

Análisis de Determinación del peso Específico seco Máximo y Humedad Optima en los Ensayos de Compactación para las Arenas Limosas en la Región de Puno – Perú

Mariano Roberto Garcia Loayza¹

romagalo55@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9022-1680>

Universidad Nacional del Altiplano Puno
Perú

Jhonatan Hinojosa Mamani

jhinojosa@unap.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-4571-2453>

Universidad Nacional del Altiplano Puno
Perú

Deywid Wagner Marron Machaca

dmarron@unap.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0005-5122-0331>

Universidad Nacional del Altiplano Puno
Perú

Enoc Edison Jilaja Carita

edisonjica@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7617-6967>

Universidad Nacional del Altiplano Puno
Perú

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 optima y peso específico seco máximo. El objetivo de esta investigación es conocer, en pruebas de compactación, cuan 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 optimo y peso específico seco máximo

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

¹ Autor principal.

Correspondencia: romagalo55@gmail.com

Analysis To Determine The Maximum Dry Specific Weight And Optimum Humidity In Compaction Tests For Silty Sands In The Puno Region - Peru

ABSTRACT

It is known that soil compaction is one of the essential activities in the execution of civil works, for which laboratory tests are carried out. In compaction tests, when it comes to silty sands in the Puno region, the influence of compaction energy and soil granulometry on the formation of a double peak of the compaction curve and location of optimum moisture 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 made 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 double peak in the curve of compaction. The results that were obtained indicate that the compaction parameters depend on the gradation and compaction energy. In conclusion, based on the phenomena demonstrated, a criterion was taken to determine a parameter of optimal moisture content and maximum dry unit weight.

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

INTRODUCCIÓN

El desafío en las nuevas construcciones radica en la utilización de materiales respetuosos con el medio ambiente, lo que impulsa la investigación de prácticas más sostenibles en la industria de la construcción, teniendo en cuenta tanto la calidad de los materiales como la competitividad en términos de costos (Sornoza-Tituano et al., 2022), la falta de conocimiento puede resultar en consecuencias negativas tanto en términos económicos como de tiempo tanto para aquellos que buscan invertir como para quienes ejecutan la inversión. Cáceres et al., (2022) sostienen y enfatizan en el proceso de planificación y ejecución de proyectos de ingeniería civil, la relevancia de garantizar una evaluación precisa de la estabilidad del suelo sobre el cual se sustentará la estructura, con el fin de prevenir problemas significativos que puedan surgir a lo largo de la vida útil de la obra. A ello se suma la existencia de problemas causados por la escorrentía excesiva de aguas pluviales, así como la carencia de sistemas de drenaje en muchas ciudades, inundaciones repentinas en áreas urbanas, contaminación de mantos acuíferos, escases de agua, aumento de agua contaminada y afectaciones ambientales que la ingeniería especializada en la adecuación de la compactación del suelo para construcciones (Yala-López et al., 2022).

La compactación de suelos granulares se relaciona con la calidad de los métodos de preparación geotécnica, y este fenómeno se hace evidente en la curva de compactación de estos suelos para abordar desafíos relacionados con situaciones del mundo real que son altamente variables y difíciles de prever (Valderrama et al., 2020). Un ejemplo de esto es la predicción de la durabilidad de una estructura, una tarea que es inherentemente complicada debido a la presencia de numerosos cambios internos y externos, en su mayoría de naturaleza aleatoria (LLaccho et al., 2023). Además, hay factores que están sujetos a diversas condiciones, como la ubicación geográfica y la calidad de los materiales, lo que hace que esta predicción sea aún más desafiante. “La disparidad en estos factores hace necesario que se estandaricen metodologías de análisis y diseño de este tipo de fundaciones” (Useche et al., 2022, p. 38).

Por otro lado, Camargo & Rangel (2014) afirma que en los diversos ensayos de compactación llevados a cabo, existe una tendencia en la que a medida que aumenta el peso específico seco máximo, disminuye la humedad óptima. Esta tendencia posiblemente se debe al hecho de que

cuando un suelo presenta una alta relación de vacíos (es menos denso), tiene una mayor capacidad para retener agua. Según Barrera et al. (2004), La mineralogía presente en una determinada masa de suelo puede ser tan diversa como la geología de la región de la que proviene. Pérez (2014) indica que el propósito de llevar a cabo pruebas de compactación en el laboratorio es generar la curva de compactación, la cual es única para cada tipo de suelo sometido a análisis. Estas curvas de compactación se obtienen al representar gráficamente el contenido de humedad del suelo en el eje horizontal, expresado en porcentaje, frente al peso específico seco en el eje vertical.

No obstante, esta diversidad está influenciada tanto por su composición original como por factores climáticos, como la temperatura, la cantidad de lluvia y la composición de las fases líquida y gaseosa en contacto con el suelo (González, 2013; Nagarajan et al., 2020). Usualmente, la curva típica muestra un punto destacado que ilustra la conexión entre la humedad y el peso específico seco máximo, facilitando la identificación de las condiciones ideales de compactación. No obstante, en suelos granulares, esta curva a veces presenta dos puntos destacados en lugar de uno, lo que genera incertidumbre en cuanto a cómo establecer el valor óptimo del peso específico seco y la humedad para este tipo de suelos (Mur & Balbuena, 2014). En ese contexto, Mendoza (1992) traduce la obtención de la curva de compactación en pruebas dinámicas en arenas limpias y gravas arenosas plantea un interrogante importante. Estos métodos de obtención de la curva son evidentemente diferentes, y esto plantea desafíos en la replicación de los resultados en un entorno de laboratorio (Sagués, 2008). Dado este desafío, se desarrollaron métodos de compactación específicos como parte de la metodología de investigación (Flores et al., 2022). La creación de estas nuevas curvas de compactación busca abordar las diferencias en los métodos utilizados en las fuentes citadas y proporcionar una base más sólida y coherente para futuros estudios y aplicaciones prácticas en ingeniería de suelos en vías terrestres (Castellanos & Rodríguez, 2022). Esta adaptación a las condiciones locales y las necesidades específicas de investigación es esencial para garantizar la fiabilidad y aplicabilidad de los resultados obtenidos en el laboratorio a situaciones del mundo real.

En tal sentido se identifica la presencia del "crushing", un fenómeno que Kuwajina et al. (2009) describen como la fractura de partículas debido a la aplicación constante de cargas lo

suficientemente altas como para romper las cadenas generadas durante la compactación. Esto se manifiesta como una sobrecompactación del suelo y es más evidente en suelos granulares, agravándose debido a factores como la forma angular, la disposición, la composición mineralógica de las partículas del suelo, la relación de vacíos, la presencia de agua, entre otros. Según Parano (2012), este fenómeno se refiere al trabajo mecánico aplicado a una masa de suelo que reorienta las partículas y mejora las propiedades mecánicas de los suelos y materiales estabilizados.

Esto motiva la necesidad de realizar un análisis más detallado para determinar estos parámetros en los ensayos de compactación de las arenas limosas en la región de Puno. La variación en los ensayos de compactación revela que a medida que aumenta el peso específico seco máximo, disminuye la humedad óptima (Camargo & Rangel, 2014). Esta tendencia podría explicarse por la probabilidad de que cuando un suelo presenta una relación de vacíos elevada (lo que indica una menor densidad), posee una capacidad superior para retener agua. Es por esa razón que la presente travesía de indagación tiene como objetivo: conocer la influencia de la aplicación de la energía compactación a los parámetros de densidad máxima seca y contenido de humedad óptima en las arenas limosas de dos tramos de humedad óptima en la Región de Puno

METODOLOGÍA

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.

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. 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 (Torres, 1995; Marron, 2022).

Tabla 1

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

Figura 1

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.

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.

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.

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 (Marron, 2022).

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 (Marron, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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

Tamices	Porcentaje pasante (%)					
	in	mm	M-1	M-2	M-3	M-4
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		70,53
	1/2"	12,50	68,01	97,87		62,66
	3/8"	9,50	61,61	95,12		57,63
	1/4"	6,30	52,28	90,55	100	50,64
	Nº 4	4,75	48,17	87,28	99,73	47,20
	Nº 8	2,36	37,65	78,41	91,45	38,98
	Nº 10	2,00	35,15	75,88	87,06	36,72
	Nº 20	0,85	24,83	62,14	54,11	21,34
Fino	Nº 40	0,425	16,45	37,55	20,9	6,5
	Nº 80	0,180	8,79	11,96	4,68	1,30
	Nº 100	0,150	8,16	10,73	3,31	1,02
	Nº 200	0,075	5,36	6,98	1,22	0,47

La Tabla proporciona información detallada sobre la granulometría de las muestras de suelo M-1, M-2, M-3 y M-4. M-1 es una grava mal graduada con limos (GP-GM) que muestra un 5.36% de partículas que pasan a través de la malla Nº 200 (75µm), clasificándose según AASHTO como A-1-a (0). Por otro lado, M-2 es una arena mal graduada con limos (SP-SM) con un 6.98% de partículas pasantes a través de la malla Nº 200 (75µm) y se clasifica como A-1-b (0). M-3 es una arena mal graduada (SP) con solo un 1.22% de partículas pasantes a través de la malla Nº 200 (75µm), y su clasificación AASHTO es A-1-b (0). Finalmente, M-4 es una grava mal graduada

(GP) con un mínimo 0.47% de partículas que pasan a través de la malla N° 200 (75µm) y se clasifica como A-1-a (0). Estos datos son cruciales para comprender las características y la composición de los suelos en la región, lo que será fundamental para la planificación y ejecución de proyectos de construcción o ingeniería civil en la zona.

Tabla 3

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

Tamices		Porcentaje pasante (%)				
	in	Mm	M-5	M-6	M-7	M-8
Grueso	3"	75,00				
	2 1/2"	63,00				
	2"	50,00		100	100	
	1 1/2"	37,50	100,00	86,65	98,18	
	1"	25,00	91,74	79,51	97,77	
	3/4"	19,00	84,48	70,44	95,69	
	1/2"	12,50	82,55	62,45	89,76	
	3/8"	9,50	80,85	57,02	82,28	
	1/4"	6,30	79,23	49,81	67,07	100,00
	N° 4	4,75	78,80	45,57	57,66	99,73
Fino	N° 8	2,36	76,79	36,93	40,86	84,02
	N° 10	2,00	76,51	35,59	37,75	79,53
	N° 20	0,85	75,57	30,29	27,06	52,51
	N° 40	0,425	74,19	23,66	20,61	26,61
	N° 80	0,180	64,86	19,55	14,99	9,25
	N° 100	0,150	,61,71	18,29	14,39	6,86
	N° 200	0,075	43,25	13,34	11,68	3,65

La Tabla presenta resultados significativos de los análisis de las muestras M-5, M-6, M-7 y M-8 en cuanto a su granulometría. La muestra M-5 se identifica como arena limosa (SM) con un

notable 43.25% de partículas que pasan a través de la malla N° 200 (75µm) y se clasifica según AASHTO como A-4 (2). M-6 corresponde a grava limosa (GM) con un 13.34% de partículas que pasan por la misma malla y se clasifica como A-1-a (0). M-7, catalogada como arena bien graduada con limo (SW-SM), muestra un 11.68% de partículas pasantes y se clasifica también como A-1-a (0). Por último, M-8 se considera arena mal graduada (SP) con un 3.65% de partículas pasantes y se clasifica como A-1-b (0). Estos resultados reflejan la variabilidad en la composición granulométrica de las muestras en la región y son esenciales para comprender las propiedades y la idoneidad de estos suelos para diferentes aplicaciones de ingeniería y construcción en la zona.

Tabla 4

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).

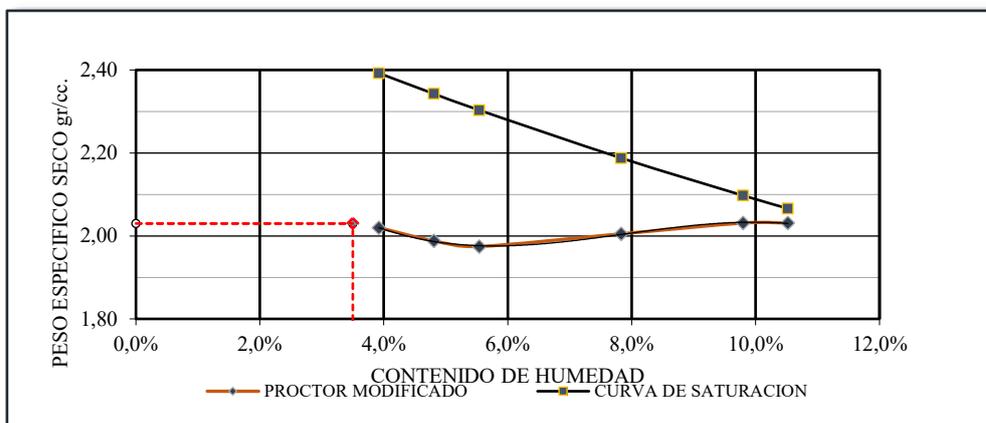
Resultados de los ensayos de Compactación

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 2

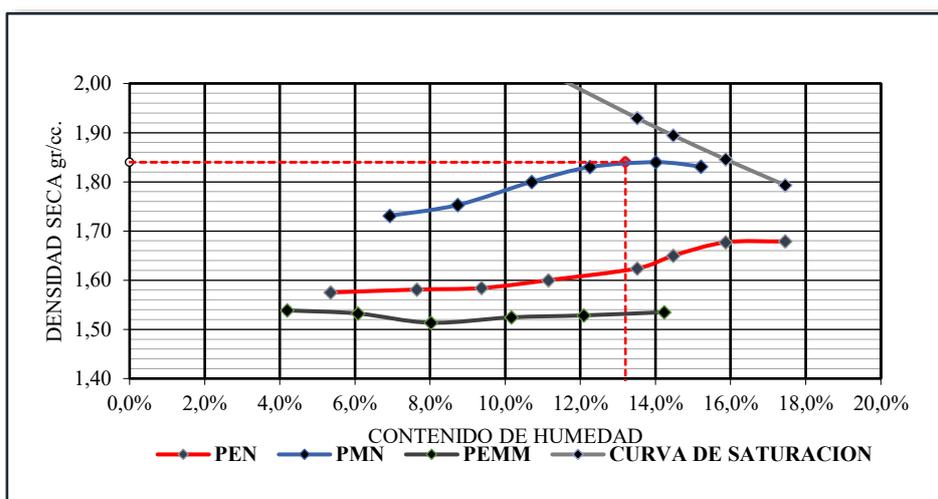
Curva de compactación de la muestra M-1



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 3

Curva de compactación de la muestra M-2

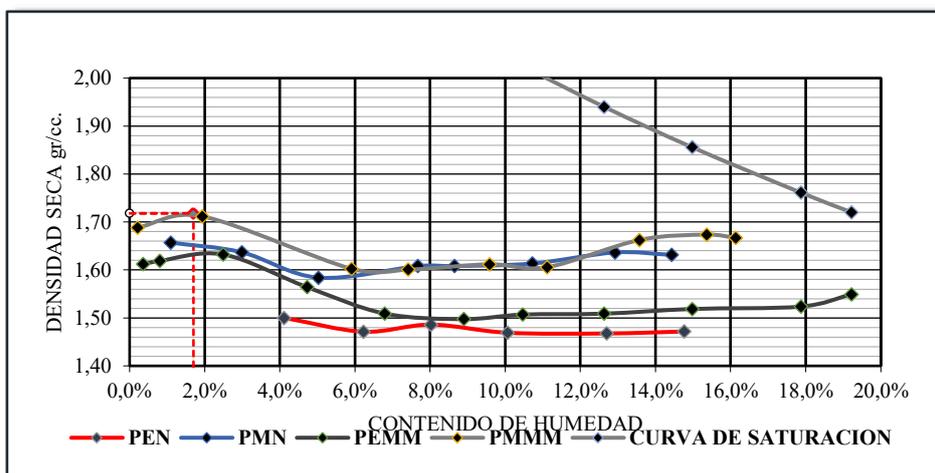


Se muestra la curva de compactación M-2 del distrito de Ilave – Puno, en la que se efectuó un Proctor estándar (PEN), Proctor Modificado (PMN) y un Proctor estándar con un martillo de área

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/cm^3 para un contenido de humedad de 15.8% . Del PMN podemos ver que obtenemos un peso específico seco máximo 1.85g/cm^3 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 4

Curva de compactación de la muestra M-3



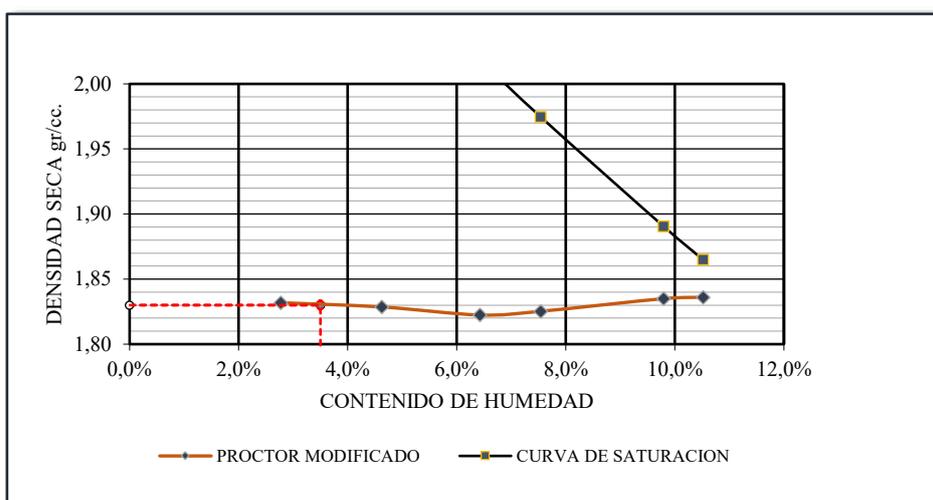
Se muestra la curva de compactación M-3 del distrito de Yunguyo – Puno, en la que se efectuó un Proctor estándar (PEN), Proctor Modificado (PMN), Proctor estándar con un martillo de área de impacto modificada (PEMM), y un Proctor modificado con un martillo de área de impacto modificada (PMMM): no podemos 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/cm³ 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/cm³ para un contenido de humedad de 2.0% en el primer pico y específico seco máximo de 1.67g/cm³ para un contenido de humedad de 15.30% en el segundo.

Figura 5

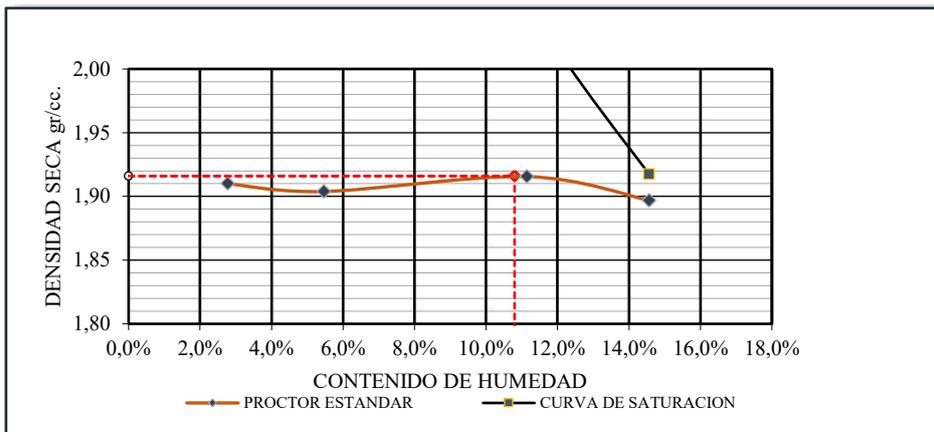
Curva de compactación de la muestra M-4



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 6

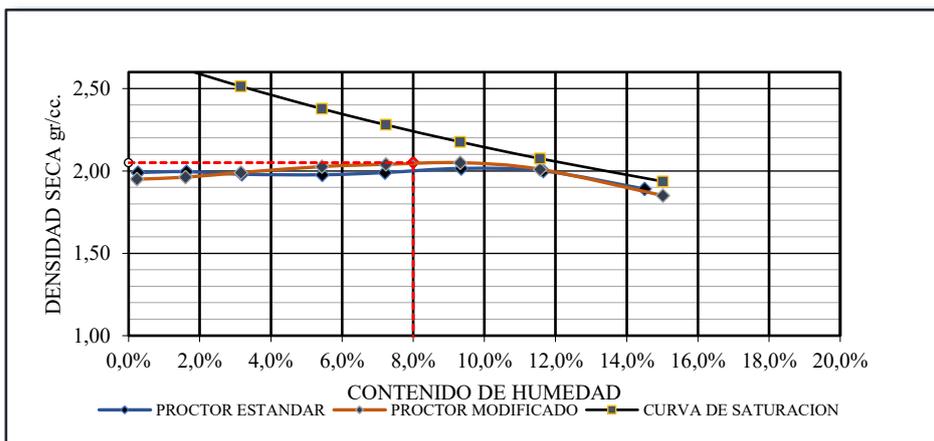
Curva de compactación de la muestra M-5



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 7

Curva de compactación de la muestra M-6

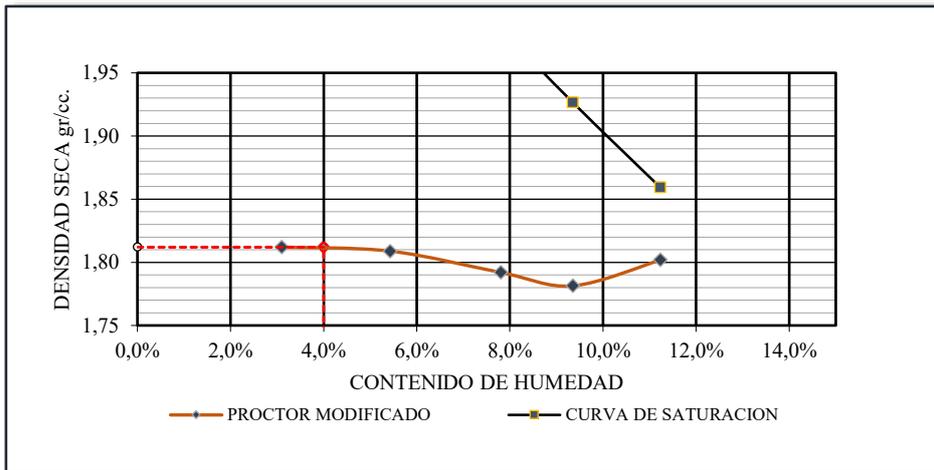


Se muestran los resultados de las pruebas de compactación realizadas a la muestra M-3 del distrito de San Antón – Puno, Proctor Modificado (PMN) y un Proctor modificado con un martillo de área de impacto modificada (PMMM): Del PMN no notamos una curva definida por un solo pico donde determinamos un peso específico seco máximo de 2.05g/cm³ 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/cm³ para un contenido de humedad de 1.60%, en el primer pico y un peso específico seco máximo de 2.05g/cm³ para un contenido de humedad de 9.30%.

Figura 8

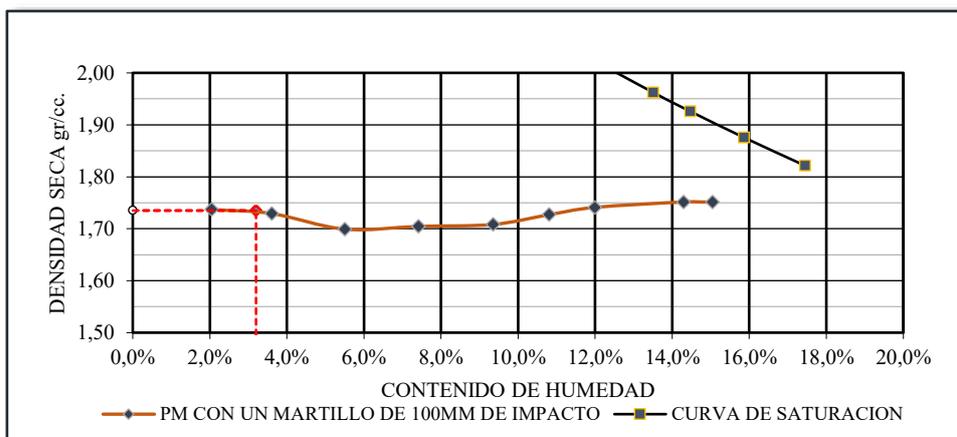
Curva de compactación de la muestra M-7



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 9

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%.

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 5

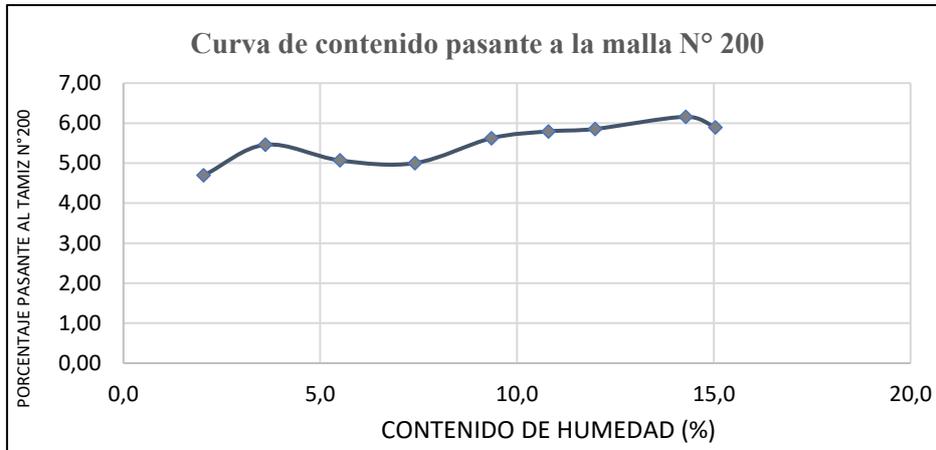
Análisis por Crushing mediante porcentajes pasantes al tamiz N°200(75µm)

Tamices		porcentaje pasante (%)										
in	mm	M-8	SECO	1%	3%	5%	7%	9%	11%	13%	15%	
GRUESO	3"	75,00										
	2"	50,00										
	1	37,50										
	1/2"											
	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	
	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
FINO	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	0,25	12,5	16,1	19,2	19,6	15,8	16,9	16,2	15,8	17,6	17,1
	N° 100	0,15	0 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	SP	SP	SP-	SP-	SP-	SP-	SP-	SP-	SW-	SP-	SP-
	SUCS			SM	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 10

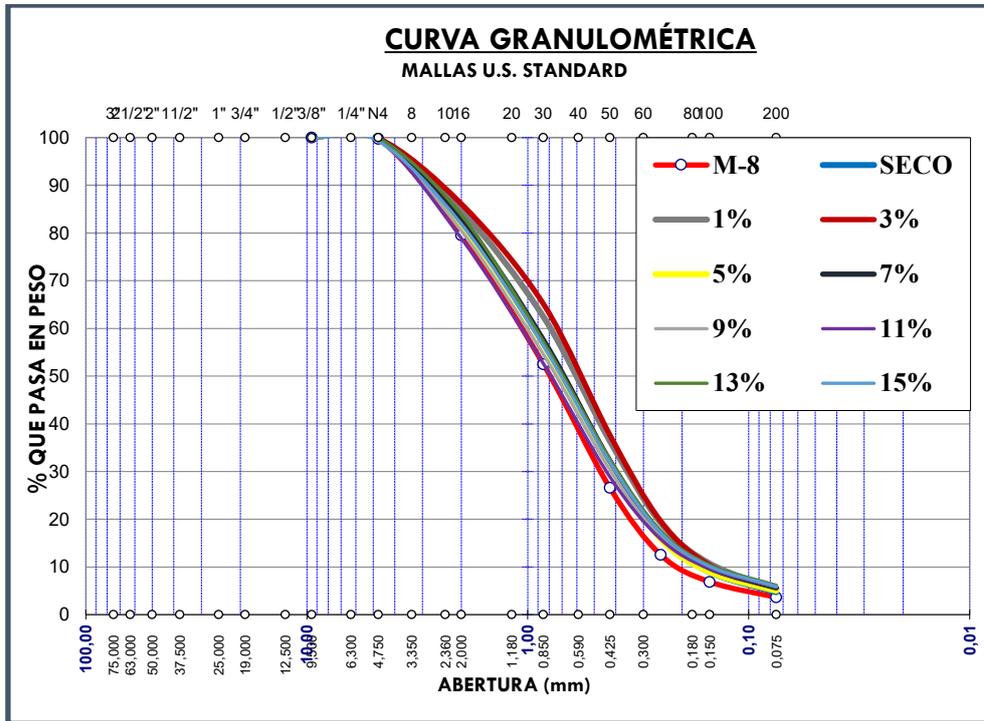
Curva de material fracturado durante el ensayo de compactación



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 11

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 que durante la compactación y este difiere de acuerdo al contenido de humedad que este posee en el proceso de compactación.

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 12

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

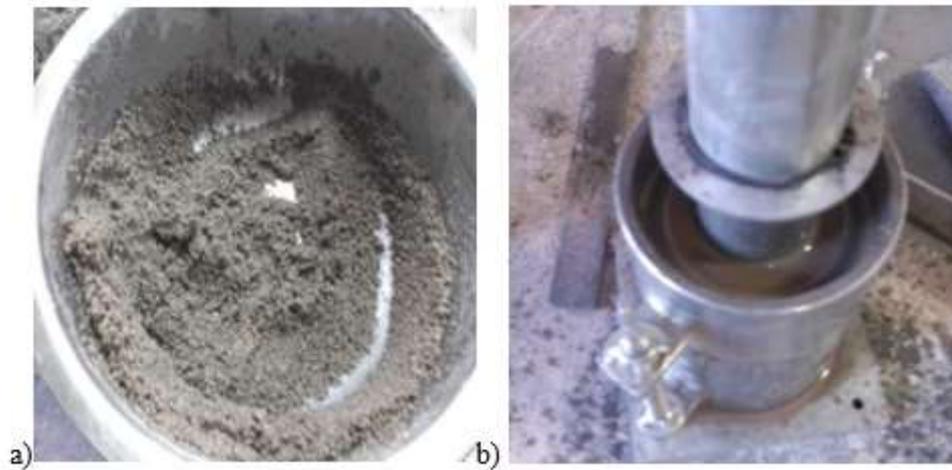


Fig. a) se visualiza que la arena aun es trabajable, sin embargo, en la Fig. b) podemos apreciar que una vez compactada por causa de la presión del martillo de compactación este espécimen drena el agua en exceso.

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 13

Ensayo del papel filtro

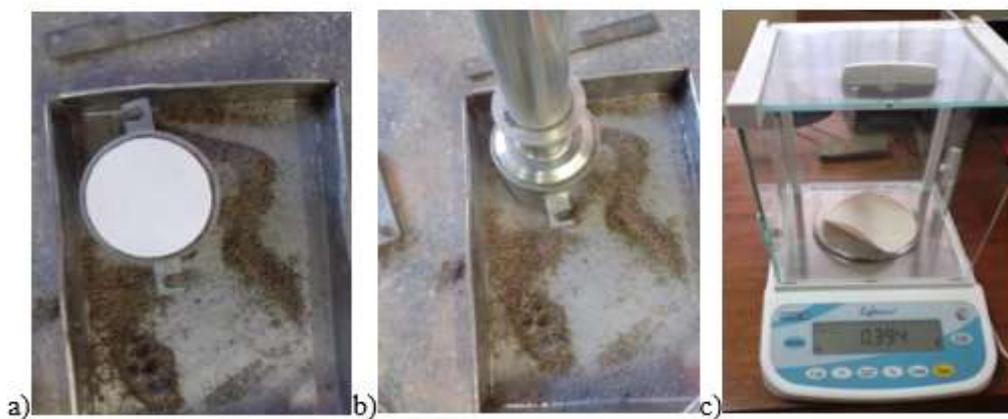


Fig. a) colocamos el papel filtro en la base testigo compactado inmediatamente terminado el proceso de compactación, Fig. b) colocado de la carga estática y Fig. c) pesado del papel en una balanza de precisión de 0.001g y 240g de capacidad.

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 14

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

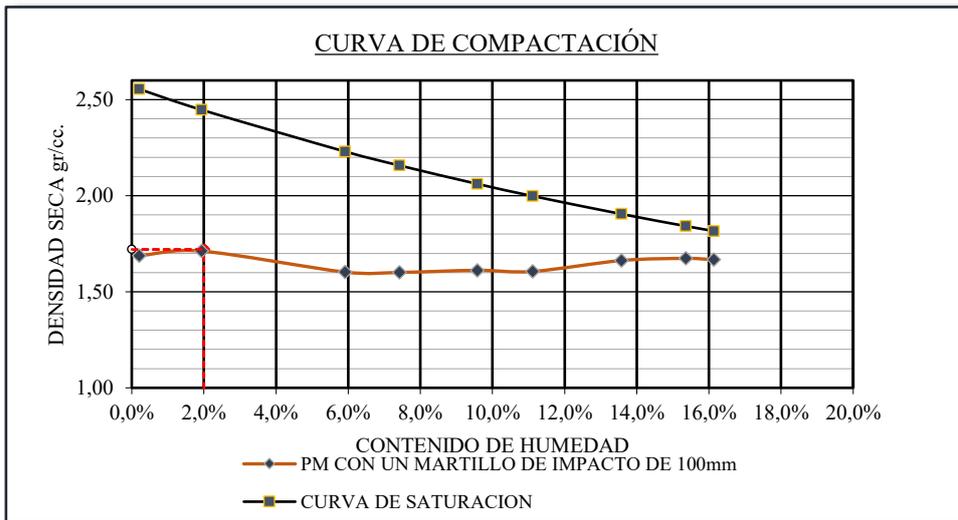


Figura 15

Resultado de las pruebas de succión



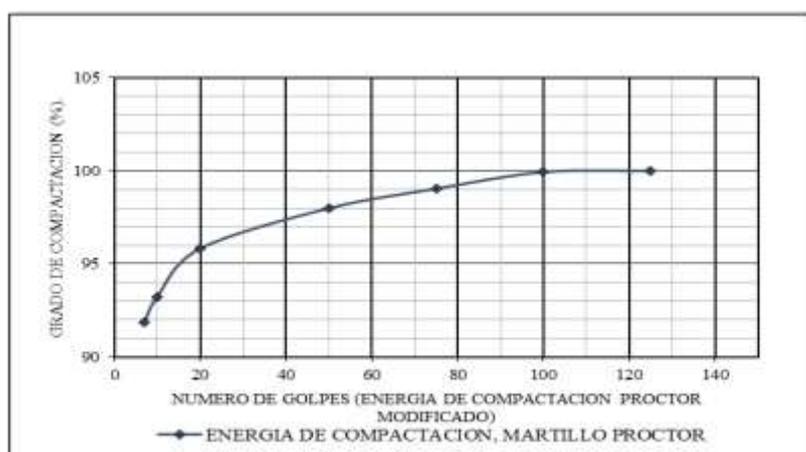
Resultados de la prueba de succión en el papel filtro y tonalidad del suelo, realizadas a la muestra M-3, En la siguiente figura podemos notar el incremento de la succión por parte del papel filtro a causa del incremento del contenido de humedad. Las tonalidades del suelo nos indican cuán saturado está el suelo de acuerdo al porcentaje de agua designado antes de realizar la prueba

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 16

Número de golpes vs grado de compactación, obtenida en Laboratorio

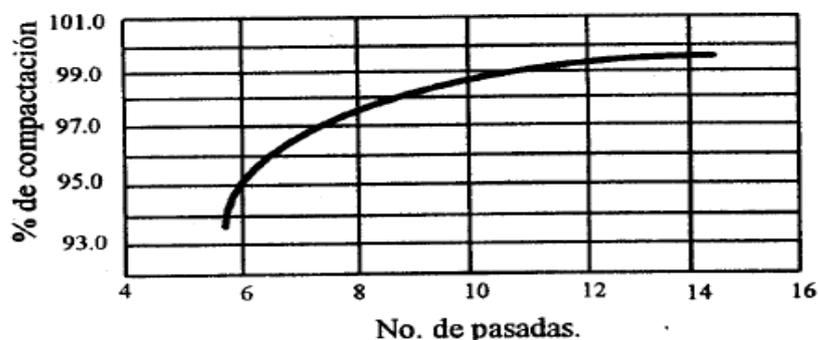


Fuente: Se tomó como referencia la ASTM D 7382-08

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 17

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 6

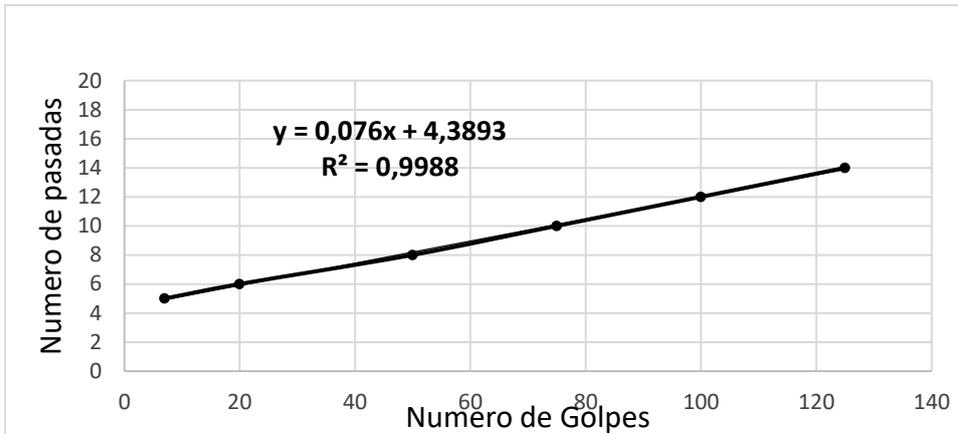
Equivalencia de compactación entre laboratorio y campo

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 18

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 7*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	
	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

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)

CONCLUSIONES

La formación de un doble pico en una curva de compactación depende de dos factores principales: la granulometría del material y la cantidad de energía de compactación aplicada durante las pruebas. Este fenómeno nos permite identificar un peso específico seco máximo junto con un nivel óptimo de humedad. Este último se encuentra en el primer pico de la curva de compactación, donde se produce una mayor densificación debido a la ruptura y desintegración de las partículas de arenas limosas en la Región de Puno.

En suelos con un contenido de humedad relativamente bajo, alrededor del 2% en promedio, se genera una mayor fricción entre las partículas, lo que aumenta su resistencia al esfuerzo cortante. Este efecto provoca la ruptura de las partículas y su reorganización durante el proceso de compactación, dando lugar a la primera pendiente en la curva de compactación en este tipo de suelos.

La cantidad de energía de compactación aplicada es un factor crítico, ya que sin ella no se lograría la densificación mediante la ruptura de las partículas en los suelos arenosos. Una energía de

compactación insuficiente no permite la formación del segundo pico en la curva de compactación, ya que este punto tiene aplicaciones específicas.

Además, la elección del peso específico seco máximo y del contenido de humedad óptimo en las arenas limosas de la Región de Puno está influenciada por consideraciones adicionales, como el método de compactación utilizado, que ayuda a comprender mejor el fenómeno del doble pico en la curva de compactación. Esto permite establecer criterios adecuados para determinar la humedad óptima y el peso específico seco máximo.

LISTA DE REFERENCIAS

- Barrera, M., Garnica, P., & Martínez, F. (2004). *Influencia de la Succión en Cambios Volumétricos de un suelo compacto* (Instituto).
<https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt238.pdf>
- Cáceres, L., Eslava, K., & Álvarez, E. (2022). Efecto de la aplicación de cáñamo en las propiedades de resistencia y resistividad de una arcilla. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 14(3), 8-23. <https://doi.org/10.22335/rict.v14i3.1650>
- Camargo, A., & Rangel, M. (2014). *Comparación del peso seco y humedad optima en los ensayos de compactación para arenas limosas en la UPB seccional*. Universidad Pontificia Boliviana.
- Castellanos, W., & Rodriguez, E. (2022). Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento. *Ingeniería*, 27(2), e16984. <https://doi.org/10.14483/23448393.16984>
- Flores, P., Gatica, A., Trinidad, D., & Sulca, V. (2022). Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria. *Investigatio*, 18, 37-52. <https://doi.org/10.31095/investigatio.2022.18.2>
- González, J. (2013). *Incidencia de Resultados del ensayo Proctor Modificado por la Influencia del Clima*. México (UNAM).
- K, K., M, H., & A, H. (2009). Pile bearing capacity factors and soil crushability. *J. Geotech. Geoenviron Engng*, 135(7), 901–913.
- LLaccho, P., Rivera, X., & Velásquez, M. (2023). Analysis of recovery strategies for construction

- and demolition waste in the last 10 years: a review of the scientific literature. *“Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development”*.
https://laccei.org/LACCEI2023-BuenosAires/papers/Contribution_530_a.pdf
- Marron, D. W. (2022). *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* [Universidad Nacional del Altiplano].
 file:///C:/Users/JHONATAN/Downloads/Marron_Machaca_Deywid_Wagner (1).pdf
- Mendoza, M. (1992). *Enfoques recientes en la compactación de suelos* (Instituto).
- Mur, M., & Balbuena, R. (2014). Compactación de un suelo argiudol típico por tráfico en un sistema de producción de forrajes. *Ciencia del suelo*, 32(1).
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672014000100001&script=sci_arttext&tlng=en
- Nagarajan, D., Raja Rajan, K., & Vijayakumar, T. (2020). *Review of Load Test Performance of Base Grouted Concrete Piles* (pp. 99-117). https://doi.org/10.1007/978-981-15-6090-3_8
- Parano, J. (2012). *Comparación de Suelos y Materiales Estabilizados*. México (UNAM).
- Pérez, J. (2014). *Introducción a la Mecánica de Suelos* (Universida).
- Sagués, P. (2008). *Propiedades de los Suelos Compactados* (FIUBA).
- Sornoza-Tituano, J., Zambrano-Sacón, R., Caballero-Giler, B., & Veliz-Párraga, J. (2022). Materiales alternativos empleados en la construcción de viviendas en Ecuador: una revisión. *Polo del Conocimiento*, 69(4).
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23857/pc.v7i4.3875>
- Torres, A. (1995). Metodología de la propuesta de grado en Ingeniería Civil. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 3. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1567>
- Useche, D., Aiassa, G., Arrua, P., & Eberhardt, M. (2022). Pilotes perforados con inyección de lechada cementicia en la punta: estudio de casos. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambien*, 49.
- Valderrama, F., Chávez, D., Muñoz, S., Tuesta-Monteza, V., & Mejía-Cabrera, H. (2020).

Importance of artificial neural networks in civil engineering: a systematic review of the literature. *ITECKNE*, 18(1). <https://doi.org/10.15332/iteckne.v18i1.2542>

Yala-López, J., Gil-Ahumada, E., Cornejo-Ramos, R., & Muñoz-Pérez, S. (2022). Metodologías empleadas para la producción de concreto permeable usando parcialmente materiales reciclados como agregados: una revisión literaria. *TecnoLógicas*, 25(53), e2080. <https://doi.org/10.22430/22565337.2080>