de la densidad seca.

2.2.2. Formulación del problema

¿Cómo influye la energía de compactación en el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca en suelos granulares?

2.2.3. Justificación de la investigación

La falta de estudios en la influencia de la energía de compactación para lograr una máxima densidad seca en suelos granulares el cual permitirá aplicar en campo el mejoramiento del terreno en la que se densifica el suelo mediante un cierto número de pasadas o mediante el peso de equipos de compactación, el cual se denominará como energía mecánica.

Este estudio permitirá tener un grado de confiabilidad en la influencia de la energía de compactación. Para lo cual se realizarán varias pruebas las que

permitirán definir un cierto número de golpes o el número de pasadas o el peso de un equipo seleccionado para poder cumplir con las especificaciones técnicas de la densidad seca.

Esta investigación servirá para lograr mayor eficacia en las obras de ingeniería como pueden ser presas de tierra, terraplenes, pavimentos, vertederos de residuos sólidos urbanos, estructuras de suelos reforzados, prefabricados, edificaciones.

2.2.4. Limitaciones y restricciones

Alcances

El presente estudio servirá para hacer una correlación de la energía de compactación con el óptimo contenido de humedad y con la densidad seca máxima y poder brindar información para los proyectos donde interviene la compactación de suelos.

Limitaciones

La investigación se limitará a analizar suelos granulares por lo que se utilizará material de la cantera del lugar denominado "Apalín" en el Distrito de los Baños del Inca, Provincia y Departamento de Cajamarca.

2.3. Objetivos de la investigación

2.3.1. Objetivo general.

- ✓ Determinar la influencia de la energía de compactación en el óptimo contenido de humedad y la densidad seca máxima en suelos granulares.

2.3.2. Objetivos específicos.

- ✓ Establecer los diferentes valores de energía de compactación para la investigación.
- ✓ Determinar el óptimo contenido de humedad y la densidad seca máxima con diferentes energías de compactación Proctor Modificado.

2.4. Hipótesis y variables

Hipótesis

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

Variables

✓ Variables Independiente: Energía de compactación.

✓ Variable Dependiente: Densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad.

2.5. Tipos de investigación y análisis

2.5.1. Tipo de investigación

En este tipo de investigación se usa el método experimental clásico, que permite establecer relaciones entre la variable dependiente y la variable independiente, motivo por lo que mi investigación es un tema explicativo.

2.5.2. Tipo de análisis

El tipo de análisis que se utiliza para este estudio es la relación causa-efecto.

2.6. Diseño metodológico

2.6.1. El universo de la investigación

Estudio de suelos granulares de la cantera de Apalín Distrito de los Baños del Inca – Cajamarca.

2.6.2. Técnicas e instrumentos para obtener los datos

✓ Técnicas de recolección de información: El tipo de fuente es primario, utilizando un método directo el cual nos permite utilizar una técnica de observación y experimentación.

✓ Los instrumentos de recolección de información:

a.- Extracción de muestras de suelos granulares de la cantera.

b.- Libreta de campo.- para anotar datos importantes, los cuales nos ayudarán al momento de procesar los datos en gabinete.

- c.- Cámara Digital.- para tener un respaldo en imágenes que demuestre la veracidad de la investigación.
- d.- Datos de Laboratorio.- Los datos a obtener son de los siguientes ensayos: Contenido de humedad, peso específico de la grava, granulometría, límite líquido, límite plástico y el ensayo de compactación. Una vez obtenidos esta información continuaremos con el procesamiento de datos.

2.6.3. Población de informantes.

Las muestras de suelos granulares fueron extraídas de la cantera de Apalín (población), del Distrito de los Baños del Inca, Provincia y Departamento de Cajamarca.

En la presente investigación se basa en un diseño experimental clásico el cual indica arreglos ortogonales identificando el número de exponente para indicar el número de variables ($2^3 = 8$). Este valor indica el número de experimentos o ensayos a realizar (las tres variables fueron: energía de compactación, contenido de humedad y densidad seca). El valor dos (2) significa el número de interacciones el cual indica dos factores

Se trabajó 7 experimentos en laboratorio, que permitió realizar estadísticamente la prueba de normalidad de Anderson – Darling cuyos intervalos de confianza de la media y la mediana alcanzaron el 95%.

$$n = a^x \dots\dots\dots (6)$$

En donde:

n = Número de experimentos

a = Número de interacciones (Experimento guía ≥ 2)

x = Número de variables (dependientes e independientes)

2.6.4. Forma de tratamiento de los datos

En este caso los datos se obtuvieron de laboratorio, el cual fueron procesados mediante hojas de cálculos de Microsoft Excel, permitiendo un fácil ingreso de datos, así como sus respectivos análisis.

2.6.5. Forma de análisis de las informaciones

Se realizó los cálculos algebraicos en gabinete, previo análisis de datos y de las informaciones obtenidas de laboratorio, bajo algunas normas establecidas para los ensayos que se realizaron.

2.7. Metodología y procedimientos

2.7.1. Obtención de muestras de suelo

Se obtuvieron muestras de suelo granular de la cantera y se lo identificó para luego ser trasladado al laboratorio de suelos, donde se realizó los ensayos generales y los especiales correspondientes.

2.7.2. Ensayos generales

a) Granulometría (Norma ASTM D421, AASHTO T88, ASTM D422, MTC E107-1999):

Material

- Muestra seca aproximadamente 7000 gr.

Equipo

- Juego de tamices 2", 1", ½", ¼", N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°100, N°200, con tapa y base.
- Balanza con aproximación de 0.1 gr.
- Tamizador.

Procedimiento

- Previamente antes del ensayo, se secó la muestra al aire libre por una semana.
- Se pesó una muestra de 7 kg aproximadamente
- Se colocó la muestra en el juego de tamices hasta la malla N° 4 y se procedió con el respectivo tamizado en seco.
- De la muestra que pasa el tamiz N°4 se tomó 500 gr, y se tamizó por lavado (malla N° 200).
- Se determinó los porcentajes retenidos en cada tamiz (%RP).

$$\%RP = \frac{PRP}{W_s} * 100 \dots\dots\dots (7)$$

- Se determinó los porcentajes retenidos acumulados en cada tamiz %R.A, para lo cual se sumó en forma progresiva los %RP.
- También se determinó los porcentajes acumulados que pasan en cada tamiz.

$$\% \text{ que pasa} = 100\% - \%R.A \dots\dots\dots (8)$$

- Se dibujó la curva granulométrica en escala semilogarítmica, en el eje de las abscisas se registró la abertura de las mallas en milímetros, y en el eje de las ordenadas se registró los porcentajes acumulados.
- Los coeficientes de uniformidad (*Cu*) y de curvatura (*Cc*), según la curva granulométrica no existe D10, por lo tanto no podemos obtener dichos coeficientes; cuyas fórmulas son:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots (9)$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \dots\dots\dots (10)$$

b) Peso específico de grava gruesa o piedra (Norma ASTM D854, AASHTO T100, MTC E113 -1999, NTP 339 - 131)

Material

- Piedra lavada y seca
- Agua

Equipo

- Balanza hidrostática con aproximación de 0.01 gr.

Procedimiento.

- Se determinó el peso de la piedra en el aire (*Waire*).
- Se determinó el peso de la piedra sumergida en agua (*Wsumer*).
- Se determinó el peso específico con la siguiente fórmula.

$$\gamma_s = \frac{W_{aire}}{W_{aire} - W_{sumer}} \dots\dots\dots (11)$$

c) Peso específico del material fino (Norma ASTM D854, AASHTO T100, MTC E113 -1999, NTP 339 - 131)

Material

- Muestra seca que pase el tamiz N° 4
- Agua

Equipo

- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Bomba de vacíos
- Fiola de 500 ml
- Tamiz N° 4

Procedimiento.

- Se pesó la muestra seca (W_s).
- Se llenó la Fiola con agua hasta la marca de 500 ml y se pesó (W_{fw}).
- Se colocó la muestra seca ya pesada en la Fiola vacía y se vertió el agua hasta cubrir toda la muestra, se agitó y se colocó a la bomba de vacíos por 15 minutos.
- Luego de haber retirado la Fiola de la bomba de vacíos, se colocó agua hasta la marca de 500 ml y se pesó (W_{fws}).
- Se determinó el peso específico con la siguiente fórmula.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{(W_s + W_{fw} - W_{fws})} \dots\dots\dots (12)$$

d) Peso específico de la muestra compuesta por partículas finas y gruesas (Norma ASTM D854, AASHTO T100, MTC E113 -1999, NTP 339 - 131)

- Se determinó el peso específico con la siguiente fórmula

$$\gamma_s \text{ prom} = \frac{1}{\frac{R_1}{100\gamma_1} + \frac{R_2}{100\gamma_2}} \dots\dots\dots (13)$$

Donde:

$\gamma_s \text{ prom}$: Promedio ponderado del peso específico del suelo compuesto de partículas mayores y menores que la malla N° 4.

R1: Porcentaje de partículas de suelo retenidas en la malla N° 4.

R2: Porcentaje de partículas de suelo que pasa la malla N° 4.

γ_1 : Peso específico de las partículas de suelo retenidas en la malla N° 4.

γ_2 : Peso específico de las partículas de suelo que pasan la malla N° 4.

e) Plasticidad

Límite líquido (Norma ASTM D4318, AASHTO T89, MTC E110-1999, NTP 339 - 130)

Material

- Suelo seco que pasa la malla N°40.

Equipo

- Malla N°40
- Copa Casagrande
- Ranurador o acanalador
- Balanza con aproximación de 0.01 gr.
- Estufa con control de temperatura
- Probeta de 100 ml
- Espátula, taras.

Procedimiento.

- En la cápsula de porcelana se mezcló el suelo con agua mediante una espátula hasta obtener una pasta uniforme.
- Se colocó una porción de la pasta en la copa de Casagrande, mediante la espátula hasta obtener un espesor de 1 cm.
- En el centro se realizó una ranura con el acanalador de tal manera que la muestra este dividida en dos partes.
- Rotar a razón de dos caídas por segundo hasta que las dos mitades de suelo se pusieron en contacto. Registrándose el número de golpes.

- Mediante la espátula se retiró la porción de suelo que se ha puesto en contacto en la parte inferior de la ranura y se colocó dentro de una tara para determinar su contenido de humedad.
- Se retiró el suelo remanente de la copa Casagrande y colocó en la cápsula de porcelana, agregando agua cuando el número de golpes del ensayo anterior era alto y agregando suelo si el número de golpes era bajo, para que el número de golpes este comprendido en 6 y 35.
- Se dibujó la curva de fluidez en escala semilogarítmica, en el eje de abscisas se registró el número de golpes en escala logarítmica, en el eje de las ordenadas los contenidos de humedad en escala natural.
- Se determinó en la ordenada correspondiente a los 25 golpes en la curva de fluidez, el valor del límite líquido del suelo

Límite plástico (Norma ASTM D4318, AASTHO T90, MTC E111 - 1999)

Procedimiento.

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

2.7.3. Ensayos especiales

Compactación Proctor modificado (Norma ASTM D1557, AASTHO T180, MTC 115 - 1999)

Material

- Muestra alterada seca
- Papel filtro

Equipo

- Equipo Proctor modificado (molde cilíndrico, placa de base y anillo de extensión).

- Pisón Proctor modificado 4.5 Kg.
- Balanza de precisión de 1gr.
- Estufa con control de temperatura.
- Probeta de 1000 ml y 500 ml.
- Recipiente de 6 kg de capacidad.
- Espátula y taras.

Procedimiento por el Proctor modificado (método C)

- Se preparó 5 muestras con una determinada cantidad de agua, de tal manera que el contenido de humedad de cada una de ellas varíe en 1.5%
- Se ensambló el molde cilíndrico con la placa de base y el collar de extensión y el papel filtro.
- Se procedió a compactar cada muestra en 5 capas y cada capa con 56 golpes y para los siguientes ensayos se aumentaba en un golpe, logrando llegar a los 62 golpes.
- Al haber terminado de compactar la última capa, se retiró el collar de extensión, se enrasó con la espátula y se determinó la densidad humedad (Dh) con la fórmula de la ecuación (2), cuya relación se expresa en gr/cm³.
- Se determinó el contenido de humedad de cada muestra compactada (w%), utilizando muestras representativas de la parte superior e inferior.
- Se determinó la densidad seca de cada muestra compactada (Ds), con la fórmula antes descrita (4.b).
- Se dibujó la curva de compactación en escala natural, los datos de contenido de humedad se registró en el eje de las abscisas y los datos de la densidad seca en el eje de las ordenadas.
- Finalmente de las gráficas obtenidas de cada ensayo se halló los valores correspondientes a las máximas densidades secas y los óptimos contenidos de humedad.

CAPITULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Resultados de la investigación

- ✓ El contenido de humedad para dos muestras obtenidas de la cantera de Apalín es de 22 %.

Tabla 6. Resultados del contenido de humedad

MUESTRA	CANTERA APALIN	
T N°	a	b
w(%)	21.04	22.49
w(%)Prom.	22.00	

- ✓ Según la granulometría del material es un suelo granular porque menos del 35 % de material fino pasa por la malla N° 200 (clasificación AASHTO), cuya curva granulométrica se muestra en la figura 9.

Tabla 7. Análisis granulométrico

Malla N°	% PASA
2 "	100.00
1 1/2"	99.44
1 "	88.76
3/4 "	80.34
1/2 "	69.34
3/8 "	62.39
1/4 "	52.77
N° 4	50.57
N° 10	43.48
N° 20	36.88
N° 30	34.10
N° 40	32.18
N° 60	29.50
N° 100	27.31
N° 200	25.40
Pérdida lavado	0.00

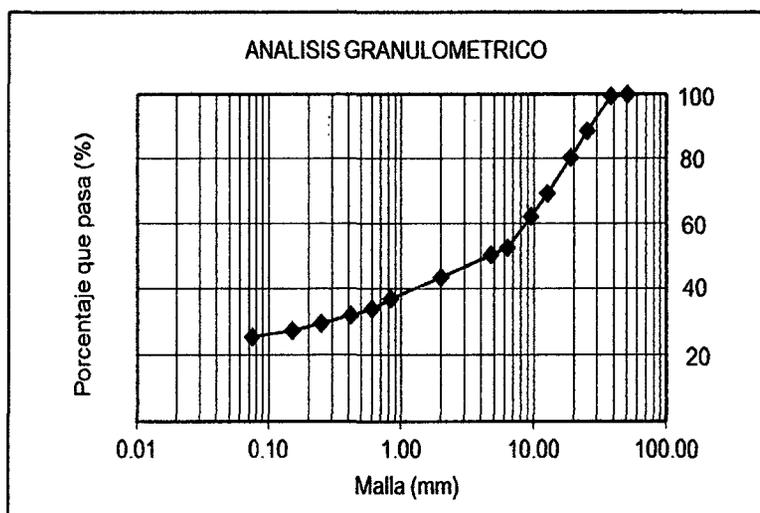


Figura 9. Curva del Análisis Granulométrico

- ✓ El peso específico de las gravas, fue de 1.40 gr/cm³, y el peso específico de los finos fue de 1.37 gr/cm³, por lo tanto el peso específico promedio es de 1.5 gr/cm³. Además dicho material (grava) es producto de una alteración argílica, cuya roca se le denomina Óxido de Silicio (SiO₂) del tipo sílice oquerosa, comúnmente conocido como sílice.
- ✓ Según la clasificación AASHTO el suelo pertenece al grupo A-2-7 (suelos granulares) y según la clasificación SUCS pertenece al grupo GM (gravas limosas).
- ✓ El suelo presenta un límite líquido de 48% y un límite plástico de 31%, obteniéndose un índice plástico de 17%.

Tabla 8. Límite Líquido

LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
N°Golpes	13	22	32	
w(%)	53.76	48.62	45.45	31.25 31.43
LL (%)	48			LP (%) 31

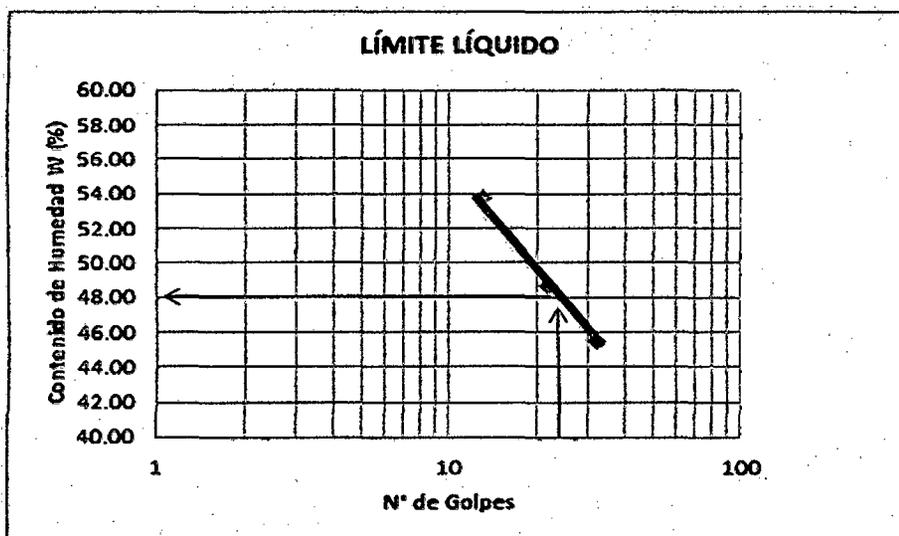


Figura 10. Límite Líquido

- ✓ Con las diferentes energías de compactación se obtienen densidades secas bajas y contenidos óptimos de humedad altos, por lo que este tipo de material no es recomendado para usarlo como afirmado. A continuación se muestra los resultados obtenidos de los ensayos de compactación.

Energía de compactación 27.24 Kg.cm/cm³ (56 golpes)
 Proctor Modificado METODO C - NORMA ASTM D1557

Tabla 9. Ec = 27.24 kg/cm³

w % prom. (gr)	Ds (gr/cm ³)
11.74	1.044
17.92	1.096
24.84	1.138
39.90	1.117
43.62	1.068

Dsmáx = 1.145 gr/cm³
 Wop = 29%

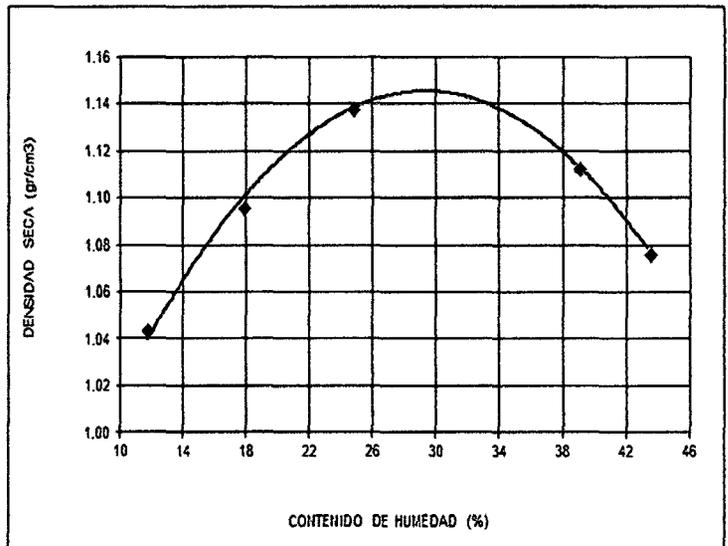


Figura 11. Compactación a 56 Golpes.

Energía de compactación 27.72 Kg.cm/cm³ (57 golpes)
 Proctor Modificado METODO C - NORMA ASTM D1557

Tabla 10. Ec=27.72 kg/cm³

w % prom. (gr)	Ds (gr/cm ³)
14.03	1.079
24.01	1.132
42.25	1.115
45.87	1.063
50.03	1.009

Dsmáx = 1.152 gr/cm³
 Wop = 29 %

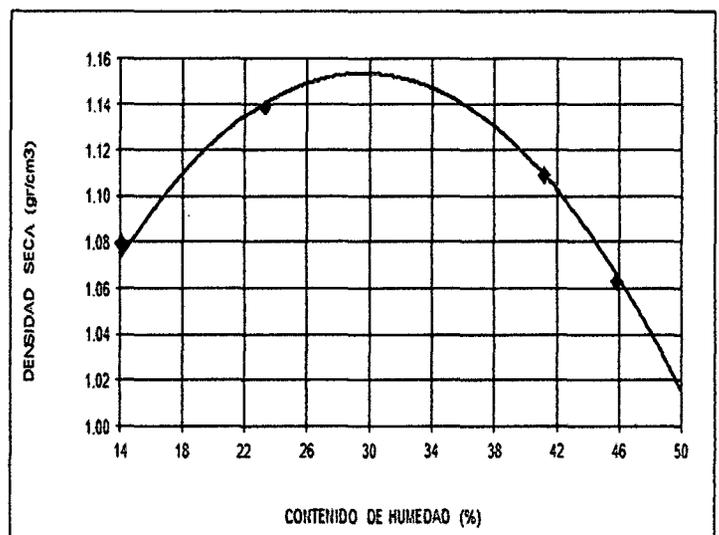


Figura 12. Compactación a 57 Golpes.

Energía de compactación 28.21 Kg.cm/cm³ (58 golpes) - Proctor Modificado
METODO C NORMA ASTM D1557

Tabla 11. Ec = 28.21 kg/cm³

w % prom. (gr)	Ds (gr/cm ³)
12.09	1.108
19.50	1.149
34.67	1.148
41.65	1.098
51.64	1.018

Dsmáx = 1.158 gr/cm³
 Wop = 27 %

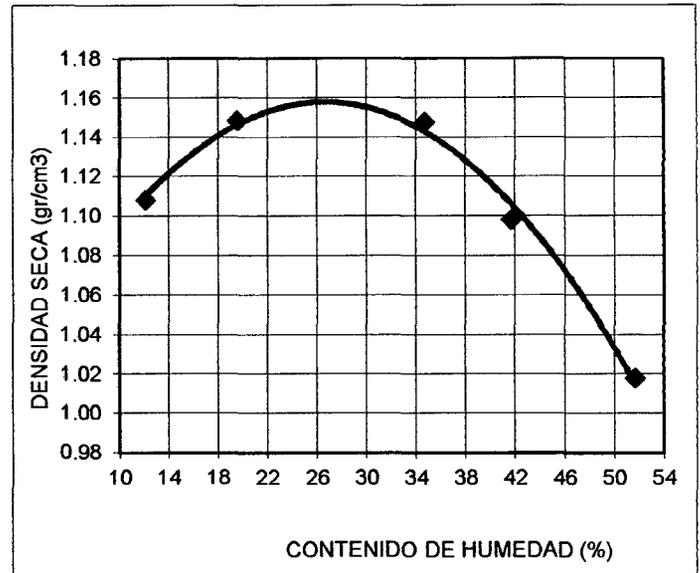


Figura 13. Compactación a 58 Golpes.

Energía de compactación 28.70 Kg.cm/cm³ (59 golpes)
Proctor Modificado METODO C - NORMA ASTM D1557

Tabla 12. Ec = 28.70 kg/cm³

w % prom. (gr)	Ds (gr/cm ³)
14.39	1.117
23.96	1.167
36.46	1.149
49.36	1.040
55.35	0.997

Dsmáx = 1.165 gr/cm³
 Wop = 27 %

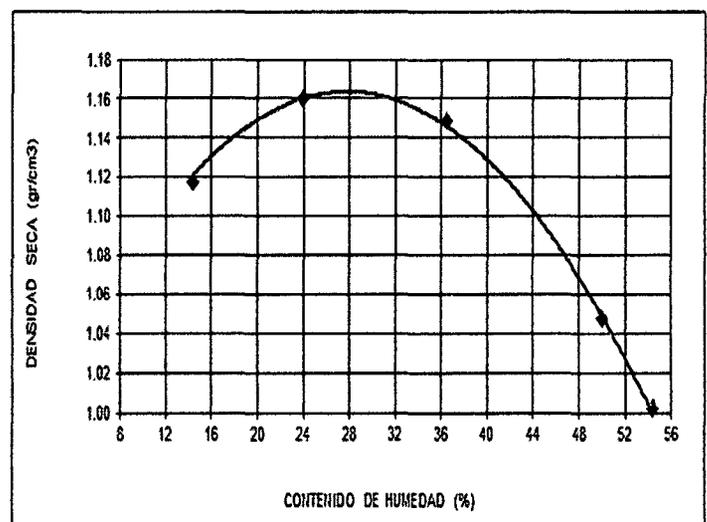


Figura 14. Compactación a 59 Golpes

Energía de compactación 29.18 Kg.cm/cm³ (60 golpes)
 Proctor Modificado METODO C - NORMA ASTM

Tabla 13. Ec = 29.18 kg/cm³

w % prom. (gr)	Ds (gr/cm ³)
15.66	1.152
27.56	1.171
39.37	1.128
47.09	1.058
51.73	1.024

Dsmáx = 1.172 gr/cm³
 Wop = 25 %

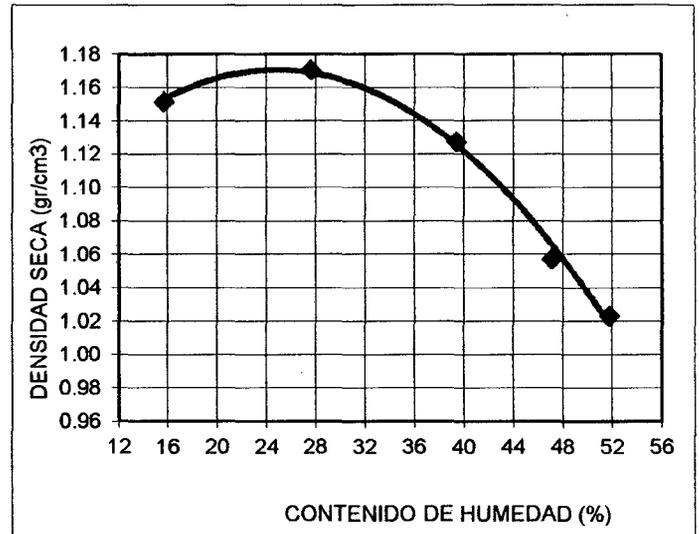


Figura 15. Compactación a 60 Golpes.

Energía de compactación 29.67 Kg.cm/cm³ (61 golpes)
 Proctor Modificado METODO C - NORMA ASTM

Tabla 14. Ec = 29.67 kg/cm³

w % prom. (gr)	Ds (gr/cm ³)
14.78	1.115
28.39	1.156
40.38	1.115
47.17	1.041
51.90	1.006

Dsmáx = 1.154 gr/cm³
 Wop = 27 %

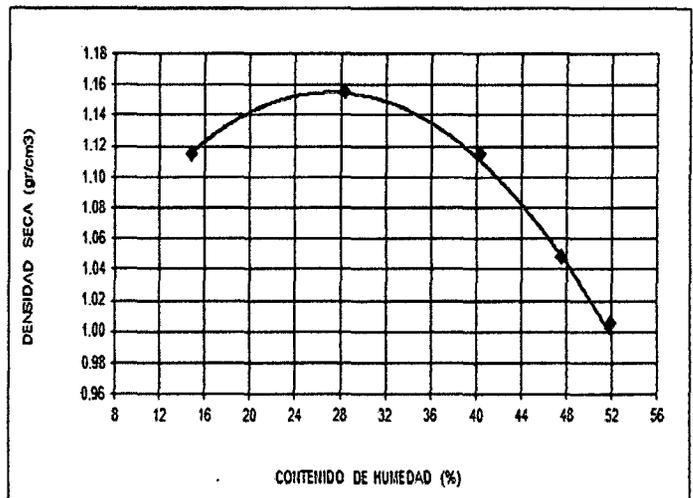


Figura 16. Compactación a 61 Golpes

Energía de compactación 30.15 Kg.cm/cm³ (62golpes)
 Proctor Modificado METODO C - NORMA ASTM

Tabla 15. Ec = 30.15 kg/cm³

w % prom. (gr)	Ds (gr/cm ³)
15.39	1.105
28.77	1.1336
38.68	1.127
47.32	1.032
51.34	1.003

Dsmáx = 1.145 gr/cm³
 Wop = 28 %

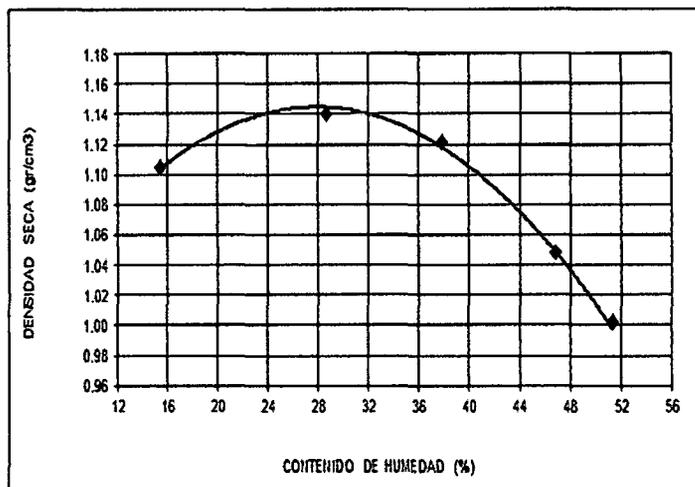


Figura 17. Compactación a 62 Golpes

Tabla 16. Relación de la energía de compactación con la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad.

Ensayo	Nºgol/capa	Ec (Kg.cm/cm ³)	Dsmáx (gr/cm ³)	Wóp (%)
1	56	27.24	1.145	29
2	57	27.72	1.154	29
3	58	28.21	1.160	28
4	59	28.70	1.165	27
5	60	29.18	1.172	25
6	61	29.67	1.154	27
7	62	30.15	1.145	28

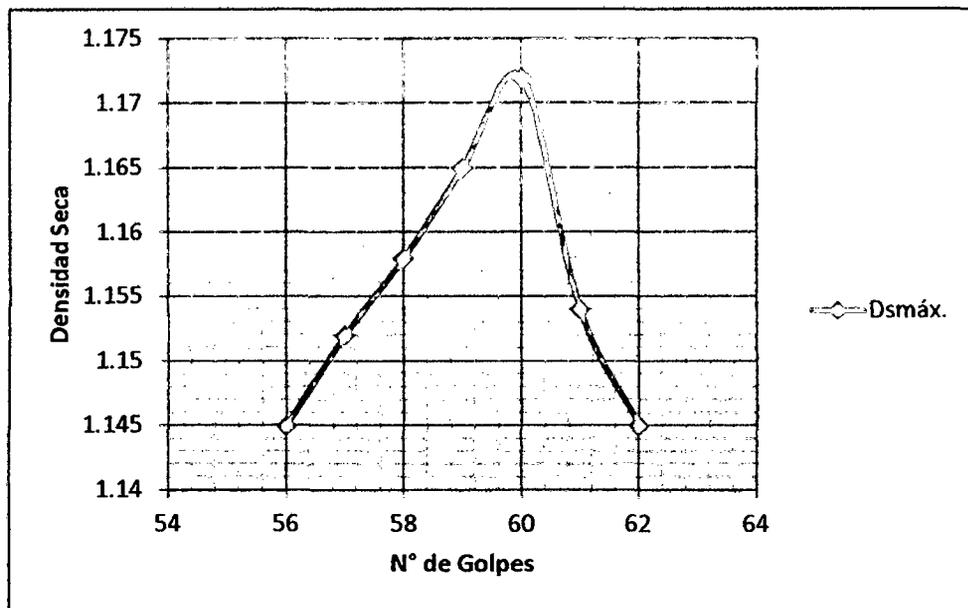


Figura 18. Densidad seca vs N° de golpes

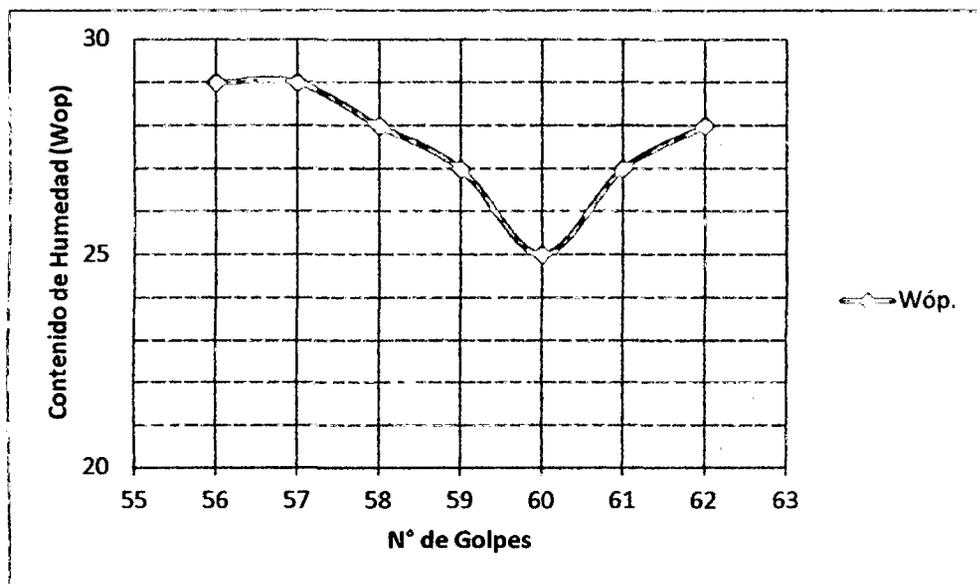


Figura19. Contenido de humedad vs N° de golpes.

3.2. Análisis de la información

Luego de los resultados obtenidos se deduce que los factores que influyen en la compactación, los más importantes son el contenido de humedad y la energía de compactación aplicada a cada ensayo realizado, ya que de estos depende obtener una máxima densidad seca.

La energía de compactación tiene una gran influencia en las variaciones de las densidades secas, es decir, mientras mayor sea la energía, más eficaz será la remoción de vacíos, pero si seguimos aumentando la energía pasado los 60 golpes para este tipo de suelo, lo único que se obtuvo es el aumento del contenido de humedad y la disminución de la densidad seca. Entonces, este aumento de energía logra un óptimo contenido de humedad en cierto punto en que la densidad seca es máxima, como observa en la figura 18 que mientras se sigue aumentando la energía de compactación, hasta los 60 golpes, se ha alcanzado una densidad seca máxima de 1.172 gr/cm^3 con una energía de 29.18 kg.cm/cm^3 ; pero también se observa que la densidad decrece y el contenido óptimo de humedad aumenta, a medida que la energía aplicada supera los 60 golpes, esto se observa en el gráfico a los 62 golpes. En comparación de la primera energía de compactación (27.24 kg.cm/cm^3), con la última energía de compactación (30.15 kg.cm/cm^3), las densidades máximas alcanzadas son iguales, significa que hubo un gasto innecesario de energía para llegar al estado inicial de los 56 golpes.

3.3. Contrastación de la hipótesis

En cuanto a la hipótesis planteada, solamente se cumple hasta una energía de 29.18 kg.cm/cm^3 (60 golpes), significa que a esta energía de compactación, la densidad seca es máxima y el óptimo contenido de humedad es mínimo. En consecuencia si se sigue incrementando la energía de compactación, no cumple con la hipótesis, debido a que la densidad seca disminuye y el contenido de humedad aumenta.

3.4. Interpretación de la información

De los ensayos de compactación realizados en laboratorio se obtienen las curvas de compactación a diferentes energías, en donde la muestra alcanza la máxima densidad seca de 1.172 gr/cm³, con una energía de compactación de 29.18 Kg.cm/cm³, significa que para este tipo de suelo es apropiado aplicar esta cantidad de energía.

Al incrementar la energía de compactación hasta los 30.15 Kg.cm/cm³ (62 golpes), la densidad seca tiende a disminuir y el contenido de humedad tiende a aumentar, por este motivo, no fue necesario seguir incrementando dicha energía de compactación.

Según los resultados de laboratorio, en los cuatro primeros ensayos, se obtiene un incremento de la densidad seca máxima y una disminución en el óptimo contenido de humedad. Y para el resto de los ensayos se tiene lo contrario, es decir, disminuye la densidad seca máxima y aumenta el óptimo contenido de humedad.

CAPITULO IV. CONCLUSIONES

Conclusiones

- ✓ Con la energía de compactación de 29.18 kg.cm/cm³ (60 golpes), se obtuvo la máxima densidad seca de 1.172 gr/cm³, con un óptimo contenido de humedad de 25%.
- ✓ Si la energía de compactación es mayor a 29.18 kg.cm/cm³ (60 golpes) la densidad decrece, lo cual significa que el suelo se fragmenta en partículas cada vez más pequeñas y aumenta el contenido de humedad.

Recomendaciones

- ✓ Se recomienda realizar investigaciones sobre la influencia de energía de compactación en otros suelos granulares, así como también en suelos cohesivos.

Referencias Bibliográficas

- **Libros**

- ✓ Braja M. /2001/Principios de la Ingeniería de Cimentaciones/ International Thomson Editores/California.
- ✓ Crespo C./2004/Mecánica de Suelos y Cimentaciones/ Quinta Editorial Limusa/Grupo Noriega Editores /Impreso en México/650 páginas.
- ✓ Garber J. /2005/ Ingeniería de tránsito y Carreteras/ Editorial/Thomson Learning/Tercera Edición/Impreso en México/1150 páginas.
- ✓ Hoyos M./2006/Mecánica de Suelos I/Editorial Universitaria de la UNC/Primera Edición/Cajamarca-Perú/89 páginas
- ✓ Juárez E. y Rico /2005/ Mecánica de suelos I/ Fundamentos de la mecánica de suelos/Editorial Limusa/Grupo Noriega Editores/Impreso en México/644 páginas.
- ✓ Llique R. /2003./Manual de Laboratorio de Mecánica de Suelos/Editorial Universitaria de la UNC/Primera Edición/Cajamarca – Perú/85 páginas.
- ✓ Ramirez R./2012/Preparación de Muestras y ensayos de Compactación/Instituto Tecnológico de Costa Rica/Informe 3.

- **Documentos Electrónicos**

- ✓ *Angel-2007, Aplicaciones del ensayo de humedad óptima y densidad máxima (en línea), Consultado 20 dic 2012. Disponible en <http://www.ingenieracivil.com/2007/05/aplicaciones-del-ensayo-de-humedad.html>.*
- ✓ Bañón Blázquez – 2012, Clasificación de suelos, consultado el 12 febrero 2013, Disponible en [sirio.ua.es/proyectos/manual %20carreteras/02010103.pdf](http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf).
- ✓ Cruz Velasco – 2012, Clasificación de Suelos, Consultado el 28 de dic 2012. Disponible en ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Geotecnia/profesor_lucio_cr

[uz/Curso%20Mec%20E1nica%20de%20Suelos%20I/Mecanica%20de%20Suelos%20I%20ESLAGE%20\(28%2029%2030\).pdf](#)

- ✓ Construmatica – 2012, Clasificación de Suelos Granulares, Disponible en: [http://www.construmatica.com/construpedia/Comportamiento de los Suelos Granulares](http://www.construmatica.com/construpedia/Comportamiento_de_los_Suelos_Granulares).
- ✓ Jorge A. Páramo-2002, *Compactación de suelos y materiales estabilizados*, Consultado 20 dic 2012. Disponible en [www.ityac.com.ar/Files/A1 Compactacion de Suelos.pdf](http://www.ityac.com.ar/Files/A1_Compactacion_de_Suelos.pdf)
- ✓ Luis Chang -2010, Compactación, consultado 02 mar 2013. Disponible en <http://www.cismid.uni.edu.pe>
- ✓ Pluijm, Ben van der, 2005, *Definición de suelo (en línea)*. Consultado 20 dic 2012. Disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/Suelo>.
- ✓ Publicado por INGTEKCH - 2011, Normas Ensayo de Compactación, Humedad Optima y densidad Máxima, Consultado 20 dic 2012. Disponible en <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2011/04/normas-ensayo-de-compactacion-humedad.html>.
- ✓ William Lambe y Robert V. Whitman -2012, *Mecánica de suelos*, Limuza Editores, Consultado el 28 de dic 2012. Disponible en es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_compactación_Proctor
- ✓ William López -2009, Energía de Compactación, Consultado el 28 de dic 2012. Disponible en <http://www.slideshare.net/wlopezalmarza/compactacion-de-suelos>
- ✓ Vicente Pérez Alama – 2004, *Materiales y procedimientos de construcción (Mecánica de suelos y cimentaciones)*, Consultado el 05 de Febrero 2013. Disponible en [http://es.wikipedia.org/wiki/Suelo \(ingenier%C3%ADa\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Suelo_(ingenier%C3%ADa))

ANEXOS

Anexo I. Tablas y gráficos complementarios

Tabla 17. Contenido de Humedad: W (%)

MUESTRA	CANTERA APALIN	
T N°	a	b
Wt	27.4	29
Wtmh	230.50	225.60
Wtms	195.2	189.5
wh	203.10	196.6
ws	167.8	160.5
Ww	35.30	36.1
w(%)	21.04	22.49
w(%)Prom.	22	

Tabla 18. Análisis Granulométrico Combinado

Malla N°	Malla(mm)	P.R.P	% R.P.	% R.A	% PASA
2 "	50.800	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100	39.00	0.56	0.56	99.44
1 "	25.400	748.00	10.69	11.24	88.76
3/4 "	19.050	589.00	8.41	19.66	80.34
1/2 "	12.700	770.00	11.00	30.66	69.34
3/8 "	9.520	487.00	6.96	37.61	62.39
1/4 "	6.350	673.00	9.61	47.23	52.77
N° 4	4.760	154.00	2.20	49.43	50.57
N° 10	2.000	496.31	7.09	56.52	43.48
N° 20	0.840	462.32	6.60	63.12	36.88
N° 30	0.600	194.70	2.78	65.90	34.10
N° 40	0.420	133.81	1.91	67.82	32.18
N° 60	0.250	187.62	2.68	70.50	29.50
N° 100	0.150	153.64	2.19	72.69	27.31
N° 200	0.074	133.81	1.91	74.60	25.40
Pérdida lavado		1777.79	25.40	100.00	0.00

Tabla 19. Pesos específicos

PESO ESPECIFICO DE LA GRAVA		
MUESTRA	a	b
Waire (gr)	78.49	51.14
Wsum (gr)	22.2	14.9
Ys (gr)	1.39	1.41
Ys prom (gr)	1.40	
PESO ESPECIFICO DEL MATERIAL FINO		
MUESTRA	a	b
Wms (gr)	55	60
Wfw (gr)	643	643
Wfws (gr)	667	669
Ys (gr/cm3)	1.77	1.76
Ys prom (gr/cm3)	1.77	
PESO ESPECIFICO DE FINOS Y GRUESOS		
	Peso (gr)	Porcentaje (%)
Pms	1157	100
R1 (retenido)	870	75.19
R2(pasa)	287	24.81
Ys prom (gr/cm3)	1.50	

Tabla 20. Límites de consistencia

T N°	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	a	b	c	d	e
Wt	27.5	26.2	26.3	27.50	26.70
Wtmh	41.8	42.4	40.7	31.60	31.30
Wtms	36.8	37.1	36.2	30.70	30.20
N°Golpes	13	22	32	-	-
wh	14.3	16.2	14.4	-	-
ws	9.3	10.9	9.9	3.20	3.50
ww	5	5.3	4.5	1.00	1.10
w(%)	53.76	48.62	45.45	31.25	31.43
LL(%)	48			LP(%)	31

Tabla 21. Energía de compactación 27.24 kg.cm/cm3 (56 golpes) – Proctor Modificado Método C

NORMA ASTM D1557

Molde N°	1	2	3	4	5					
N° golpes por capa	56	56	56	56	56					
Peso molde	6300	6300	6300	6300	6300					
Pmh + molde	8755	9020	9290	9590	9530					
Pmh (gr)	2455	2720	2990	3290	3230					
Vmh. (cm3)	2104.9	2104.9	2104.9	2104.9	2104.9					
Dh (gr/cm3)	1.17	1.29	1.42	1.56	1.53					
Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Pt (gr)	26.7	26.4	27.5	27.4	26.2	27.5	27	26.9	25.5	25.7
Pmh + t (gr)	201.1	205.1	219.7	224.8	225.3	241	226.8	232.3	240.2	241.4
Pms + t (gr)	182.7	186.4	190.6	194.7	188.1	196	164.1	180.1	173.8	177.1
Pw (gr)	18.4	18.7	29.1	30.1	37.2	45	62.7	52.2	66.4	64.3
Pms (gr)	156	160	163.1	167.3	161.9	168.5	137.1	153.2	148.3	151.4
w %	11.79	11.69	17.84	17.99	22.98	26.71	45.73	34.07	44.77	42.47
w % prom. (gr)	11.74	17.92	24.84	39.90	43.62					
Ds (gr/cm3)	1.044	1.096	1.138	1.117	1.068					

Tabla 22. Energía de compactación 27.72 kg.cm/cm³ (57 golpes) – Proctor Modificado Método C

NORMA ASTM D1557

Molde N°	1		2		3		4		5	
N° golpes por capa	57									
Peso molde	6295		6295		6295		6295		6295	
Pmh + molde	8885		9250		9635		9560		9480	
Pmh (gr)	2590		2955		3340		3265		3185	
Vmh. (cm ³)	2104.9		2104.9		2104.9		2104.9		2104.9	
Dh (gr/cm ³)	1.23		1.40		1.59		1.55		1.51	
Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	h
Pt (gr)	28.4	27.4	26.2	27.3	27.4	28.2	27.8	26.5	28	27.4
Pmh + t (gr)	219.2	220.3	219.7	235	251.3	255.7	261.8	263.8	303.5	306.5
Pms + t (gr)	196.7	195.6	181.4	195.7	178.4	195.2	187.6	189.8	210.1	215.0
Pw (gr)	22.5	24.7	38.3	39.3	72.9	60.5	74.2	74	93.4	91.5
Pms (gr)	168.3	168.2	155.2	168.4	151	167	159.8	163.3	182.1	187.6
w %	13.37	14.68	24.68	23.34	48.28	36.23	46.43	45.32	51.29	48.77
w % prom. (gr)	14.03		24.01		42.25		45.87		50.03	
Ds (gr/cm ³)	1.079		1.132		1.115		1.063		1.009	

Tabla 23. Energía de compactación 28.21 kg.cm/cm³ (58 golpes) – Proctor Modificado Método C

NORMA ASTM D1557

Molde N°	1		2		3		4		5	
N° golpes por capa	58									
Peso molde	6295		6295		6295		6295		6295	
Pmh + molde	8910		9185		9550		9570		9545	
Pmh (gr)	2615		2890		3255		3275		3250	
Vmh. (cm ³)	2104.9		2104.9		2104.9		2104.9		2104.9	
Dh (gr/cm ³)	1.24		1.37		1.55		1.56		1.54	
Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k
Pt (gr)	25.8	26.8	29.5	26.4	27.1	26.5	27.7	28.5	26.6	26.5
Pmh + t (gr)	232.9	226.8	241.9	214.1	242.5	248.3	235.6	270.7	280.1	276
Pms + t (gr)	210.6	205.2	210	181.1	182.9	195.7	173.7	200.4	193.6	191.2
Pw (gr)	22.3	21.6	31.9	33	59.6	52.6	61.9	70.3	86.5	84.8
Pms (gr)	184.8	178.4	180.5	154.7	155.8	169.2	146	171.9	167	164.7
w %	12.07	12.11	17.67	21.33	38.25	31.09	42.40	40.90	51.80	51.49
w % prom. (gr)	12.09		19.50		34.67		41.65		51.64	
Ds (gr/cm ³)	1.108		1.149		1.148		1.098		1.018	

Tabla 24. Energía de compactación 28.70 kg.cm/cm³ (59 golpes) – Proctor Modificado Método C
NORMA ASTM D1557

Molde N°	1		2		3		4		5	
N° golpes por capa	59		59		59		59		59	
Peso molde	6295		6295		6295		6295		6295	
Pmh + molde	8985		9340		9595		9565		9555	
Pmh (gr)	2690		3045		3300		3270		3260	
Vmh. (cm ³)	2104.9		2104.9		2104.9		2104.9		2104.9	
Dh (gr/cm ³)	1.28		1.45		1.57		1.55		1.55	
Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Pt (gr)	27.5	27.4	26.4	29	27.6	27	26.9	25.7	26.7	27.5
Pmh + t (gr)	231.4	215.6	221.8	234.6	244.3	249.3	234.4	248.8	272.5	291.8
Pms + t (gr)	207.1	190.7	180.1	199.2	184.4	192	168.3	172.5	181.4	201.6
Pw (gr)	24.3	24.9	41.7	35.4	59.9	57.3	66.1	76.3	91.1	90.2
Pms (gr)	179.6	163.3	153.7	170.2	156.8	165	141.4	146.8	154.7	174.1
w %	13.53	15.25	27.13	20.80	38.20	34.73	46.75	51.98	58.89	51.81
w % prom. (gr)	14.39		23.96		36.46		49.36		55.35	
Ds (gr/cm ³)	1.117		1.167		1.149		1.040		0.997	

Tabla 25. Energía de compactación 29.18 kg.cm/cm3 (60 Golpes) – Proctor Modificado Método C

NORMA ASTM D1557

Molde N°	1		2		3		4		5	
N° golpes por capa	60		60		60		60		60	
Peso molde	6295		6295		6295		6295		6295	
Pmh + molde	9100		9440		9605		9570		9565	
Pmh	2805		3145		3310		3275		3270	
Vmh.	2104.9		2104.9		2104.9		2104.9		2104.9	
Dh (gr/cm3)	1.33		1.49		1.57		1.56		1.55	
Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Pt (gr)	27	27.7	26.9	26.7	26	26.5	27.7	27.7	26.3	27.7
Pmh + t (gr)	227.4	229.1	232.5	232.6	247.2	250.3	274.5	295.3	319.1	315.6
Pms + t (gr)	200.2	201.9	187.2	189	184.4	187.4	194.7	210.5	218.5	218.2
Pw (gr)	27.2	27.2	45.3	43.6	62.8	62.9	79.8	84.8	100.6	97.4
Pms (gr)	173.2	174.2	160.3	162.3	158.4	160.9	167	182.8	192.2	190.5
w %	15.70	15.61	28.26	26.86	39.65	39.09	47.78	46.39	52.34	51.13
w % prom. (gr)	15.66		27.56		39.37		47.09		51.73	
Ds (gr/cm3)	1.152		1.171		1.128		1.058		1.024	

Tabla 26. Energía de compactación 29.67 kg.cm/cm³ (61 golpes) – Proctor Modificado Método C

NORMA ASTM D1557

Molde N°	1		2		3		4		5	
N° golpes por capa	61									
Peso molde	6295		6295		6295		6295		6295	
Pmh + molde	8990		9420		9590		9520		9510	
Pmh (gr)	2695		3125		3295		3225		3215	
Vmh. (cm ³)	2104.9		2104.9		2104.9		2104.9		2104.9	
Dh (gr/cm ³)	1.28		1.48		1.57		1.53		1.53	
Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Pt (gr)	26.8	26.5	28.0	26.5	27.7	27.4	29.0	27.3	28.4	29.1
Pmh + t (gr)	226.3	231.5	227.4	230.5	245.3	247.9	272.8	291.1	320.5	333.1
Pms + t (gr)	201.2	204.5	182.9	185.8	182.3	184.9	192.8	208.6	219.4	230.6
Pw (gr)	25.1	27	44.5	44.7	63	63	80	82.5	101.1	102.5
Pms (gr)	174.4	178	154.9	159.3	154.6	157.5	163.8	181.3	191	201.5
w %	14.39	15.17	28.73	28.06	40.75	40.00	48.84	45.50	52.93	50.87
w % prom. (gr)	14.78		28.39		40.38		47.17		51.90	
Ds (gr/cm ³)	1.115		1.156		1.115		1.041		1.006	

Tabla 27. Energía de compactación 30.15 kg.cm/cm³ (62 golpes) – Proctor Modificado Método C
NORMA ASTM D1557

Molde N°	1	2	3	4	5					
N° golpes por capa	62	62	62	62	62					
Peso molde	6295	6295	6295	6295	6295					
Pmh + molde	8980	9375	9585	9495	9490					
Pmh (gr)	2685	3080	3290	3200	3195					
Vmh. (cm ³)	2104.9	2104.9	2104.9	2104.9	2104.9					
Dh (gr/cm ³)	1.28	1.46	1.56	1.52	1.52					
Recipiente N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Pt (gr)	26.9	25.7	27.4	27.5	26.3	27.6	26.7	27.5	25.5	27.0
Pmh + t (gr)	205.9	224.3	223.1	232.2	245.9	244.0	273.5	281.4	324.8	332.4
Pms + t (gr)	182.3	197.5	178.4	187.5	182.9	185.4	192.1	202.1	222.2	229.9
Pw (gr)	23.6	26.8	44.7	44.7	63	58.6	81.4	79.3	102.6	102.5
Pms (gr)	155.4	171.8	151	160	156.6	157.8	165.4	174.6	196.7	202.9
w %	15.19	15.60	29.60	27.94	40.23	37.14	49.21	45.42	52.16	50.52
w % prom. (gr)	15.39	28.77	38.68	47.32	51.34					
Ds (gr/cm ³)	1.105	1.136	1.127	1.032	1.003					

- ✓ En figura 20, se obtuvo los valores estadísticos de la media, desviación estándar, varianza y mediana de la densidad seca máxima, calculados por el programa MINITAB, para la densidad máxima.

Tabla 28. Estadísticas descriptivas de la Densidad máxima

Variable	N	N*	Media	M. del error estándar	Desv.Est.	Varianza	Coef.Var	Suma de cuadrados
Dsmáx	7	0	1.0886	0.00357	0.00945	0.00009	0.87	8.2955

Variable	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Rango	IQR	Modo	N para moda
Dsmáx	1.0800	1.0800	1.0900	1.0950	1.1050	0.0250	0.0150	1.08	3

Variable	Sesgo	Kurtosis
Dsmáx	0.78	-0.09

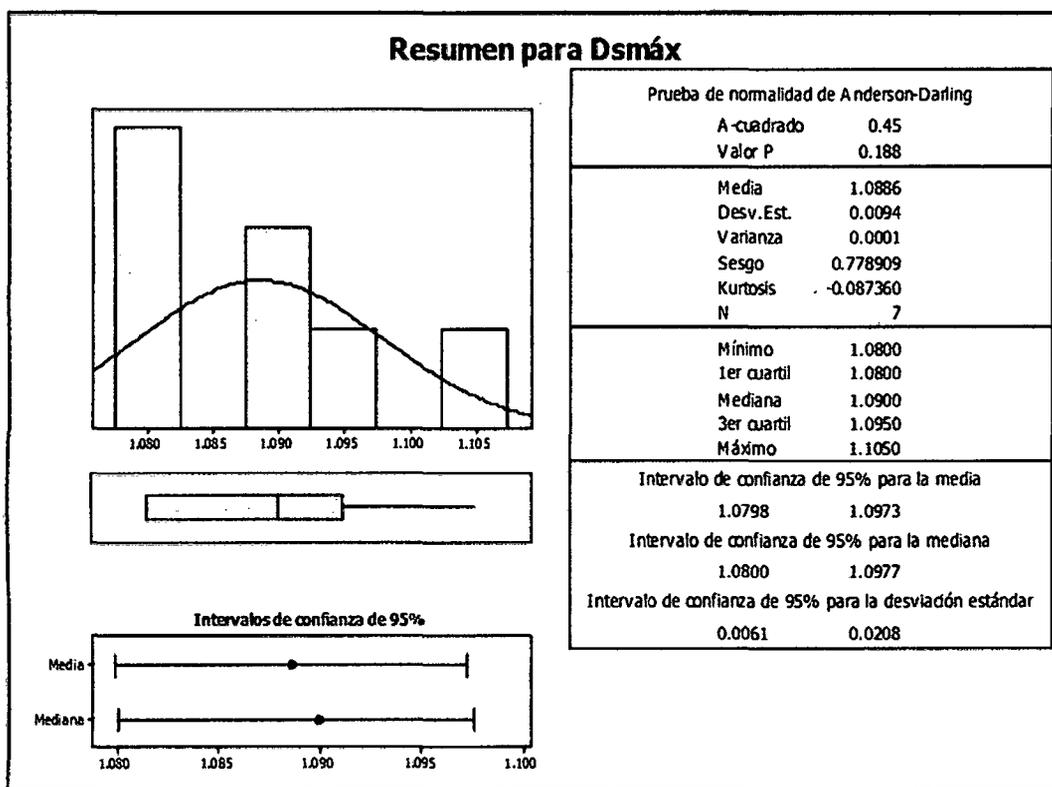


Figura 20. Resumen de La Densidad Máxima

- ✓ En la figura n° 21, se obtuvo los valores estadísticos de la media, desviación estándar, varianza y mediana de la densidad seca máxima, calculados por el programa MINITAB, para el óptimo contenido de humedad.

Tabla 29. Estadísticas descriptivas del óptimo contenido de humedad (Wop)

Variable	N	N*	Media	M. del error estándar	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Suma de cuadrados
Wop	7	0	27.857	0.705	1.864	3.476	6.69	5453.000

Variable	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Rango	IQR	Modo	N para moda
Wop	25.000	27.000	28.000	29.000	31.000	6.000	2.000	27, 28	2

Variable	Sesgo	Kurtosis
Wop	0.29	1.05

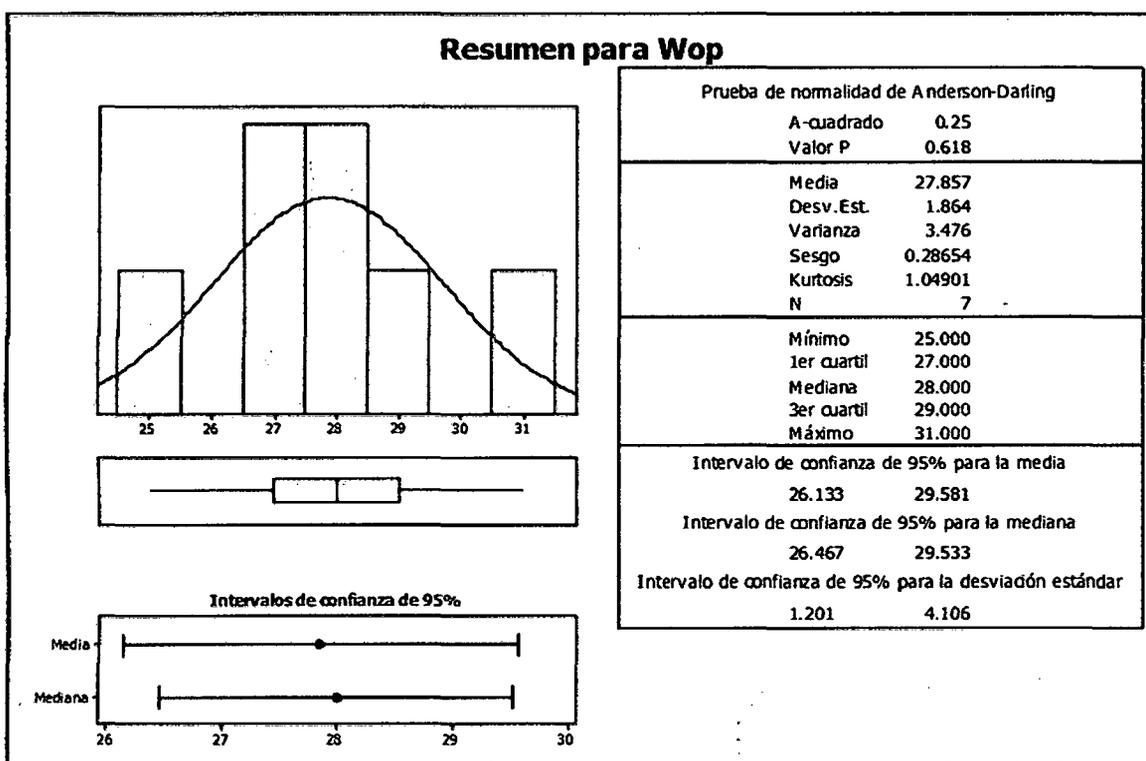


Figura 21. Resumen del contenido óptimo de humedad

Anexo II. Panel fotográfico



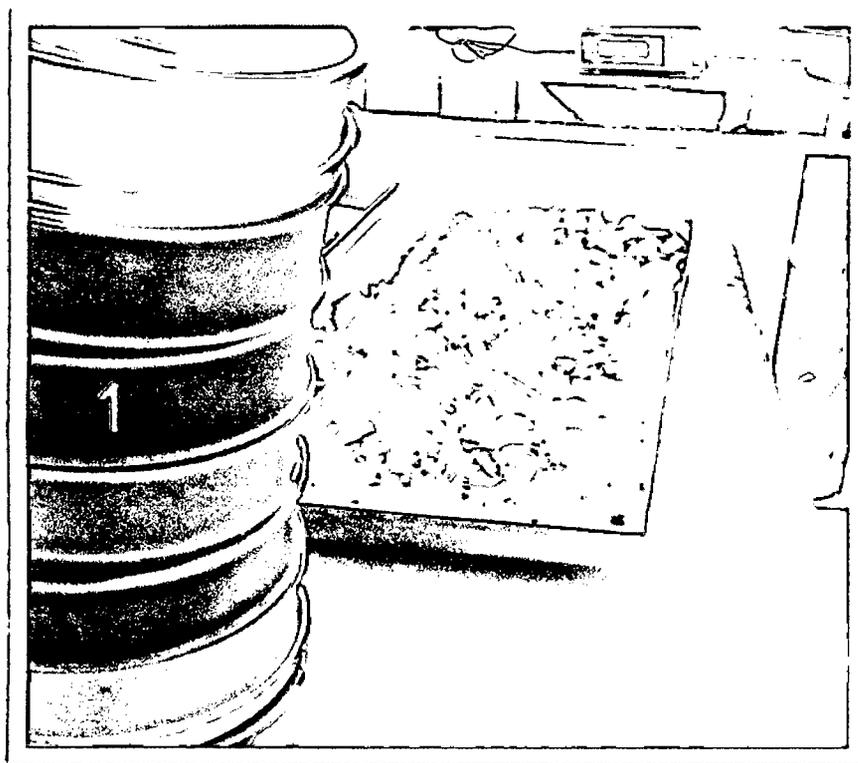
Fotografía 1. Cantera de Apalín, cuyas muestras se extrajeron de esta población.



Fotografía 2. Luego de haber hallado los contenidos de humedad de las muestras extraídas in situ, (secado de muestras al aire libre).



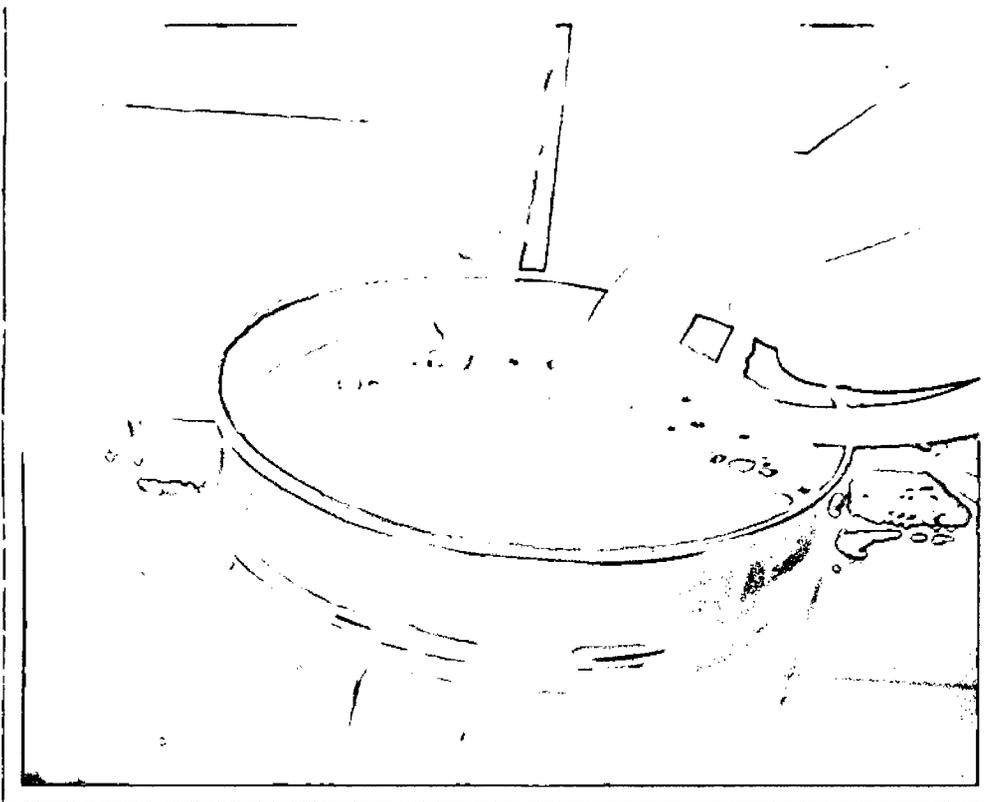
Fotografía 3. Luego del secado se pesaron 7kg de suelo, para realizar el análisis granulométrico.



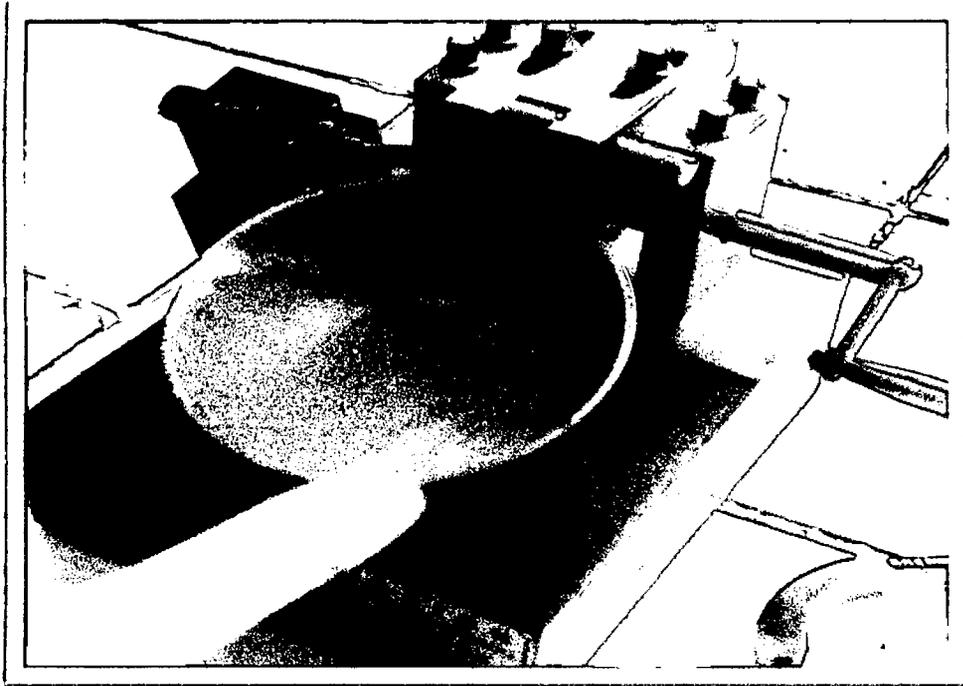
Fotografía 4. Juego de tamices utilizados 2", 1", 1/2", 1/4", N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°100 en el análisis granulométrico.



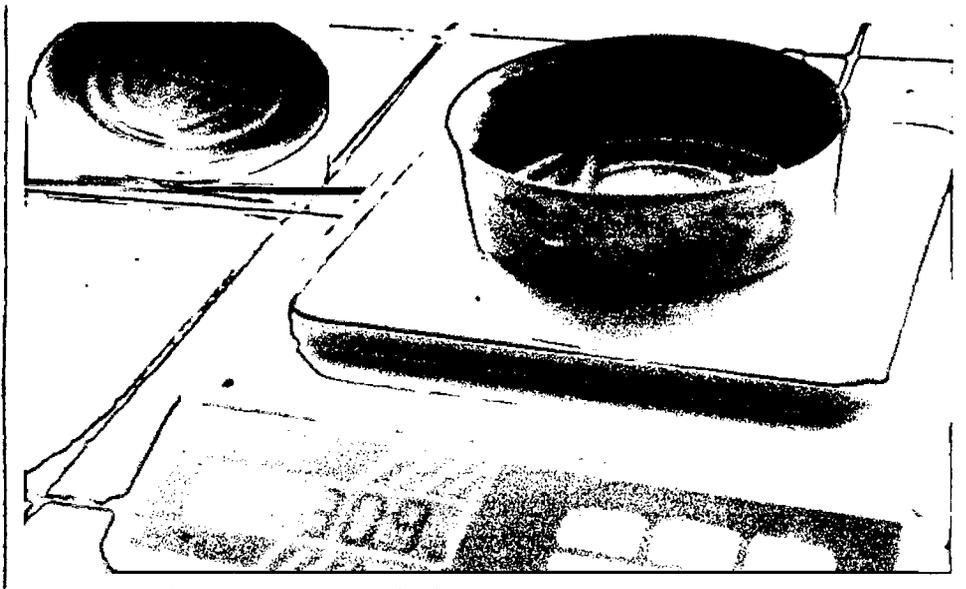
Fotografía 5. Muestra que pasó la malla N° 40, para el ensayo de límites líquido y plástico.



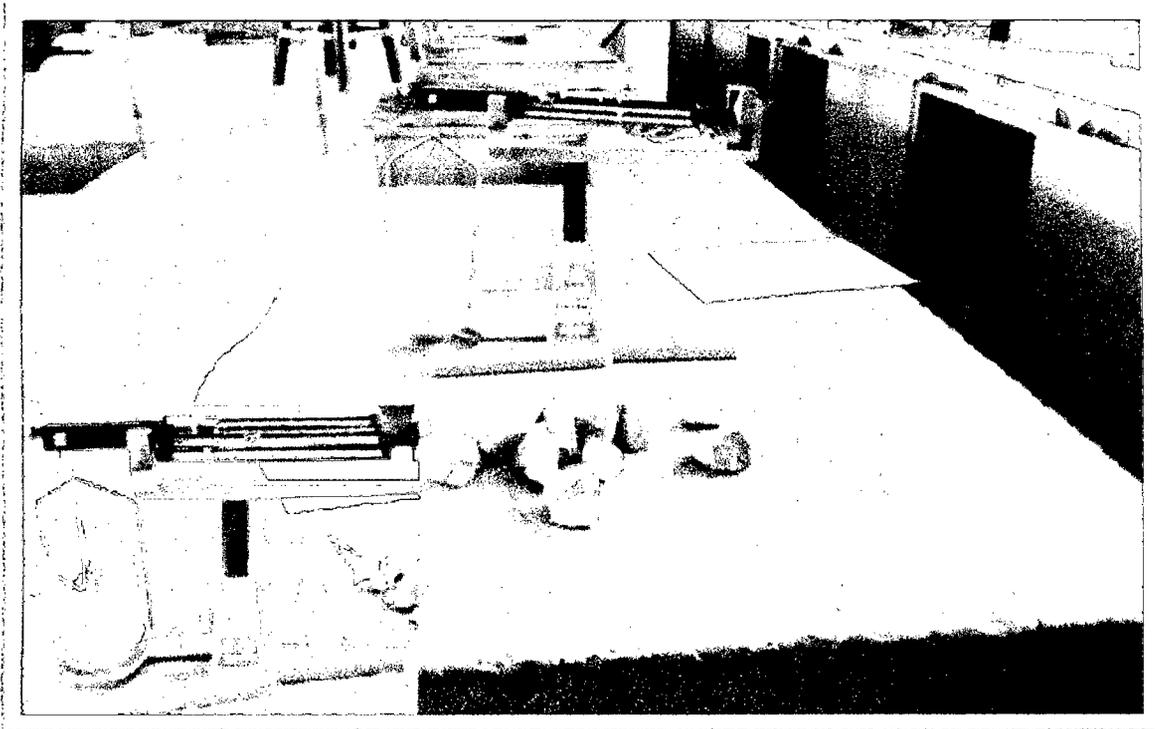
Fotografía 6. Realizando el lavado de la muestra, para el análisis granulométrico combinado.



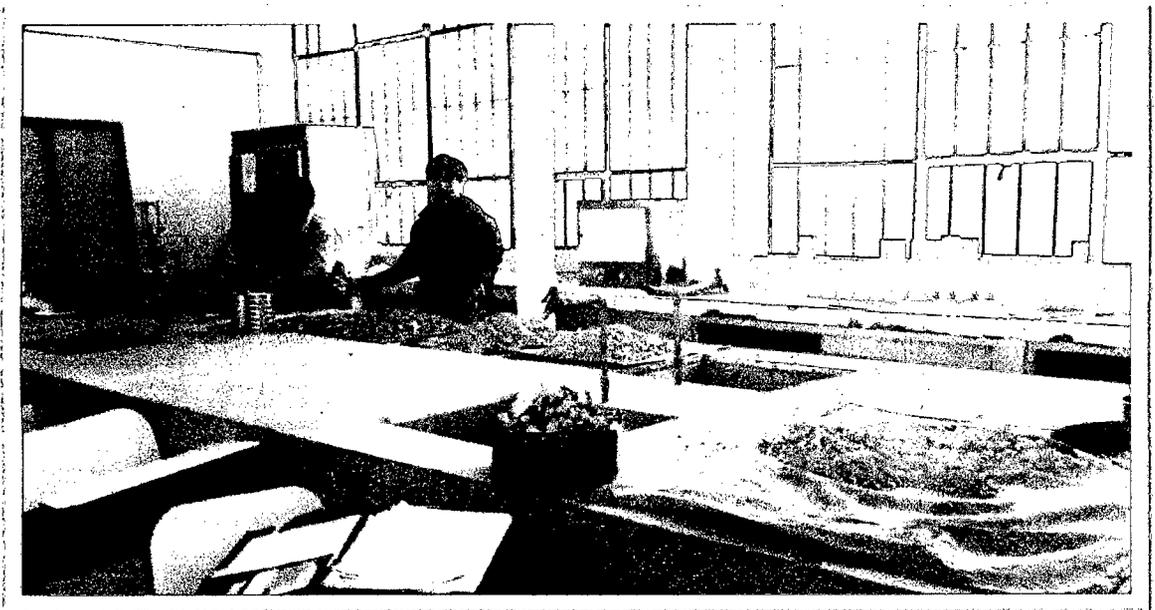
Fotografía 7. Copa Casagrande usado para el ensayo del límite líquido.



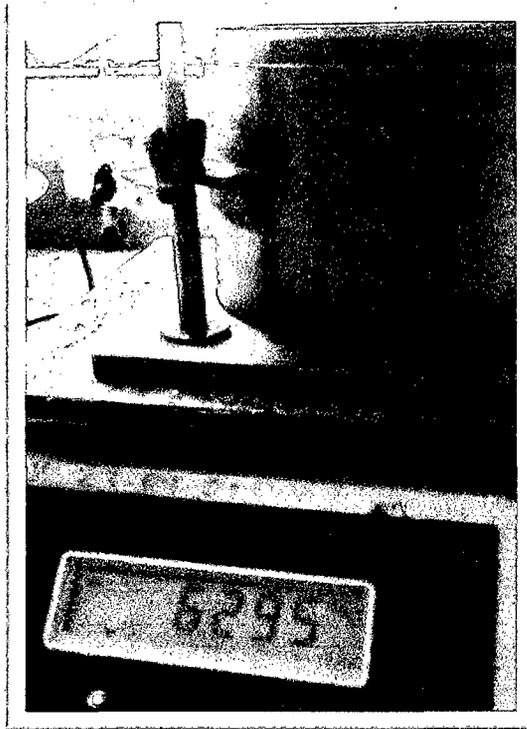
Fotografía 8. Con la pasta del ensayo del límite líquido, se realizó el ensayo de la plasticidad del suelo.



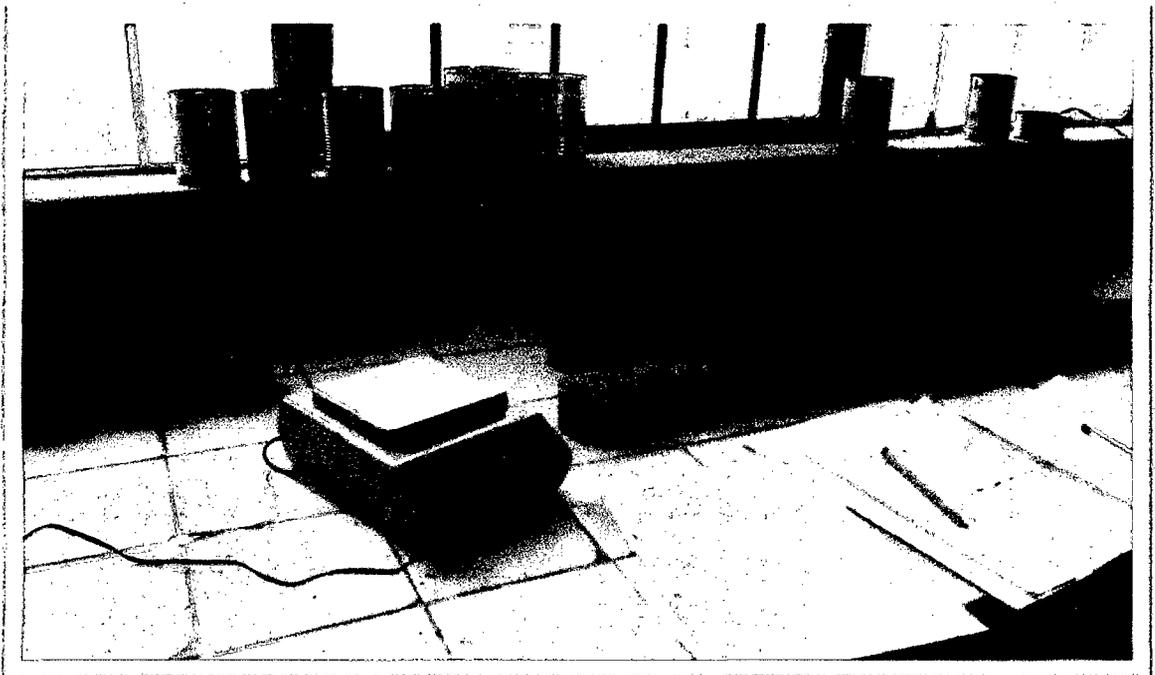
Fotografía 9. Balanza hidrostática con aproximación de 0.01gr. Usado en el ensayo para el peso específico de la grava.



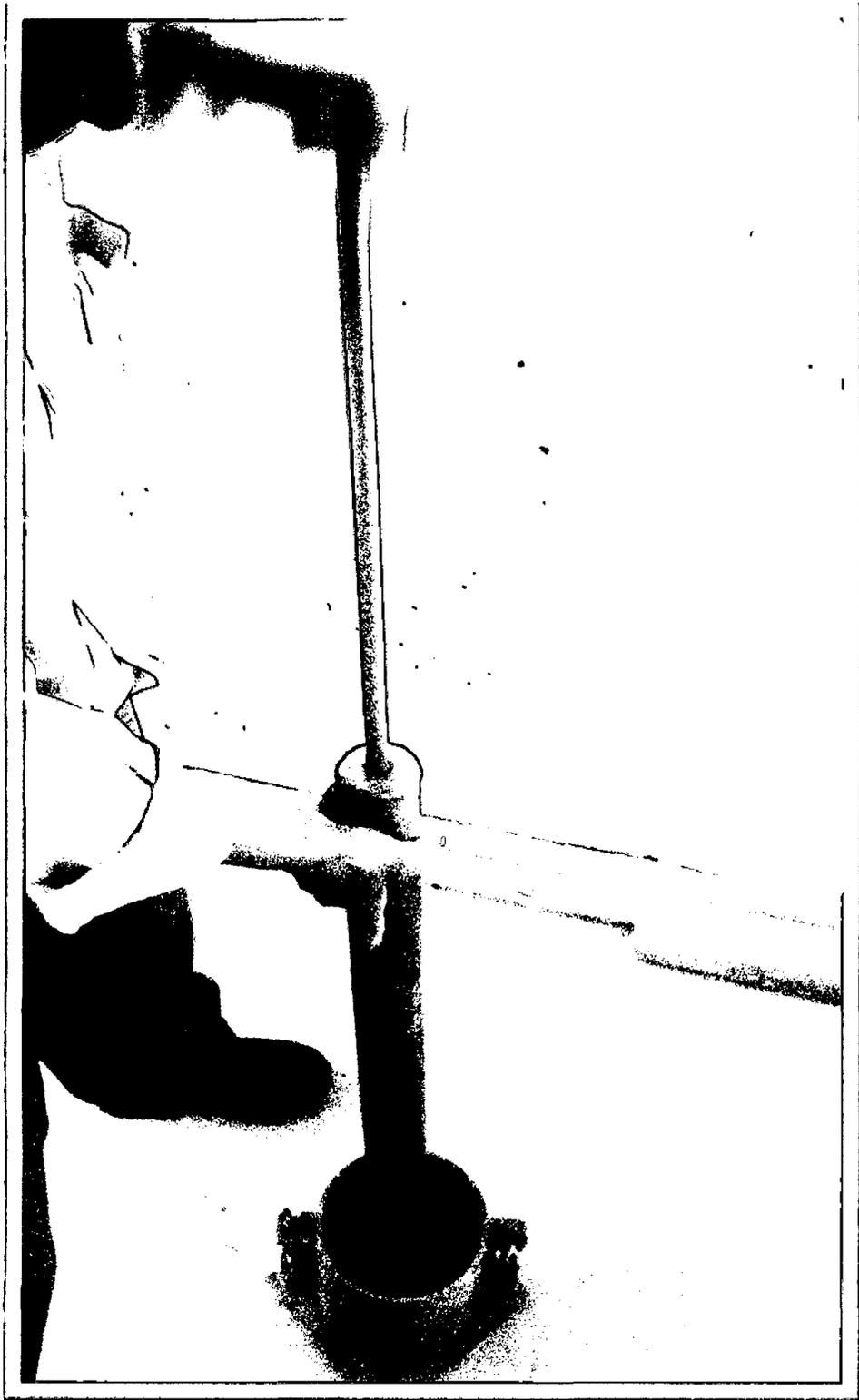
Fotografía 10. Se realizó la separación de cinco puntos de muestras, para el ensayo de compactación Proctor Modificado.



Fotografía 11. Se pesó el molde cilíndrico.



Fotografía 12. Se registró el peso de las muestras de cada ensayo, obteniéndose posteriormente las densidades secas y los contenidos de humedad.



Fotografía 13. Se muestra la forma correcta de aplicar la energía de compactación, por el método C de Proctor Modificado.