



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECIFICO
SECO MÁXIMO Y HUMEDAD OPTIMA EN LOS ENSAYOS DE
COMPACTACIÓN PARA LAS ARENAS LIMOSAS EN LA
REGIÓN DE PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. DEYWID WAGNER MARRON MACHACA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primera instancia a Dios padre, por haberme dado la vida y permitir realizar este trabajo y así poder llegar a este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre y a mi padre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional, A mi familia que es el motor que me impulsa a seguir adelante sin cansancio.

Deywid Wagner Marron Machaca.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme cada día la oportunidad y las fuerzas para superar las dificultades y obstáculos al transcurrir los días.

A mi madre, que con su la fortaleza que me demostrado me inculco a no ante las dificultades y tropiezos afrontarlos con decisión y fortaleza.

A mi padre, que con su ejemplo de diciplina y actitud en las labores a realizar, las que me enseñaron a no decaer ni rendirme ante un entorpecimiento durante camino que me toca recorrer por la vida.

A mi familia, por darme la fortaleza y constancia para superar cualquier dificultad que se nos presenta en nuestro día a día.

Gracias a los profesionales que aportaron en mi formación académica, de la misma forma agradecer a las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto.

Deywid Wagner Marron Machaca



ÍNDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 12

ABSTRACT..... 13

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema 14

1.1.1. Identificación del problema 14

1.2. Enunciados del problema 15

1.2.1. Problema General..... 15

1.2.2. Problema Específico 15

1.3. Justificación 16

1.4. Hipótesis de la investigación 16

1.4.1. Hipótesis General..... 16

1.4.2. Hipótesis Específico..... 16

1.5. Objetivos de la investigación..... 17

1.5.1. Objetivo General 17

1.5.2. Objetivos Específicos..... 17

1.6. Descripción de Variables Analizadas en los Objetivo Especifico 17



1.6.1. Variable Independiente	17
1.6.2. Variable Dependiente.....	18

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación	19
2.2. Marco teórico	21
2.2.1. Descripción y propiedades de los suelos arenosos limosos	21
2.2.2. Compactación de suelos.....	25
2.2.3. Energía de Compactación	25
2.2.4. Curva de Compactación.	28
2.2.5. Parámetros de la curva de compactación.	28
2.2.6. Influencia de la Compactación.....	30
2.2.7. Características de los Suelos a Compactar.....	34
2.2.8. Propiedades de los Suelos Compactados.	35
2.2.9. Ensayo de Compactación por el Método Proctor Modificado.	36

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de Estudio.....	39
3.2. Muestra	39
3.3. Metodología de la Investigación	41
3.3.1. Diseño de Muestreo	41
3.4. Descripción de los Métodos	42
3.4.1. Muestreo en campo	42
3.4.2. Determinación del contenido de humedad.....	44
3.4.3. Para desarrollar el ensayo de granulometría por tamizado.	46



3.4.4. Para desarrollar de las Pruebas de Compactación.....	49
3.4.5. Para determinar la gravedad específica de los solidos	58

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados.....	61
4.1.1. Resultados de los ensayos granulométricos	61
4.2. Resultados de los ensayos de Compactación	65
4.2.1. Análisis del Crushing	74
4.2.2. Análisis por succión método del papel filtro	77
4.2.3. Optimización de la Compactación	81
4.3. Discusión	87
V. CONCLUSIONES	102
VI. RECOMENDACIONES	104
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXOS.....	108

TEMA: Compactación de suelos arenosos

ÁREA: Mejoramiento de suelos para la construcción

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Geotecnia

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 de agosto del 2022



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Simbología de Grupos.	22
Tabla 2: Tipología de Suelos.	23
Tabla 3: Propiedades Físicas más Comunes de las Arenas.	24
Tabla 4: Determinación del método para Ensayo Proctor Modificado.	37
Tabla 5: Cuadro de identificación de muestras de los 8 distritos de la región de Puno.	40
Tabla 6: Requerimiento de la masa mínima para el ensayo.	45
Tabla 7: Juego de tamices estándar.	46
Tabla 8: Requisito mínimo de masa para el espécimen a ensayar.	48
Tabla 9: Masa del espécimen recomendado para el ensayo.	59
Tabla 10: Porcentajes pasantes de las muestras M-1, M-2, M-3 y M-4.	61
Tabla 11: Porcentaje pasante de las muestras M-5, M-6, M-7 y M-8.	63
Tabla 12: Cuadro resumen de clasificaciones de las muestras.	65
Tabla 13: Análisis por Crushing - porcentajes pasantes al tamiz N°200(75 μ m).	75
Tabla 14: Tabla de equivalencia de compactación entre laboratorio y campo.	83
Tabla 15: Curvas granulométricas de especímenes realizados comparados con el natural.	85
Tabla 16: Resumen de resultados en las pruebas de compactación.	86



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva de compactación.....	26
Figura 2: Curvas de Compactación a diferentes energías de compactación.	27
Figura 3: Curvas de Saturación.	30
Figura 4: Curvas de compactación de cinco suelos diferentes.	31
Figura 5: Tipos de curva según Lee y Suedkamps.	32
Figura 6: Descripción de los mapas del INGEMMET.	41
Figura 7: Pesado del recipiente a una precisión de 0.01g.....	44
Figura 8: Martillos utilizados para las pruebas de compactación.....	50
Figura 9: Martillo de compactación mecánico automático.	51
Figura 10: Diagrama de los ensayos de compactación realizados.	53
Figura 11: Pesado de la masa de suelo para compactarlo en una capa.....	55
Figura 12: Curvas granulométricas de las muestras M-1, M-2, M-3 Y M-4.....	62
Figura 13: Curvas granulométricas de las muestras M-5, M-6, M-7 y M-8.	64
Figura 14: Curva de compactación de la muestra M-1.....	66
Figura 15: Curva de compactación de la muestra M-2.....	67
Figura 16: Curva de compactación de la muestra M-3.....	68
Figura 17: Curva de compactación de la muestra M-4.....	70
Figura 18: Curva de compactación de la muestra M-5.....	71
Figura 19: Curva de compactación de la muestra M-6.....	72
Figura 20: Curva de compactación de la muestra M-7.....	73
Figura 21: Curva de compactación de la muestra M-8.....	74
Figura 22: Curva de material fracturado durante el ensayo de compactación.	76
Figura 23: Análisis de curvas de granulometría después del crunshig.....	77
Figura 24: Arena preparada en un 17% de humedad con respecto a su peso seco.....	78



Figura 25: Ensayo del papel filtro.	79
Figura 26: Curva de compactación de la M-3 sometida a pruebas de succión.....	80
Figura 27: Resultado de las pruebas de succión.	80
Figura 29: Número de golpes vs grado de compactación, obtenida en Laboratorio.	81
Figura 29: Número de pasadas vs grado de compactación, obtenida de campo.	82
Figura 30: Relación que existe entre el número de golpes y el número de pasadas.....	84
Figura 31: Curva de compactación obtenida en arenas limpias y gravas arenosas.	88
Figura 32: Curvas de compactación a pruebas PEN.	89
Figura 33: Curvas de compactación a pruebas PMN.	91
Figura 35: Curvas de compactación a pruebas PEM.	93
Figura 35: Curvas de compactación a pruebas PMMM.	94
Figura 36: Porcentaje de rompimiento después de las pruebas de compactación.	96
Figura 37: Curva de absorción del papel filtro en la muestra M-3.....	98
Figura 38: Aproximación numérica a una curva de compactación de doble pico.....	100
Figura 39: Curvas de partimiento y desintegración durante las pruebas de optimización.	101



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

V:	Volumen
W:	Peso
Ws:	Peso de los Sólidos
Ww:	Peso de la masa de Agua.
Wt:	Peso total de la masa de suelo o espécimen de Suelo
DR:	Densidad Relativa
St:	Grado de saturación de la muestra de suelo
γ_d :	Peso específico o peso Unitario Seco del Suelo.
γ_{sat} :	Peso específico Saturado
γ_{max} :	Peso específico seco máximo
Gs:	Gravedad Especifica de los Sólidos de la muestra
e:	Relación de vacíos.
Cu:	Coefficiente de Uniformidad
Cc:	Coefficiente de Curvatura
IP:	Índice de Plasticidad
LL:	Limite Líquido
LP:	Limite Plástico
NP:	No tiene Plasticidad
CHO:	Contenido de Humedad Óptimo
PEN	Proctor estándar con un martillo de 50mm. De diámetro de impacto
PEMM	Proctor estándar con un martillo de 100mm. De diámetro de impacto
PMN	Proctor modificado con un martilló de 50mm. De diámetro de impacto
PMMM	Proctor modificado con un martilló de 100mm. De diámetro de impacto (semejante al usado en la elaboración de briquetas en el ensayo Marshall ASTM D1559)



- ASTM: American Society for Testing and Materials
- M-1: Muestra numero 1 corresponde al distrito de San Antonio - Puno (cantera juncal)
- M-2: Muestra numero 2 corresponde al distrito de Ilave
- M-3: Muestra numero 3 corresponde al distrito de Chatuma - Yunguyo
- M-4: Muestra numero 4 corresponde al distrito de Masacruz
- M-5: Muestra numero 5 corresponde al distrito de Amantani - Puno
- M-6: Muestra numero 6 corresponde al distrito de San Anton - Azángaro
- M-7: Muestra numero 7 corresponde al distrito de Pomata
- M-8: Muestra numero 8 corresponde al distrito de Puno (Cantera Cutimbo)



RESUMEN

Es de conocimiento que la compactación de suelos es una de las actividades primordiales en la ejecución de obras civiles, para ello se realizan pruebas de laboratorio. En pruebas de compactación, cuando se trata de arenas limosas de la región de Puno, no se conoce la influencia de la energía de compactación y granulometría del suelo, en la formación de doble pico de la curva de compactación y ubicación de la humedad óptima y peso específico seco máximo. El objetivo de esta investigación es conocer, en pruebas de compactación, cuán influyente es la gradación y energía aplicada, para determinar un criterio en la elección de parámetros de compactación. Para la investigación se trabajó en 8 muestras, ellas según el sistema de clasificación SUCS se trata de GP-GM, SP-SM, SP, GP, SM, GM, SW-SM y SP-SM, las cuales fueron seleccionadas tomando en cuenta la geología de la región. Se realizaron los ensayos de compactación, para los cuales se hizo pruebas con diferentes métodos de compactación, además se evaluó el efecto de la gradación de este tipo de suelos, y pruebas complementarias que ayudaron a entender mejor la formación de doble pico en la curva de compactación. Los Resultados que se obtuvieron indican que los parámetros de compactación dependen de la gradación y energía de compactación. En conclusión, en función a los fenómenos demostrados se tomó un criterio para la determinación de un parámetro de contenido de humedad óptimo y peso específico seco máximo

Palabras Clave: Peso específico máximo, contenido de humedad, compactación, energía de compactación, granulometría del suelo arenosos.



ABSTRACT

It is known that soil compaction is one of the main activities in the execution of civil works, for which laboratory tests are carried out. In compaction tests, when it comes to silty sands from the Puno region, the influence of the compaction energy and granulometry of the soil is not known, in the formation of double peak of the compaction curve and location of the optimum humidity and maximum dry unit weight. The objective of this research is to know, in compaction tests, how influential is the gradation and applied energy, to determine a criterion in the choice of compaction parameters. For the investigation, 8 samples were worked on, according to the SUCS classification system, they are GP-GM, SP-SM, SP, GP, SM, GM, SW-SM and SP-SM, which were selected taking into account the geology of the region. Compaction tests were carried out, for which tests were carried out with different compaction methods, in addition, the effect of the gradation of this type of soil was evaluated, and complementary tests that helped to better understand the formation of a double peak in the curve of compaction. The results obtained indicate that the compaction parameters depend on the gradation and compaction energy. In conclusion, based on the demonstrated phenomena, a criterion was taken for the determination of a parameter of optimal moisture content and maximum dry specific weight..

Keywords: Maximum specific weight, moisture content, compaction, compaction energy, soil granulometry.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La compactación de suelos en nuestro país ha ido avanzando con la llegada de nuevos equipos de compactación, lo que lleva a la investigación de nuevos métodos de compactación a nivel internacional y las adaptaciones en nuestro país a través de normativas nacionales, sin embargo no se ha llegado a uniformizar la compactación de suelos para cada tipo de suelos en vista de que cada suelo es un caso indistinto y por tanto un nuevo caso a investigar cuyas propiedades geomecánicas varían de acuerdo a las cargas solicitadas por parte del diseño del tipo de proyecto u obra civil. Esto nos lleva a realizar la siguiente investigación en Análisis para la determinación del peso específico seco máximo y humedad óptima en los ensayos de compactación para las arenas limosas en la región de Puno, la normativa actual recomienda realizar la compactación de este tipo de suelo por medio de la compactación por vibración de tal forma que busquemos el reacomodo de las partículas de este material pero este fenómeno solo se puede dar en estados seco o naturalmente seco de los suelos, lo cual no sucede en campo o al compactar volúmenes grandes de este suelo, este siempre se encuentra con un porcentaje de humedad.

Por esta razón es imperante la necesidad de conocer un método de compactación adecuado, para conocer el comportamiento de arenas limosas.

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. Identificación del problema

La compactación como actividad principal en la construcción, bases de estructuras de tránsito y como base de estructuras en obras civiles, es de importancia la necesidad de



la evaluación de los distintos materiales que existen, y su comportamiento en el proceso constructivo donde estos se optimicen de la mejor manera de acuerdo a las solicitudes de diseño. Es por ello que se analiza las pruebas de compactación en arenas limosas de la región de Puno, cuyo caso particular se hace notar en la curva de compactación de estos suelos, dicha curva de compactación, normalmente forma un solo pico que nos ayuda a determinar el valor de contenido de humedad óptimo y peso específico seco máximo, este último caso no ocurre en la compactación de este tipo de suelos granulares, la que forma dos picos en la curva de compactación, que muchas veces no se visualiza de mejor manera la formación de estos pico y por qué se forman, esto pone en duda la determinación de la humedad óptima y peso específico seco máximo o como estos se logran obtener en este tipo de suelo, lo que inspira plantear el análisis para la determinación del peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptima en los ensayos de compactación para las arenas limosas en la región de Puno.

1.2. Enunciados del problema

1.2.1. Problema General

- ¿Cuál es la influencia de la aplicación de la energía de compactación y granulometría del suelo en la formación de doble pico en la curva de compactación, para la determinación del contenido de humedad óptimo y peso específico seco máximo para arenas limosas de la región de Puno?

1.2.2. Problema Específico

- ¿Cómo influye la energía de compactación en la formación de doble pico en la curva de compactación en las arenas limosas región de Puno?



- ¿Cuáles son las consideraciones adicionales que se debe tener en cuenta durante la compactación, para la determinación del contenido de humedad óptimo y peso específico seco máximo en las arenas limosas en análisis región de Puno?

1.3. Justificación

realizar procedimientos de los métodos de ensayos para la compactación de suelos en laboratorio propuesto por la ASTM D 698-12 Y ASTM D 1557-12, para la determinación de la curva de compactación de una arena limosa de la región de Puno, seguidamente realizar el análisis de la formación de doble pico en la curva de compactación, así poder determinar un punto donde tengamos el contenido de humedad óptimo y peso específico seco máximo, de no lograr las condiciones en campo para su aplicación ya sea este el exceso de humedad que presente in situ proponer un método de compactación para su posterior aplicación en un determinado proyecto donde se requiera la compactación y a su vez el mejoramiento cuando nos encontremos con este tipo de suelos.

1.4. Hipótesis de la investigación

1.4.1. Hipótesis General

- La energía de compactación y granulometría del suelo influyen en la formación de doble pico en la curva de compactación, para la determinación del contenido humedad óptima y peso específico seco máximo en arenas limosas de la región de Puno.

1.4.2. Hipótesis Específico

- La variación de la energía de compactación influye en la formación de doble pico en la curva de compactación en las arenas limosas de la región de Puno.



- Existen consideraciones adicionales que se debe tener en cuenta durante la compactación, para la determinación del contenido de humedad óptimo y peso específico seco máximo en las arenas limosas de la región de Puno.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo General

- Conocer la influencia de la aplicación de la energía de compactación y granulometría del suelo en la formación de doble pico en la curva de compactación, para la determinación del contenido humedad óptima y peso específico seco máximo en arenas limosas de la región de Puno.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Conocer la influencia de la energía de compactación en la formación de doble pico en la curva de compactación en las arenas limosas de la región de Puno.
- Analizar las consideraciones adicionales que se debe tener en cuenta durante la compactación, para la determinación del contenido de humedad óptimo y peso específico seco máximo en las arenas limosas de la región de Puno.

1.6. Descripción de Variables Analizadas en los Objetivo Especifico

1.6.1. Variable Independiente

Se incluye dos variables independientes, las cuales que se utilizan en diferentes etapas de la investigación.

- **Contenido de humedad óptimo:**

Contenido de humedad óptimo de la muestra se determina Determinación mediante curva Proctor.

- **Energía de compactación:**



Energía producida por la aplicación de un esfuerzo determinado por la eficiencia del martillo de compactación en laboratorio.

1.6.2. Variable Dependiente

- **Peso específico seco máximo**

Valor Máximo obtenido de la curva de compactación



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

Camargo, et al. (2014), realizaron una investigación en comparación del peso específico seco máximo y humedad óptima en los ensayos de compactación para las arenas limosas de la UPM seccional Bucaramanga. En la cual desarrollaron distintos ensayos de compactación y procedieron a establecer una relación entre los pesos unitarios secos máximos de cada ensayo, así como también relaciones entre humedades óptimas de distintos ensayos. Además, se analizó la variación del peso específico máximo y la humedad óptima con la energía de compactación aplicada en cada ensayo. En el cual concluyeron que, de los diferentes ensayos de compactación realizados, entre mayor sea el peso específico seco máximo, menor será la humedad óptima. Este comportamiento se debe probablemente a que cuando un suelo tiene una relación de vacíos alta (densidad baja), este tiene una mayor capacidad de absorción de agua.

Chirinos, (2016) realizó una investigación acerca del efecto de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad del suelo granular de la cantera el gavián. En la ciudad de Cajamarca, Perú, en la cual recomienda seguir realizando investigaciones para obtener datos correctos del peso específico máximo y el contenido de humedad óptima en suelos granulares. Y arenas friccionantes.

Barrea, Garnica & Martínez (2004). Realizaron una investigación en Influencia de la Succión en Cambios Volumétricos de un suelo compacto. En donde incluyen en sus objetivos una novedosa aportación para su trabajo fue la adquisición de una nueva e innovadora célula edométrica diseñada para realizar ensayos edométricos de succión. En



donde concluyen. El empleo de la nueva célula edométrica con control de succión permite el análisis de la influencia de la succión en los cambios volumétricos, así como la evolución temporal de las deformaciones asociadas a esta.

Rico & Del Castillo (2000). Realizaron una investigación sobre consideraciones sobre compactación de suelos en Obras de infraestructura de transporte, cuyo objetivo fue determinar cuáles son las características de comportamiento que pueden mejorar al compactar un suelo. En el cual concluyeron que las diferencias de comportamiento entre los especímenes de la misma muestra de suelo, compactado por diferentes métodos de compactación hasta el mismo peso unitario, son tan significativas que debe considerarse peligroso predecir el comportamiento de los suelos solo por el peso unitario máxima alcanzado, dejando al constructor la elección del equipo y contenido de humedad de compactación. Estas diferencias pueden ser hasta de tres veces en resistencia, cinco veces en compresibilidad y dos en CBR

Ortiz, et al. (2013) en su investigación, estudio del fenómeno del crushing en el ensayo de compactación de un Proctor normal que tuvo como objetivo analizar los efectos del crushing en una muestra de suelo, como consecuencia de una excesiva compactación. El cual concluye los suelos uniformes y partículas angulosas se comprimen y rompen más que los suelos bien graduados, los suelos que sufren participación (rotura) llegan a ser más finos luego de la aplicación de la carga y a su vez existe un aumento de la densidad seca máxima en un orden del 2.5% y pone como una de sus recomendaciones aumentar el número de pasadas en campo para poder visualizar de mejor manera el efecto crushing.



2.2. Marco teórico

2.2.1. Descripción y propiedades de los suelos arenosos limosos

Este tipo de suelos se clasifica en tres categorías: Arena gruesa, Arena media y Arena fina. De acuerdo a la siguiente distribución:

- Arena gruesa: pasa el tamiz N°. 4 (4.75mm) y es retenido en el tamiz N°. 10 (2mm).
- Arena media: pasa el tamiz N°. 10 (2.00mm) y es retenido en el tamiz N°. 40 (0.425mm).
- Arena fina: pasa el tamiz N°. 40 (0.425mm) y es retenido en el tamiz N°. 200 (0.075mm).

Los suelos son una composición de minerales y orgánicas de diferentes formas y tamaño, su distribución por tamaño se denomina granulometría. Los suelos arenosos presentan una granulometría gruesa y friccionantes.

En las siguientes tablas se mostrarán los principales grupos de la clasificación SUCS según la (ASTM D 2487-17).



Tabla 1

Simbología de Grupos.

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
GRAVA	G	BIEN GRADUADO	W
ARENA	S	POBREMENTE GRADUADO	P
LIMO	M	LIMOSO	M
ARCILLA	C	ARCILLOSO	C
ORGANICO	O	LIMITE LIQUIDO ALTO (>50%)	L
TURBA	Pt	LIMITE LIQUIDO BAJO (<50%)	H

Fuente: SUCS

Estudiaremos las características básicas de las arenas y arenas limosas, así como también evaluaremos la relación que existiese con otros suelos de mayor granulometría idéntica forma de partículas, que ocasionan la formación de doble pico en la curva de compactación de acuerdo a la tipología de suelos.

Tabla 2

Tipología de Suelos.

SÍMBOLO		CARACTERÍSTICAS GENERALES	
GW			BIEN GRADUADAS
		LIMPIAS (Finos<5%)	
GP	GRAVAS (>50% en tamiz N°. 4)		POBREMENTE GRADUADO
GM		CON FINOS	COMPONENTE LIMOSO
GC		(Fino>12%)	COMPONENTE ARCILLOSO
SW			BIEN GRADUADAS
		LIMPIAS (Finos<5%)	
SP	ARENAS (<50% en tamiz N°. 4)		POBREMENTE GRADUADO
SM		CON FINOS	COMPONENTE LIMOSO
SC		(Fino>12%)	COMPONENTE ARCILLOSO
ML	LIMOS	BAJA PLASTICIDAD (LL<50%)	
MH		ALTA PLASTICIDAD (LL>50%)	
CL	ARCILLAS	BAJA PLASTICIDAD (LL<50%)	
CH		ALTA PLASTICIDAD (LL>50%)	
OL	SUELOS ORGANICOS	BAJA PLASTICIDAD (LL<50%)	
OH		ALTA PLASTICIDAD (LL>50%)	
Pt	TURBA	SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS	

Fuentes: SUCS

Como se mencionó anteriormente daremos mayor énfasis al estudio de arenas y arenas limosas. En la siguiente tabla, mostraremos las propiedades físicas de los suelos arenosos y areno limosos.

Tabla 3*Propiedades Físicas más Comunes de las Arenas.*

MATERIAL	DESCRIPCION	COMPACIDAD	DR (%)	N (SPT)	DENSIDAD SECA	ÍNDICE DE POROS	ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO
SW	Arenas bien graduadas- Arenas con grava	Densa	75	65	1,89	0,43	37
		Medianamente Densa	50	35	1,79	0,49	34
		Suelta	25	<15	1,70	0,57	30
SP	Arenas mal graduadas- Arenas con grava	Densa	75	50	1,76	0,52	36
		Medianamente Densa	50	30	1,67	0,60	33
		Suelta	25	<10	1,59	0,65	29
SM	Arenas Limosas	Densa	75	45	1,65	0,62	35
		Medianamente Densa	50	25	1,55	0,74	32
		Suelta	25	<8	1,49	0,80	29

Fuente: SUCS

Se trata de analizar de suelos areno limosos de la región de Puno donde se detectaron suelos arenosos, arenas limosas, arenas mal graduadas, arenas mal graduadas con limo. Así también se detectaron otros suelos granulares como gravas mal graduadas, gravas limosas y gravas mal graduadas con limo, todas estas con una particularidad de la formación de doble pico en la curva granulométrica.

a) Propiedades presentes en suelos arenosos

Mineralogía del suelo: según Barrera, et al. (2002), la mineralogía que componen una masa de suelo puede ser tan variada como la geología del lugar del cual estos provienen. Sin embargo, está condicionado por un lado por el factor composicional, y por



otro por agentes climáticos que establece la temperatura, la pluviosidad y la composición de las fases, líquida y gaseosa en contacto con la masa de suelo.

Crushing: este fenómeno es descrito por Kuwajima, et al. (2013) como consecuente de la fracturación de las partículas debido a la aplicación de cargas constantes de magnitud suficiente para desarticular las cadenas generadas por la compactación, es un sobre apisonamiento del suelo, se hace evidente en suelos granulares y se incrementa por la angularidad, la posición, la composición mineralógica de las partículas de suelo, la relación de vacíos, la presencia de agua, entre otros.

Porosidad: Es el espacio que compone el suelo que no está ocupado por sólidos, generalmente estos se dividen en microporos y microporos.

2.2.2. Compactación de suelos

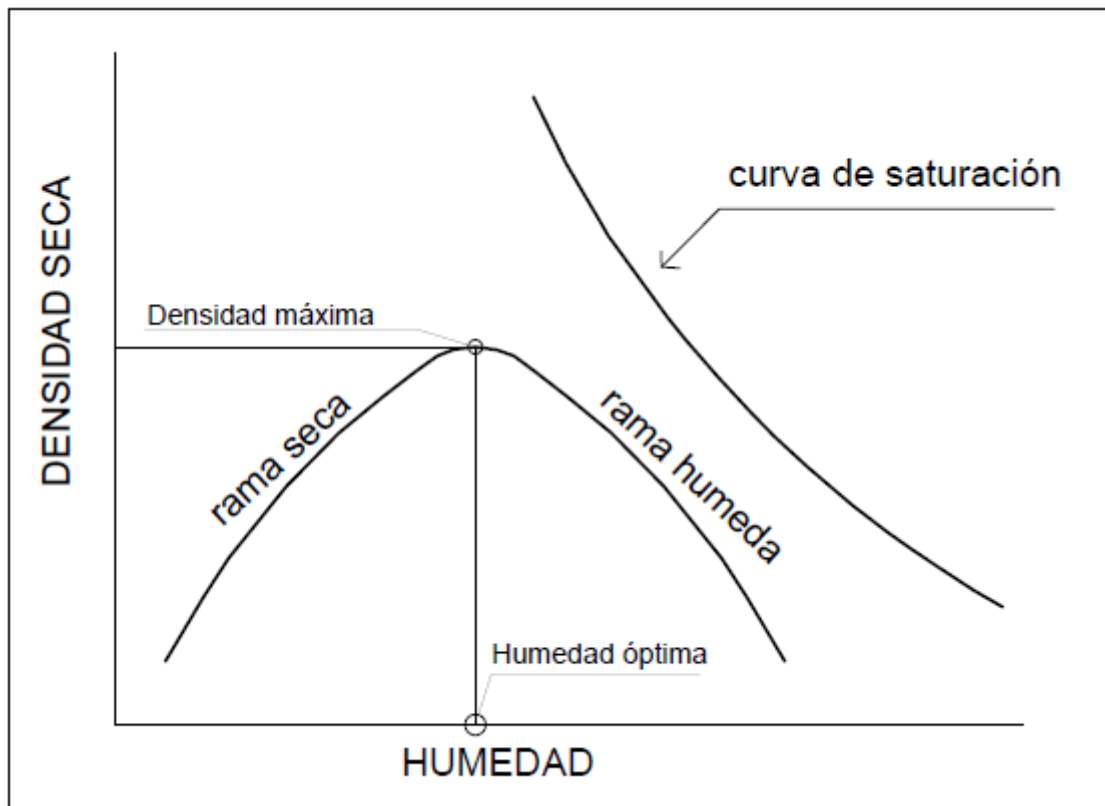
Una de las definiciones y la más coherente y simple para la compactación de los suelos es: Según Juárez Badillo la “compactación” de los suelos es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos (Badillo, 2014).

2.2.3. Energía de Compactación

Según. Parano, (2012). Es el trabajo mecánico modificado aplicado a una masa de suelo, la que orienta las partículas y mejora las características mecánicas de los suelos y materiales estabilizados. La representación de la figura N° 1 de la relación peso específico seco y contenido de humedad, da lugar a lo que habitualmente se denomina curva de compactación.

Figura 1:

Curva de compactación.



a) Causa de Variación de la Energía de Compactación.

Estas causas de la variación de la energía de compactación entregada dependen del tipo de suelo y método de compactación seleccionado, algunos procedimientos están establecidos por normas, también se tendrá en cuenta las particularidades del material a ensayar ya que cada muestra de suelo difiere de su composición geotécnica, se incrementará la energía dependiendo de su resistencia mecánica del suelo (Ruíz, 2005).

b) Suelos friccionante o granulares.

Según, Sánchez, (1996) la resistencia al esfuerzo cortante incrementarse al aumentar la energía de compactación, elevando los valores de peso específico seco máximo. En los suelos granulares dará lugar a una curva de resistencia también más

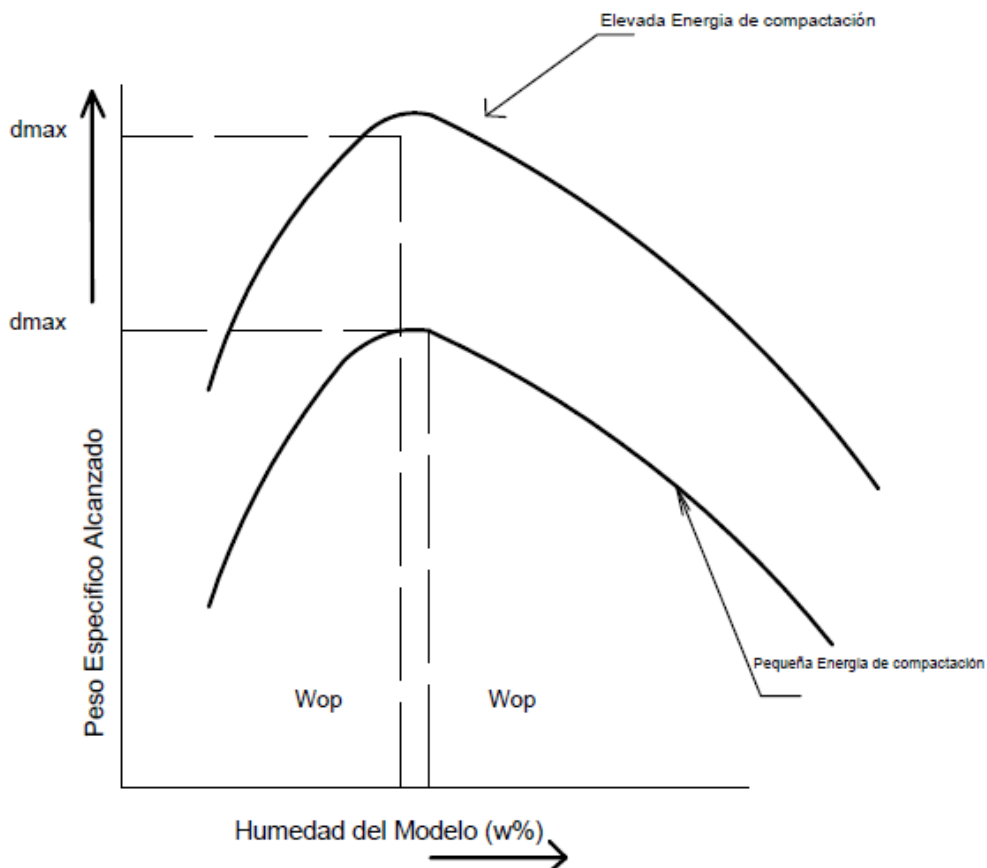
elevada, motivado en su menor sensibilidad a la acción del agua. Por este motivo, es habitual que los suelos granulares se compacten con mayor energía

c) Energía de compactación en la curva de compactación.

Según, Sagúes (2008) La energía de compactación al suelo afecta considerablemente a los pesos específicos secos obtenidos en los ensayos de un mismo método. Como se puede observar en la figura si se compacta el suelo con una energía de compactación baja, se obtienen pesos específicos más bajos. Por el contrario, si la energía de compactación es alta, las curvas de compactación se recorren hacia arriba y a la izquierda.

Figura 2:

Curvas de Compactación a diferentes energías de compactación.





Georges, 2004.

2.2.4. Curva de Compactación.

La finalidad las pruebas de compactación de laboratorio es obtener la curva de compactación, las mismas que serán distintivas de cada tipo de suelo analizado. Estas curvas de compactación son el producto de graficar, en el eje de las abscisas el contenido de humedad del suelo en porcentaje y en el eje de las ordenadas el peso específico seco, (Pérez, 2014).

2.2.4.1. Descripción de la Curva de Compactación

a) Rama Seca.

Iniciando el desarrollo de la curva de compactación se encuentra la rama seca, el suelo se encuentra relativamente seco, a medida que aumenta el agua se convierte en ese agente lubricante entre partículas. Hasta que ello no ocurra, la fricción entre los granos impide el deslizamiento entre una partícula sobre las otras y, por consiguiente, su densificación (Escobar, 2007).

b) Rama Humeda.

La rama húmeda es parte de la curva de compactaciones del suelo, esta inicia en el punto donde se determina, el contenido de humedad óptimo donde el suelo adquiere un máximo peso específico seco, a partir de ese punto decae la curva de compactación, estado en la cual se considera en estado húmedo del suelo (Escobar, 2007).

2.2.5. Parámetros de la curva de compactación.

a) Contenido de Humedad.



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

Se determina la humedad del suelo mediante la siguiente expresión:

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} ;$$

Dónde:

$w(\%)$ = porcentaje del contenido de humedad.

W_w = peso del agua.

W_s = peso de sólidos.

b) Peso Específico o Peso Unitario.

El poder determinar la densidad que posee un suelo en estado natural o de un terraplén, ha sido siempre un gran reto para los investigadores de mecánica de suelos. Ya que En laboratorio se puede obtener una relación en función de un volumen conocido, en campo es difícil determinar este volumen, Se realiza esta determinación para determinar las relaciones gravimétricas y volumétricas de una masa de suelo en estado natural y para comprobar el grado de compactación en rellenos compactados artificialmente (Sánchez, 1996).

$$\gamma = \frac{W}{V} ;$$

Donde:

γ = peso específico.

W = peso del suelo.

V = volumen unitario.

Para determinar el peso específico existe dos métodos, cada uno se aplica de acuerdo al tipo de material.

2.2.6. Influencia de la Compactación.

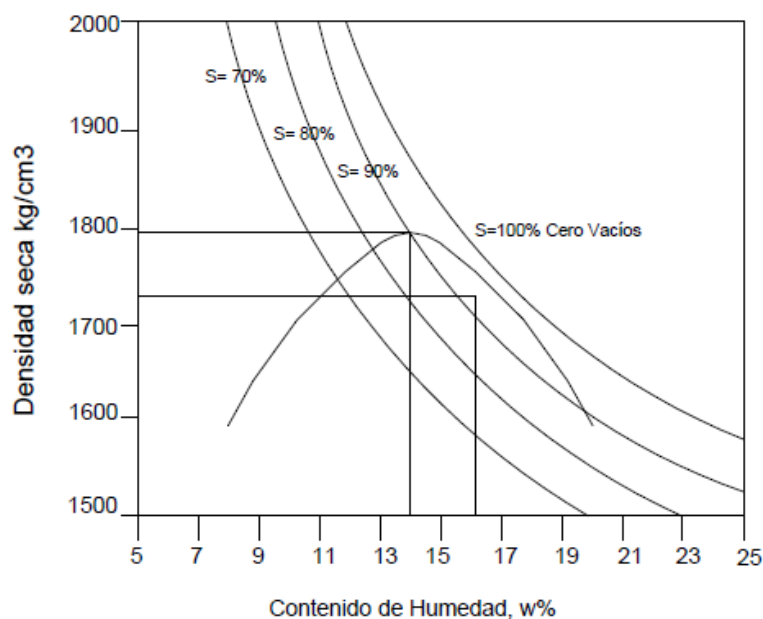
Según Georges, (2004) los más resaltante son contenido de humedad y la energía de compactación aplicada en los ensayos. Hay también otros factores distintos a continuación se describe cómo afectan éstos en la compactación del suelo.

a) Efecto del incremento del agua.

Según Sagué, (2008). El contenido de humedad influye directamente en el peso específico seco.

Figura 3:

Curvas de Saturación.



Badillo, 2014.

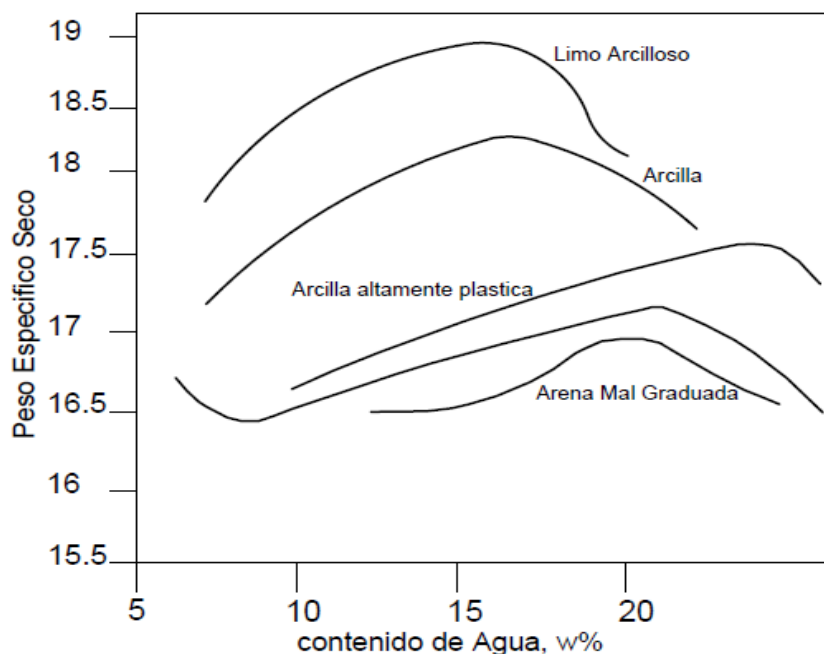
El contenido de agua, además afecta a la estructura del suelo que está siendo compactado. Cuando hay poca agua en el suelo, éste ejerce una fuerza de resistencia al esfuerzo de compactación, debido a la alta concentración de iones en el agua, a los esfuerzos efectivos producidos por la tensión capilar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

b) Efecto del tipo de suelo a compactar.

La clasificación del suelo, su granulometría, la forma de sus partículas, la gravedad específica de los sólidos y el porcentaje de finos (porcentaje pasante a la malla N°200) presentes, influyen en el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptima del suelo compactado. En la figura se muestran las curvas de compactación de cinco diferentes tipos de suelos. Se puede ver que los suelos finos como el limo arenoso y la arcilla limosa, tienen mayores pesos específicos secos que las arenas (Georges, 2004).

Figura 4:

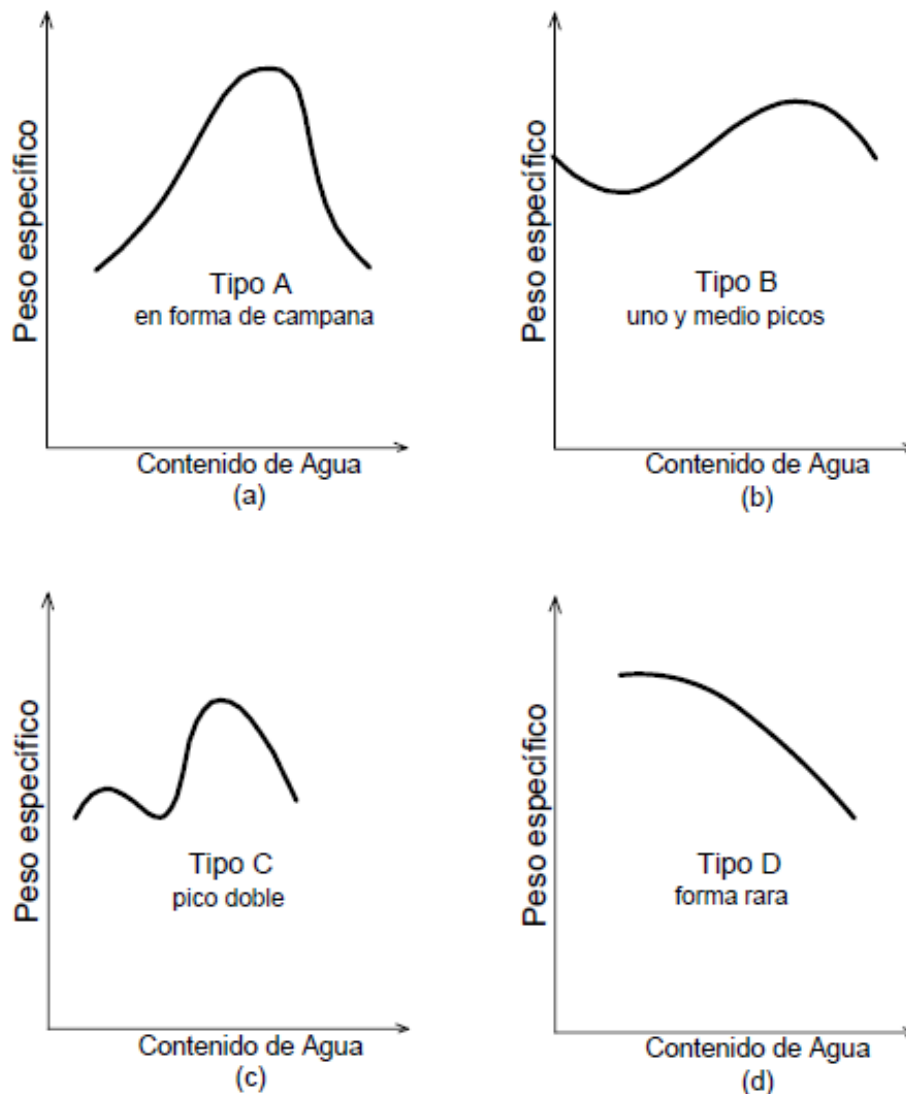
Curvas de compactación de cinco suelos diferentes.



Fuente: Das, (2004) curvas de compactación con cinco suelos diferentes.

Figura 5:

Tipos de curva según Lee y Suedkamps.



Según Lee & Suedkamp, (1972) que estudiaron las curvas de compactación de 35 muestras de suelos diferentes, observando cuatro tipos diferentes de curvas de compactación, como muestra la figura anterior. Las curvas de compactación tipo A son aquellas que tienen un solo pico, y se encuentran generalmente en suelos que tienen un límite líquido de entre 30% y 70%, las curvas tipo B es una curva con un pico y medio y la curva C es una curva de tipo pico doble, las curvas de compactación tipo B y C se encuentran en suelos que tiene un límite líquido menor a aproximadamente 30%. Las



curvas de compactación tipo D son aquellas que no tienen un pico definido y se designan como tipo raro. Los suelos con un límite líquido mayor a aproximadamente 70% exhiben curvas de compactación del tipo C o D. los suelos que producen curvas del tipo C y D no son muy comunes, para la presente investigación se busca obtener una metodología que nos permita obtener la formación de curva tipo C.

a) Efecto del método de compactación.

Los métodos de compactación en laboratorio, Según Rico & del Castillo, (2000). A partir de 1933, Proctor desarrollo una prueba de compactación, la primera históricamente, inicialmente empírica ahora ya estandarizada, han ido apareciendo otras.

b) Pruebas de dinámicas

El suelo se compacta por capas en el interior de un molde metálico cilíndrico, variando de unas pruebas a otras el tamaño del molde, calculando la energía de compactación con bastante aproximación quedando definida por un numero de golpes por capa, por un pisón de compactación.

c) Pruebas estáticas

Según Rico & del Castillo, (2000) Una de las pruebas de compactación estática fue propuesta por O. J. Porter, en la que se compacta al suelo colocando dentro del un molde cilíndrico de 6" de diámetro; el cual se coloca en tres capas acomodando con 25 golpes de una varilla metálica de punta de bala, lo que no significa una compactación intensa, pues la varilla es ligera y la altura de caída, no se especifica, es la mínima utilizada por el operador para una manipulación cómoda. La compactación se logra al conjunto de las tres capas acomodadas a una presión de 140.6kg/cm², la cual se mantiene durante un minuto.



d) Pruebas por amasado

Según Rico & del Castillo, (2000) Los métodos por amasado son relativamente nuevos en la tecnología de laboratorios, se busca reproducir en el laboratorio el efecto típico que tiene lugar en muchos rodillos de campo, pata de cabra y neumáticos, en menor escala. En la prueba miniatura el efecto de amasado se logra al presionar una embolo de área especificada contra la superficie de las diversas capas con las que se constituye la muestra dentro de un molde de 3.6cm. de diámetro y 7 cm d altura, que desarrollo S. D. Wilson en la Universidad de Harvard EE.UU.

e) Pruebas por vibración

Según Rico & del Castillo, (2000) Las pruebas de compactación con vibración han interesado a numerosos investigadores muchas de ellas usan un molde Proctor montado en una mesa vibratoria, se estudia el efecto de la frecuencia, la amplitud y la aceleración de la mesa vibratoria, así como la influencia de las sobrecargas, la granulometría del suelo y del contenido de agua.

2.2.7. Características de los Suelos a Compactar.

a) Angularidad de las Partículas.

La forma de las partículas de los suelos se aparta en distinto grado de la esférica y en consecuencia también de la de los anillos de agua en cada contacto. Simples consideraciones geométricas, indican que la superficie contactada para un mismo volumen de partículas, será tanto mayor cuando la forma de las partículas se aparte más de la esférica (Jorajuria, 2004).

b) Rugosidad de las Partículas del Suelo.



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

c) Orientación de las partículas.

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

d) granulometría de la masa suelo.

Según, Sagués, (2008). Para una masa solida de suelo de granulometría bien graduada existe mayor contacto entre las partículas A mayor uniformidad de tamaños, el contenido de humedad tiene menor influencia en la compactación, lo que se evidencia en curvas de forma más achatada comparativamente con suelos similares mejor graduados granulométricamente

e) Actividad Superficial de las Partículas del Suelo.

Según, Sagués, (2008). La superficie de suelos finos es amplia y por lo tanto son capaces de absorber e inmovilizar mayor cantidad de agua, eso incrementa su masa. El agua está retenida por energías muy elevadas y la de contactos sólo puede existir, cuando el contenido de humedad supera el necesario para saturar la capacidad de absorción propia de cada suelo

2.2.8. Propiedades de los Suelos Compactados.

a) Permeabilidad.



Según, Ruiz (2005). Una de las propiedades del suelo, es la resistencia al paso del agua, a esta propiedad se le denomina permeabilidad. La permeabilidad depende de la relación de vacíos, la estructura del suelo y el grado de saturación.

b) Compresibilidad.

Según, Jorajuria, (2004). La compresibilidad en un suelo se mide, al relacionar la carga de compresión aplicada y cambio de volumen

2.2.9. Ensayo de Compactación por el Método Proctor Modificado.

Según la norma ASTM D 1557-12 el ensayo de Proctor Modificado se hará en un cilindro sólido de 101.6mm. de diámetro y 116.4mm. de altura, con una energía de compactación entregada por un martillo tubular a caída libre de 18" y 10 lb. de masa, cuyo material para realizar el ensayo dependerá de la distribución granulométrica del material. Los cuáles serán seleccionados de acuerdo a los métodos propuestos por esta normativa.

Tabla 4*Determinación del método para Ensayo Proctor Modificado.*

Concepto	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C
Molde	101,60 mm (4in)	101,60 mm (4in)	152,40 mm (6in)
Volumen del molde	944 cm ³ (1/30ft ³)	944 cm ³ (1/30ft ³)	2124 cm ³ (3/40ft ³)
Peso del martillo	4,54 kg (10 lb)	4,54 kg (10 lb)	4,54 kg (10 lb)
Altura de Caída del Martillo	457,20 mm (18 in)	457,20 mm (18 in)	457,20 mm (18 in)
Número de golpes	25	25	56
Número de capas	5	5	5
Energía de compactación	2700 kNm/m ³ (56000ft-lbf/ft ³)	2701 kNm/m ³ (56000ft-lbf/ft ³)	2702 kNm/m ³ (56000ft-lbf/ft ³)
Material a ser usado	Porción que pasa por el tamiz N°4, se usa si 25% o menos por peso es retenido en el tamiz N°4	Porción que pasa por el tamiz 3/8, se usa si el suelo retenido en el tamiz N°4 es más del 25% y 25% o menos por peso es retenido en el tamiz 3/8	Porción que pasa por el tamiz 3/4, se usa si más de 25% 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: ASTM D 1557-12.

Cálculo de la Energía de Compactación

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

$$E = \frac{N \times n \times W \times h}{V}; \left(\frac{kg \times m}{m^3} \right)$$

Donde;

E=Energía de Compactación.



N =Numero de golpes por capa.

n =Numero de capas.

W =Peso del martillo.

h =Altura de caída del pisón.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de Estudio

El lugar de estudio es la región de Puno se encuentra ubicada en: El extremo sur este del Perú, el que se divide administrativamente en 13 provincias. De acuerdo al último censo oficial del año 2017, la provincia más poblada del departamento es la Provincia de San Román y la menos poblada es la Provincia de Moho. La Región de Puno que esta subdividido en 13 provincias y 109 distritos, distribuidos de la siguiente manera: Puno 15 distritos, Azángaro 15, Carabaya 10, Lampa 10, Sandia 10, Melgar 9, Huancané 8, Chucuito 7, Yunguyo 7, El Collao 5, San Antonio de Putina 5, Moho, 4San Román

3.2. Muestra

Para determinar el tamaño de la muestra, se utilizará la fórmula para poblaciones finitas, para muestras probabilísticas - cualitativo, referidos a 109 distritos de la Región de Puno que contemplen canteras y materiales usados en construcción cuyas características del suelo son adecuadas para la investigación.

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{e^2 \cdot (N - 1) + z^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde:

- n=tamaño de la muestra.
- z=0.67 para 50% (Nivel de confianza de elegido)
- p=95% (privacidad de éxito).
- q=5% (probabilidad de fracaso)

- $e=5\%$ (error de estimación o diferencia máxima entre la media muestral y la media de la población).
- $N=109$ distritos (Tamaño de la población)

$$n = \frac{0.67^2 * 0.95 * 0.05 * 109}{0.05^2(109 - 1) + 0.67^2 * 0.95 * 0.05} = 7.97 \cong 8$$

El número de distritos a analizar son 8, las muestras seleccionadas de estos lugares serán materiales que corresponde a las características de los suelos en análisis, dichos materiales serán aquellos que se estén aplicando o aplicarán en la ejecución de una obra ingenieril.

Tabla 5

Cuadro de identificación de muestras de los 8 distritos de la región de Puno.

muestra	lugar	distrito	cantera
M-1	San Antonio de Esquilache	San Antonio	Juncal
M-2	Ciudad de Ilave	Ilave	de lugar*
M-3	playas de Chatuma	Yunguyo	de lugar*
M-4	Ciudad de Mazocruz	Santa Rosa	de lugar*
M-5	Isla de Amantani	Amantani	de lugar*
M-6	Ciudad de San Anton	San Anton	de lugar*
M-7	Pomata	Pomata	Molino
M-8	Rio Cutimbo	Laraqueri	Cutimbo

*las muestras son de proyectos que se ejecutaran con material propio los que se obtendrán de las excavaciones que realicen.

Antes de realizar el muestreo se evaluó las ciudades que se encuentran asentadas sobre este tipo de suelos, este análisis se realizó primeramente con una descripción visual, luego se hizo una exploración geológica, mediante las cartas geológicas del INGEOMET

los cuales se muestran en la parte de anexos, dichas descripciones se encuentran con la siguiente descripción.

Figura 6

Descripción de los mapas del INGEMMET.



La geología de los lugares de procedencia de las muestras, detallan la descripción geológica según la página web del INGEMMET, en la figura tenemos la descripción de la muestra M-3, la que señala un depósito aluvial de grava con arenas mal seleccionadas de matriz limo arenosa.

3.3. Metodología de la Investigación

3.3.1. Diseño de Muestreo

La investigación es cuantitativa según la naturaleza de la información y del tipo de datos a emplear. La recolección del material de estudio se realizará a criterio del investigador, con el fin de obtener resultados confiables y en un mismo tiempo.

a) Tipo de Investigación

La propuesta del desarrollo investigativo, de la presente investigación es explicativa, ya que se estudian las causas que originan la variación de los resultados al manipular la variable independiente.



b) Nivel de Investigación

Es una investigación experimental, debido a que desea conocer porque se generan dos picos en la curva de compactación, debido a este fenómeno como demostrar cual es la humedad optima determine un peso seco máximo del suelo, el cual se pueda reproducir de una mejor manera en campo.

Experimental: La investigación es realizada por medio de pruebas y prácticas en campo y laboratorio, basándose en el método científico, para determinar la relación entre variables.

3.4. Descripción de los Métodos

Para la recolección de datos se procedió a obtener muestras del suelo granulares, tales como: Arenas mal graduadas, arenas limosas y para comprobar este comportamiento de doble pico en la curva de compactación tenemos también gravas mal graduadas y gravas de componente limoso, de las distintas canteras y lugares que contengan estos suelos y/o con las mismas características del proyecto de investigación, cuya zona de estudio es la Región de Puno. Los procedimientos de laboratorio se desarrollaron de acuerdo al siguiente orden:

3.4.1. Muestreo en campo

a) Equipos y Materiales

- **Pico y pala:** Los picos y son herramientas básicas para realizar labores de movimiento de tierras de forma manual. Se utilizan para cavar terrenos sueltos, excavación de zanjas y otras labores.
- **Varilla metálica liza 5/8” (para cuarteo):** Varilla Redonda Lisa. Este tipo de varillas se aplica para realizar el cuarteo de muestras de suelos en campo.



- **Lona de cuarteo:** A pesar que se cuenta con equipos mecánicos de cuarteo una lona de cuarteo es el método más usado en campo y laboratorio para cuartear suelos y agregados, y también nos sirve para homogenizar el material granular relativamente seco.
- **Bolsa y sacos para transportar el material:** Se utilizo el método de transporte MAB (Muestras Alteradas en Bolsa) y estas almacenadas en saquillos de Polipropileno. Ideales para el transporte de material de suelos en trayecto largos.

b) Procedimiento

El desarrollo de la actividad se inicia con la selección del material, como primer paso se realizó el muestro en las Canteras y/o lugares realizando una inspección visual y manual en campo teniendo como referencia la NTP 339.150 y ASTM D 2488, de los materiales requeridos para realizar la presente investigación.

El muestreo se realizó en referencia a la norma ASTM D420 el cual indica realizar calicatas o trincheras en la zona de estudio, para el muestreo respectivo.

Una vez realizado el muestreo se procede a preparar el material para su transporte de acuerdo a la ASTM D 4220 de Muestras alteradas transportados en bolsas (mab), debido a la dispersión del material granulares, el cual no presenta una cohesión natural al momento de su extracción inalterada. Dichas muestras transportadas al Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la FICA-UNAP, donde se ejecutaron los ensayos.

3.4.2. Determinación del contenido de humedad

a) Equipos y materiales

- **Recipiente de para contenido de humedad:** Recipientes metálicos que **mantengan** una masa constante por la variación de la temperatura, con capacidad de albergar muestras de 200g a 400g.
- **Balanza de 0.01g:** de precisión: Dispositivo de medición de peso balanza de 600g. de precisión y 0.01g de precisión, calibrada previamente.
- **Horno a temperatura de 110 +/- 5°C:** Cámara de secado a $(110 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C})$ con un termorregulador cíclico en el interior.

b) Procedimiento

Para determinar el contenido de humedad en cada etapa que se requería este proceso, y así determinar el contenido de humedad del material (w%) estos se realizaron según la norma ASTM D 2216 en el que se realizó lo siguiente:

Figura 7

Pesado del recipiente a una precisión de 0.01g.



Se utilizó esta balanza calibrada con una capacidad máxima de 600g a una aproximación de 0.01g., para la medición de pesos en el ensayo de contenido de humedad para todas las pruebas de compactación.

Se selecciona la masa mínima del material a ensayar de acuerdo al siguiente cuadro, si se tuviese más de ese material se procede a realizar la selección por el método de cuarteo en caso de que la muestra tenga partículas mayores a $\frac{3}{4}$ " (19.00mm)

Tabla 6

Requerimiento de la masa mínima para el ensayo.

Tamaño máximo de partícula (100 % pasante)		Method A Water Content Recorded to ± 1 %		Method B Water Content Recorded to ± 0.1 %	
tamaño de tamiz	tamaño alternativo de tamiz	masa mínima de la muestra	Balance Legibilidad (g)	masa mínima de la muestra	Balance Legibilidad (g)
75,0mm	3 in.	5 kg	10	50 kg	10
37,5mm	1-1/2 in.	1 kg	10	10 kg	10
19,0mm	3/4 in.	250 g	0,1	2,5 kg	0,1
9,5mm	3/8 in.	50 g	0,1	500 g	0,1
4,75mm	No. 4			100 g	0,01
2,00mm	No. 10			20 g	0,01

Fuente: ASTM D 2216

Paralela a la selección de la muestra se pesa un recipiente designado por el laboratorio con un código o nomenclatura, clara y visible, la cual no permita la confusión al momento de la recolección de los datos.

Se pesa el material conjuntamente con el material a ensayar, con una balanza de precisión de 0.01g, o de acuerdo al peso que se tenga.

Se lleva el material a un horno de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ durante un tiempo prudencial para la muestra de suelo dentro del recipiente mantenga una masa constante (pesos iguales), esto indica que el tiempo en el horno no está determinado, lo que si se determina es el monitoreo que se realiza a la muestra si realiza 3 monitoreos al menos los dos finales deben permanecer constantes.

Para finalizar el ensayo se registran los pesos finales y se procede a realizar los cálculos en gabinete.

3.4.3. Para desarrollar el ensayo de granulometría por tamizado.

a) Equipos y materiales

- **separador mecánico (cuarteo):** Diseñado para trabajo pesado con operación manual; se usa para dividir una muestra de gran tamaño en dos partes iguales que representan al material, pero como se indicó anteriormente se optó por usar una lona de cuarteo.
- **Tamices:** Los tamices son mallas de 8 pulgadas de diámetro y 4 de alto, herramientas que se usa para separar diámetros distintos, así como finas de las gruesas los tamices deben tener certificación de producto bajo la norma ASTM E 11 y fabricados en acero inoxidable y en bronce, ya que estos estarán en contacto con el agua.

Tabla 7

Juego de tamices estándar.

Designación de tamices según E 11			
Alternativa	Estándar	alternativa	estándar
Tapa		N°. 10	2,00mm
3 in.	75mm	N°. 20	850mm
2 in.	50mm	N°. 40	425mm
1-1/2 in.	37,5mm	N°. 60	250mm
1 in.	25,0mm	N°. 100	150mm
3/4 in.	19,0mm	N°. 140	106mm
3/8 in.	9,5mm	N°. 200	75mm
N°. 4	4,75mm	Pan	

Fuente ASTM 6913-17: Usualmente no se utiliza o no se requiere una tapa al utilizar tamices gruesos rectangulares que tengas dimensiones mayores a 200mm o 8 in.



- **Balanzas:** balanzas de precisión una de 6000g de capacidad y 0.1 g de precisión y una de 600g de capacidad y 0.01g de precisión, están deben estar calibradas para su uso.
- **Utensilios de limpieza para tamices:** Recipientes metálicos de diferentes tamaños, brochas de mano de distintos tamaños, escobas, recogedoras y otros.

b) Procedimiento

Las pruebas de análisis granulométrico por cribado se realizaron tomando como referencia la ASTM D 6913-17, ya que esta norma es la que adopta la norma ASTM D 2487 para el sistema de clasificación SUSC, el procedimiento que se siguió fue el siguiente:

De las muestras transportadas al Laboratorio en bolsas y saquillos, observamos que no exista anomalías como material contaminante o partículas sobre tamaño que no pertenezcan a la gradación visual manual, seguidamente adoptamos un tratamiento similar al realizado en campo en campo, tomamos una lona de cuarteo y nos fijamos que el material sea homogéneo, cuarteando el material, de tal forma que vamos mermando el mismo hasta obtener la masa mínima requerida para el ensayo, de acuerdo al siguiente cuadro.

Tabla 8*Requisito mínimo de masa para el espécimen a ensayar.*

Tamaño máximo de partícula del material (99% o más pasa)		Masa Seca Mínima del Especimen, g o kg	
Designación alternativa del tamiz	Tamaño máximo de partícula, mm	Método A Resultados reportados con precisión al 1%	Resultados reportados con precisión al 0,1%
N° 40	0,43	50 g	75 g
N° 10	2	50 g	100 g
N° 4	4,75	75 g	200 g
3/8 in.	9,5	165 g	D
3/4 in.	19	1,3 kg	D
1 in.	25,4	3 kg	D
1-1/2 in.	38,1	10 kg	D
2 in.	50,8	25 kg	D
3 in.	76,2	70 kg	D

Fuente ASTM D6913-17

Seleccionamos la masa requerida y seguidamente la secamos en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, por un tiempo prudente hasta que el material mantenga una masa seca constate.

Seguidamente realizamos el lavado del material, ya que visualmente se nota que contienen más del 0.5% de finos en la masa de suelo, dicho lavado lo realizamos sobre el tamiz N°200 ($75 \mu\text{m}$), dicho lavado se realiza hasta visualizar correctamente la formas de los granos de las partículas de nuestra muestra representativa, terminado este proceso se deja secar el material en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, hasta que este mantenga una masa seca constante.

Para Finalizar este procedimiento lo sacamos del horno y dejamos que esta Adquiera la temperatura ambiente, registramos el peso perdido a causa del lavado por el tamiz N°200 ($75 \mu\text{m}$), ya que estos representan a la fracción fina, los que pueden ser limos y arcillas.



seguidamente realizamos el cribado para determinar los pesos retenidos en cada tamiz, dicho peso nos determinara los porcentajes pasantes a un determinado diámetro de acuerdo a la normativa en referencia, registramos todos estos datos en un formato de recolección para finalmente realizar los cálculos en gabinete.

3.4.4. Para desarrollar de las Pruebas de Compactación.

a) Equipos y materiales

- **Martillo de compactación:** herramienta utilizada en el ensayo de compactación que consiste en una guía tabular y con agujeros a los extremos de 1/8” de diámetro, esto para levantar una masa de 5lb (Norma ASTM D698) a una altura de caída de 12”, de la mismas forma una masa de 10lb (Norma ASTM D1557) a una altura de caída de 18”, adicional a estos dos martillos se usó el martillo utilizado en las pruebas Marshall (Norma ASTM D 1559) el cual tiene la misma masa 10lb y la misma altura de caída que el Proctor modificado con la diferencia que este tiene un área de impacto en toda la cara del espécimen de ensayo, una barra guía por el que se eleva el martillo y un mango en la parte superior que nos ayuda a mantener confiando el material a compactar.

Figura 8

Martillos utilizados para las pruebas de compactación.



En figura podemos apreciar un martillo del ensayo Proctor estándar, Proctor modificado y un martillo usado en la prueba Marshall que tiene un área de impacto de 100mm. De diámetro.

- **Martillo de compactación mecánico:** Un martillo accionado con un mecanismo semiautomático, propulsado por un motor eléctrico que eleva el martillo cuyo número de golpes es controlado mediante un contador laser, el área de impacto del martillo es en toda la sección de la muestra, ya sea este en un molde de 101.24mm ó 152.15mm. de diámetro, mantiene confinada la muestra mediante una sobre carga de 25lb. Y esta provista de una **barra** guía por donde impacta la masa a la sobrecarga fija. Este método de compactación que este equipo aplica es, de tipo cuasi estático ya que mantiene estática la muestra al momento de compactar y vibra al momento de golpear al espécimen a compactar.

Figura 9

Martillo de compactación mecánico automático.



En la figura se muestra instalado el martillo de 10mm. De impacto en el equipo mecánico semiautomático que tiene una altura de caída de 12”.

- **Vernier:** Instrumento de medición manual con aproximación de 0.1mm.
- **Molde de compactación de 4”:** Los moldes deben de ser cilíndricos hechos de materiales rígidos de 101.6mm. de diámetro y 116.4 de altura. Esta se ajusta a una base fija mediante dos tornillos fijos en esta base, en la parte superior al molde se acopla un anillo de 50mm de alto para generar una pequeña sobre carga para enrasar el material.
- **Balanzas de precisión:** se utilizaron dos balanzas, una de capacidad de 15 kg. de capacidad y 1g de precisión, ambas calibradas previamente.
- **Regla metálica (para enrasar el molde):** Barra de acero solida de 3mm de espesor y 25.4 cm de largo según la norma (ASTM D 1557-12).



- **Extractor de Muestras (opcional):** Puede ser una gata, estructura u otro mecanismo adaptado con el propósito de extraer los especímenes compactados del molde, no fue necesario para las muestras de arenas limpias.
- **Bandejas:** Pieza de metal o acero inoxidable, plana o algo cóncava, que nos ayudan a mezclar el material y manipularlo sin desperdiciarlo.
- **Bolsas herméticas (para mantener constante el contenido de humedad):** Una bolsa hermética es una bolsa de plástico, normalmente transparente, que tiene un cierre en su parte superior que, al usarlo, cierra herméticamente lo que hay en su interior.
- **Herramientas diversas:** Diversas herramientas tales como cucharas, guantes de goma, paleta, espátula, etc., accesorios apropiados para la mezcla completa de muestra de suelo con incrementos de agua por espécimen.

b) Procedimiento

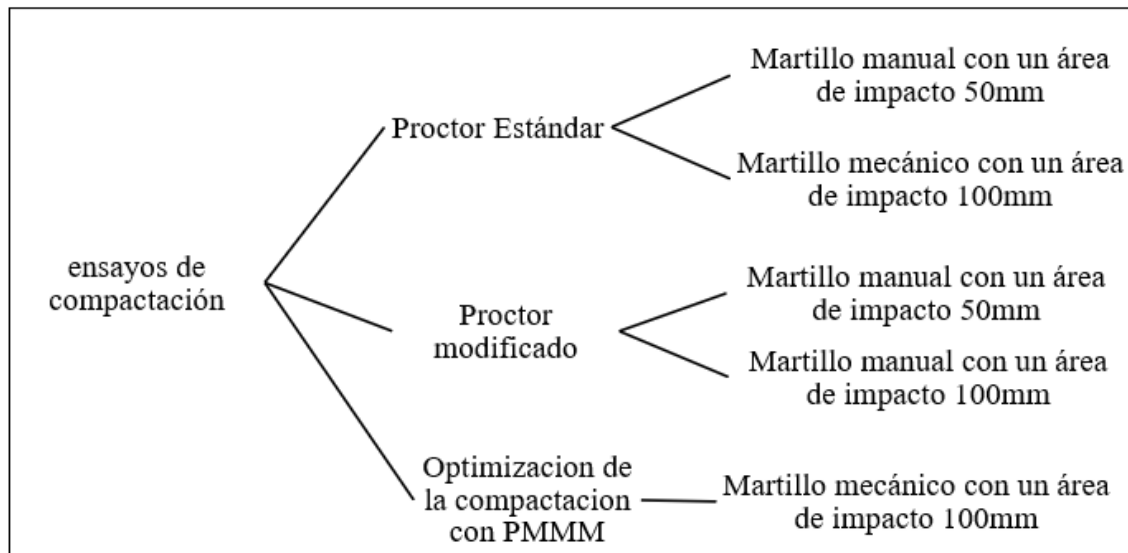
Para el desarrollo de las pruebas de compactación, estas se efectuaron en función a las estandarizadas por las normas ASTM D 698-12 y ASTM D 1557-12, las que indican como realizar los ensayos Proctor Estándar y Proctor Modificado respectivamente, pero estas no fueron suficientes para analizar la doble formación de las curvas de doble pico, es por ellos que se optó por realizar las siguientes pruebas, además se incluyó un nuevo método de compactación cuasi estático por vibración el cual consintió en confinar le material a ensayar con un martillo de compactación similar al usado en ensayo Marshall ASTM D 1559.

Para lo cual realizamos un diagrama donde se muestra los métodos de compactación a usar para obtener la curva de compactación de doble pico en este tipo de

suelos y así poder determinar un criterio para la elección de los parámetros de compactación críticos.

Figura 10

Diagrama de los ensayos de compactación realizados.



Luego de haber realizado el ensayo de granulometría se designa el método a usar para realizar los ensayos de Proctor Estándar y Proctor Modificado, para ello se verifico los porcentajes retenidos de nuestro material en estudio, la designación según los porcentajes retenidos que es menos de 25% retenido en el tamiz N°4 (4.75mm.) entonces utilizaremos el método A, para la realización de nuestros ensayos de compactación. para esto seleccionamos el molde que será utilizado en todos los ensayos de compactación, el cual es un molde de acero de 101.6mm., de diámetro y 116.4mm. de altura y una base rígida de acero específicamente.

Previo a este paso se realizó el secado al aire libre seguidamente realizamos la separación de la muestra, la que correspondería de acuerdo al método sería la pasante al tamiz N°4 (4.75mm.). Esta separación se realizó con material secado al aire libre sin presencia de radiación solar.



Separamos una porción de material, que en lo posible sea lo más homogéneo posible, esta masa es de un peso de 3kg o 5kg para cada espécimen a compactar, según a los métodos de compactación a realizar para esta investigación. Seguidamente en un recipiente rígido con la ayuda de unos guantes de goma mezclamos con agua de manera creciente para cada espécimen, con los siguientes porcentajes, 1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13%, 15% y 17%, adicional a estos contenidos de humedad preparados se ensayó uno secado al aire libre y los siguiente fueron agregados al material granular y dejados en reposo, al interior de bolsas herméticas por un periodo de 24 horas, a pesar que en la norma menciona un periodo mínimo de 3 horas a 7 horas. Todo esto para que cada espécimen tenga una humedad uniforme y homogénea, los porcentajes de agua propuestos son para garantizar una equidistancia al momento de graficas la curva de compactación, la preparación de 5kg es para realizar dos ensayos de compactación bajo distintos métodos.

Luego del humedecimiento o curado de los especímenes con los porcentajes de humedad designados anteriormente, se procedió a realizar la compactación de las muestras que varían en función al método de compactación seleccionado, así como también la elección del martillo manual que tiene la energía y peso según al método elegido para las pruebas.

Para mantener la eficiencia de la energía de compactación por unidad de volumen, la norma señala que la energía entregada debe ser en el volumen estandarizado que se nos indica que no debe exceder como máximo 6mm de su altura del molde de compactación, para ellos se optó por pesar la capa a compactar de acuerdo al método a utilizar.

Para determinar la masa de compactado por capa, inicialmente se estimó un valor de peso específico húmedo, obtenida la compactación con valores estimados se prosigue

a ajustar la masa del material a compactarlo por capa, de acuerdo al material ensayado y a la energía de compactación a aplicar.

Figura 11

Pesado de la masa de suelo para compactarlo en una capa.



a)

b)

en la figura a) se coloca el recipiente que nos servirá a la vez herramienta para verter el material en el molde de compactación, en la figura b) se pesa el material requerido por cada capa de compactación dicho calculo se realizó con un ensayo previo para estimar la altura de compactación

Terminando el proceso de compactación en el molde, se procedió a enrazar y pesar en la balanza el molde más la muestra contenida, finalmente realizamos la toma de muestra para determinar el contenido de humedad esto por lo general de opto por extraerlo de la parte media del espécimen compactado, de acuerdo a la ASTM D 2216.

Se realizó 8 veces el procedimiento descrito, esto para obtener la mayor cantidad de puntos posibles en la curva de compactación, hubo ocasiones donde se realizó 9 para realizar ciertas comprobaciones, no se pudo realizar más muestras debido a que la



saturación del espécimen designado ya no era lógica, ya que tenía mucha presencia de agua.

Se realizaron pruebas para comprobar el Crushing

Durante los ensayos de compactación, se realizó la comprobación de fenómeno por Crushing, el cual consistió en realizar el análisis granulométrico a cada uno de los especímenes una vez concluida las pruebas de compactación, este se desarrolló en la muestra M-8.

Se realizaron las pruebas de succión mediante el método del papel filtro

De la misma forma durante las pruebas de compactación se hizo la comprobación de la saturación excedente en los diferentes puntos de la curva de compactación, esto mediante las pruebas de Succión desarrolladas por un papel filtro a causa de una sobre carga determinada una vez concluida las pruebas de compactación, esta prueba se desarrolló en la base del molde de compactación, para realizarlo de tubo de cambiar de posición el molde, dicha prueba se realizó con la muestra M-3.

También se realizaron las pruebas de optimización de la compactación

No existe un parámetro correlativo de la energía de compactación, entre los métodos de compactación en laboratorio y los métodos de compactación en campo, es por ello que se optó por desarrolló una metodología que nos ayude a definir una equidad entre estos métodos de compactación, y al mismo tiempo un ensayo de laboratorio que nos apoye en esta búsqueda, a continuación, tenemos la energía de compactación.

$$E = \frac{N \times n \times W \times h}{V}; \left(\frac{kg \times m}{m^3} \right)$$

Y la productividad del equipo a utilizar para la compactación en campo:



$$Q = \frac{W \times V \times E \times e}{N(1+h)}; \left(\frac{m^3}{hora} \right)$$

$$W = L - L_0$$

Donde:

Q= Productividad real

W= Ancho efectivo de compactación

V= Velocidad de trabajo (metros/hora)

N= Numero de pasadas

e= Espesor de la capa de relleno

E= Factor de eficiencia de trabajo

H= factor de altura (m.s.n.m.)

L= Ancho del rodillo compactador (m)

L0= Ancho del traslape

Como vemos a continuación la energía de compactación en laboratorio y medición de eficiencia del equipo compactador en campo. No tienen parámetros de medición. La única forma es haciendo la medición del material a compactar y esto se logra mediante el grado de compactación en campo, por lo tanto, realizaremos una prueba similar en laboratorio que simule en lo posible las condiciones de campo controlando la energía de compactación en laboratorio para determinar una curva de numero de golpes vs grado de compactación en laboratorio, al cual llamaremos curva de optimización del laboratorio.



3.4.5. Para determinar la gravedad específica de los solidos

a) Equipos y Materiales

- **Fiola de 500 ml: Instrumento** de vidrio para la medición de volúmenes el cual tiene un volumen conocido.
- **Recipiente termorregulador:** Se puede utilizar un recipiente de Tecnopor con tapa para mantener la temperatura constante durante el desarrollo del ensayo.
- **Bomba de vacíos:** es un equipo diseñado para extraer gases del interior de recipientes.
- **Balanza de 0.01g. de precisión:** Equipo de medición de peso balanza de aproximación de 0.01 gramo.
- **Horno a temperatura de 110 +- 5°C:** Que controla la temperatura constante de 110 ± 5 °C a través de la cámara de secado.
- **Termómetro de mano:** Será un termómetro digital calibrado que nos ayude a comprobar la temperatura a cada acción que se realice durante el desarrollo del ensayo.
- **Pipeta:** Una pipeta manual que nos ayudara a controlar el volumen del agua dentro de la fiola para poder medirla en la capacidad indicada.

b) Procedimiento:

Para determinar la gravedad específica de los sólidos en este caso arenas limosas pasantes al tamiz N°4(4.75mm) se desarrolló la prueba según la norma ASTM D 854.

Secamos el material a usar en un horno a temperatura constante de 110 ± 5 °C, hasta obtener una masa constante del material.



Se identifica a la fiola de 500 ml de capacidad mediante un código designado en laboratorio, para luego pesarla sin agua ni material seco.

Se separa el material seco a usar de acuerdo a la siguiente tabla

Tabla 9

Masa del espécimen recomendado para el ensayo.

Soil Type	Specimen Dry Mass (g) When Using 250ml Pycnometer	Specimen Dry Mass (g) When Using 500ml Pycnometer
SP, SP-SM	60+-10	100+-10
SP-SC, SM, SC	45+-10	75+-10
Silt or Clay	35+-5	50+-10

Fuente: ASTM D 854

Se introduce el material seco separado con la ayuda de un embudo de papel para facilitar la fluidez de la arena dentro de la fiola. Se pesa nuevamente para verificar que haya ingresado toda la muestra seca designada para la prueba.

Se satura el material con agua destilada para evitar diferencias en el cambio de volumen por parte del agua, dentro de la fiola.

El ambiente se encuentra a una temperatura de 11°C, por lo tanto, nos vemos en la necesidad de calentar el agua a una temperatura de entre 20 a 25 °C.

Se mantiene la temperatura a 20 a 25°C en un termorregulador, este puede ser un recipiente de Tecnopor que albergue las muestras durante el desarrollo del ensayo, hasta realizar la medición del volumen a la cual está calibrada la fiola a 500 ml, para luego pesarla con la muestra seca y el agua en su interior.



Manteniendo la temperatura a 20 a 25°C en el termorregulador se realiza, hasta realizar la medición del volumen a la cual esta calibrada la fiola a 500 ml, para luego pesarla con tan solo agua.

Antes de racializar el pesado de la fiola con agua más muestra y fiola con tan solo agua, deberá extraerse todos los vacíos mediante la bomba de vacíos por un tiempo prudencial hasta no notar la efervescencia de los vacíos atrapados.

Para el cálculo de la gravedad especifica de los sólidos se usó la siguiente fórmula.

$$G_s = \frac{W_s}{[(W_f + a + m_s) - (W_f + a)]}$$

Donde:

G_s = Gravedad especifica de los sólidos (particular de suelo pasante a la N°4).

W_s = Peso de la muestra seca.

$W_f + a + m_s$ = Peso de la fiola.

$W_f + a$ = Peso del agua.

.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Resultados de los ensayos granulométricos

A continuación, se detallan los ensayos granulométrico desarrollados según la norma ASTM D 6913-17, así también se usaron las NTP400.012 de referencia, las cuales se realizaron en arenas limpias y arenas limosas que a pesar de que algunas muestras están en la caracterización de arenas limpias se lavó el material por la malla N°200.

Tabla 10

Porcentajes pasantes de las muestras M-1, M-2, M-3 y M-4.

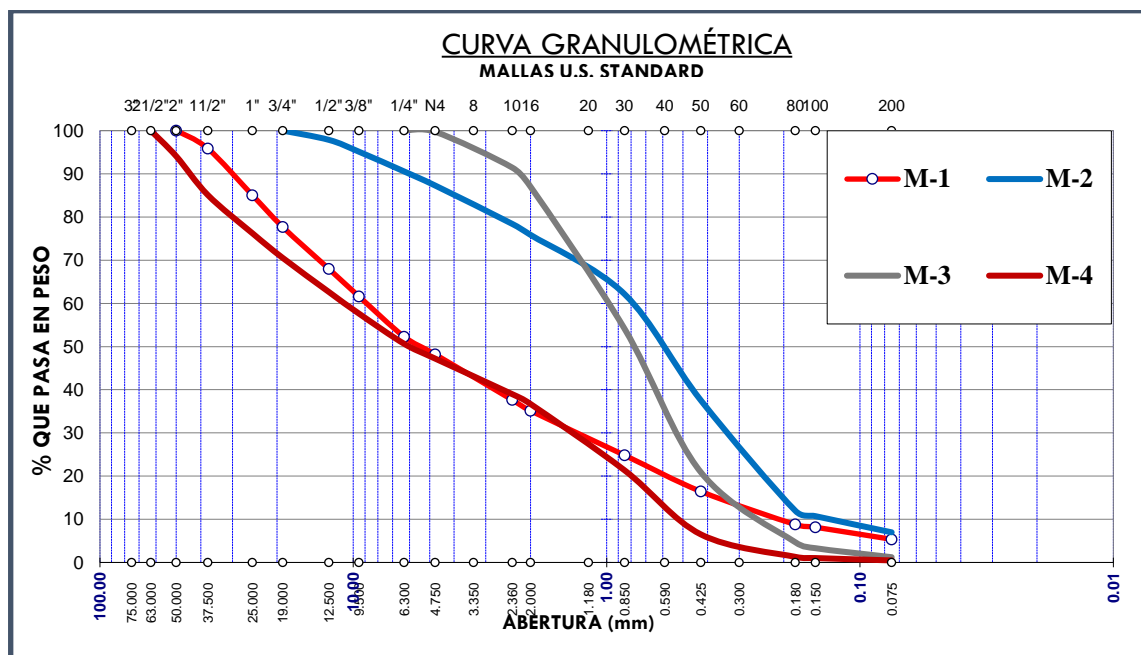
	tamices		porcentaje pasante (%)	
	in	mm		
GRUESO	3"	75,00		
	2 1/2"	63,00		100
	2"	50,00	100	94,07
	1 1/2"	37,50	95,84	85,08
	1"	25,00	85,03	76,22
	3/4"	19,00	77,7	100
	1/2"	12,50	68,01	97,87
	3/8"	9,50	61,61	95,12
	1/4"	6,30	52,28	90,55
	N° 4	4,75	48,17	87,28
FINO	N° 8	2,36	37,65	78,41
	N° 10	2,00	35,15	75,88
	N° 20	0,85	24,83	62,14
	N° 40	0,425	16,45	37,55
	N° 80	0,180	8,79	11,96
	N° 100	0,150	8,16	10,73
	N° 200	0,075	5,36	6,98

Se muestra la granulometría de las muestras de suelo M-1, M-2, M-3 Y M-4

- M-1; **Grava** mal graduada con limos (GP-GM) con un 5.36 % de partículas pasantes a la malla N° 200 (75 μ m), cuya clasificación AASHTO es un A-1-a (0).
- M-2; **Arena** mal graduada con limos (SP-SM) con un 6.98 % de partículas pasantes a la malla N° 200 (75 μ m), cuya clasificación AASHTO es un A-1-b (0).
- M-3; **Arena** mal graduada (SP) con un 1.22 % de partículas pasantes a la malla N° 200 (75 μ m), cuya clasificación AASHTO es un A-1-b (0).
- M-4; **Grava** mal graduada (GP) con un 0.47 % de partículas pasantes a la malla N° 200 (75 μ m), cuya clasificación AASHTO es un A-1-a (0).

Figura 12

Curvas granulométricas de las muestras M-1, M-2, M-3 Y M-4.



En el gráfico tenemos dos suelos de granulometría gruesa y dos suelos de la fina

Tabla 11

Porcentaje pasante de las muestras M-5, M-6, M-7 y M-8.

		tamices				
		in	mm			
GRUESO		3"	75,00			
		2 1/2"	63,00			
		2"	50,00	100,00		
		1 1/2"	37,50	100,00	86,65	
		1"	25,00	91,74	79,51	
		3/4"	19,00	84,48	70,44	
		1/2"	12,50	82,55	62,45	
		3/8"	9,50	80,85	57,02	
		1/4"	6,30	79,23	49,81	100,00
		N° 4	4,75	78,80	45,57	99,73
FINO		N° 8	2,36	76,79	36,93	84,02
		N° 10	2,00	76,51	35,59	79,53
		N° 20	0,85	75,57	30,29	52,51
		N° 40	0,425	74,19		26,61
		N° 80	0,180	64,86	19,55	9,25
		N° 100	0,150	61,71	18,29	6,86
		N° 200	0,075	43,25	13,34	3,65

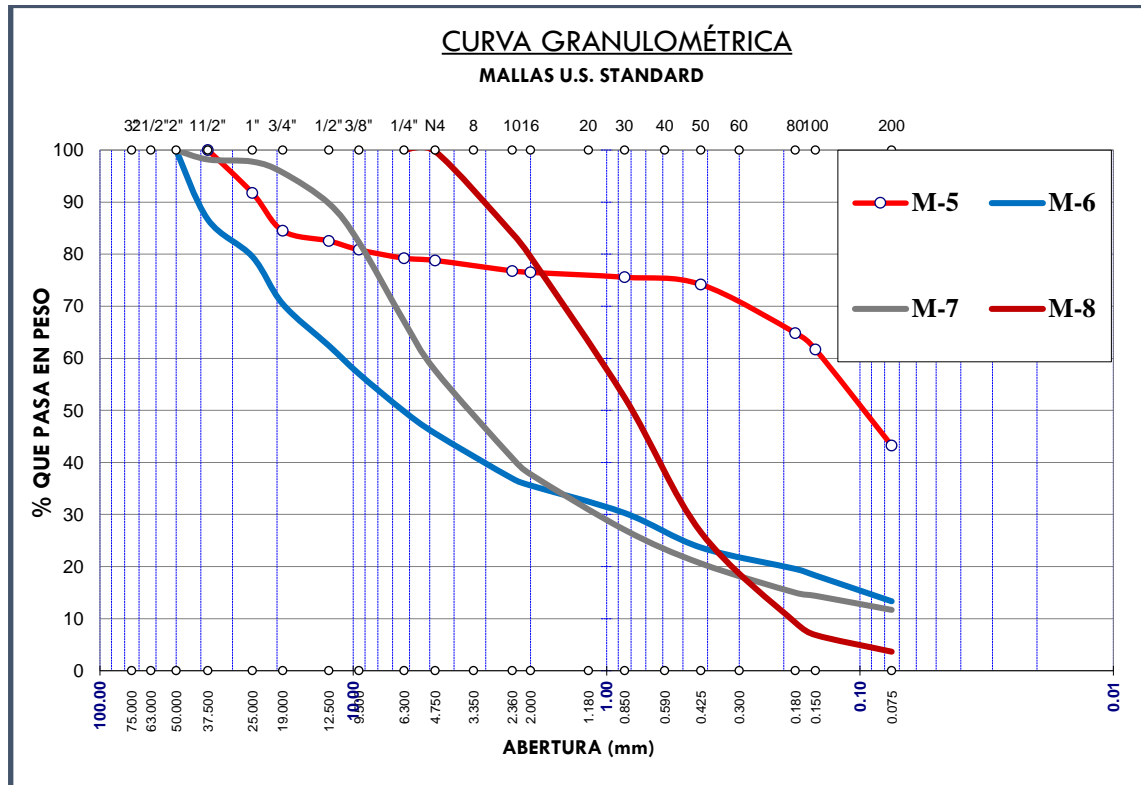
Se muestra la granulometría de las muestras:

- M-5; Arena Limosa (SM) con un 43.25 % de partículas pasantes a la malla N° 200 (75µm), cuya clasificación AASHTO es un A-4 (2).
- M-6; Grava limosa (GM) con un 13.34 % de partículas pasantes a la malla N° 200 (75µm), cuya clasificación AASHTO es un A-1-a (0).
- M-7; Arena bien graduada con limo (SW-SM) con un 11.68 % de partículas pasantes a la malla N° 200 (75µm), cuya clasificación AASHTO es un A-1-a (0).

- M-8; Arena mal graduada (SP) con un 3.65 % de partículas pasantes a la malla N° 200 (75µm), cuya clasificación AASHTO es un A-1-b (0).

Figura 13

Curvas granulométricas de las muestras M-5, M-6, M-7 y M-8.



En el gráfico tenemos un suelo de granulometría gruesa y tres de suelos finos.

Tabla 12

Cuadro resumen de clasificaciones de las muestras.

muestra	clasificación		w%	% Grava	% Arena	% Finos
	SUSC	AASHTO				
M-1	GP-GM	A-1-a (0)	4,52	51,83	42,8	5,36
M-2	SP-SM	A-1-b (0)	7,85	12,72	80,3	6,98
M-3	SP	A-1-b (0)	3,68	0,27	98,51	1,22
M-4	GP	A-1-a (0)	2,9	52,8	46,73	0,47
M-5	SM	A-4 (2)	10,2	21,2	35,54	43,25
M-6	GM	A-1-a (0)	8,4	54,43	32,23	13,34
M-7	SW-SM	A-1-a (0)	12,8	42,34	45,98	11,68
M-8	SP-SM	A-1-b (0)	5,45	0,27	96,08	3,65

En el siguiente cuadro vemos a las muestras su clasificación y el porcentaje pasante a la malla N°200(75µm).

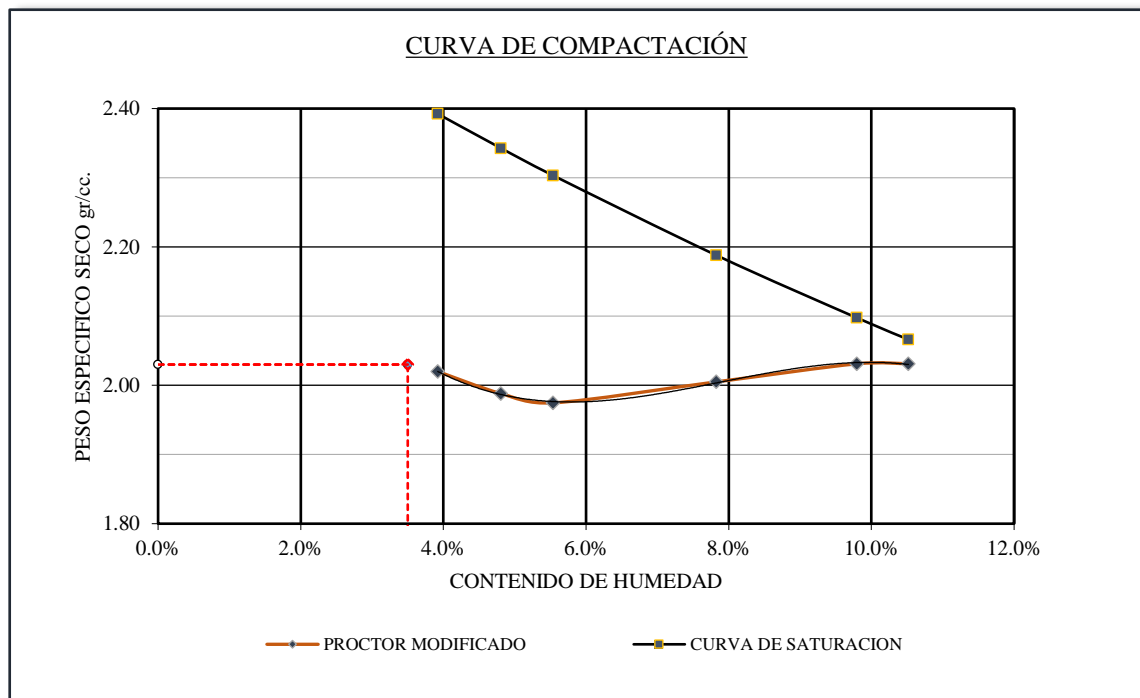
4.2. Resultados de los ensayos de Compactación

Al realizar los ensayos de Proctor Estándar ASTM D 698-12, Proctor Modificado ASTM D 1557-12 y a su vez también se utilizó martillos de impacto que cubren la cara del molde de compactación (similar al utilizado en el ensayo Marshall ASTM D1559), cuya energía de compactación es igual al de la prueba Proctor modificado.

Ensayos de compactación realizadas a las muestras tomadas de distintos lugares de la región de Puno.

Figura 14

Curva de compactación de la muestra M-1.

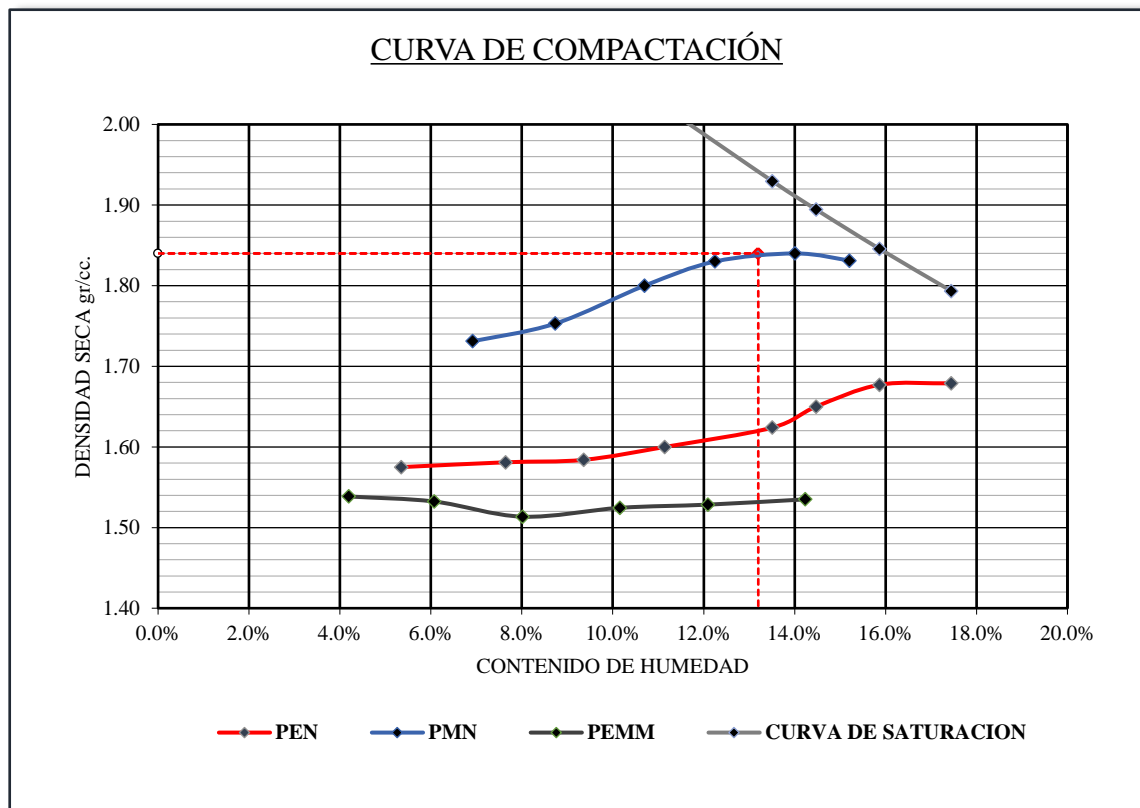


Se muestra los resultados de la prueba de compactación M-1 del distrito de Esquilache – Puno, en la que se efectuó un Proctor modificado Método C, con un martillo tubular en el que se observa lo siguiente:

La formación de una curva de compactación con doble pico, el que nos determinara dos valores de humedad para un valor promedio de peso específico seco máximo de 2.03g/cm³, para un contenido de humedad en el primer pico de 3.5% y de 10% en el segundo pico.

Figura 15

Curva de compactación de la muestra M-2.



Se muestra la curva de compactación M-2 del distrito de Ilave – Puno, en la que se efectuó un Proctor estándar (PEN), Proctor Modificado (PMN) y un Proctor estándar con un martillo de área de impacto modificada (PEMM):

En los dos primeros ensayos no notamos la formación de doble pendiente, pero si podemos notar el pico de la curva lo que nos lleva a determinar los contenidos de humedad y pesos específicos seco máximos.

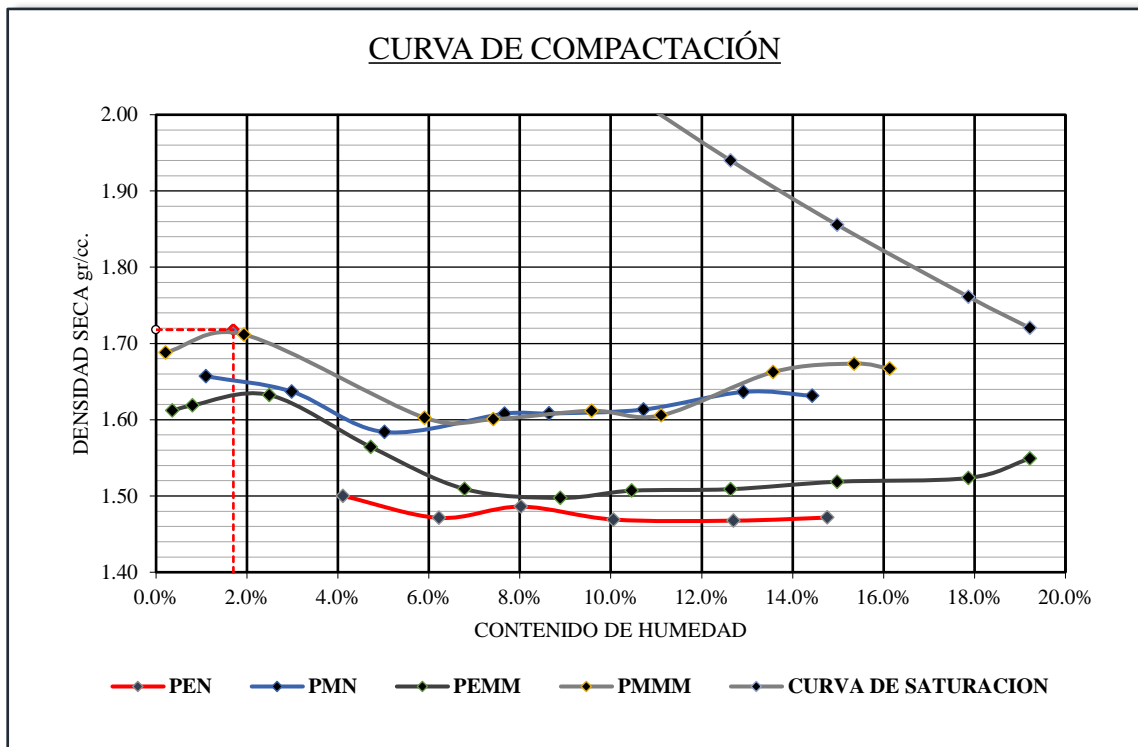
Del PEN podemos ver que obtenemos un peso específico seco máximo 1.68g/cm³ para un contenido de humedad de 15.8%.

Del PMN podemos ver que obtenemos un peso específico seco máximo 1.85g/cm³ para un contenido de humedad de 13.2%.

En el PEMM si se notó la formación de doble pico lo que tenemos es que para un peso específicos seco máximo de 1.54g/cm^3 , podemos obtenerlo con humedades de 6% y 14.3% en la formación de ambos picos.

Figura 16

Curva de compactación de la muestra M-3.



Se muestra la curva de compactación M-3 del distrito de Yunguyo – Puno, en la que se efectuó un Proctor estándar (PEN), Proctor Modificado (PMN), Proctor estándar con un martillo de área de impacto modificada (PEMM), y un Proctor modificado con un martillo de área de impacto modificada (PMMM):

no podemos notar la formación de doble pico con claridad en los ensayos efectuados con un martillo tubular.



Del PEN no notamos una curva definida por la baja energía de compactación, pero visualizamos un peso específico seco máximo de 1.50g/cm^3 con contenidos de humedad de 4% y 8%, en ambos picos de la curva de compactación.

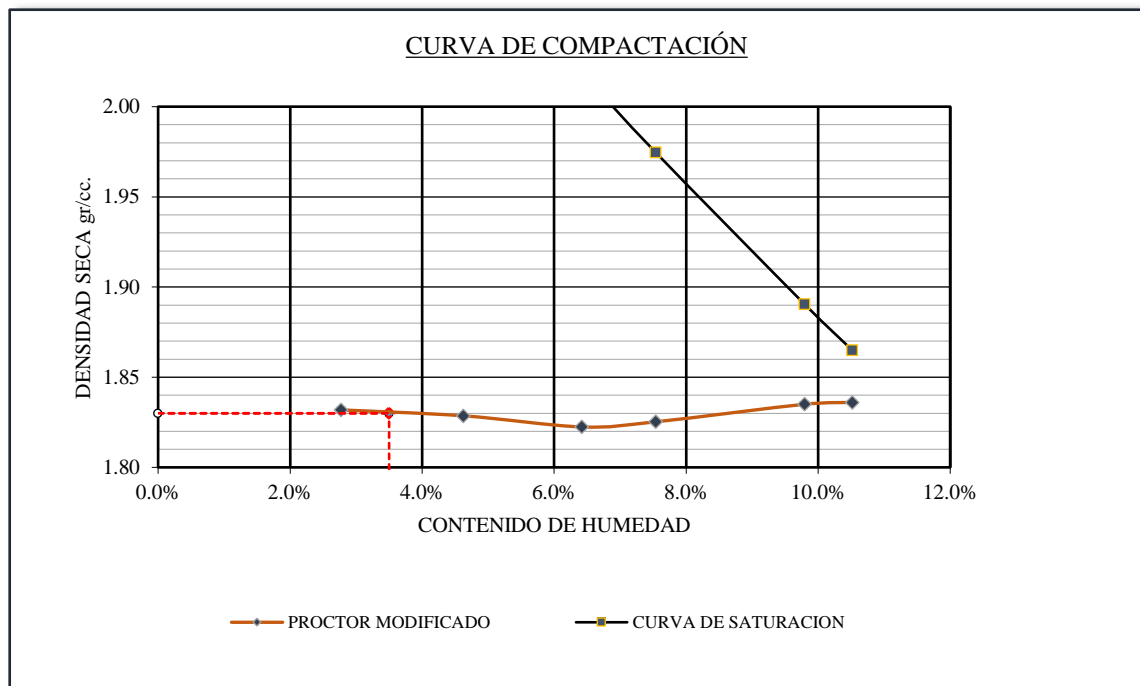
Del PMN debido a la granulometría del suelo podemos notar una formación de doble pendiente muy pronunciada de la cual obtenemos valores de peso específico seco máximo de 1.66g/cm^3 para un contenido de humedad de 1.20%, y un peso específico seco máximo de 1.64g/cm^3 para un contenido de humedad de 13.60%,

En el PEMM solo se notó la formación del primer pico cuyos valores fueron peso específico seco máximo de 1.63g/cm^3 para un contenido de humedad de 2.50%, el segundo pico no se formó por la baja energía de compactación aplicada.

En el PMMM si se logró la formación de doble pico cuyos valores fueron: específico seco máximo de 1.71g/cm^3 para un contenido de humedad de 2.0% en el primer pico y específico seco máximo de 1.67g/cm^3 para un contenido de humedad de 15.30% en el segundo.

Figura 17

Curva de compactación de la muestra M-4.

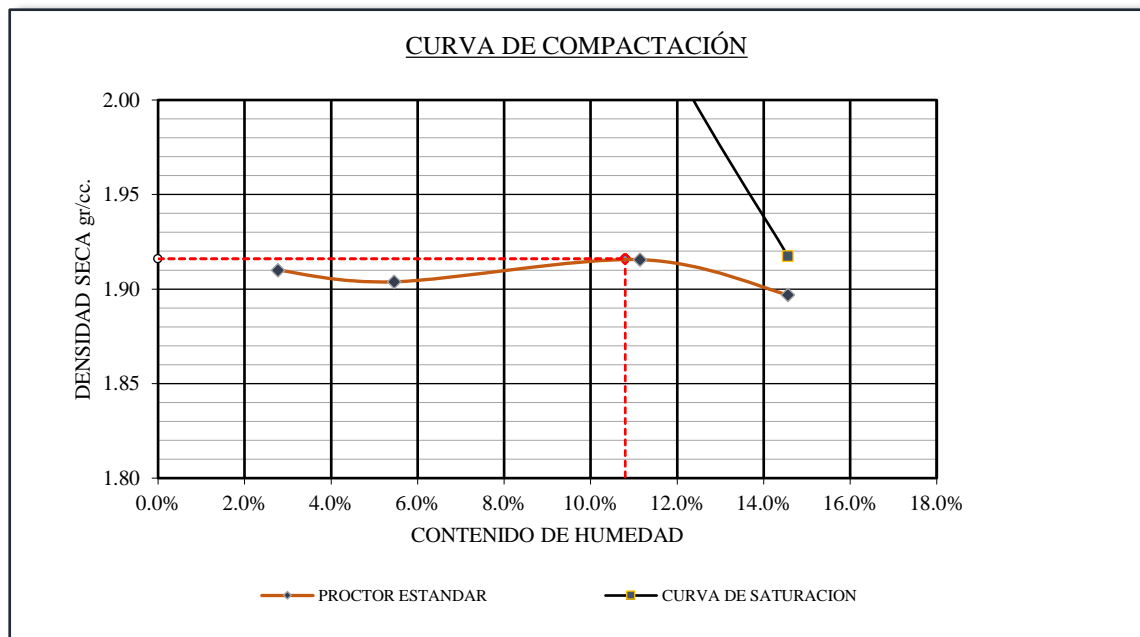


Se muestra la curva de compactación M-4 del distrito de Mazocruz – Puno, en la que se efectuó un Proctor modificado con un martillo tubular en el que notamos lo siguiente:

Notamos la formación de una curva de doble pico que nos determinara dos valores de humedad para determinar un valor promedio de peso específico seco máximo de 1.84/cm³, para un contenido de humedad en el primer pico de 3.6% y de 10.2% en el segundo pico.

Figura 18

Curva de compactación de la muestra M-5.

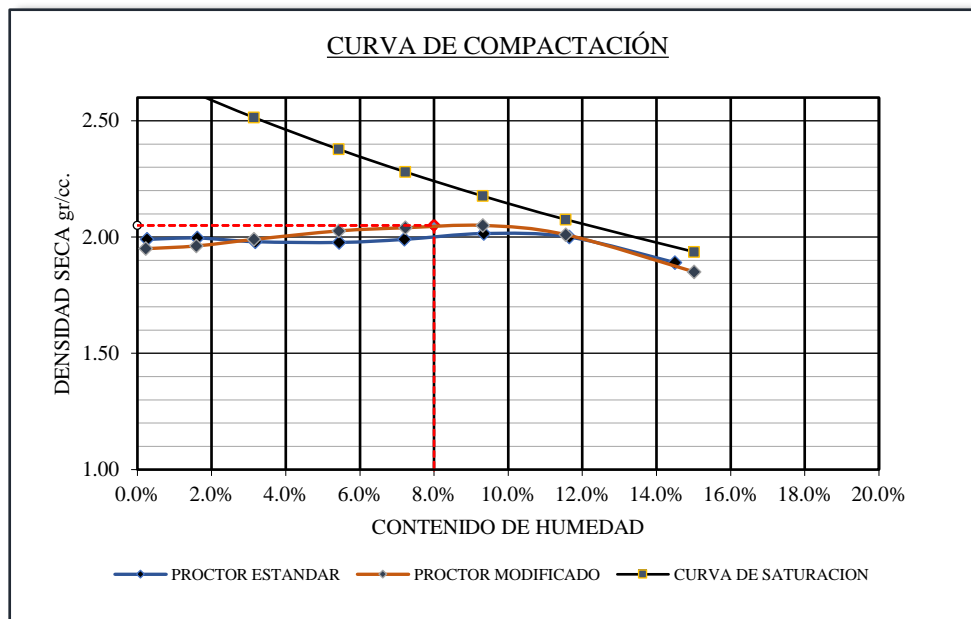


Se muestra los resultados de compactación a la M-5 del distrito de Amantani – Puno. la curva de compactación en la que se efectuó un Proctor estándar con un martillo tubular en el que notamos lo siguiente:

Notamos la formación de una curva de doble pico que nos determinara dos valores de humedad para determinar un valor promedio de peso específico seco máximo de 1.92g/cm³, para un contenido de humedad en el primer pico de 2.0% y de 11% en el segundo pico.

Figura 19

Curva de compactación de la muestra M-6.



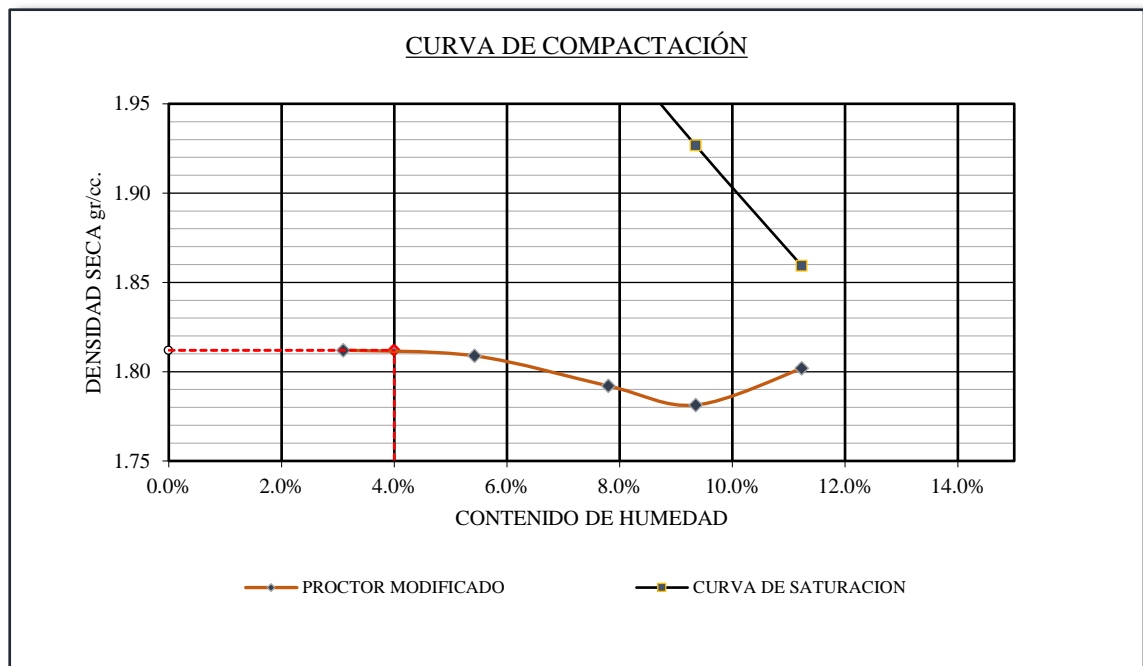
Se muestran los resultados de las pruebas de compactación realizadas a la muestra M-3 del distrito de San Antón – Puno, Proctor Modificado (PMN) y un Proctor modificado con un martillo de área de impacto modificada (PMMM):

Del PMN no notamos una curva definida por un solo pico donde determinamos un peso específico seco máximo de 2.05g/cm^3 a un contenido de humedad de 8%.

Del PMMM debido al método de compactación que es por impacto en toda la cara del molde del espécimen podemos apreciar la formación de doble pico se obtuvo un peso específico seco máximo de 1.96g/cm^3 para un contenido de humedad de 1.60%, en el primer pico y un peso específico seco máximo de 2.05g/cm^3 para un contenido de humedad de 9.30%.

Figura 20

Curva de compactación de la muestra M-7.

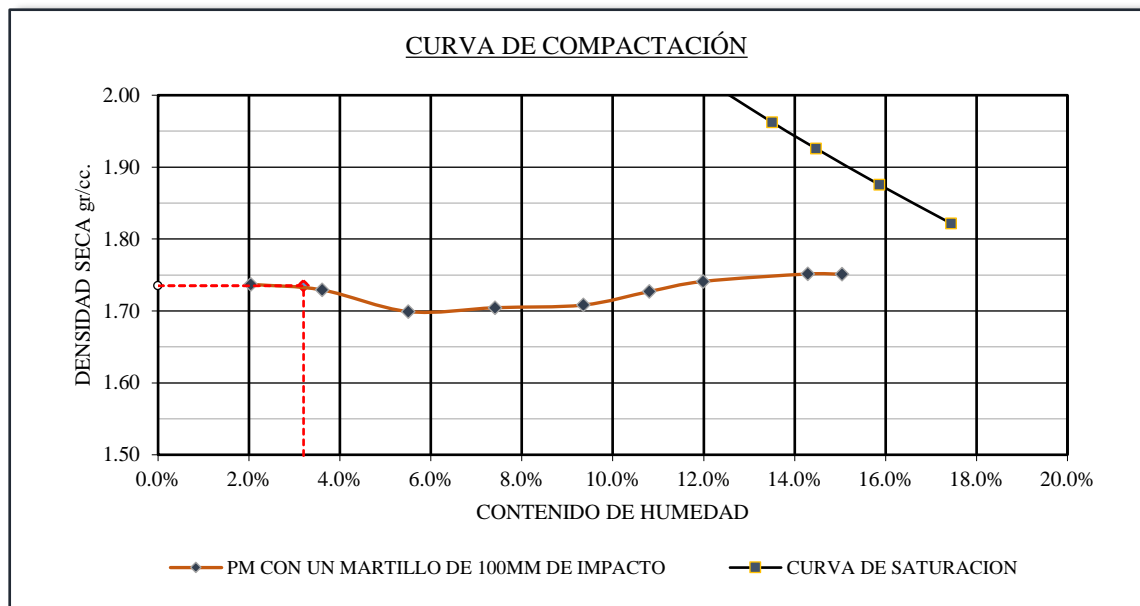


Se muestra los resultados de compactación a la M-7 del distrito de Pomata – Puno. la curva de compactación en la que se efectuó un Proctor Modificado (PMN) con un martillo tubular en el que notamos lo siguiente:

La formación de una curva de doble pico cuyo segundo pico no está bien definido puesto que el espécimen a compactar contiene agua en exceso y no se puede determinar con este método de compactación, por lo tanto, determinaremos solo un valor de peso específico seco máximo de 1.81g/cm³, para un contenido de humedad en el primer pico de 4.0%.

Figura 21

Curva de compactación de la muestra M-8.



Se muestra los resultados de la prueba de compactación a la M-8 del distrito de Laraqueri – Puno. Curva de compactación que se obtuvo por medio del ensayo Proctor Modificado (PMMM) con un martillo modificado los resultados se detallan a continuación:

Se observa la formación de una curva de doble pico bien definidos, los valores de densidad seca máxima en la formación del primer pico es 1.73g/cm³ para un contenido de humedad de 3.2% y los valores de densidad seca máxima en la formación del segundo pico, que es 1.75g/cm³, para un contenido de humedad de 14.3%.

4.2.1. Análisis del Crushing

Se realizó el análisis granulométrico para determinar en qué punto de la curva de compactación sucede el mayor porcentaje de rompimiento y/o desintegración de partículas de la masa de, el análisis por crushing se realizó en la muestra M-8, en el cual

se hizo el análisis granulométrico de cada espécimen luego de realizar la prueba de compactación.

Tabla 13

Análisis por Crushing - porcentajes pasantes al tamiz N°200(75u m).

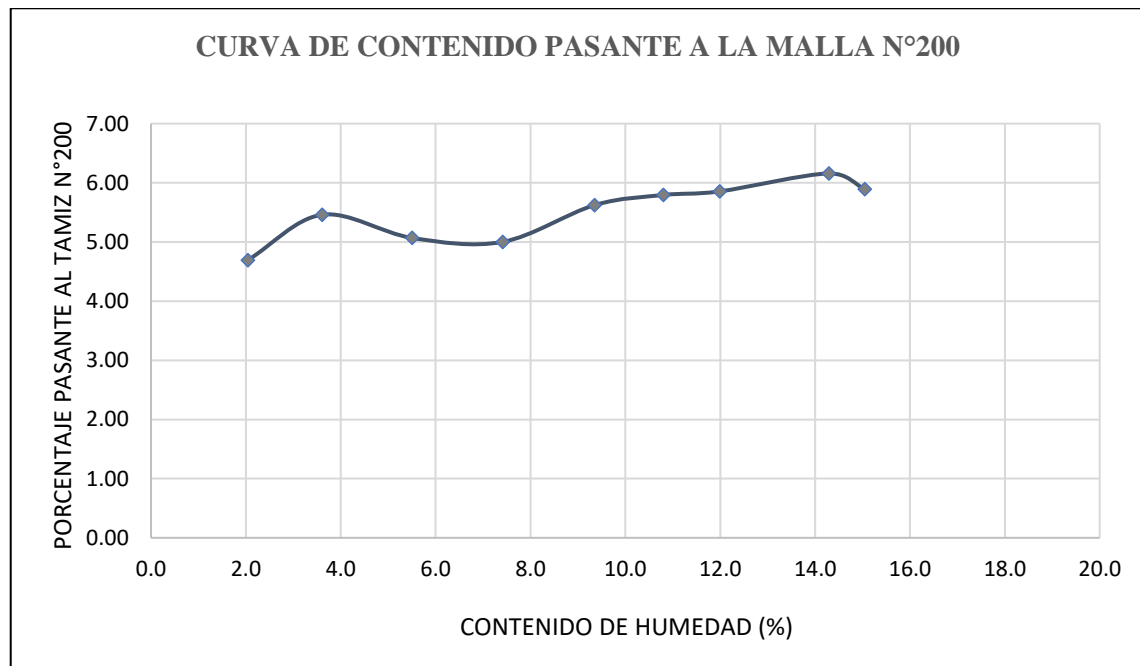
tamices		porcentaje pasante (%)										
in	mm	M-8	SECO	1%	3%	5%	7%	9%	11%	13%	15%	
GRUESO	3"	75,00										
	2"	50,00										
	1 1/2"	37,50										
	1"	25,00										
	3/4"	19,00										
	3/8"	9,50	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
FINO	N° 4	4,75	99,7	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,6	99,9	99,3
	N° 10	2,00	79,5	82,9	84,8	86,1	81,9	83,0	80,5	78,9	83,8	81,9
	N° 20	0,85	52,5	57,3	62,5	65,1	56,6	57,6	54,6	52,6	57,2	56,3
	N° 40	0,43	26,6	31,5	36,4	37,7	31,3	32,2	30,4	28,9	32,6	31,9
	N° 60	0,250	12,5	16,1	19,2	19,6	15,8	16,9	16,2	15,8	17,6	17,1
	N° 100	0,150	6,9	8,9	10,7	10,3	8,9	9,7	9,7	9,6	10,4	10,1
	N° 200	0,075	3,7	4,7	5,5	5,1	5,0	5,6	5,8	5,9	6,2	5,9
CLASIFICACION SUCS		SP	SP	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SW-SM	SP-SM	SP-SM
contenido de humedad			2,0	3,6	5,5	7,4	9,4	10,8	12,0	14,3	15,0	

Determinamos una relación entre la cantidad de muestra fina pasante a la Malla N°200 (75µm) que fue generada en cada uno de los puntos de la curva de compactación y el porcentaje de humedad luego de realizar las pruebas de compactación.

La designación de cada punto del ensayo de compactación nos determina el porcentaje de humedad teórico con el que se mesclo el material.

Figura 22

Curva de material fracturado durante el ensayo de compactación.

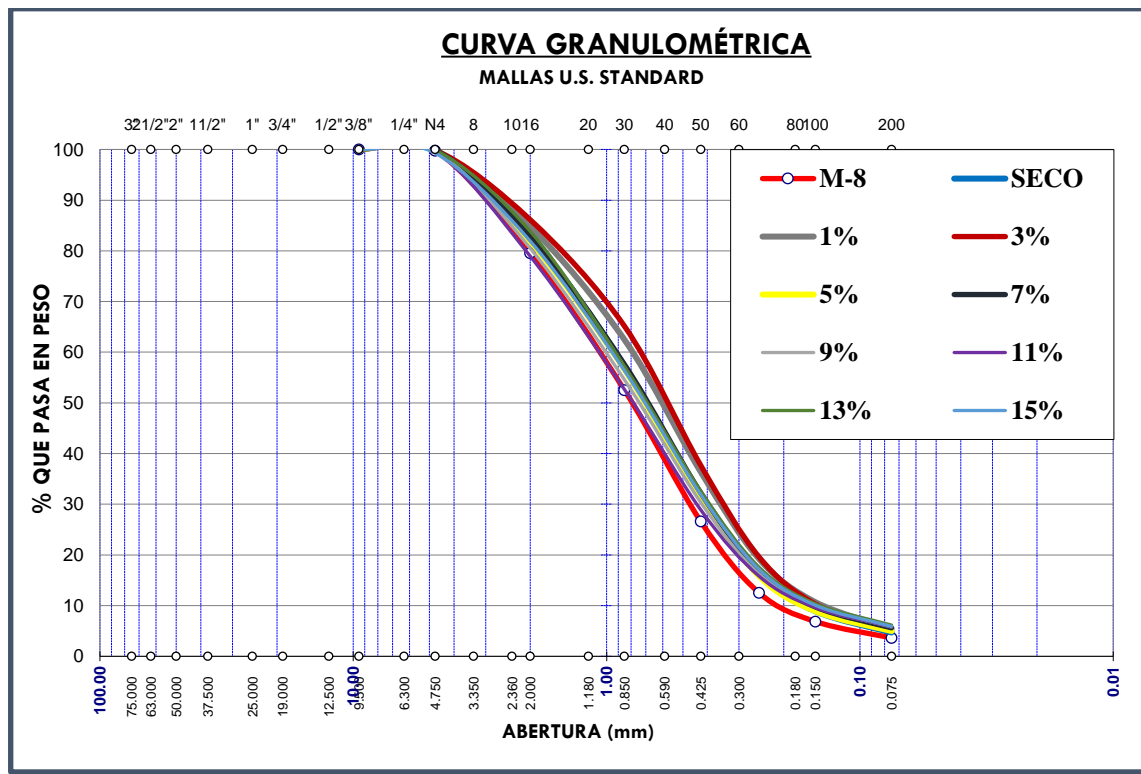


De acuerdo a este grafico podemos definir la formación del primer pico en la curva de compactación en arenas limosas ya que nos muestra el material fino producido en las pruebas de compactación

Sin embargo, el que se haya generado partículas finas pasantes al tamiz N°200 (75 μ m), no significa que la fracturación haya ocurrido a todo nivel, nos referimos a todos los diámetros de la distribución granulométrica del suelo, para ellos desarrollaremos el análisis granulométrico de cada espécimen compactado para probar este efecto por causa de la variación del contenido de humedad.

Figura 23

Análisis de curvas de granulometría después del crunshig.



En la siguiente figura podemos ver que la muestra sufre una transformación de su granulometría, debido a la excesiva presión que existe durante la compactación y este difiere de acuerdo al contenido de humedad que este posee en el proceso de compactación.

4.2.2. Análisis por succión método del papel filtro

Se determino la succión por el método de la succión del agua por medio del papel filtro, papel que utilizo por 5 min en la base del espécimen una vez concluida la compactación con una sobre carga de 15 lb. determinada por el martillo de compactación manual de área de impacto de 100mm, el cual es en toda la cara del espécimen.

La finalidad por la cual se realizó el siguiente ensayo fue para demostrar el grado de saturación con el que se encuentra la arena ensayada en la formación del segundo pico.

En la siguiente figura grafico se muestra la arena preparada a 17% de humedad con respecto a su peso seco y se puede notar que aún es trabajable.

Figura 24

Arena preparada en un 17% de humedad con respecto a su peso seco.



Fig. a) se visualiza que la arena aun es trabajable, sin embargo, en la Fig. b) podemos apreciar que una vez compactada por causa de la presión del martillo de compactación este espécimen drena el agua en exceso.

Es por ello que se desarrolló el ensayo de succión por parte del papel filtro debido a una carga estática para demostrar este fenómeno de saturación por medio de la succión por parte del papel filtro debido a una carga estática. Como muestra la siguiente figura.

Figura 25

Ensayo del papel filtro.

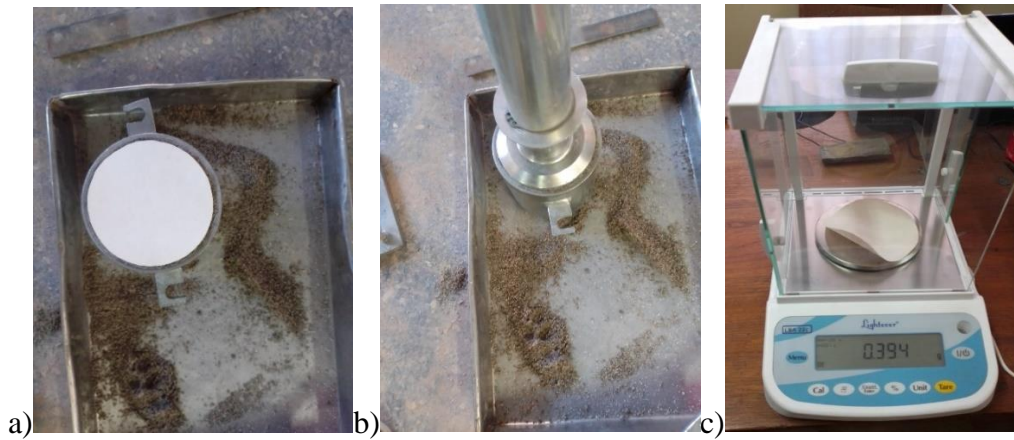


Fig. a) colocamos el papel filtro en la base testigo compactado inmediatamente terminado el proceso de compactación, Fig. b) colocado de la carga estática y Fig. c) pesado del papel en una balanza de precisión de 0.001g y 240g de capacidad.

Seguidamente mostramos los resultados del ensayo, primeramente, mostramos el ensayo que compactación realizada a la muestra M-3

Ensayo de compactación a muestras sometidas a la prueba de succión.

Figura 26

Curva de compactación de la M-3 sometida a pruebas de succión.

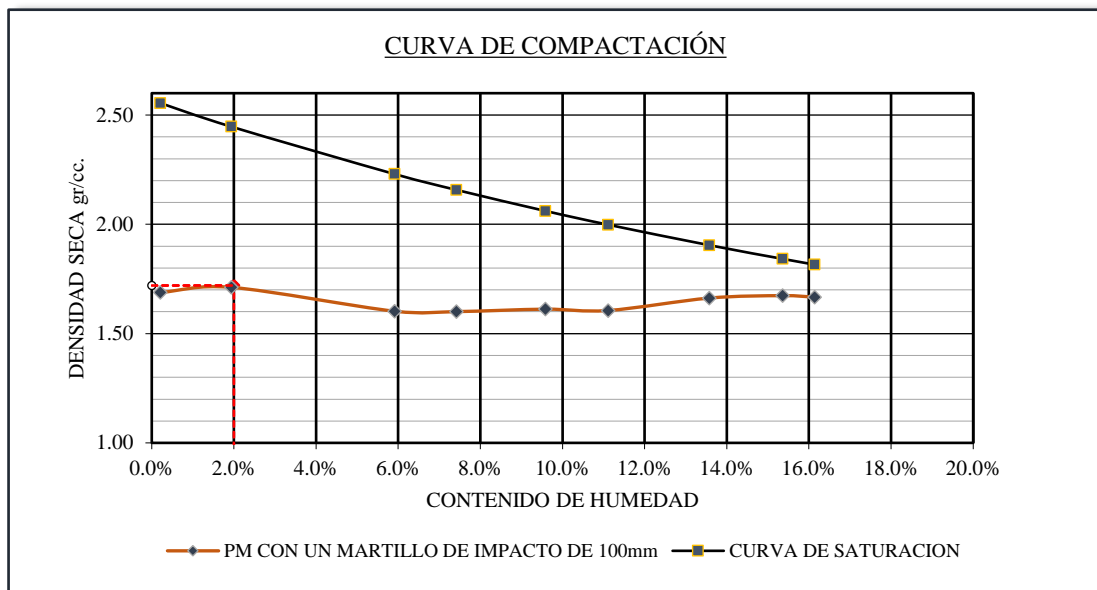
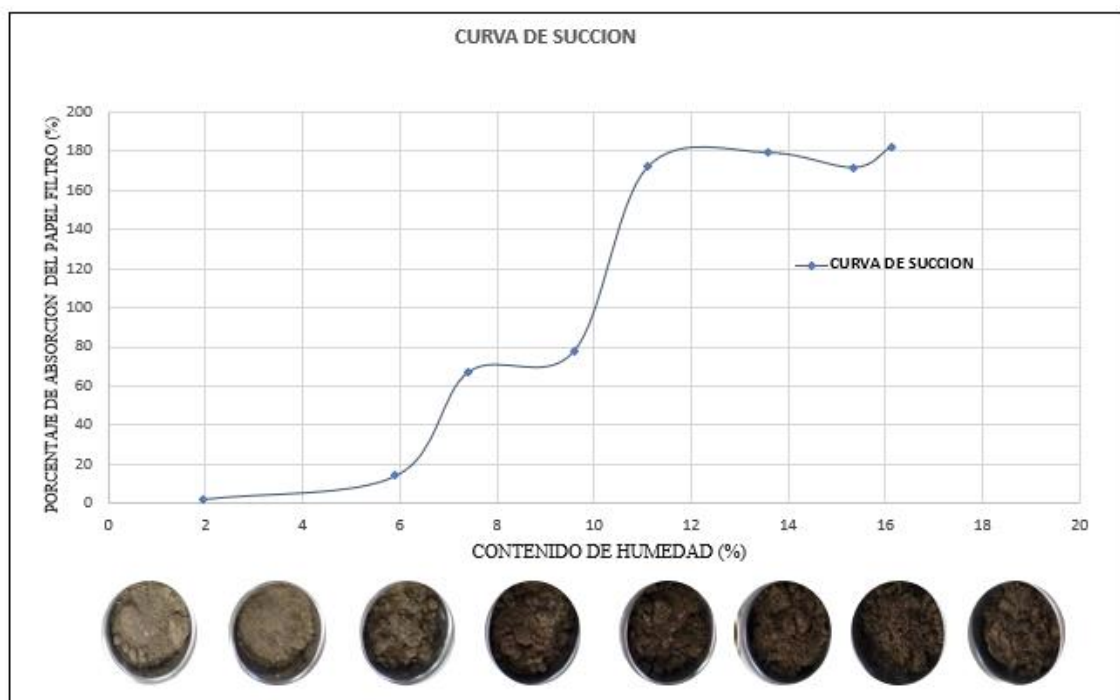


Figura 27

Resultado de las pruebas de succión.



Resultados de la prueba de succión en el papel filtro y tonalidad del suelo, realizadas a la muestra M-3, En la siguiente figura podemos notar el incremento de la succión por parte del papel filtro a causa del incremento del contenido de humedad.

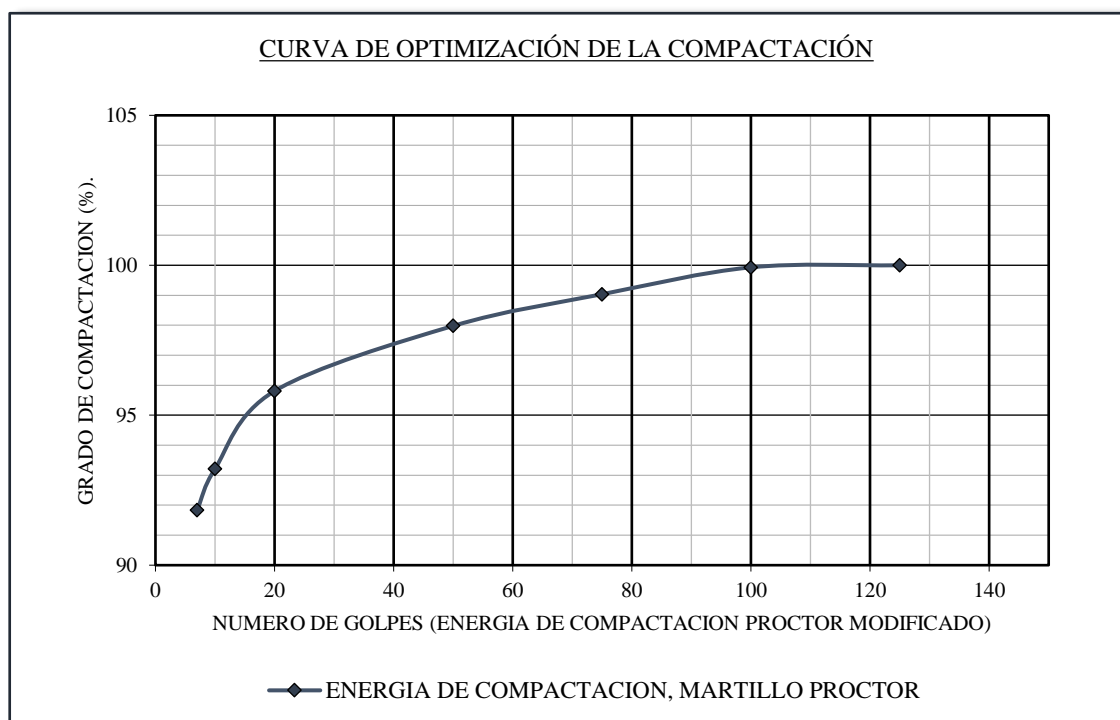
Las tonalidades del suelo nos indican cuán saturado está el suelo de acuerdo al porcentaje de agua designado antes de realizar la prueba

4.2.3. Optimización de la Compactación

La finalidad de este ensayo fue determinar una curva de compactación que optimice la compactación en laboratorio en función al número de golpes de acuerdo al método de compactación utilizado, que mantiene como constantes el método de compactación PMMM y el contenido de humedad, teniendo como variable independiente al número de golpes. De esta forma es como se obtuvo la gráfica número de golpes Vs grado de compactación.

Figura 28

Número de golpes vs grado de compactación, obtenida en Laboratorio.



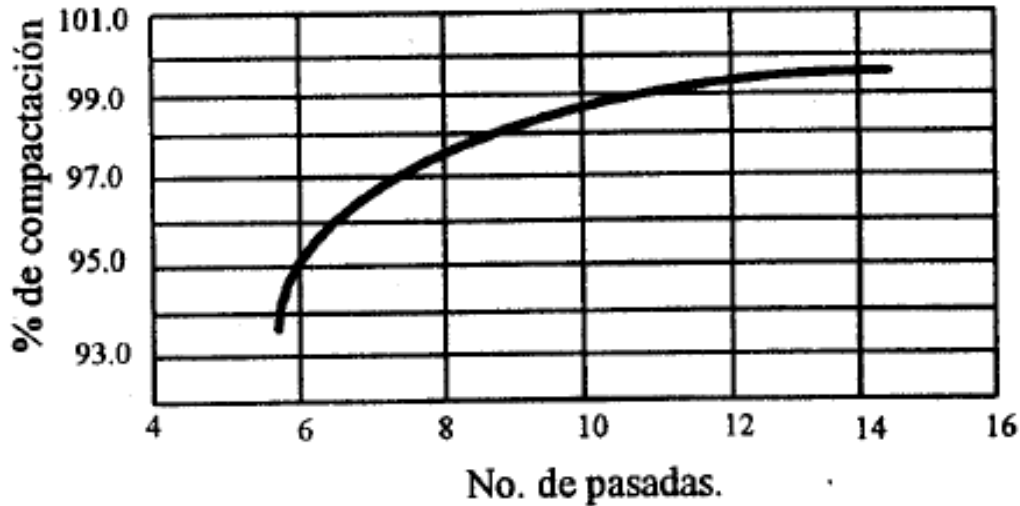
Fuente: se tomó como referencia la ASTM D 7382-08

Una vez determinada la curva número de golpes vs grado de compactación en laboratorio, se procede a realizar la comparación con otra curva obtenida en campo con las mismas características de las que se obtuvo en laboratorio para el desarrollo de esta investigación.

Obtuvimos una curva número de pasadas de rodillo vibratorio liso de 4 tn de carga, dicha referencia se obtuvo de una investigación realizada por Satuarde, 2007 donde realizaron el cálculo para el número de pasadas elección y para la compactación, tesis de maestría realizada en la Universidad Autónoma de Madrid.

Figura 29

Número de pasadas vs grado de compactación, obtenida de campo.



Fuente: SATUARDE, Juan Fran. Ilustración elección y cálculo de número de pasadas para compactar un suelo de manera efectiva. Madrid (España). Tesis de maestría. Magíster en Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Madrid, 2007. p. 22.



Al no tener alguna relación entre la compactación en laboratorio la cual es volumétrica y la compactación en campo que depende del ancho del equipo, es por ello que se adoptó este método la cual fue relacionar el resultado de ambas curvas, para así poder definir un cuadro de equivalencia de la energía de compactación modificada en laboratorio y el número de pasadas de un equipo compactador vibratorio en campo.

Tabla 14

Tabla de equivalencia de compactación entre laboratorio y campo.

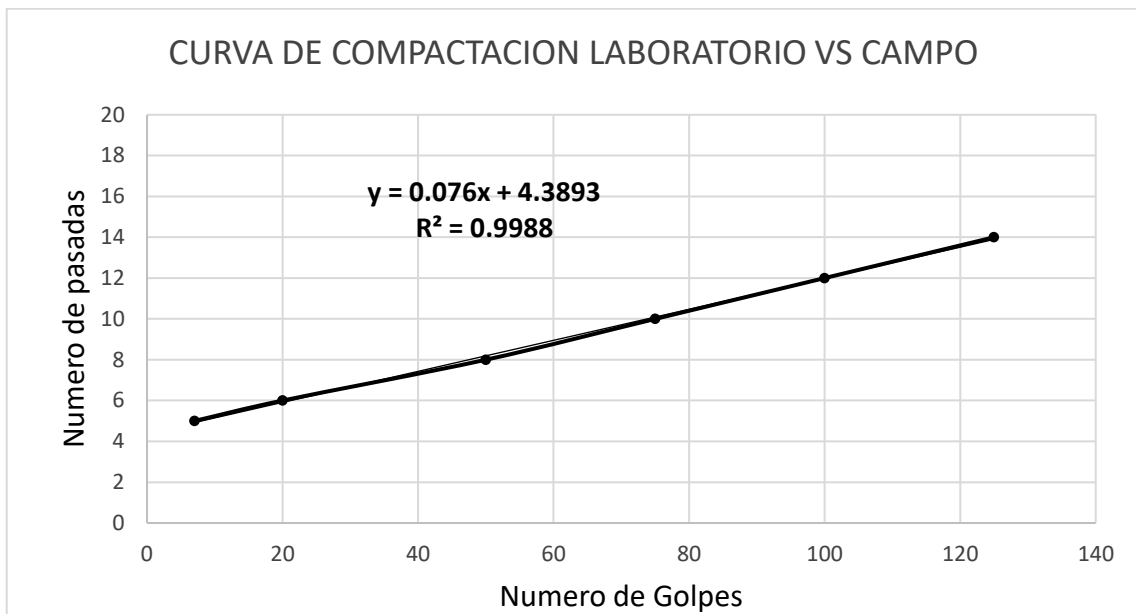
CUADRO DE EQUIVALENCIA LABORATORIO VS CAMPO						
NUMERO DE GOLPES (PROCTOR MODIFICADO)	7	20	50	75	100	125
NUMERO DE PASADAS RODILLO VIBRATORIO	5	6	8	10	12	14

Relación entre el número de golpes del Proctor modificado de laboratorio y el número de pasadas de un equipo compactador de laboratorio.

Para dar validez a la relación que existe entre estos valores se realizó un gráfico relacionando ambos valores número de golpes de laboratorio vs número de pasadas de un equipo compactador vibratorio en campo, donde se determina el valor R².

Figura 30

Relación que existe entre el número de golpes y el número de pasadas.



La relación R^2 se aproxima a 1 la cual le da validez al cuadro de equivalencia número de golpes vs número de pasadas.

También se realizó la verificación de fracturamiento de las partículas durante la prueba de optimización de la compactación para poder visualizar el cambio de tamaño de las partículas en función al incremento de la energía de compactación por medio del número de golpes a cada espécimen.

La muestra para realizar el análisis granulométrico por cribado se tomó de la parte media del espécimen compactado una vez extraída del molde. A continuación, mostramos los resultados de las pruebas.

Tabla 15

Curvas granulométricas de especímenes realizados comparados con el natural.

tamices		NUMERO DE GOLPES EN LABORATORIO CON UNA ENERGIA MODIFICADA								
in	mm	M-3	7	10	20	50	75	100	125	
GRUESO	3"	75,00								
	2"	50,00								
	1 1/2"	37,50								
	1"	25,00								
	3/4"	19,00								
	3/8"	9,50								
FINO	N° 4	4,75	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	N° 10	2,00	86,5	89,6	89,7	89,5	89,5	91,0	90,1	91,2
	N° 20	0,85	70,3	73,6	75,8	73,1	75,7	77,0	74,7	76,1
	N° 40	0,43	41,3	42,5	45,5	42,7	45,9	47,2	45,1	46,3
	N° 60	0,250	17,6	17,7	19,7	19,5	21,3	22,5	21,7	22,2
	N° 100	0,150	8,7	7,7	8,8	9,7	10,7	11,9	11,7	11,8
N° 200	0,075	4,3	4,6	5,3	6,2	6,9	7,8	8,3	7,9	
CLASIFICACION SUCS		SP	SP	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM

Podemos notar que, a medida que incrementa la energía de compactación, también podemos apreciar un incremento el porcentaje pasante a la malla N°200(75µm)

Para finalizar mostramos el cuadro resumen de resultados.

Tabla 16

Resumen de resultados en las pruebas de compactación.

muestra	clasificación		% Finos	PEN		PMN		PEMM		PMMM	
	SUSC	AASHTO		γ_d (g/cm ³)	w (%)	γ_d (g/cm ³)	w (%)	γ_d (g/cm ³)	w (%)	γ_d (g/cm ³)	w (%)
M-1	GP-GM	A-1-a (0)	5,36	-	-	2,03	3,5	-	-	-	-
M-2	SP-SM	A-1-b (0)	6,98	1,68	15,8	1,85	13,2	1,54	6,0	-	-
M-3	SP	A-1-b (0)	1,22	1,5	4	1,66	1,2	1,63	2,5	1,71	2
M-4	GP	A-1-a (0)	0,47	-	-	1,84	3,6	-	-	-	-
M-5	SM	A-4 (2)	43,25	1,92	11,0	-	-	-	-	-	-
M-6	GM	A-1-a (0)	13,34	-	-	2,05	8	-	-	1,96	1,6
M-7	SW-SM	A-1-a (0)	11,68	-	-	1,81	4	-	-	-	-
M-8	SP-SM	A-1-b (0)	3,65	-	-	-	-	-	-	1,73	3,2

Para arena finas de la región de Puno con porcentajes <5%, pasante a la malla N°200 (75 μ m) tenemos un rango de contenidos de humedad óptimo de 1.2% a 4%, indistintamente de la energía de compactación que finalmente determina el peso específico máximo.

Para arena limosas de la región de Puno con porcentajes >5%-<12%, pasante a la malla N°200 (75 μ m) tenemos un rango de contenidos de humedad óptimo de 4% a 6%, indistintamente de la energía de compactación que finalmente determina el peso específico máximo.

Para arena limosas de la región de Puno con porcentajes >12%, pasante a la malla N°200 (75 μ m) tenemos un rango de contenidos de humedad óptimo de 8% a 10%, indistintamente de la energía de compactación que finalmente determina el peso específico máximo.



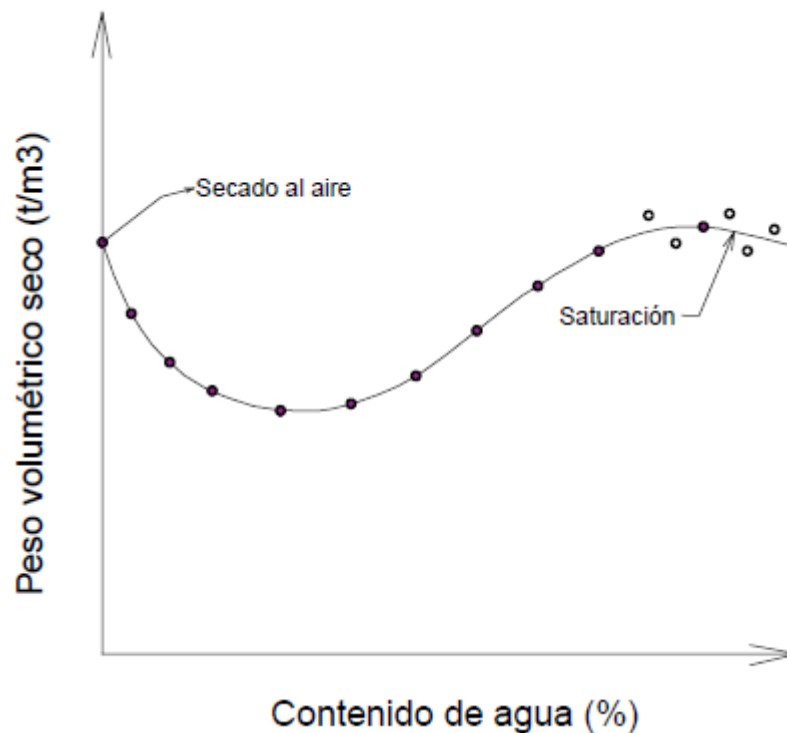
4.3. Discusión

Las pruebas de compactación realizadas en laboratorio presentan anomalías al momento de hacer el cálculo y obtención de la curva de compactación, estas presentas pueden ser por errores humanos o por error de un equipo mal calibrado, pero al verificar que las variables anteriores estén bien ejecutadas y equipos calibrados, a pesar de este escenario nos encontremos con estas anomalías una de ellas la formación de doble pico en algunos de estos casos no bien formados, como lo sucedido en las curvas de compactación de las muestras M-1, M-4, M-5 y M-7 se eligió estas muestras para realizar el análisis de este comportamiento de la formación de doble pico, pese que alguna de estas muestras no es arena limosa pero si se encuentra en la clasificación de suelos friccionantes o granulares.

Dicho análisis se realizó en laboratorio, tratando de demostrar o encontrar el ensayo de compactación que nos ayude a determinar el fenómeno de la formación de doble pico en estos suelos, los que se hicieron con las muestras: M-2, M-3, M-6 y M-8, el cual se inició teniendo como antecedente la siguiente figura.

Figura 31

Curva de compactación obtenida en arenas limpias y gravas arenosas.



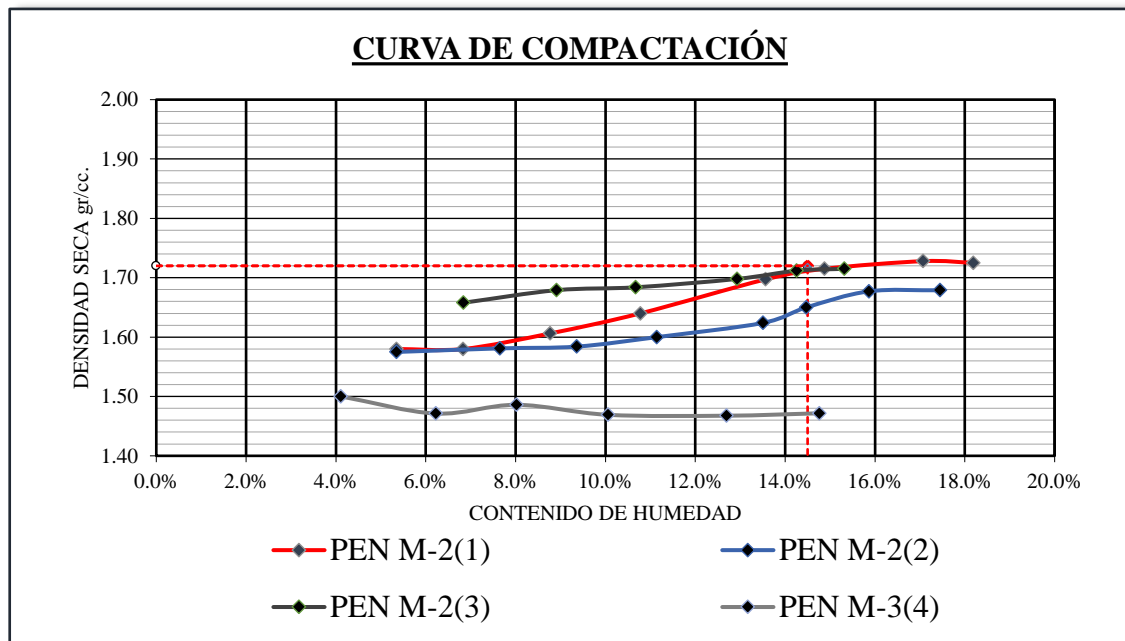
Fuente: Rico & del Castillo en su libro, la Ingeniería de suelos en las vías terrestres (2000), en una de sus referencias indican que la curva fue obtenida en pruebas dinámicas en arenas limpias y gravas arenosas, y por lado MJ Mendoza en su libro enfoque recientes en la compactación de suelos (1992), también lo coloca como referencia indicando que la curva de compactación fue obtenida en pruebas por impacto en arenas limpias y gravas arenosas.

Es así que dicha grafica nos indica dos métodos muy distintos para replicarlo en laboratorio es por ello que se desarrollaron los métodos de compactación propuestos en la metodología obteniéndose las siguientes curvas de compactación.

Primeramente, se realizó ensayos de Proctor estándar normal (PEN), la cual se asemeja a una prueba dinámica en laboratorio, a las siguientes muestras M-2 y M-3, dentro de los cuales se realizaron 4 ensayos tres de ellas de una misma zona de estudio

Figura 32

Curvas de compactación a pruebas PEN.



En la figura podemos notar que no se logró formar una curva con doble pico a excepción de la M-3, que tiene cierto comportamiento similar pero no definido.

Se realizó 6 especímenes compactados en algunos casos hasta de 8, cada uno equidistando en un promedio de 2% de humedad como indica la norma de forma creciente.

No se notan puntos en la parte izquierda de la curva de compactación ya que estos especímenes al momento de compactarse con un contenido de humedad menor a 4% tiende a inestabilizarse al igual que un fluido, ocasionando el desparramamiento a las paredes



del molde de compactación, este efecto se causa a al momento de compactar con un martillo tubular de 50mm de diámetro. De área de impacto momento.

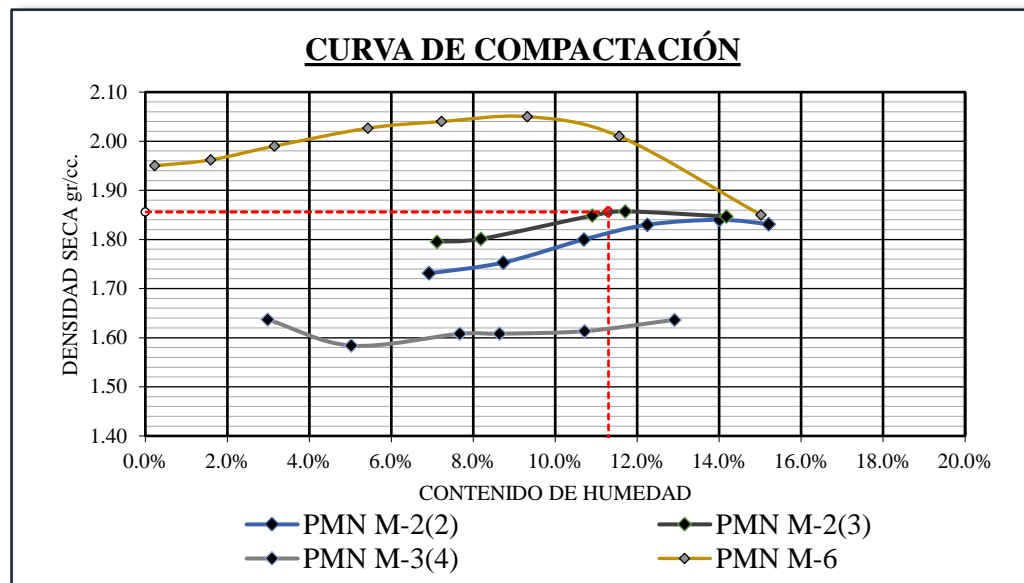
No se notan puntos más allá de la parte derecha de la curva de compactación ya que los especímenes preparados para la compactación en esta zona están sobre saturados, esto no permite la trabajabilidad al momento del desarrollo de la compactación, puesto que el material se pega al martillo tubular de 50 mm. De diámetro, debido al exceso de agua el que no permite el compactado, así como también produce el escurrimiento de agua en la base del molde de compactación durante la prueba.

En la figura, la M-3(4) pertenece a una muestra de arena limpia con menos del 5% pasante a la malla N°200 (75 μ m.). las causas por las que no se logró obtener la curva de doble pico bien definido es al cuidado que debemos tener al momento de realizar las pruebas o simplemente no haber realizado el método de compactación adecuado.

Seguidamente se realizaron los ensayos de Proctor modificado normal (PMN), la cual se asemeja a una prueba dinámica en laboratorio, pero a una mayor energía de compactación, a las siguientes muestras M-2, M-3 y M-6.

Figura 33

Curvas de compactación a pruebas PMN.



En la figura podemos notar que no se logró formar una curva con doble pico a excepción de la M-3, que tiene cierto comportamiento al anterior método el cual no está bien definido.

Se realizaron 6 especímenes de compactación, en algunos casos hasta de 8, cada uno equidistando en un promedio de 2% de humedad como indica la norma de forma creciente.

De la igual forma que el método anterior no se notan puntos en la parte izquierda de la curva de compactación ya que estos especímenes al momento de compactarse con un contenido de humedad menor a 4% tiende a inestabilizarse al igual que un fluido, ocasionando el desparramamiento, con mayor intensidad en este caso, a las paredes del molde de compactación, este efecto se causa a al momento de compactar con un martillo tubular de 50mm de diámetro. De área de impacto momento.



No se notan puntos más allá de la parte derecha de la curva de compactación ya que los especímenes preparados para la compactación en esta zona están sobre saturados, esto no permite la trabajabilidad al momento del desarrollo de la compactación, puesto que el material se pega al martillo tubular de 50 mm. De diámetro, debido al exceso de agua el que no permite el compactado, así como también produce el escurrimiento de agua en la base del molde de compactación durante la prueba.

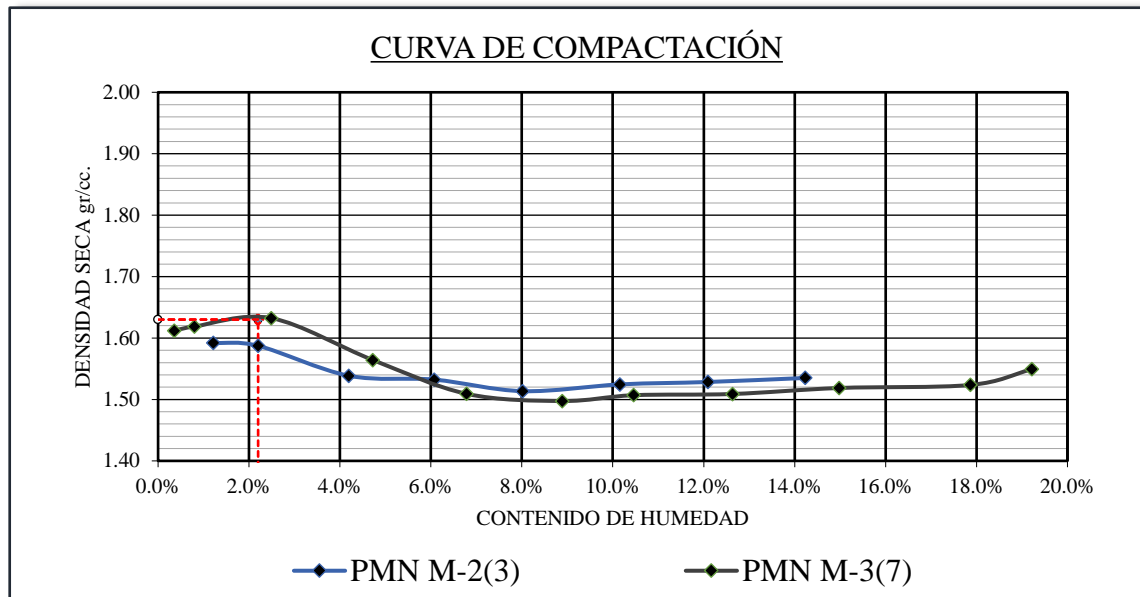
En la figura, la M-3(4) pertenece a una muestra de arena limpia con menos del 5% pasante a la malla N°200 (75 μ m.). Una de las causas por las que no se logró obtener la curva de doble pico bien definido es al cuidado que debemos tener al momento de realizar las pruebas o simplemente no haber realizado el método de compactación adecuado.

También podemos notar que la muestra M-6 tiene una forma definida con un solo pico máximo debido a que contiene más del 12% pasante al tamiz N°200 (75 μ m.). y el método de compactación dinámico con el martillo tubular de 50mm ayuda a un mejor reacomodo de partículas debido a la cohesión que la fracción fina le proporciona es por ello que podemos aumentar puntos a la izquierda ya que no existe desparramiento, mas no podemos aumentar puntos a la derecha puesto que existe el fenómeno de acolchonamiento por el incremento de la relación de vacíos en los especímenes compactados.

Seguidamente realizamos los Proctor estándar con un martillo de mecanismo de impulsión automática (PEM) con un diámetro de impacto de 100mm. Con la finalidad de confinar el área de compactación y evitar el fluido de la muestra durante el proceso de compactación resultados fueron los siguientes.

Figura 34

Curvas de compactación a pruebas PEM.



En la figura podemos notar que no se logró formar una curva con doble pico a excepción de la M-3, que tiende a formar dos picos definidos.

Se realizaron 8 especímenes de compactación en la muestra M-2, y se realizaron 11 especímenes de compactación para la muestra M-3, cada uno equidistando en un promedio de 2% de humedad como indica la norma de forma creciente.

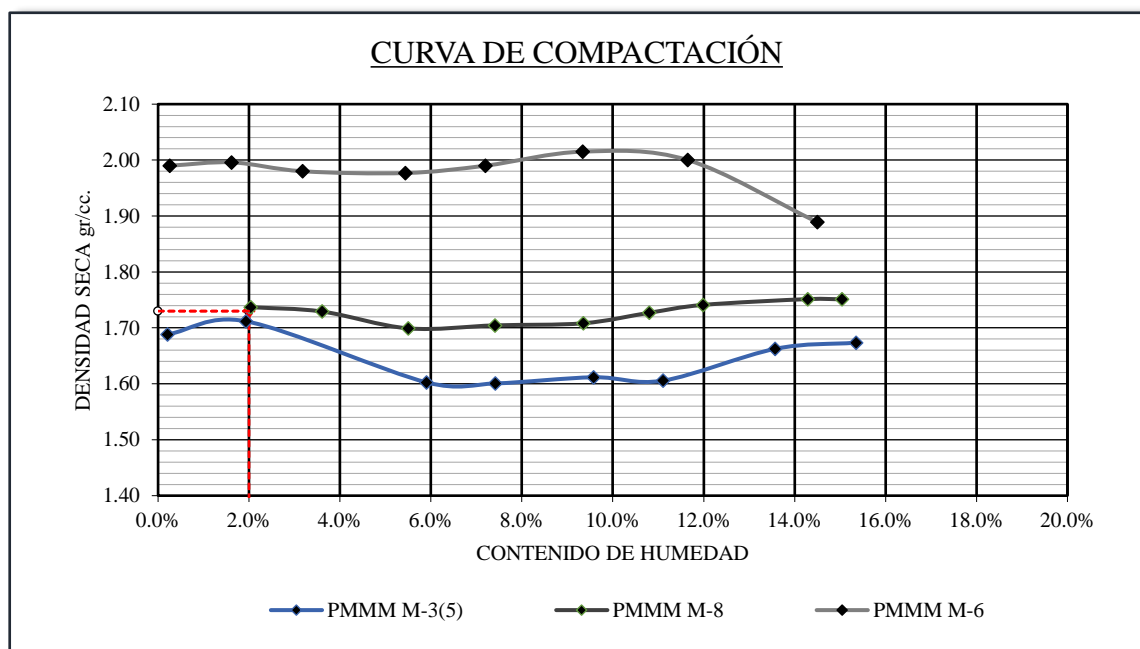
A diferencia de los métodos anteriores se pudo realizar puntos en la parte izquierda de la curva de compactación ya que el método de compactación confina el material con una sobrecarga previa al desarrollo de la compactación esto hace que el material este confinado dentro del molde de compactación y esto hace que podamos compactar especímenes que tienden a inestabilizarse al igual que un fluido en este tipo de suelos, con contenidos de humedad menores al 4%, esto gracias a un martillo de compactación con una barra guía por la cual desliza la masa a compactar con un diámetro de 100mm de diámetro. De área de impacto momento.

No se notan puntos más allá de la parte derecha de la curva de compactación ya que los especímenes preparados para la compactación en esta zona están sobre saturados, esto no permite la trabajabilidad al momento del desarrollo de la compactación, puesto que el material drena el agua en exceso en la base y en la parte superior del molde durante la prueba de compactación, esto debido a que el martillo cubre el área de compactado.

Seguidamente se procedió a realizar la prueba de compactación Proctor modificado con un martillo de impacto de 100mm de diámetro.

Figura 35

Curvas de compactación a pruebas PMMM.



En la figura podemos notar que si se logró formación de una curva de compactación con doble pico bien definidas.

Se realizaron 8 especímenes de compactación en la muestra M-3, 9 especímenes de la muestra M-8 y 8 de la muestra M-6, cada uno equidistando en un promedio de 2% de humedad como indica la norma de forma creciente.



A diferencia de los métodos anteriores se pudo realizar puntos en la parte izquierda de la curva de compactación ya que el método de compactación confina el material con una sobrecarga previa al desarrollo de la prueba de compactación esto hace que el material este confinado dentro del molde de compactación y esto hace que podamos compactar especímenes que tienden a inestabilizarse al igual que un fluido en este tipo de suelos, con contenidos de humedad menores al 4%, esto gracias a un martillo de compactación con una barra guía por la cual desliza la masa y compacta con un diámetro de 100mm de diámetro. De área de impacto momento.

No se notan puntos más allá de la parte derecha de la curva de compactación ya que los especímenes preparados para la compactación en esta zona están sobre saturados, esto no permite la trabajabilidad al momento del desarrollo de la compactación, puesto que el material drena el agua en exceso en la base y en la parte superior del molde durante la prueba de compactación, esto debido a que el martillo cubre el área de compactado. A diferencia de los otros materiales este no tendera a bajar con el grafico en referencia este se mantendrá en el segundo pico puesto que al agregar más agua simplemente este drenará y el material se compactará de la misma forma, ya que la energía de compactación aplicada es la misma.

Mostrados los métodos de compactación y por el proceso que se tuvo que seguir para que finalmente obtengamos las curvas de compactación de doble pico y así poder explicar los fenómenos que ocurren a través de estas.

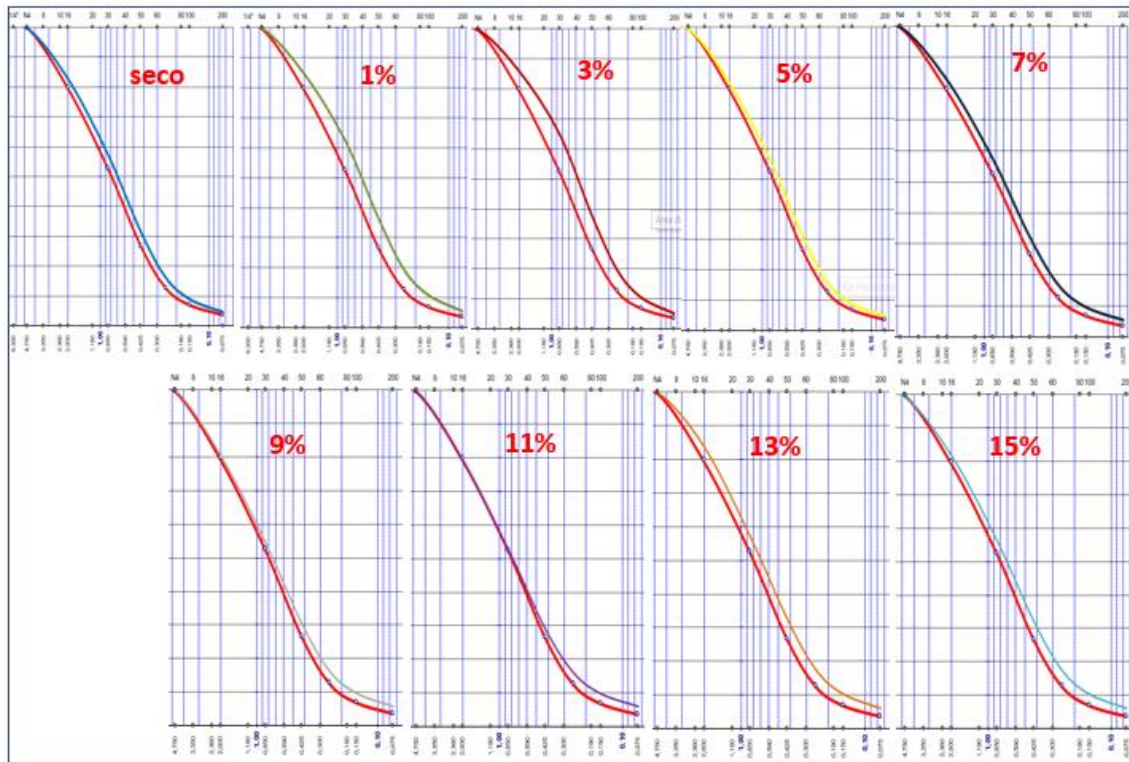
a) Comprobación de la formación del primer pico

Según Ortiz, et al. (2013). El fenómeno del crushing el que comprende al rompimiento y desintegración de las partículas del suelo, se da a cualquier presión que sufra el suelo es por ello se desarrolló dicha comprobación de dicho fenómeno por medio

de curvas de granulometría y porcentajes pasantes a la malla N°200(75 μ m.), en cada espécimen luego de haber realizado la prueba de compactación que logro formar la curva de doble pico. Los resultados muestran los siguiente.

Figura 36

Porcentaje de rompimiento después de las pruebas de compactación.



En la figura se muestra la curva de análisis granulométrico base que esta de color rojo y la curva granulométrica de cada espécimen después de la prueba de compactación, se hizo el grafico individual para cada espécimen para visualizar las franjas, dichas franjas representan material fracturado o desintegrado durante la prueba.

Notamos que en los puntos donde se forma el primer pico de la curva de compactación ocurre un mayor rompimiento y/o desintegración, debido al mayor esfuerzo que existe entre particular ya que el material no se encuentra saturado en su totalidad. Esto no sucede con el material secado al aire el cual es el primer punto ya que



todo material pétreo a compactar necesariamente debe contener cierta cantidad de agua en su composición para que facilite el rompimiento de estas partículas, esto ayuda a la densificación del material en esta etapa de la curva de compactación.

Vemos que seguido de estos puntos la curva de compactación cae esto debido a que las partículas interiormente se encuentran lubricadas progresivamente y esta lubricación hace que las partículas resbalen entre ellas y no se logre la densificación del material.

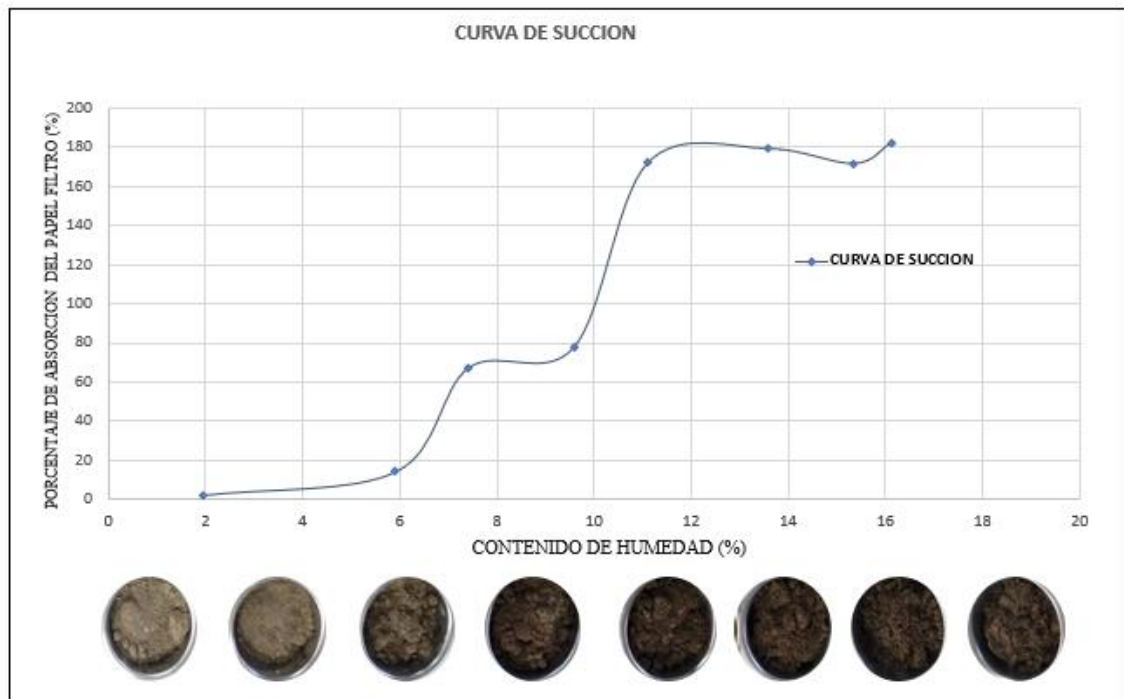
Nuevamente notamos una crecida de la curva de compactación y esto hace que se genere el segundo pico, esto debido a que el agua incrementada llena los espacios vacíos al llenar estos espacios vacíos este hace que al momento de la compactación incremente la presión de poro, dicha presión ayuda nuevamente a densificar el material ya que este confina el material con fuerza que provoca el rompimiento y desintegración de las partículas de suelo, la presión de poro con la densificación del material van en aumento lo que provoca la formación del segundo pico, como anteriormente se había mencionado este pico no tendería a bajar, ya que al incremento de agua y la presión de compactación simplemente este la dejara drenar fuera del espécimen compactado, por la granulometría de estos suelos y la propiedad permeable de estos.

b) Comprobación de la formación del segundo pico

Para demostrar que la formación del segundo pico está asociada al incremento excesivo de agua se realizó la prueba de succión por medio de un papel filtro durante el desarrollo de las pruebas de compactación de la muestra M-3.

Figura 37

Curva de absorción del papel filtro en la muestra M-3.



En la siguiente figura podemos notar el incremento de la succión por parte del papel filtro a causa del excesivo incremento agua a la muestra de suelo. Las tonalidades del suelo nos indican cuán saturado está el suelo de acuerdo al porcentaje de agua designado antes de realizar la prueba.

Queda demostrado que los 4 puntos en crecida y formación del segundo pico en la curva de compactación se encuentran con exceso de agua en la muestra de suelo, sin embargo, este crece y se densifica por causa del incremento de la presión de poros, parte del agua que no aporta a este efecto de presión a las partículas del suelo, simplemente las deja drenar a través del espécimen en el proceso de compactación.

c) Criterio final

Demostrados los fenómenos en la formación de doble pico en la curva de compactación, nos lleva a tomar una decisión, tomaremos como contenido de humedad



optima, la humedad en la que se genera el primer pico donde se logra una mayor densificación y una mayor desintegración y rompimiento de las partículas de suelo. De los suelos areno limosos de la región de Puno, a un bajo contenido de humedad, sin embargo, no vamos dejar sin utilidad a la humedad obtenida en la formación del segundo pico, ya que este tiene otra utilidad y aplicación, puesto que en este punto el material se densifica de igual forma o mejor aún de acuerdo con el método de compactación.

d) Optimización de la compactación

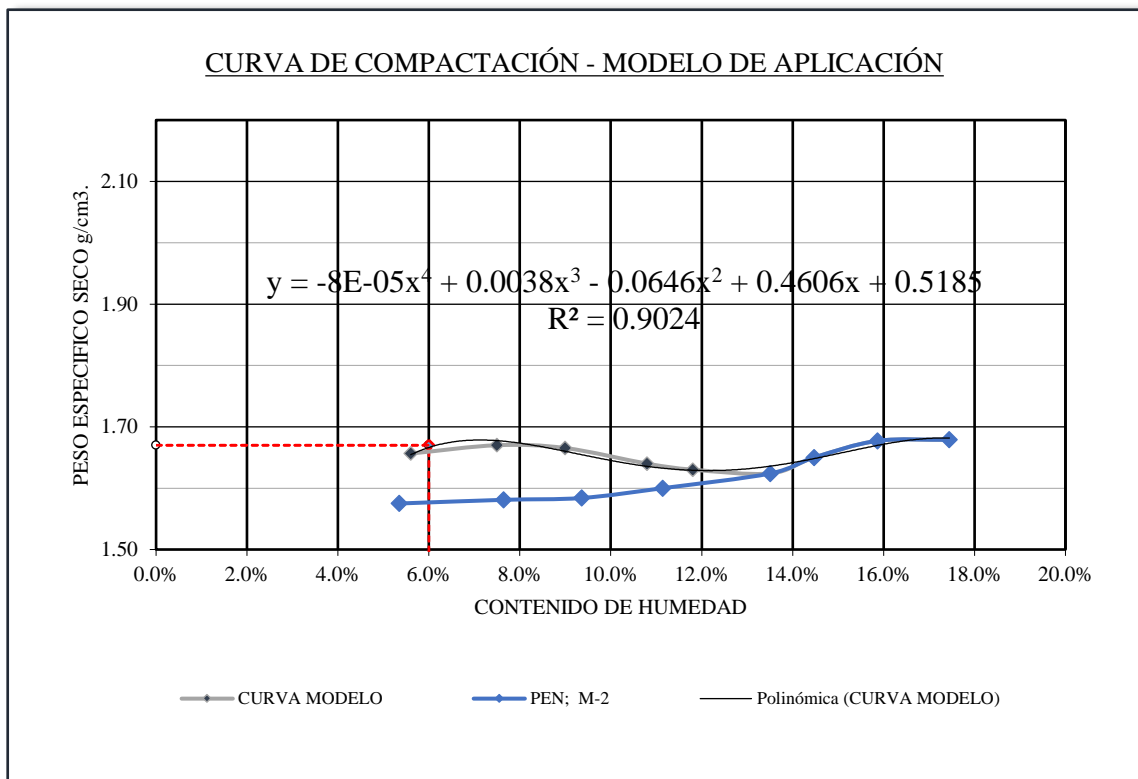
Para realizar la prueba de optimización de la compactación, se tomó como referencia las pruebas de compactación realizadas a la muestra M-2, específicamente la prueba PEN, la que tiene la formación de un solo pico, induciremos a la formación del segundo pico, mediante la aproximación de un modelo matemático que cuenta con las características de una curva de compactación de doble pico real, realizaremos la aproximación para determinar el contenido de humedad formado en el primer pico el cual fue el criterio adoptado por esta investigación.

e) Aproximación numérica a una curva de doble pico.

aproximaremos los 5 puntos en crecida del segundo pico a un modelo numérico que nos ayude a determinar la humedad en el primer pico.

Figura 38

Aproximación numérica a una curva de compactación de doble pico.



se hizo la aproximación numérica a una curva de compactación de doble pico, el cual se asemeja a una curva polinómica de cuarto Grado, la que tendrá la siguiente forma.

$$Y = AX^4 + BX^3 + CX^2 + DX + E$$

Donde:

Y: el peso específico seco

X: contenido de humedad en porcentaje

A,B,C,D y E: constantes que se determinarán con 5 puntos de la curva de compactación.

Ingresando mínimamente 5 puntos de la curva de compactación de la formación del segundo pico se determinará la ecuación de aproximación

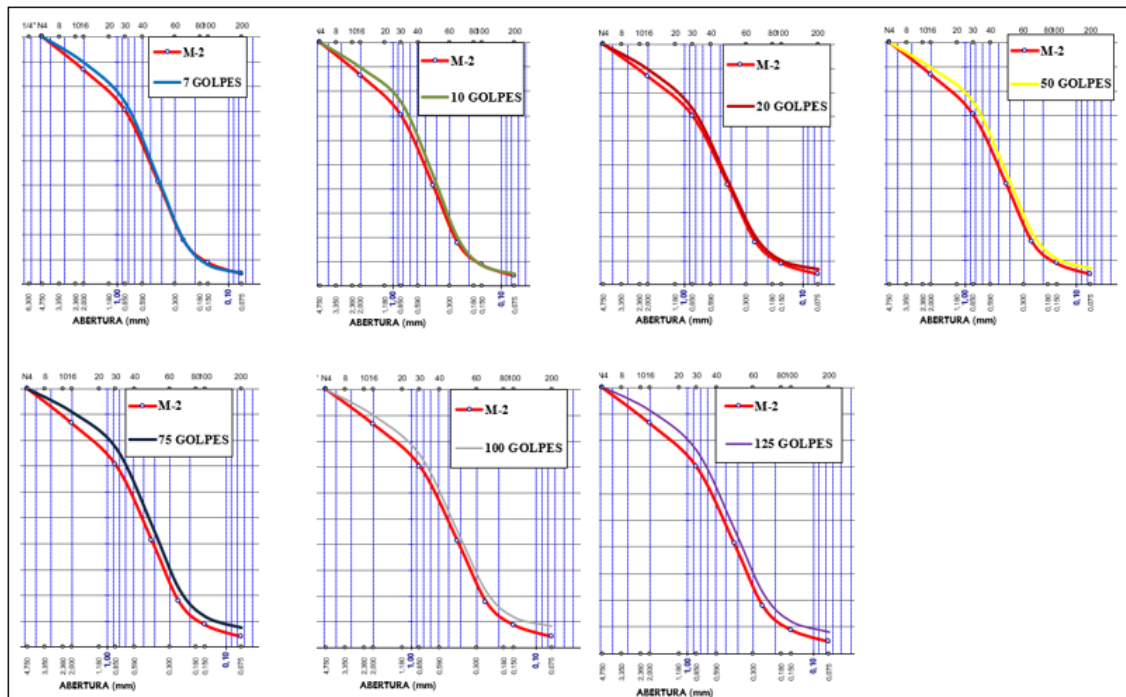
$$y = -8E-05x^4 + 0,0038x^3 - 0,0646x^2 + 0,4606x + 0,5185$$

obtenida la ecuación de compactación se determinará el peso específico en la formación del primer pico y el contenido de humedad al cual se forma este.

Seguidamente hicimos un análisis de las partículas que logran fracturarse al final de la prueba haciendo un análisis de las franjas formadas por la granulometría inicial, y la que cae uno de los especímenes.

Figura 39

Curvas de partimiento y desintegración durante las pruebas de optimización.



Podemos apreciar que 7 a 20 golpes del matillo de compactación no se aprecia una franja significativa, a partir de los 50 golpes podemos ver que aumenta la franja de variación de tamaño de partículas con mayor magnitud.



V. CONCLUSIONES

La formación de doble pico en una curva compactación depende de la granulometría del material y la energía de compactación aplicada, en las pruebas de compactación, lo cual nos ayuda a determinar un peso específico seco máximo a una humedad óptima la cual se da en la formación del primer pico de la curva de compactación ya que esta densificación se da a causa del rompimiento y desintegración de las partículas de las arenas limosas en la Región de Puno.

De acuerdo con el criterio adoptado, tomar el contenido de humedad óptimo y peso específico máximo en la formación del primer pico obtuvimos los siguientes resultados, los que representaremos en un rango de valores para arenas limosas de la Región de Puno. Para arenas finas con $<5\%$, pasante a la malla N°200 ($75\mu\text{m}$) tenemos un rango de contenidos de humedad óptimo de 1.2% a 4% , y para arena limosas con, $>5\%$ - $<12\%$, pasante a la malla N°200 ($75\mu\text{m}$) tenemos un rango de contenidos de humedad óptimo de 4% a 6% , para arenas limosas con $>12\%$, pasante a la malla N°200 ($75\mu\text{m}$) tenemos un rango de contenidos de humedad óptimo de 8% a 10% .

La energía de compactación es un factor que influye directamente a las pruebas de compactación, ya que está relacionado directamente en la formación del segundo pico. Al mismo tiempo está influido por la presión de poros en un espacio confinado, ambas presiones actúan en conjunto, y logran un rompimiento de las partículas, logrando la densificación del material saturado en su totalidad, dicho contenido de humedad tiene otras aplicaciones en obras civiles.

Existen consideraciones adicionales en la elección del peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptimo en las arenas limosas de la región de Puno, una de ellas fue el método de compactación a utilizar, que nos ayudó a entender mejor el



fenómeno de doble pico en la curva de compactación, y así poder elegir un criterio en la elección de humedad óptima y peso específico seco máximo.



VI. RECOMENDACIONES

Se recomendaría realizar más ensayos de compactación en grava mal graduadas para ver el comportamiento de doble pico en la curva de compactación y realizar el análisis para determinar el peso específico seco máximo y contenido de humedad óptimo teniendo como referencia el fenómeno de fracturación de partículas durante la compactación.

Se recomienda realizar el método de compactación por impacto con un martillo de compactación en toda la cara del espécimen, haciendo el uso del método C de la prueba de laboratorio Proctor modificado ASTM D1557-12.

Si no se llegase a formar el primer pico con el material estudiado se recomienda hacer uso de un modelo matemático, cuya ecuación aproxime mediante la formación de doble pico, teniendo como referencia la formación del segundo pico.

Se recomiendo realizar otros métodos de compactación, así como el método como la máquina de compactación giratoria, y así realizar una mejora en la optimización de la compactación en laboratorio de estos suelos areno limosos, realizando gráficos del número de golpes vs el grado, y así tener un cuadro de equivalencia más próximas a la realidad en campo.

Se recomienda realizar ensayos indirectos como el método del cono de arena ASTM D1556, para determinar la densidad en un tramo de prueba para realizar gráficos de numero de pasadas vs grado de compactación y así poder optimizar la compactación en este tipo de suelos.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ortiz & Bastidas, (2013). *estudio del fenómeno del crushing en el ensayo de compactación de un Proctor normal en la UCC seccional*. Tesis de pregrado de la Universidad Católica de Colombia.
- Rico & Del Castillo, (2000). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres carreteras, ferrocarriles y Aeropistas*. Volumen 1: editorial Limusa.
- Mendoza, MJ. (1992). *Enfoques recientes en la compactación de suelos*, Publicación técnica (33).
- Bowles, J. E. (1982). *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. México: ediciones Mc.Graw Hill.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: editorial Limusa.
- Camargo, A. M. & Rangel, M. A. (2014). *Comparación del peso seco y humedad optima en los ensayos de compactación para arenas limosas en la UPB seccional*. Tesis de pregrado de la Universidad Pontificia Boliviana.
- Juárez, E. & Rico, A. (2010). *Mecánica de Suelos (Vol. I)*. México: editorial Limusa.
- Lambe, T., & Whitman, R. (1969). *Mecánica de Suelos*. John Wiley.
- Barrea, M. Garnica, P. & Martínez, F. (2004). *Influencia de la Succión en Cambios Volumétricos de un suelo compacto*. Nueva línea de investigación de suelos no saturados, desarrollado en el laboratorio de la coordinación de la infraestructura del instituto mexicano de transportes.
- Rico Rodríguez, Alfonso & Del Castillo Mejía, Hermilio (1992). *Consideraciones sobre compactación de Suelos en obras de Infraestructura de transporte*. Instituto



mexicano del transporte.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1973). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*.

Barcelona, España: editorial El ateneo.

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

Editorial Limusa-Wiley.

Jorajuria, D. (2004). *Resistencia Mecánica Del Suelo Como Parámetro Mecánico Del*

Suelo. Buenos Aires: Editorial Lumen.

Yepes, V. (2004). *Compactación Dinámica Y Control Con Ensayos De Penetración*

Dinámica. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Badillo, J. (2014). *Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: Editorial Limusa.

Escario, U. (1989). *Terraplenes y pedraplenes*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y

Transporte.

Escobar, C. (2007). *Mecánica de Suelos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Georges, A. (2004). *Compactación en carreteras y aeropuertos*. Barcelona: Técnicos

Asociados.

González, J. C. (2013). *Incidencia de Resultados del ensayo Proctor Modificado por la*

Influencia del Clima. México: UNAM.

López, W. (2011). slideshare. Recuperado el 15 de 09 de 2016, de

<http://es.slideshare.net/wlopezalmarza/compactacion-de-suelos>.

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

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



Coruña.

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

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

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

Buenos Aires: FIUBA.

Rico Rodríguez, Hermilo Del Castillo (2000). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres carreteras, ferrocarriles y Aeropistas*.

ASTM D-1557-12. (2012). *Proctor Modificado*. West Conshohocken: ASTM.



ANEXOS

ANEXO 1: UBICACIÓN Y GEOLOGIA

ANEXO 2: PANEL FOTOGRAFICO

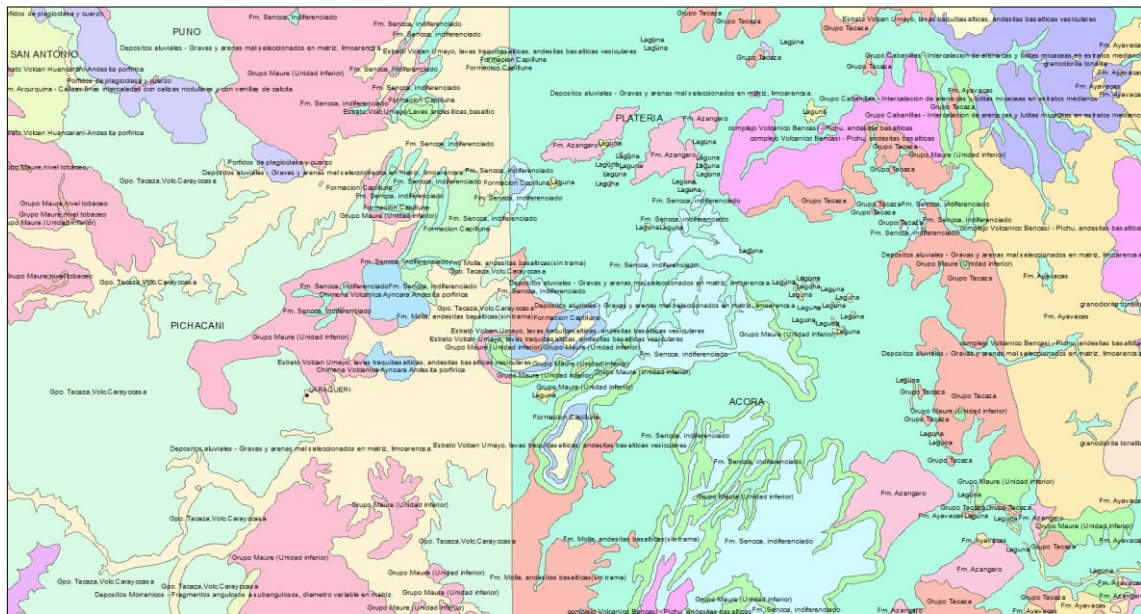
ANEXO 3: ENSAYOS DEL LABORATORIO

UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

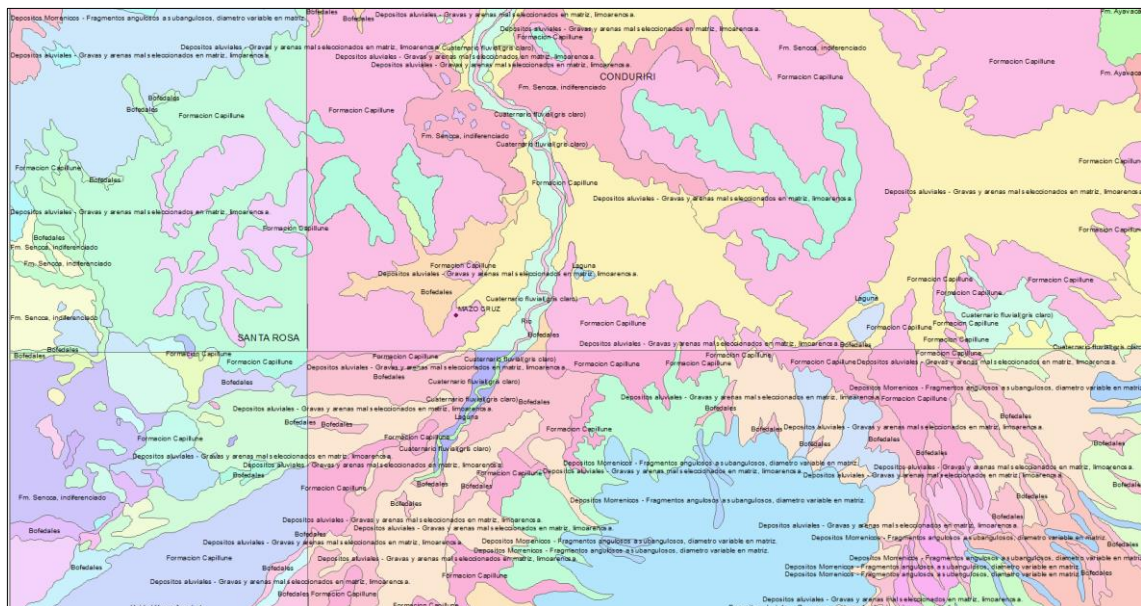


Zona de estudio: suelos de la Región de Puno

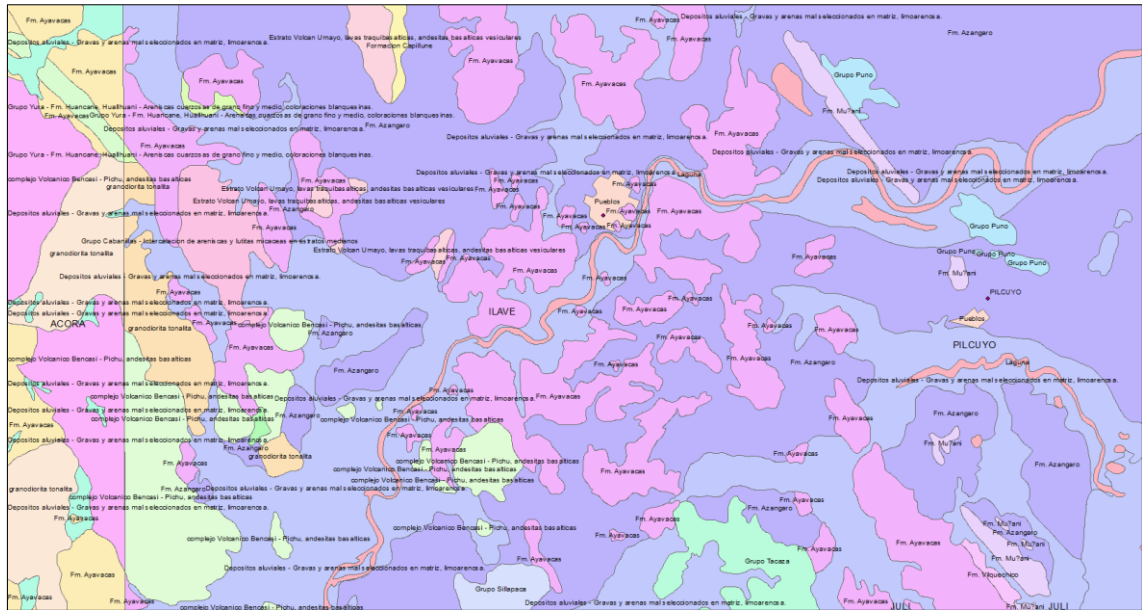
GEOLOGIA DE LA PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS



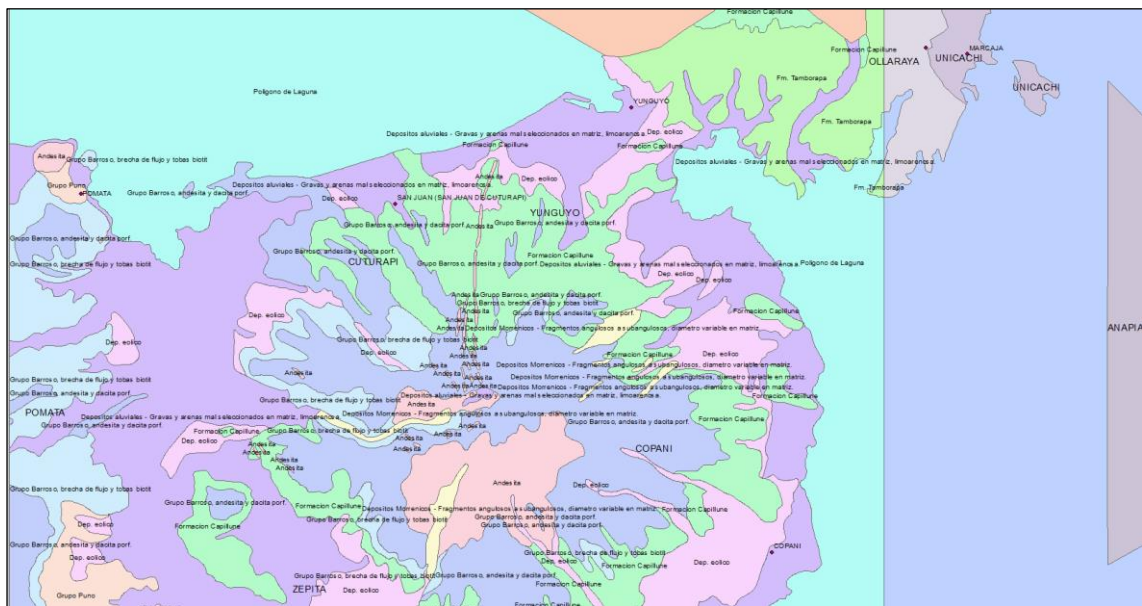
Zona – provincia de Puno, Amantani, Laraqueri y Esquilache



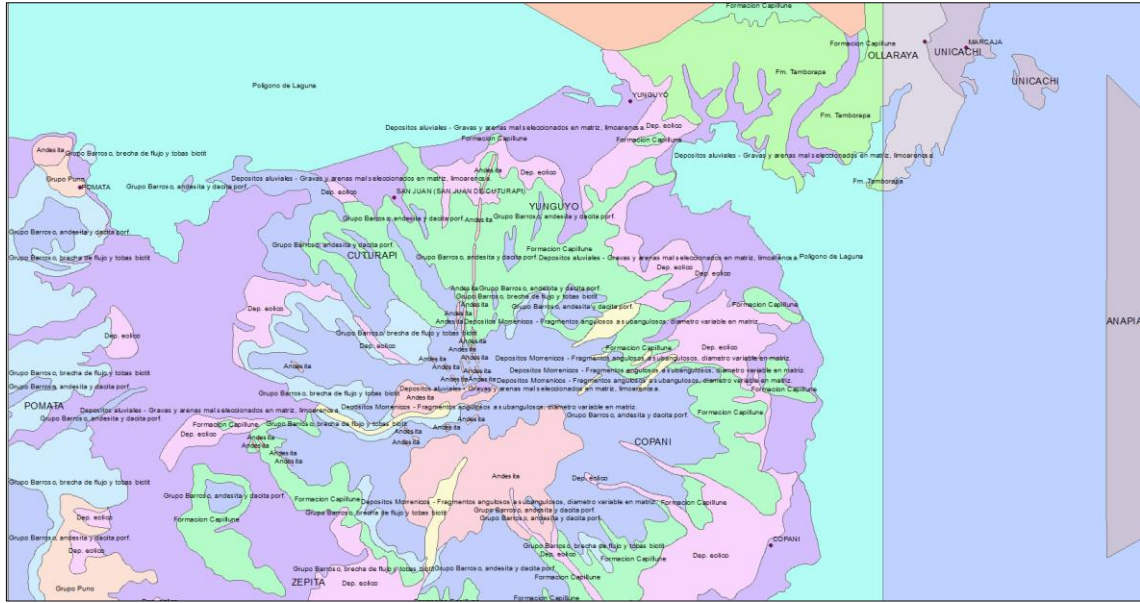
Zona – distrito de Mazocruz



Zona – distrito de Illave



Zona – distrito de Yunguyo



Zona – distrito de San Antón

PANEL FOTOGRAFICO

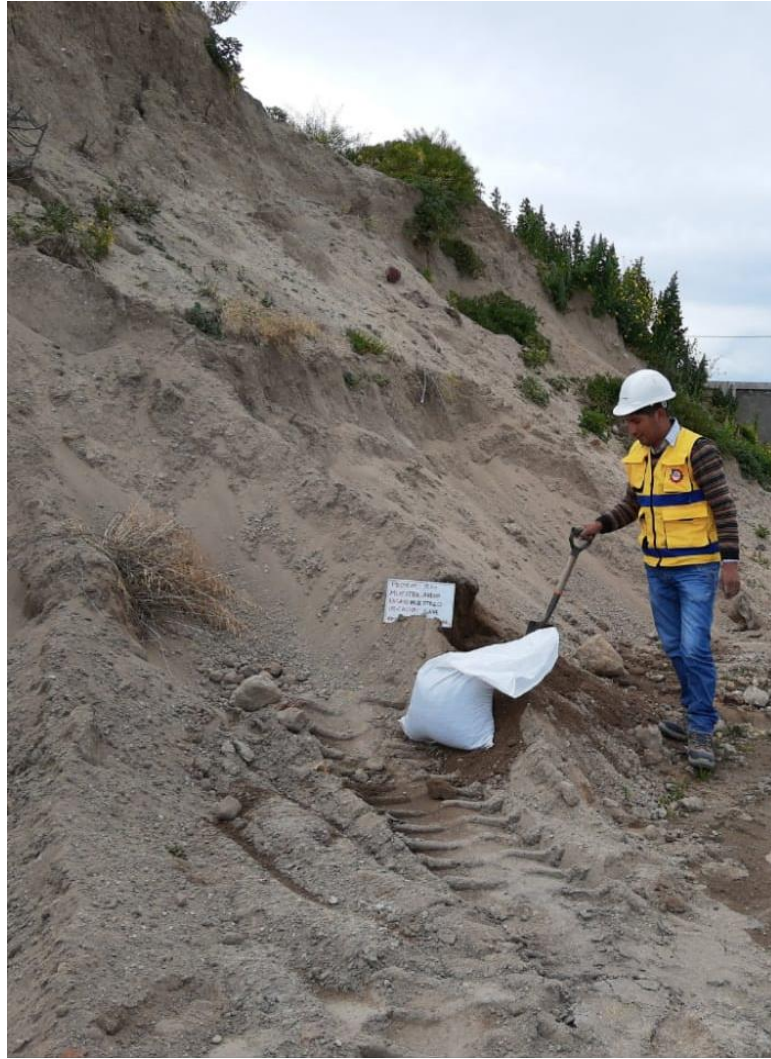
MUESTREO EN CAMPO



Extracción de muestras en campo CATERAS M-4, M-5, M-6 Y M-7



Extracción de muestras en campo CANTERAS M-3



Extracción de muestras en campo CANTERA M-1

ENSAYOS DE LABORATORIO



CUARTEO EN LABORATORIO



SELECCIÓN DE MUESTRAS PARA EL ANALISIS GRANULOMETRICO



ANALISIS GRANULOMETRICO



MATERIALES PROCTOR ESTANDAR



PREPARACION DE MUESTRAS PARA ENSAYO DE COMPACTACION



MUESTRA A DIFERENTES HUMEDADES



SATURACION DE MUESTRAS DURASTE 24HORAS A MAS



COMPACTACION MANUAL



COMPACTACION CON UN EQUIPO AUTOMATICO



ENSAYOS DE LABORATORIO