

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

**INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL, SUPERFICIE DE CONTACTO
Y ALTURA DE ALMACENAJE SOBRE EL ÁNGULO DE REPOSO, EN
MATERIALES GRANULARES**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. Priscila Maldonado Uria

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO

TACNA - PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS
“INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL, SUPERFICIE DE CONTACTO Y
ALTURA DE ALMACENAJE SOBRE EL ÁNGULO DE REPOSO, EN
MATERIALES GRANULARES”


Tesis sustentado y aprobado el 20 de noviembre del 2019, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE




Ing. Pio Ángel Coila Valdez

MIEMBRO – SECRETARIO



Mgr. Fredy Cleto Cabrera Olivera

MIEMBRO



MSc. Conrado G. Bedoya Jaén

ASESOR DE TESIS



Ph.D. Edwin Martin Pino Vargas

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Quiero empezar agradeciendo a Dios por las personas y oportunidades que pone en mi camino; a mis padres que me hicieron quien soy y me apoyaron en todo momento.

Así mismo, a mi asesor Ph.D Edwin Martin Pino Vargas, por su orientación, colaboración y pronta respuesta en todo momento del presente trabajo de tesis.

Va también mi agradecimiento al Ingeniero Christian Tisnado Valdivia por apoyarme con el espacio de laboratorio para los ensayos realizados; a mis amigos Carolyn Salazar García y Príncipe Tacora Villegas, por el apoyo en campo y trabajo experimental; a mi novio Reisell Rojas Pilco, quien con sus consejos y apoyo pude avanzar y seguir firme en mi camino.

Dedico este trabajo a mis padres, quienes con su esfuerzo, dedicación y abnegación me apoyaron y guiaron desde el inicio de mis estudios hasta hoy, para lograr poco a poco mis metas.

CONTENIDO

RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	14

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema	15
1.1.1 Antecedentes del problema	15
1.2 Formulación del problema	15
1.2.1 Problema general	15
1.2.2 Problemas específicos.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Limitaciones	4
1.5. Objetivos	4
1.5.1 Objetivo general	4
1.5.2 Objetivos específicos.....	4
1.6. Hipótesis	5
1.6.1 Hipótesis general.....	5
1.6.2 Hipótesis específicas	5
1.7. Variables	5

1.7.1. Variables independientes.....	5
1.7.2. Variables dependientes	6
1.7.3. Operacionalización de variables	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos	3
2.2. Marco teórico.....	8
2.2.1. Estado y comportamiento del suelo	8
2.2.2. Clasificación de suelos según SUCS	9
2.2.3. Método del embudo	12
2.2.4. Ensayo de corte directo en suelos	14
2.2.5. Ensayo de análisis granulométrico	16
2.2.6. Ensayo de contenido de humedad.....	18
2.2.7. Ensayo de límites de consistencia	18
2.2.8. Análisis estadísticos de datos.....	20
a) Media aritmética:	\bar{X}
.....	20
b) Desviación: d_i	20
c) La desviación estándar: σ	20
d) Diferencia de medias significativas.....	20

2.3. Marco Conceptual	21
2.3.1. Granulometría.....	21
2.3.2. Ángulo de reposo.....	21
2.3.3. Angulo de fricción	23
2.3.4. Ángulo de fricción crítico.....	23
2.3.5. Talud	24

CAPÍTULO III

MARCO METODOLOGICO

3.1. Trabajos de campo.....	8
3.2. Ensayos de laboratorio.....	8
3.3. Ángulo de reposo	8

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y CÁLCULOS

4.1. Granulometría	8
4.2 Límites de consistencia	8
4.3 Clasificación de suelos	8
4.4 Contenido de humedad	29
4.5 Gravedad específica.....	29
4.6 Ángulo de reposo	29

4.7 Corte directo.....	30
------------------------	----

CAPÍTULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados.....	29
5.1.1 Granulometría.....	29
5.1.2 Límites de consistencia	33
5.1.3 Clasificación de suelos	33
5.1.4 Contenido de humedad	34
5.1.5 Gravedad específica.....	34
5.1.6 Ángulo de reposo	35
5.1.7 Corte directo.....	36
5.2. Análisis de los factores de influencia	37
5.2.1 Influencia del material.....	37
5.2.2 Influencia de la rugosidad de las superficies de contacto.....	39
5.2.3 Influencia de la altura.....	42
5.3. Análisis de interrelaciones	45
5.3.1 Comparación del ángulo de reposo con el ángulo de fricción crítico	45
5.3.2 Análisis de comportamientos y patrones.....	47

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.....	51
Recomendaciones.....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXOS.....	58

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados del ensayo de corte directo	60
Anexo 2. Hoja resumen de resultados	76
Anexo 3. Galería fotográfica	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación SUCS para suelos gruesos	9
Tabla 2. Clasificación SUCS para suelos finos	10
Tabla 3. Valores del ángulo de fricción interno de los medio incoherentes	22
Tabla 4. Valores granulométricos de los materiales ensayos.....	29
Tabla 5. Propiedades físicas de los materiales granulares ensayados	34
Tabla 6. Valores promedios del ángulo de reposo, interactuando superficie, altura y tipo de material.....	35
Tabla 7. Parámetros de resistencia de los materiales ensayados	36
Tabla 8. Composición de material en relación a su ángulo de reposo calculado	37
Tabla 9. Valores promedio del ángulo de reposo en relación a las superficies por tipo de material	39
Tabla 10. Ángulo de reposo promedio en relación a la altura en cada tipo de material.....	42
Tabla 11. Masa utilizada en relación a la altura en cada tipo de material.....	44
Tabla 12. Comparación entre el ángulo de fricción crítico y ángulo de reposo...	45
Tabla 13. Prueba “T” para la diferencia de medias entre el ángulo de reposo y de fricción crítico.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Forma de la Pila.....	12
Figura 2. Método descrito por Train para determinar el ángulo de reposo.	13
Figura 3. Método para determinar el ángulo de reposo según Atkinson.....	13
Figura 4. Esquema del ensayo de corte directo según norma ASTM D3080	14
Figura 5. Esfuerzos en la falla.....	15
Figura 6. Agua en los suelos	18
Figura 7. Comparación de curvas granulométricas por tipo de material	32
Figura 8. Ángulo de reposo por tipo de material	38
Figura 9. Comparación del ángulo de reposo por tipo de material ensayado en cada superficie.....	40
Figura 10. Comparación de la forma de la pila cónica de material T1, en superficie lisa y rugosa.	42
Figura 11. Pilas cónica del material T1 con superficie rugosa, mostrando las tres alturas.	43
Figura 12. Valores de ángulo de reposo para cada tipo de material en tres alturas	43
Figura 13. Comparación del ángulo de fricción crítico y el ángulo de reposo promedio, por tipo de material.	46
Figura 14. Ángulo de reposo en función del ángulo de fricción crítico construido con los valores promedios de todos los tipos de materiales.....	48

Figura 15. Ángulo de reposo en función del ángulo de fricción crítico construido con los valores promedios de todos los tipos de materiales sobre una superficie lisa y rugosa.	49
Figura 16. Ángulo de reposo en función del ángulo de fricción crítico construido con los valores promedios de todos los tipos de materiales ensayados a tres alturas (h_1 , h_2 , h_3) fijas.....	50

RESUMEN

La presente investigación experimental de tipo cualitativa y cuantitativa buscó analizar la influencia de tres factores principales sobre el ángulo de reposo, los cuales fueron: el tipo de material, rugosidad de la superficie de contacto y altura de almacenaje del ensayo. Para esto se utilizaron cuatro tipos de materiales conformados por diferentes porcentajes, establecidos para lograr la mayor combinación de arenas, de acuerdo a la clasificación por tamaño de partícula.

Para el análisis de la presente investigación se combinaron todos los factores estudiados, determinando el ángulo de reposo en cada tipo de material tanto en superficie de vidrio como de lija y trabajando a tres alturas fijas de 8,18 y 28 cm, ensayando un total de 24 muestras representativas para luego analizar los resultados y las variaciones producidas por la influencia de cada factor.

Así mismo para corroborar la efectividad del método del embudo, utilizado para determinar el ángulo de reposo, se realizó el ensayo de corte directo para cada tipo de material, partiendo de la premisa bibliográfica de la proximidad del ángulo de reposo con el ángulo de fricción crítico.

Con la data recolectada de los ensayos, se realizó el análisis mediante tablas, gráficas y extrapolando líneas de tendencia para definir la relación entre variables. Determinando la verdadera influencia de cada uno de los factores estudiados sobre el ángulo de reposo.

ABSTRACT

The present experimental research of qualitative and quantitative type sought to analyze the influence of three main factors on the angle of repose, which were: the type of material, rugosity of the basement and height of the trial. The four types of materials were composed of different percentages of sands, established to achieve the greatest combination according to the classification by particle size.

For the analysis of the present investigation, the combination of all factors was carried out, determining the angle of repose in each type of material, on the glass surface and on the sandpaper and working at three fixed heights of 8, 18 and 28cm, testing a total of 24 representative samples. Analyzing the results and the variations produced by each influence factor.

Likewise, to corroborate the effectiveness of the funnel method, used to determine the angle of repose and the values obtained in each test, the direct cutting laboratory test was carried out for each type of material, starting from the bibliographic premise of the proximity of the angle of repose with the critic friction angle.

With all the data collected from the trials, they were analyzed using tables, graphs and extrapolating trend lines to define the relationship between variables. And defining the true influence of each studied factor on the angle of repose.

INTRODUCCIÓN

El ángulo de fricción crítico (φ_c) es uno de los parámetros de mayor evaluación e importancia ya que los parámetros de resistencia mecánica son relevantes para el análisis de estabilidad de taludes, presas de relave, botaderos, cimentaciones superficiales y profundas y en presiones laterales.

Según Solaque y Lizcano (2008), tradicionalmente se considera el ángulo de fricción crítico igual que el ángulo de reposo ($\varphi_c = \varphi_{rep}$). El φ_c se obtiene de ensayos de corte directo. El φ_{rep} se obtiene a partir de diferentes métodos; uno de ellos aplicables a materiales granulares es la construcción de una pila por medio de un embudo. φ_c es remplazado por φ_{rep} dado lo dispendioso y complejo de los ensayos necesarios para determinar φ_c comparados con los métodos para obtener φ_{rep} y la similitud de los resultados obtenidos.

Investigaciones previas demuestran que factores como rugosidad de la base, altura de apilamiento o almacenaje, tamaño y distribución de las partículas, densidad de la pila, efectos dinámicos, entre otros, influyen en el valor del ángulo de reposo φ_{rep} (Chik & Vallejo, 2005); (Kalman, Goder, Rivkin, & Ben-Dor, 1993).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1 Antecedentes del problema

Actualmente en el Perú no existe ninguna metodología consolidada para obtener el ángulo de reposo de los suelos granulares ni estudios sobre los factores que influyen sobre este y el impacto que producen.

El ángulo de reposo es fundamental en la estimación de los valores máximos de inclinación de masas de suelos granulares, como taludes de suelos granulares y terraplenes de carreteras. Las variaciones que se puedan producir en los valores del ángulo de reposo, se traducen en variaciones en los factores de seguridad y en importantes diferencias de volúmenes de suelo a excavar; por lo tanto, tiene un impacto directo tanto en la seguridad como en los costos de los proyectos (Rodas & Rouse, 2010, pág. 100).

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

- ¿Cómo determinar la influencia que tendrá el tipo de material, que componga cierta pila cónica, sobre el valor de ángulo de reposo?

- ¿Cómo determinar la influencia que tendrá la rugosidad de la superficie de contacto, sobre el valor de ángulo de reposo?

- ¿Cómo determinar la influencia que tendrá la variación de altura de almacenaje de cierta pila cónica, sobre el valor de ángulo de reposo?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué combinaciones de materiales granulares se pueden utilizar para la realización de los ensayos de determinación del ángulo de reposo?
- ¿Qué tipo de superficies de contacto se utilizarán para probar las diferentes rugosidades del basamento al momento de realizar el ensayo de determinación del ángulo de reposo?
- ¿Qué variaciones en las alturas de almacenaje se utilizarán para los ensayos y cuál será el impacto de estas?

1.3. Justificación

El presente trabajo de investigación busca aportar información de manera práctica y experimental sobre el ángulo de reposo.

Considerando el aspecto académico, el desarrollo de la tesis proporciona una visión de cómo distintos factores tienen influencia sobre el parámetro estudiado.

Asimismo, proporciona información de referencia para trabajos de investigación similares que tienden a la aplicación en proyectos de obras geotécnicas.

Esta investigación contribuiría al entendimiento de botaderos de roca fracturada de mina, en este caso a pequeña escala.

Se podría aplicar también a casos reales como en la zona cerro Arena de la carretera panamericana sur, Arequipa, donde se presentan acumulaciones de bancos de arena.

1.4. Limitaciones

No se cuenta con la capacidad de poder materializar una pila de material granular grueso a escala real, distintas superficies de contacto y de alturas de almacenaje controladas, para poder analizar las influencias de estos factores.

Se realizan ensayos en materiales granulares con granulometrías correspondientes a arenas y finos, que son representativos para los estudios correspondientes al presente trabajo de investigación.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Determinar la influencia del tipo de material y la rugosidad de la superficie de contacto sobre el ángulo de reposo en función a las alturas de almacenaje variables del cono.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar los tipos de materiales a ensayar.
- Determinar los tipos de superficies de contacto con diferentes rugosidades que caracterizarán al tipo de basamento en donde se realicen los ensayos.
- Establecer las variaciones en las alturas de almacenaje que serán utilizadas en los ensayos y el impacto de estas.

- Comparar el ángulo de reposo con el ángulo de fricción crítico, para la comprobación de la efectividad del método del embudo para el cálculo de este parámetro.

1.6. Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

Los ensayos de diferentes granulometrías de material granular fino permiten determinar la influencia de su composición, rugosidad de la superficie de contacto y altura de almacenaje, sobre el ángulo de reposo.

1.6.2 Hipótesis específicas

- Se determinan los tipos de materiales granulares, según su granulometría.
- Se determinan las rugosidades que caracterizan a las superficies de contacto y las alturas de almacenaje.

1.7. Variables

1.7.1. Variables independientes

Los tipos de materiales, rugosidades de las superficies de contacto y alturas de almacenaje utilizadas en los ensayos, son factores influyentes sobre el ángulo de reposo.

a) Indicadores

- Granulometría
- Rugosidad de las superficies de contacto

- Variación de alturas
- b) Escala de medición
- Clasificación según SUCS
- Coeficiente de fricción

1.7.2. Variables dependientes

El cálculo del ángulo de reposo en cada uno de los ensayos es lo que permite cuantificar y analizar los resultados para la determinación de la influencia de cada factor sobre los valores obtenidos.

- a) Indicadores
- Ángulo de reposo ($^{\circ}$)

1.7.3. Operacionalización de variables

Las variables independientes y dependientes son analizadas tanto cualitativamente como cuantitativamente mediante la realización de ensayos de laboratorio, con granulometrías determinadas, lo que permite poder operacionalizar el objetivo de esta investigación y finalmente determinar la influencia de los distintos factores estudiados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos

Se han realizado una serie de estudios acerca del ángulo de reposo, como parámetro de suelos granulares, sus implicaciones, métodos de determinación, aspectos influyentes, etc. Los estudios más relevantes relacionados con el tema son los siguientes:

A partir del cálculo del ángulo de reposo de la arena del Guamo, se compararon diferentes métodos de determinación y se analizaron las influencias de diversos factores (Solaque & Lizcano, 2008).

Estudiaron y analizaron las implicancias de varios métodos para la determinación del ángulo de reposo, sus diferencias y la comparación de los resultados obtenidos por cada método (Rodas & Rouse, 2010).

Determinan la influencia de la rugosidad de la superficie sobre la cual se realiza en ensayos de partículas gruesas, para la determinación del ángulo de reposo (Chik & Vallejo, 2005).

Analizan la relación del ángulo de fricción crítico y el ángulo de reposo, correlacionando los resultados obtenidos de cada uno (Ghazavi et al., 2008).

A partir de la densidad relativa se determina el ángulo de fricción crítico y lo compara con el ángulo de reposo calculado mediante métodos normalizados y no normalizados (Ortiz, 2018).

Se hizo la comparación de resultados de métodos prácticos no normalizados con método ASTM C-1444 para la obtención del ángulo de reposo de un suelo tipo granular en la región del Bío-Bío (Barrientos, 2014).

Se determinó el ángulo de reposo en suelos granulares de Lambayeque, utilizando diversos métodos para este cálculo y comparándolo con el ángulo de fricción crítico calculado mediante corte directo, relacionando a estos dos en distintas condiciones de saturación de los suelos (Barrantes & León, 2017).

2.2. Marco teórico

2.2.1. Estado y comportamiento del suelo

Todos los materiales poseen resistencia debido a sus propiedades internas, por esta razón las pendientes de taludes naturales y artificiales se mantienen en equilibrio debido a la resistencia al corte que posee el suelo o la roca de que estén formados. Parte de la resistencia de los materiales se debe a la fricción del material. (Solaque D. , 2008, pág. 4).

El entrelace de las partículas es un fenómeno que contribuye a la resistencia de las arenas. La densidad de la arena influye apreciablemente en el ángulo de fricción del material y el entrelace de las partículas. De acuerdo con Taylor (1962), el procedimiento más antiguo y sencillo para obtener el ángulo de fricción de un suelo granular seco, es el ángulo de reposo de una pequeña pila de material.

2.2.2. Clasificación de suelos según SUCS

Los sistemas de clasificación de suelos tienen por objetivo ordenar los suelos en familias de similares características geotécnicas. Empleando el método de clasificación USCS (Unified Soil Classification System).

Tabla 1

Clasificación SUCS para suelos gruesos

SISTEMA DE CLASIFICACION SUCS						
GRUESOS (<50% pasa 0,08 mm.)						
Tipo de suelo	Símbolo	% pasa 5 mm	% pasa 0.08 mm	CU	CC	IP
Gravas	GW			>4	1 a 3	
	GP	< 50	<5	≤6	<1 o >3	
	GM		>12			<0,73 (wl-20) ó <4
	GC					>0,73 (wl-20) ó >7
	SW			>6	1 a 3	
Arenas	SP	> 50	<5	≤6	<1 o >3	
	SM		>12			<0,73 (wl-20) ó <4
	SC					>0,73 (wl-20) ó >7

En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej. GW-GM en vez de GW-GC.

$$C_U = (D_{60}) / (D_{10})$$

$$C_C = (D_{30}^2) / (D_{60} \cdot D_{10})$$

Fuente: Según la norma ASTM D 2487-00

Tabla 2*Clasificación SUCS para suelos finos*

FINOS ($\geq 50\%$ pasa 0,08 mm.)			
Tipo de Suelo	Símbolo	Lim. Liq. w_L	Índice de Plasticidad *IP
limos orgánicos	ML	<50	<0,73 ($w_L - 20$) ó <4
	MH	>50	<0,73 ($w_L - 20$)
arcillas inorgánicas	CL	<50	> 0,73 ($w_L - 20$) y >7
	CH	>50	>0,73 ($w_L - 20$)
limos y arcillas	OL	<50	** w_L seco al horno
orgánicos	OH	>50	$\leq 75\%$ de w_L seco al aire
turba	P_t	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.	

Si $L_p \cong 0,73 (w_L - 20)$ ó si IP entre 4 y 7 e $L_p > 0,73 (w_L - 20)$, usar símbolo doble CL-ML, CH-OH

** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente w_L seco al horno

En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej: CH-MH en vez de CL-ML

Si $w_L = 50$; CL-CH ó ML-MH

Fuente: Según la norma ASTM D 2487-00

Los símbolos S, G, M y C corresponden a arena, gravas, limo y arcilla, respectivamente. Desde el punto de vista de la granulometría, los símbolos P y W indican mal graduado y bien graduado respectivamente.

El símbolo O corresponde a suelo orgánico, H a suelos de alta plasticidad ($LL > 50\%$) y L de baja plasticidad ($LL < 50\%$). Sin embargo, en la práctica un suelo con $30 < LL < 50\%$ se considera de mediana plasticidad.

La fracción gruesa se refiere a todo el conjunto de material que queda retenido por sobre la malla N° 200. Si esta fracción es mayor al 50% el suelo se dice granular, y puede estar limpio o mezclado con fino. Si la fracción gruesa es inferior al 50%, el suelo sería fino o cohesivo (limo, arcilla u orgánico).

Si el suelo es granular, la malla N° 4 separa a la grava de la arena. Si más del 50% de la fracción gruesa pasa por la malla N° 4, se trata de una arena. En caso contrario, el suelo es una grava.

Una vez establecido si es grava o arena, si pasa menos del 5% por el tamiz N° 200, es un suelo granular limpio que puede ser grava o arena, bien graduada o mal graduada: GW, GP, SW o SP. Si pasa entre 5 y 12% por la malla N° 200, se trata de una mezcla de suelo granular con fino y se emplean símbolos dobles: GW -GM, GP -GM, GW -GC ó GP -GC si se trata de gravas; SW -SM, SP -SM, SW -SC o SP - SC si son arenas. El símbolo P y W depende de los valores de CU y CC, mientras que se determina si es limo (M) o arcilla (C) de la carta de plasticidad.

Si es un suelo fino, es decir, que más del 50% pasa por el tamiz N° 200, se clasifica según el límite líquido w_L y el índice de plasticidad I_p con la carta de plasticidad. Si el punto está sobre la recta A de la carta, se emplean símbolos dobles (Saez, 2010, pág. 25).

2.2.3. Método del embudo

Existen varios métodos utilizados para calcular el ángulo de reposo de un material. Entre estos el más usado es el método del embudo; éste busca determinar el ángulo de reposo de los materiales ensayados. Se debe garantizar que el diámetro de salida del embudo sea mayor o igual a cinco veces el diámetro de la partícula ($D_{\text{embudo}} > 5 d_{\text{partícula}}$) (Gundogdu et al., 2008).

Existen diversas formas de medir el ángulo de reposo, una es tratar de medir el ángulo del cono resultante directamente estimando el valor gráficamente; la otra forma es dividir el doble de la altura por el diámetro de la base del cono. La tangente inversa de esta relación es el ángulo de reposo.

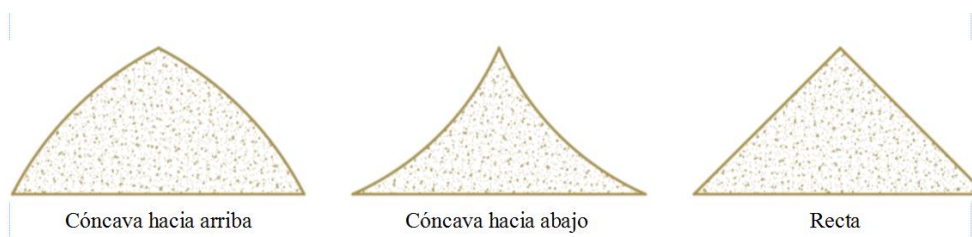


Figura 1. Forma de la Pila
Fuente: Norma ASTM D6393-99

Según el método I, desarrollado por (Train, 1958):

El embudo empleado en la conformación de la pila se mantiene a una altura constante H y el material se vierte dentro del embudo para que la pila quede perfectamente cónica. La pila se construye hasta que toque el orificio de salida del embudo. Luego se mide el diámetro de la base de la pila (D) y se determina el ángulo de reposo de la siguiente forma. Ecuación (1)

$$\tan\phi_{rep} = \frac{2H}{D} \quad (1)$$

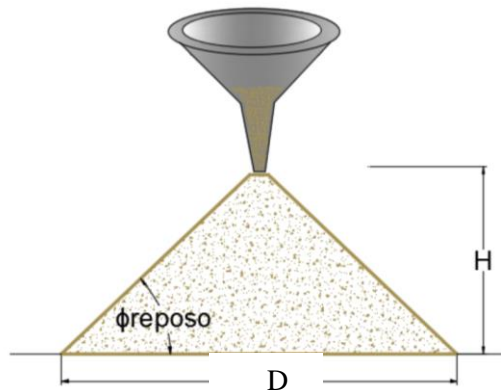


Figura 2. Método descrito por Train para determinar el ángulo de reposo.

Fuente: (Barrantes & León, 2017)

Según el método de la pila, desarrollado por Atkinson, (1993):

Consiste en verter la arena sobre una superficie con diferentes rugosidades; base rugosa (lija) y base lisa (vidrio), luego se obtiene el ángulo de reposo, midiendo el ángulo formado por su talud con respecto a la horizontal (Barrantes & León, 2017, pág. 51).

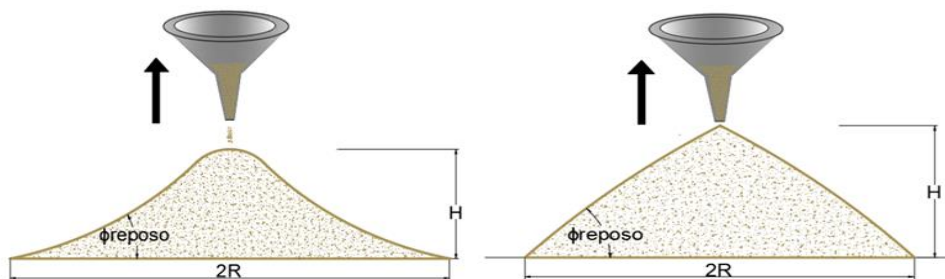


Figura 3. Método para determinar el ángulo de reposo según Atkinson
Fuente: Solaque D., 2008, pág. 15

2.2.4. Ensayo de corte directo en suelos

El ensayo de corte directo consiste en hacer deslizar una porción de suelo, respecto a otra a lo largo de un plano de falla predeterminado mediante la acción de una fuerza de corte horizontal incrementada, mientras se aplica una carga normal al plano del movimiento. Se rige por la norma ASTM D-3080, y su objetivo es determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. Para casos prácticos este ensayo permite conocer el ángulo de fricción crítico del suelo (Olivera et al., 2014).

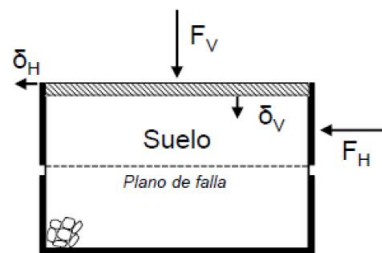


Figura 4. Esquema del ensayo de corte directo según norma ASTM D3080
Fuente: Olivera et al., 2014

Según Olivera et al. (2014), el ensayo de corte directo impone sobre un suelo las condiciones idealizadas del ensayo. Es decir, induce la ocurrencia de una falla a través de un plano de localización predeterminado. Sobre este plano actúan dos fuerzas (o esfuerzos): un esfuerzo normal debido a una carga vertical (P_v) aplicada externamente y un esfuerzo cortante debido a la aplicación de una carga horizontal (P_h). Estos esfuerzos se calculan simplemente como

$$n = \frac{P_v}{A} \quad (2)$$

$$t_f = \frac{P_h}{A} \quad (3)$$

Donde A es el área nominal de la muestra (o de la caja de corte) y usualmente no se corrige para tener en cuenta el cambio de área causada por el desplazamiento lateral de la muestra (Ph). La relación entre los esfuerzos de corte de falla (t_f) y los esfuerzos normales (σ_n) en suelos, y puede representarse por la ecuación siguiente:

$$t_f = c + \sigma_n * tg\varphi \quad (4)$$

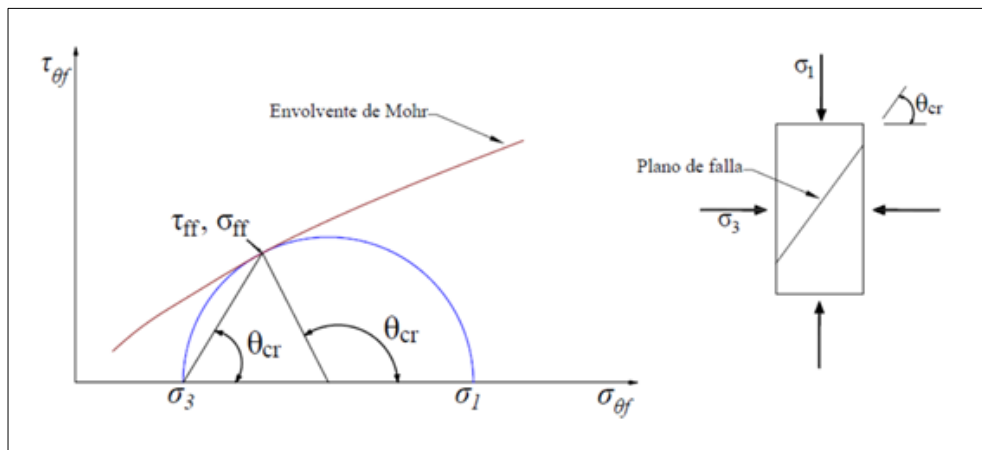


Figura 5. Esfuerzos en la falla

Fuente: Lambe y Whitman, 1969

De la ley de Coulomb se desprende que la resistencia al corte de suelos tiene dos componentes:

- a) Fricción ($tg \varphi$) - que se debe al contacto entre partículas y al roce entre ellas cuando están sometidas a esfuerzos normales.
- b) Cohesión (C) - que se debe a fuerzas internas que mantienen unidas a las partículas en una masa.

2.2.5. Ensayo de análisis granulométrico

Según Medina et al. (2008), en el análisis granulométrico se busca determinar qué tamaños de partículas están presentes en el suelo y en qué proporción.

Para la fracción gruesa, gravas y arenas, es adecuado el tamizado vía seca.

El “tamaño” determinado en este caso, no corresponde a ninguna medida de la partícula, solo se establece si la partícula pasa o queda retenida en un tamiz de abertura cuadrada normalizada.

La granulometría de un suelo permite clasificarlo utilizando alguno de los muchos sistemas de clasificación, tales como:

- USCS: Sistema Unificado de Clasificación de suelos
- AASHTO: American Association of State’s Highways and Transportation Officials

A partir de la curva de distribución granulométrica, se pueden obtener diámetros característicos tales como el D_{10} , D_{30} , D_{60} . El diámetro D se refiere al tamaño de partículas y el subíndice denota el porcentaje de material que pasa. El diámetro D_{10} es también llamado diámetro efectivo del suelo.

Una indicación de la variación o rango del tamaño de los granos presentes en una muestra se obtiene mediante el coeficiente de uniformidad C_U , el que está definido como:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5)$$

Existe otro parámetro llamado coeficiente de curvatura C_C , el cual mide la forma de la curva entre el D_{60} y el D_{10} , definiéndose de la siguiente manera:

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (6)$$

A. Suelos de grano grueso

> 50 % queda retenido en la malla N° 200 (0,074 mm)

Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla N° 4 (4,75 mm)

- Fracción fina < 5%: GW, GP según C_U y C_C
- Fracción fina > 12%: GM, GC según carta de plasticidad
- Fracción entre 5% y 12%: Símbolos dobles

Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla N° 4 (4,75 mm)

- Fracción fina < 5%: SW, SP según C_U y C_C
- Fracción fina > 12%: SM, SC según carta de plasticidad
- Fracción entre 5% y 12%: Símbolos dobles

B. Suelos de grano fino

> 50% pasa por la malla N° 200 (0,074mm)

Carta de plasticidad

2.2.6. Ensayo de contenido de humedad

Según Medina et al. (2008), la relación entre pesos de fases más empleada en suelos es la humedad, que es el peso de agua dividido por el peso de las partículas sólidas de una muestra de suelo.

El agua total del suelo corresponde a la suma del agua libre, del agua capilar y del agua higroscópica de las partículas sólidas.

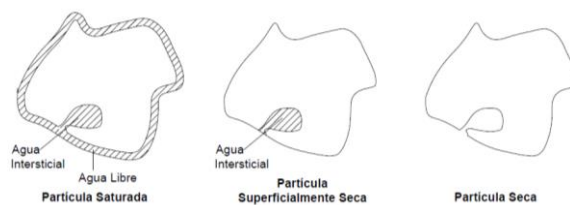


Figura 6. Agua en los suelos
Fuente: Medina et al. (2008)

La importancia de la humedad de un suelo radica en que junto a otras características, determina su comportamiento, influye directamente en los cambios de volumen, estabilidad mecánica y cohesión, siendo particularmente influyente cuando se trata de suelos finos.

$$w = \frac{W_h - W_s}{W_s} \quad (7)$$

2.2.7. Ensayo de límites de consistencia

Según Medina et al. (2008), los límites se basan en que un suelo de grano fino solamente puede existir en cuatro estados de consistencia según su humedad.

Así, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco, pasando al añadir agua a los estados semisólido, plástico y finalmente líquido.

Los límites de Atterberg son ensayos de laboratorio normalizados que permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible clasificar el suelo en la Clasificación Unificada de Suelos (Unified Soil Classification System, USCS) y también en la Clasificación de la AASHTO de carreteras. Estos límites son válidos para suelos finos y para la porción de finos de suelos granulares.

Para realizar los límites de Atterberg se trabaja con todo el material menor que la malla N° 40 (0,42 mm).

Esto quiere decir que no solo se trabaja con la parte fina del suelo (< malla N° 200), sino que se incluye igualmente la fracción de arena fina.

a) Límite líquido (w_L ó LL): contenido de humedad del suelo en el límite entre el estado líquido y plástico.

b) Límite plástico (w_p ó LP): es el contenido de humedad del suelo en el límite entre los estados semisólido y plástico.

c) Índice de plasticidad (IP): es la diferencia entre los límites líquido y plástico; es decir, el rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene plástico:

$$IP = L_L - L_P \quad (8)$$

2.2.8. Análisis estadísticos de datos

En los datos experimentales siempre aparecen errores en todos los experimentos por mucho cuidado que se haya puesto en ellos. Algunos de estos errores son de naturaleza aleatoria, mientras que otros se deben a errores por parte del observador.

a) *Media aritmética: \bar{X}*

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (9)$$

Si "n" tiende al infinito, luego podemos adoptar el promedio aritmético de los valores "X" como el valor más probable (Argandoña, 2014, pág. 21).

b) *Desviación: d_i*

$$d_i = X_i - \bar{X} \quad (10)$$

c) *La desviación estándar: σ*

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad (11)$$

e) *Diferencia de medias significativas*

La diferencia entre un estadístico de muestra y un valor hipotético es estadísticamente significativa si una prueba de hipótesis indica que es muy poco probable que la misma haya ocurrido en virtud de las probabilidades. Para evaluar la significancia estadística, examine el valor t de la prueba. Si el valor estadístico t es menor que el valor crítico de t, se puede decir que la diferencia no es estadísticamente significativa y rechazar la hipótesis nula de la prueba.

De esta manera se puede determinar si dos muestras se consideran similares o diferentes. (Rodrigo, 2016)

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Granulometría

Se define como la repartición en promedio de las dimensiones de las partículas constituyentes del suelo, expresada en términos del porcentaje del peso total del material.

Como la variación del peso de las partículas es en general baja, la distribución de los tamaños en función de peso o volumen son prácticamente equivalentes en la práctica. La granulometría se representa a través de una curva granulométrica (Saez, 2010).

2.3.2. Ángulo de reposo

Es el ángulo de fricción del material bajo un esfuerzo prácticamente igual a cero. También definido como el ángulo máximo con que un montículo de suelo se mantiene estable sin que se produzca una falla por deslizamiento.

Esta es una propiedad del suelo que está determinada por la fricción, cohesión y forma de las partículas.

Así, el ángulo de reposo corresponde al ángulo formado entre la superficie inclinada del montículo y la base, y se obtiene por medición directa o midiendo el diámetro y altura del montículo de arena (Rodas & Rouse, 2010).

- Factores que influyen en el ángulo de reposo (Kalman et al.,1993).

- Tamaño de la partícula y distribución de tamaños
- Rugosidad de la superficie de la partícula
- Rugosidad de la base
- Esfericidad de la partícula
- Humedad de la pila
- Homogeneidad de la pila
- Efecto dinámico
- Altura de caída del material

Tabla 3

Valores del ángulo de fricción interno de los medios incoherentes

$\phi = 36^\circ + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4$			
Compacidad.....	ϕ_1	suelta	-6°
		media	0
		compacta	+ 6°
		aguda	+1
Forma y rugosidad de los granos	ϕ_2	media	0
		redondeada	-3
		muy redondeada	-5
Grosor de los granos	ϕ_3	arena	0
		grava fina	+1°
		grava gruesa	+2°
Granulometría	ϕ_4	uniforme	-3°
		media	0
		abierta	+3°

Fuente: (Costet et al., 1975)

“Uno de los parámetros del suelo empleado en diferentes análisis, entre ellos en modelos constitutivos, es el ángulo de fricción crítico (φ_c).

Para materiales granulares una forma simplificada de determinar φ_c es por medio del ángulo de reposo ($\varphi_c = \varphi_{rep}$). Esta simplificación se hace por lo dispendioso y complejo de los ensayos necesarios para determinar φ_c comparado con los métodos para obtener φ_{rep} .” (Solaque & Lizcano, 2008).

2.3.3. Ángulo de fricción

El ángulo de fricción es uno de los parámetros más comunes en la mecánica de suelos y es utilizado para numerosos procedimientos de diseño de fundaciones y estructuras geotécnicas.

En general, el ángulo de fricción hace referencia a la medida de la resistencia cortante debida a la fricción mecánica directa entre las partículas de suelo (Nieto et al., 2009).

2.3.4. Ángulo de fricción crítico

El ángulo de fricción crítico φ_c es una relación de los esfuerzos principales en el estado crítico y es importante para los modelos constitutivos, ya que define el estado crítico o residual propio de cada material.

El estado donde se alcanza un volumen constante y una resistencia al corte residual se le denomina estado crítico, el ángulo de fricción interno en estas condiciones se denomina ángulo en estado crítico. (Álvarez, 2007).

Tradicionalmente se considera el ángulo de fricción crítico igual que el ángulo de reposo ($\varphi_c = \varphi_{rep}$). El φ_c se obtiene de ensayos triaxiales monotónicos o de ensayos de corte simple (Solaque & Lizcano, 2008).

2.3.5. Talud

Se denomina a la superficie inclinada con respecto a la horizontal que adopta un terreno. Un talud es una pendiente formada por acumulación de fragmentos de roca al pie de un acantilado o de una montaña.

Los fragmentos de roca son a veces designados como escombros de roca o rocas deslizadas. La pendiente del talud varía con el tamaño y forma de los fragmentos de roca (Jodson, 1968).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Trabajos de campo

Se extrajeron aproximadamente 200 kg de material de suelo de una calicata, recuperando el pasante de la malla N° 4, almacenándolo en sacos para luego ser llevados al laboratorio y utilizar el material recolectado en la conformación de los tipos de materiales de los ensayos.

3.2. Ensayos de laboratorio

Los métodos que se utilizaron para la recolección de datos y su posterior análisis, fueron los siguientes:

- Conformación de material: Del material recolectado en campo se tamizó la arena por tamaño de partícula para conformar los cuatro tipos de materiales a ensayar con una específica granulometría. Los tipos de materiales ensayados son los siguientes:

- Tipo 1 Arena gruesa 100%.
- Tipo 2 Arena gruesa 60%, arena media 40%.
- Tipo 3 Arena gruesa 40%, arena media 40%, arena fina 20%.
- Tipo 4 Arena gruesa 25%, arena media 35%, arena fina 35%.y limos 5%.

- Ensayo de granulometría: Se seleccionaron los tamaños adecuados de tamices (N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 60, N° 100 y N° 200) siguiendo la norma ASTM D422.
- Ensayo de límites de Atterberg: Se ensayó de acuerdo con la norma ASTM D 4318.
- Ensayo de contenido de humedad: Se procedió con la norma ASTM D2216.
- Ensayo de gravedad específica: Se basó en la norma ASTM D 854.
- Ensayo de corte directo: Se procedió según la norma técnica peruana NTP 339.171 (Norma Técnica Peruana, 2001) y la norma ASTM D3080.

3.3. Ángulo de reposo

Para la determinación del ángulo de reposo se decidió utilizar el método del embudo basándose en el método I de Train (1958), descrito en el marco teórico.

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y CÁLCULOS

4.1. Granulometría

Se realiza el tamizado de cada tipo de material ensayado anotando el peso retenido en cada tamiz, para obtener de esta tabla los porcentajes de material pasante por tamiz.

Conociendo la abertura en mm por tamiz y el porcentaje de material pasante en cada uno de ellos, se graficó la curva granulométrica y se realizaron los cálculos de D10, D30, D60, para la determinación del coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura.

4.2 Límites de consistencia

Se realizó el ensayo de límites de consistencia solo para el material tipo 4, ya que en su composición admitía material pasante de la malla N° 200, que corresponde a partículas finas (limos, arcillas o una combinación de ellos).

Para poder clasificar el tipo de material ensayado se calculó el límite líquido, obtenido con el valor de humedad correspondiente a 25 golpes, el límite plástico, correspondiente al contenido de humedad al romper bastoncitos de 3mm del material en trozos de 0,5 a 1 cm de largo, y el índice de plasticidad, con la diferencia del límite líquido y límite plástico.

4.3 Clasificación de suelos

Teniendo la granulometría, donde calculamos C_c y C_u , y los límites de consistencia LL, LP e IP, se clasificó el material según la normativa SUCS.

4.4 Contenido de humedad

Se tomaron los datos de peso de muestra húmeda + tara, peso de muestra seca + tara; la diferencia de estos es el peso del agua. Luego se calculó el contenido de humedad, dividiendo el peso del agua y el peso de la muestra seca por 100%.

4.5 Gravedad específica

Con los datos del peso seco de la muestra, peso de la fiola + agua, peso de la fiola + agua + muestra y K (densidad del agua a temperatura específica), se aplica la siguiente ecuación: (ASTM International, 2014).

$$G_S = \frac{M_S \cdot K}{(M_S + M_A) - M_M} \quad (15)$$

Donde:

G_S : Gravedad específica

K : Densidad del agua a una temperatura específica

M_S : Peso seco de la muestra

M_A : Peso de la fiola + agua

M_M : Peso de la fiola + agua + muestra

4.6 Ángulo de reposo

Con los datos obtenidos de la altura y promedio del diámetro de la pila cónica, se realizó el cálculo del ángulo de reposo utilizando la siguiente fórmula.

$$\varphi_{rep} = \arctan\left(\frac{2h}{D_{prom}}\right) \quad (16)$$

Donde:

h : Altura del cono (cm)

D_{prom} : Diámetro promedio del cono (cm)

φ_{rep} : Ángulo de reposo (°)

4.7 Corte directo

De acuerdo a Norma ASTM D-3080 (2011), se calculó el ángulo de fricción utilizando la siguiente fórmula:

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\varphi) + c \quad (17)$$

Donde:

C: Cohesión del suelo [kgf/cm²]

φ : Ángulo de fricción [°]

Para el caso de la densidad, se consideró un valor bibliográfico de 1,51 g/cm³

CAPÍTULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados

5.1.1 Granulometría

Se realizó el análisis granulométrico para cada tipo de material, secando el material antes de ensayarlo.

Tabla 4

Valores granulométricos de los materiales ensayos

Tipo	D₁₀ (mm)	D₃₀ (mm)	D₆₀ (mm)	C_U	C_C
1	1,48	1,77	1,95	1,32	1,08
2	0,51	0,78	1,51	2,97	0,79
3	0,16	0,34	0,93	5,92	0,80
4	0,11	0,16	0,40	3,80	0,50

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4 muestra un resumen de los valores granulométricos promedios para cada tipo de material ensayado.

Como se planteó en el capítulo 3, los tipos de material a ensayar se constituyeron con determinados porcentajes.

Por esta razón se realizaron los análisis granulométricos a cada muestra, luego de conformarse la pila cónica de material, para demostrar así que no se obtuvo ningún cambio significativo en la composición de cada material después de realizarse el ensayo del método del embudo, concluyendo que este método no produce variaciones en la composición de las muestras.

El análisis granulométrico se realizó a los 4 tipos de materiales: tipo 1: 100% de arena gruesa; tipo 2: 60% de arena gruesa y 40% de arena media; tipo 3: 40% de arena gruesa, 40% de arena media, 20% de arena fina; y tipo 4: 25% de arena gruesa, 35% de arena media, 35% de arena fina y 5 % de finos; todos estos en combinación con las dos superficies (rugosa y lisa) y tres alturas (8, 18 y 28 cm), realizándose los análisis para un total de 24 muestras repitiendo el procedimiento tres veces por muestra, para poder obtener un dato representativo de cada una.

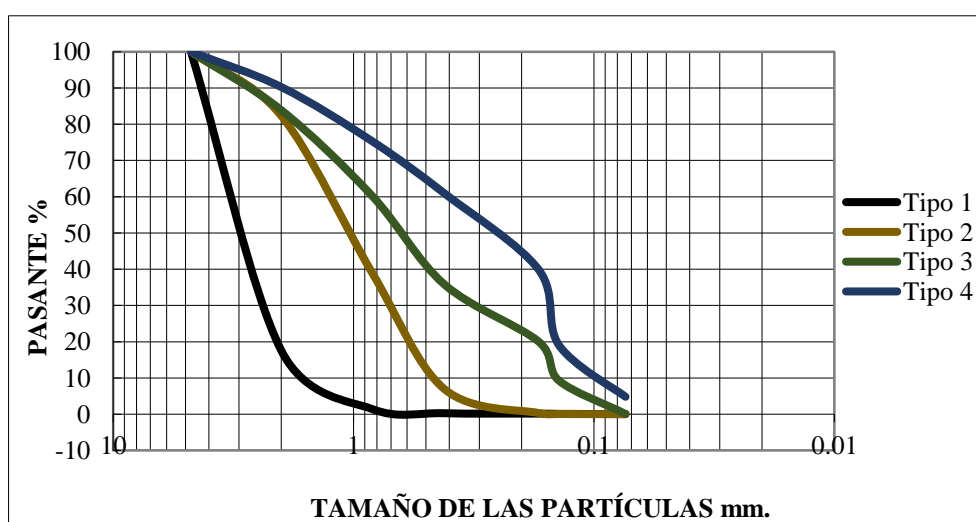


Figura 7. Comparación de curvas granulométricas por tipo de material

Fuente: Elaboración propia

En la figura 7 se observa el consolidado de las curvas granulométricas, construidas a partir de los valores promedio por tipo de material ensayado; es decir, de cada combinación realizada se tomaron los datos promedios para representar a cada tipo de material.

5.1.2 Límites de consistencia

Basado en la norma ASTM D 4318 (2017), el ensayo de límites de consistencia se realizó únicamente en el material tipo 4, ya que es el único tipo que contempla en su composición partículas finas pasante al tamiz N° 200, y es preciso este ensayo para definir si las partículas finas corresponden a limos o arcillas.

El material tipo 4 ensayado presentó un límite líquido de 17,43%, límite plástico de 0% y no mostró índice de plasticidad (NP). Según la clasificación SUCS, basado en la norma ASTM D 2487-00 (2000), las partículas finas, pasante de la malla N°200, del material tipo 4 correspondieron a limos.

5.1.3 Clasificación de suelos

Con los datos del análisis granulométrico y límites de consistencia de los cuatro tipos de materiales ensayados, se los clasificó mediante el sistema SUCS, perteneciendo todos a arena mal graduada (SP), basada en la norma ASTM D 2487-00 (2000). En la tabla 5 se presentan la clasificación de los tipos de materiales.

Tabla 5

Propiedades físicas de los materiales granulares ensayados

Material	Distribución granulométrica				Clasificación SUCS
	%Arena gruesa	%Arena media	%Arena fina	%limos	
T1	99,10	0,00	0,00	0,00	SP
T2	60,88	38,83	0,29	0,00	SP
T3	40,51	40,59	18,90	0,00	SP
T4	24,98	33,15	36,30	5,57	SP

Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Contenido de humedad

De acuerdo a los análisis de contenido de humedad de los materiales ensayados, se obtuvieron los siguientes resultados: tipo 1 con $\omega = 0,33\%$, tipo 2 $\omega = 0,95\%$, tipo 3 $\omega = 1,02\%$, tipo 4 $\omega = 0,83\%$.

Los contenidos de humedad determinados no son relevantes, ya que los materiales utilizados en los ensayos correspondieron a material granular completamente seco, de acuerdo con Gundogdu (2006).

5.1.5 Gravedad específica

Los valores obtenidos son muy similares en todos los casos, ya que cada tipo de material fue constituido por la misma materia prima, pero en diferentes porcentajes cada uno. Para el tipo 1 de $2,67 \text{ g/cm}^3$, tipo 2 de $2,65 \text{ g/cm}^3$, tipo 3 de $2,67 \text{ g/cm}^3$ y tipo 4 de $2,69 \text{ g/cm}^3$.

5.1.6 Ángulo de reposo

Para determinar el ángulo de reposo se utilizó el método del embudo, ensayado para cada tipo de material, utilizando las muestras correspondientes a las combinaciones con 2 tipos de superficie: lisa – vidrio y rugosa – lija, así mismo trabajando con 3 alturas constantes en cada caso h1 (8cm), h2 (18cm) y h3 (28cm), realizando 3 ensayos por cada muestra, para obtener datos representativos.

Tabla 6

Valores promedios del ángulo de reposo, interactuando superficie, altura y tipo de material

Tipo de material	Φ°_{rep}					
	H1		H2		H3	
	(8cm)		(18cm)		(28cm)	
	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa	Lisa	Rugosa
T1	32,52	31,71	34,17	34,11	33,97	34,06
T2	31,36	31,96	32,28	34,24	32,65	33,15
T3	30,70	32,36	32,32	32,30	33,15	32,84
T4	30,88	31,03	33,96	34,11	33,87	33,93

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6 se resumen los valores del ángulo de reposo obtenidos realizando las combinaciones entre los tipos de materiales con alturas ensayadas sobre las superficies de contacto.

Se obtuvieron valores similares, teniendo un valor máximo de 34,24° y un valor mínimo de 30,70°, teniendo entonces una máxima variación de 3,54°.

5.1.7 Corte directo

Se realizaron los ensayos de corte directo, en condiciones secas, para los cuatro tipos de materiales ensayados, a diferentes cargas, las cuales se presentan en el anexo 1. Los parámetros de resistencia resultantes de cada tipo de material, se muestran en la tabla 7.

Tabla 7

Parámetros de resistencia de los materiales ensayados

Tipo de Material	C (Kgf/cm ²)		Φ°	
	Máximo	Residual	Máximo	Residual
1	0,092	0,060	33,66	31,59
2	0,084	0,042	32,86	30,92
3	0,095	0,024	33,46	29,42
4	0,086	0,041	29,98	26,20

Fuente: Elaboración propia

Los ángulos de fricción críticos o residuales (ϕ_c) se determinaron mediante ensayos de corte directo, con saturación 0%. Estos se realizaron con los mismos materiales empleados en los ensayos del ángulo de reposo, con el fin de compararlos, considerando $\phi_c = \phi_{rep}$, planteado por Solaque Guzman (2008).

5.2. Análisis de los factores de influencia

5.2.1 Influencia del material

Parte del objetivo general del presente trabajo era determinar la influencia del tipo de material sobre el ángulo de reposo. Para esto se conformaron cuatro tipos de materiales, compuestos por arena gruesa, media, fina y finos, en porcentajes descritos en el capítulo 3; estos porcentajes se eligieron para obtener las combinaciones necesarias para el análisis de las variaciones.

Tabla 8

Composición de material en relación a su ángulo de reposo calculado

Tipo de Material	Composición	Clasificación SUCS	Φ_{rep}° promedio
1	100 % Arena gruesa	SP	33,42°
2	60% Arena gruesa, 40% arena media	SP	32,61°
3	40% Arena gruesa, 40% arena media, 20% arena fina	SP	32,28°
4	25% Arena gruesa, 35% arena media, 35% arena fina, 5% limos	SP	32,96°

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8 se muestran los resultados promedios del ángulo de reposo obtenido en los cuatro tipos de material ensayados, mostrando su composición y clasificación SUCS.

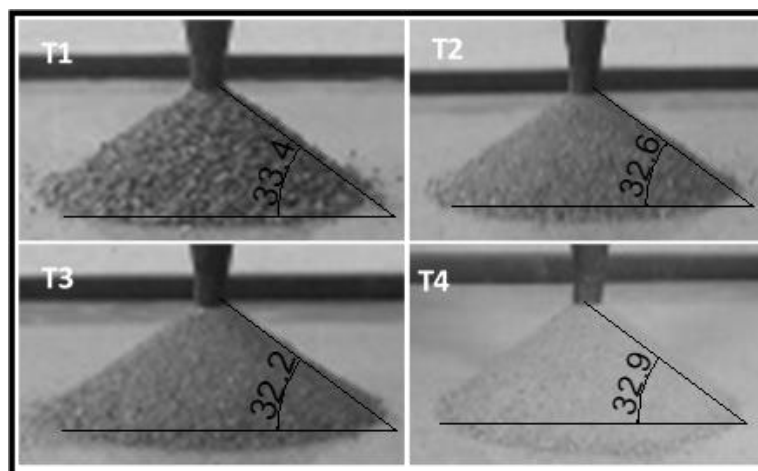


Figura 8. *Angulo de reposo por tipo de material*
Fuente: Tabla 8

Este análisis se realizó con el fin de determinar si existía variación sobre el ángulo de reposo, por composición de material. Como se observa en la figura 8, en el caso del material tipo 1 compuesto únicamente por arena gruesa se obtuvo un ángulo de reposo de $33,4^\circ$ siendo el mayor valor obtenido. Para los tipos 2 y 3 los resultados son similares oscilando en 32° , esto se debe a que los materiales correspondieron a mezclas de arenas con el mismo tamaño máximo y mínimo de partículas, por ende, presentan el mismo relleno de vacíos entre partículas. Cabe mencionar que al mismo tiempo se observa una ligera tendencia de disminución del valor del ángulo de reposo a medida que disminuye la granulometría.

Para el material tipo 4, se evidencia un ligero aumento en el valor de ángulo de reposo rompiendo la tendencia de disminución que se evidenciaba en el tipo 2 y 3, esto se debe a que este material incorpora en su composición un pequeño porcentaje de limos, los que generan una ligera cohesión y ligero aumento del relleno de vacíos entre partículas, resultando en el incremento del valor del ángulo de reposo respecto al tipo 2 y 3.

Como se explicó líneas arriba, los resultados presentan una tendencia al decrecimiento del φ_{rep} a medida que la granulometría disminuye. Estos resultados coinciden con el análisis presentado por Solaque & Lizcano (2008), así también con Herle & Gudehus (1999), quienes concluyen en su investigación: “Al rodar las partículas en el proceso de formación de la pila, los granos grandes tienden a superar esfuerzos más altos” (p.29).

Esto puede explicar un incremento de φ_{rep} al aumentar el tamaño de los granos. Pero a su vez difieren cuando el material presenta un porcentaje de limos en su composición.

5.2.2 Influencia de la rugosidad de las superficies de contacto

En este trabajo se realizaron todos los ensayos sobre dos superficies de contacto una de vidrio y la otra de lija gruesa con rugosidades lisa y rugosa respectivamente, esto para poder analizar la influencia de cada una sobre los resultados del ángulo de reposo. En la tabla 9 se observan los resultados.

Tabla 9

Valores promedio del ángulo de reposo en relación a las superficies por tipo de material

Tipo de material	Superficie lisa	Superficie rugosa	Variación
	Φ°_{rep}	Φ°_{rep}	($^{\circ}$)
1	33,55	33,29	0,26
2	32,10	33,12	1,02
3	32,06	32,50	0,44
4	32,90	33,02	0,12

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos mencionados se realizaron primero en una superficie de vidrio, esto para no generar ningún tipo de fuerza debida a la fricción entre el material granular y la base durante el proceso de formación de la pila.

De la misma manera se realizaron también los mismos ensayos sobre una superficie de lija gruesa, la cual genera una pequeña fuerza de fricción entre el material y la superficie de contacto.

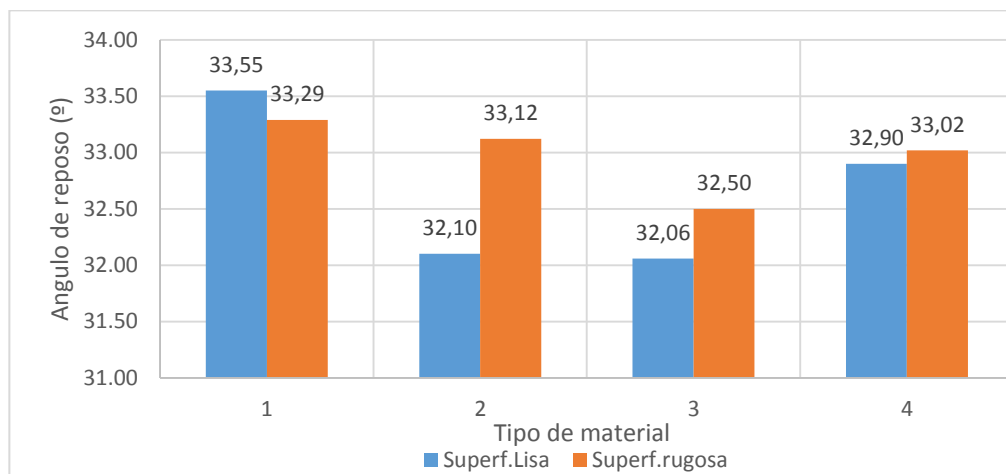


Figura 9. Comparación del ángulo de reposo por tipo de material ensayado en cada superficie

Fuente: Tabla 9

Como se observa en la figura 9, la máxima variación obtenida ensayando el mismo tipo de material fue de $1,02^\circ$, pudiéndose observar también que en la superficie rugosa se obtuvieron los valores de ángulo de reposo ligeramente más altos. Se puede deducir de esto, que la rugosidad de la superficie de contacto del ensayo produce una ligera variación sobre el valor del ángulo de reposo de un material.

Este factor de rugosidad fue estudiado por Chik & Vallejo (2005), quienes concluyeron: “La rugosidad de la base afecta más el ángulo de reposo para partículas gruesas. Cuando el porcentaje de finos es mayor o igual al 70% de la masa de la mezcla (predomina fracción fina), la rugosidad de la base no influye”. (p.45).

Con base en estos resultados bibliográficos y a los resultados del presente trabajo de investigación se coincide que para materiales finos la rugosidad no es un factor que genera gran influencia sobre el valor del ángulo de reposo. Cabe mencionar que se evidencia que la rugosidad de la superficie influencia en la cantidad de masa necesaria para conformar la pila, ya que en una superficie de vidrio al no presentar una fuerza de fricción el material resbala lo que genera mayor masa para conformar la pila, en cambio en una superficie rugosa donde la superficie de contacto genera una ligera fuerza de oposición, el material no resbala fácilmente.

Al construir las pilas cónicas de material sobre una superficie lisa (vidrio) y una rugosa (lija gruesa), se encontró que el tipo de superficie de contacto afecta ligeramente a la forma de los taludes de las pilas de material.

Para la superficie rugosa se obtiene una pila convexa (figura 10b) bien constituida. Sobre la superficie de vidrio la forma de la pila es convexa, pero a su vez el talud presenta una parte curva en su base (figura 10a), ya que al ir formándose la pila en la base de vidrio los bordes de esta ceden al caer el material mientras se van acomodando las partículas.

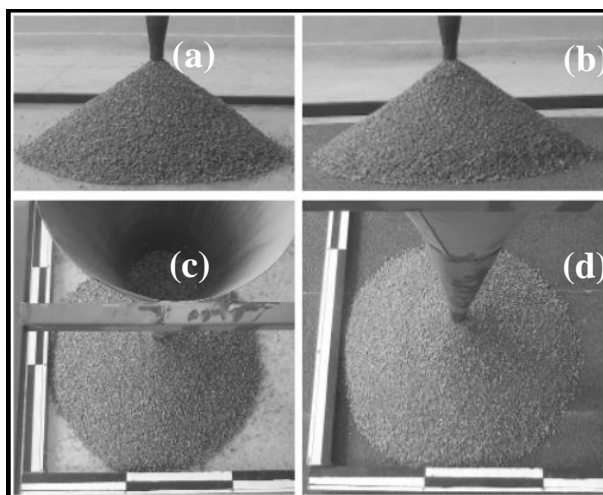


Figura 10. Comparación de la forma de la pila cónica de material T1, en superficie lisa y rugosa.

Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Influencia de la altura

Se realizaron los mismos ensayos para cada muestra a tres alturas fijas de h1 de 8 cm, h2 de 18 cm y h3 de 28 cm (Fig.11). Los resultados del ángulo de reposo promedio obtenidos para cada tipo de muestra en las tres alturas mencionadas ensayadas en superficie de vidrio y lija, se observan en la tabla 10.

Tabla 10

Ángulo de reposo promedio en relación a la altura en cada tipo de material

Tipo de material	Φ°_{rep}		
	H1 (8cm)	H2 (18cm)	H3 (28cm)
T1	32,12	34,14	34,02
T2	31,66	33,26	32,90
T3	31,53	32,31	33,00
T4	30,96	34,04	33,90

Fuente: Elaboración propia

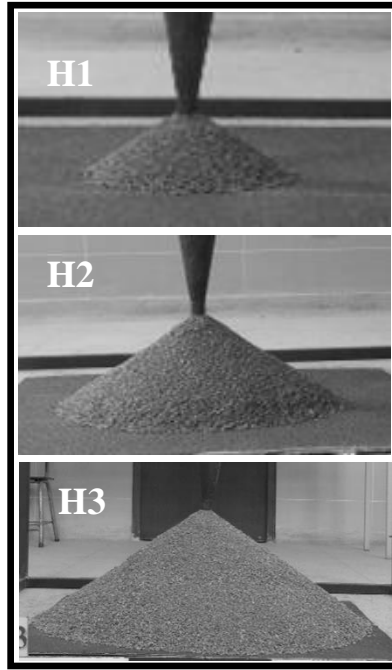


Figura 11. Pilas de forma cónica del material T1 con superficie rugosa, mostrando las tres alturas.

Fuente: Elaboración propia

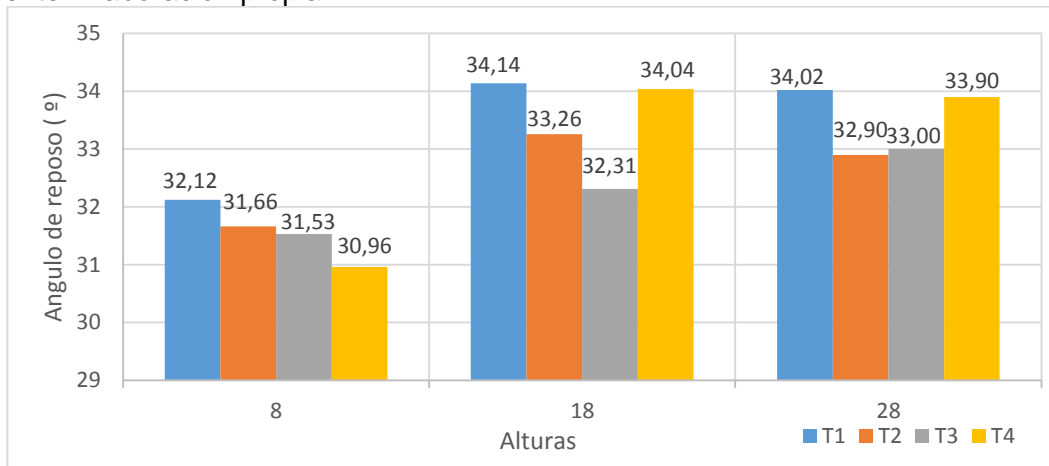


Figura 12. Valores de ángulo de reposo para cada tipo de material en tres alturas

Fuente: Tabla 10

En la figura 12 se puede observar que los menores valores del ángulo de reposo corresponden a una altura inicial h1 de 8 cm. Por otro lado, los resultados obtenidos para h2 y h3 aumentan respecto a los obtenidos en h1, pero ambos son similares. Se observa que el aumentar la altura del ensayo de 18 cm a los 28 cm, en promedio el ángulo de reposo aumenta su valor en menor proporción, teniendo resultados similares, para un h2 de 33,44° y para h3 de 33,46°.

Se realizó también el análisis respecto a la masa utilizada dependiendo del tipo de material y la altura del ensayo. Pudiendo observar en la tabla 11 que, al aumentar la altura de ensayo, la masa requerida en promedio se cuadruplica.

Se observa también que la mayor cantidad de masa utilizada se encuentra en el material 3 y 4, pudiendo deducir de esto que al aumentar la cantidad de finos (% de arenas fina y limos) se necesita mayor masa para ocupar el mismo volumen.

Tabla 11

Masa utilizada en relación a la altura en cada tipo de material

Tipo de material	Masa (kg)		
	H1 (8cm)	H2 (18cm)	H3 (28cm)
T1	4,00	23,00	82,00
T2	4,41	26,06	87,00
T3	4,80	26,89	88,00
T4	4,82	26,00	84,00

Fuente: Elaboración propia

5.3. Análisis de interrelaciones

5.3.1 Comparación del ángulo de reposo con el ángulo de fricción crítico

Se realizó el análisis comparativo entre el ángulo de fricción crítico calculado mediante el ensayo de corte directo para los cuatro tipos de materiales, y el ángulo de reposo calculado mediante el ensayo del método del embudo en los cuatro tipos de materiales ensayados interactuando con los dos tipos de rugosidad y tres alturas; partiendo de la igualdad $\phi_c = \phi_{rep}$ (Solaque D. , 2008). Se mostraron los resultados promedios de ambos ángulos, obtenidos para el mismo tipo de material en la tabla 12.

Tabla 12

Comparación entre el ángulo de fricción crítica y ángulo de reposo

Tipo de Material	Φ_c Kgf/cm²	Φ_{rep} Promedio
T1	31,59°	33,42°
T2	30,92°	32,61°
T3	29,42°	32,28°
T4	26,20°	32,96°

Fuente: Elaboración propia

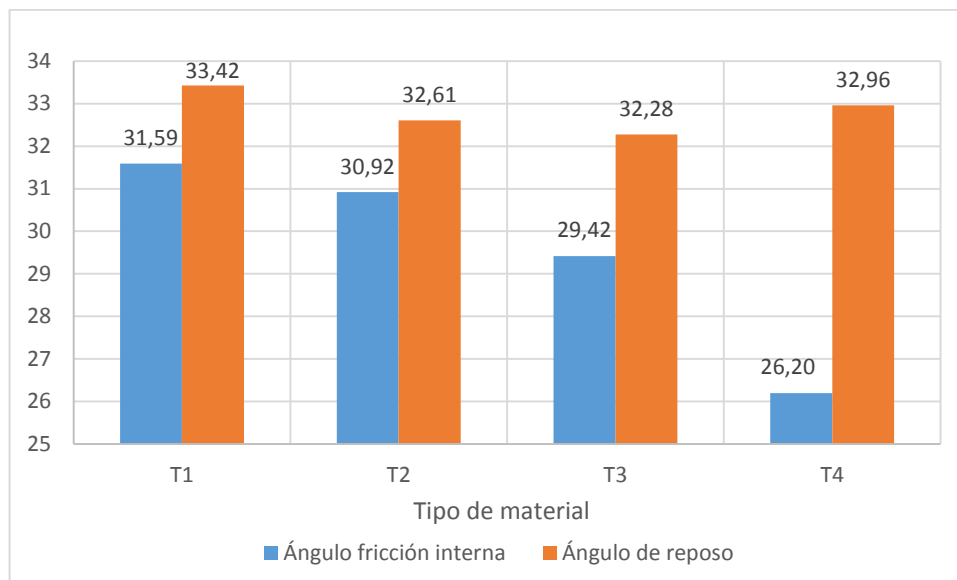


Figura 13. Comparación del ángulo de fricción crítica y el ángulo de reposo promedio, por tipo de material.
Fuente: Tabla 12

Se observa en la figura 13 que la mayor variación para los valores del ángulo de fricción crítica y ángulo de reposo se presenta en los materiales de tipo 3 y 4, con mayores porcentajes de arenas medias, finas y limos.

Para comprobar que para materiales granulares estos dos ángulos pueden ser considerados similares, se aplicó la prueba estadística T de Student, que evalúa la diferencia aceptable de dos resultados. En la tabla 13 se presentan los resultados, obteniendo un valor estadístico “t” 2,77, menor al valor crítico de t de 3,18, con estos resultados podemos dar como correcta la hipótesis de proximidad de los valores de los ángulos de reposo y de fricción crítica.

Tabla 13

Prueba "T" para la diferencia de medias entre el ángulo de reposo y de fricción crítico

	Ángulo reposo	Ángulo fricción crítico
Media	32,82	29,53
Varianza	0,24	5,76
Observaciones	4,00	4,00
Coefficiente de correlación de Pearson	0,15	
Diferencia hipotética de las medias	0,00	
Grados de libertad	3,00	
Estadístico t	2,77	
P(T<=t) una cola	0,03	
Valor crítico de t (una cola)	2,35	
P(T<=t) dos colas	0,07	
Valor crítico de t (dos colas)	3,18	

Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Análisis de comportamientos y patrones

Con los resultados anteriores obtenidos se analizó el comportamiento que presenta el ángulo de reposo respecto al ángulo de fricción crítico. Para esto se realizó el análisis de los promedios y luego el análisis de tendencia por tipo de superficie y altura.

Análisis con valores promedios

De cada tipo de material ensayado se ploteó la data del ángulo de reposo de las 24 muestras, calculado en cada una de las combinaciones con tipo de superficie y altura utilizada, eligiendo valores promedios de estos y comparándolos con los valores del ángulo de fricción crítico obtenidos del ensayo de corte directo, para los mismos tipos de materiales.

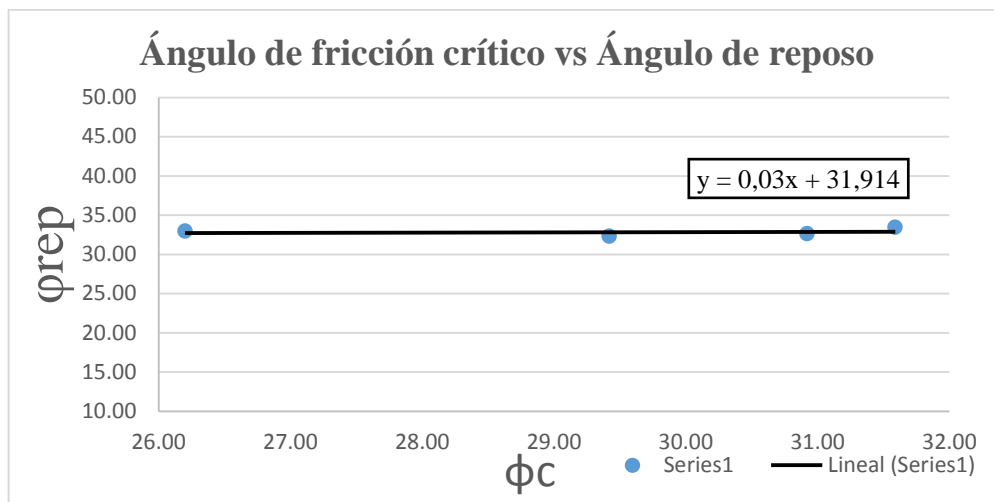


Figura 14. *Ángulo de reposo en función del ángulo de fricción crítico construido con los valores promedios de todos los tipos de materiales.*

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que los ángulos de reposo y de fricción crítica pueden ser correlacionados mediante una expresión lineal (figura 14).

De este análisis se concluye que el ángulo de reposo de arenas en estado seco no consolidado es similar al ángulo de fricción crítica en estado seco no consolidado. Estos resultados coinciden con los presentados por Ghazavi & Hosseini (2008), quienes concluyeron que en arenas estos dos ángulos se correlacionan, en condiciones similares de densidad y consolidación, mediante una expresión empírica lineal.

Análisis con valores promedio por tipo de superficie

Para este análisis se tomaron los promedios de los resultados de las muestras ensayadas sobre superficies lisa y rugosa.

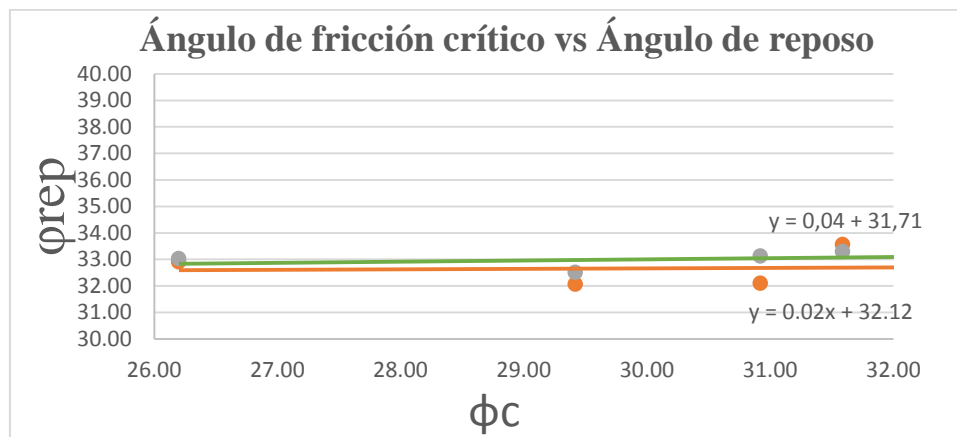


Figura 15. *Ángulo de reposo en función del ángulo de fricción crítica construido con los valores promedios de todos los tipos de materiales sobre una superficie lisa y rugosa.*

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que el ángulo de reposo y de fricción crítica ensayado sobre una superficie lisa y rugosa pueden ser correlacionados mediante una expresión lineal diferenciándose entre ambas superficies en las décimas de las constantes de las ecuaciones empíricas de cada una (figura 15).

De este análisis se observa que el ángulo de reposo es similar al ángulo de fricción crítica en arenas en estado seco no consolidado, concluyendo al igual que Chik & Vallejo (2005) que la rugosidad, en la escala de este estudio, no es un factor influyente en los valores de estos ángulos, en materiales granulares finos.

Análisis con valores promedio por altura de ensayo

Para este análisis se tomaron los promedios de todos los resultados obtenidos en cada tipo de material ensayados a 3 alturas fijas h_1 , h_2 y h_3 .

Ttomando la data del ángulo de reposo calculado y comparándolo con los valores obtenidos de ángulo de fricción crítico del ensayo de corte directo, para los mismos tipos de materiales.

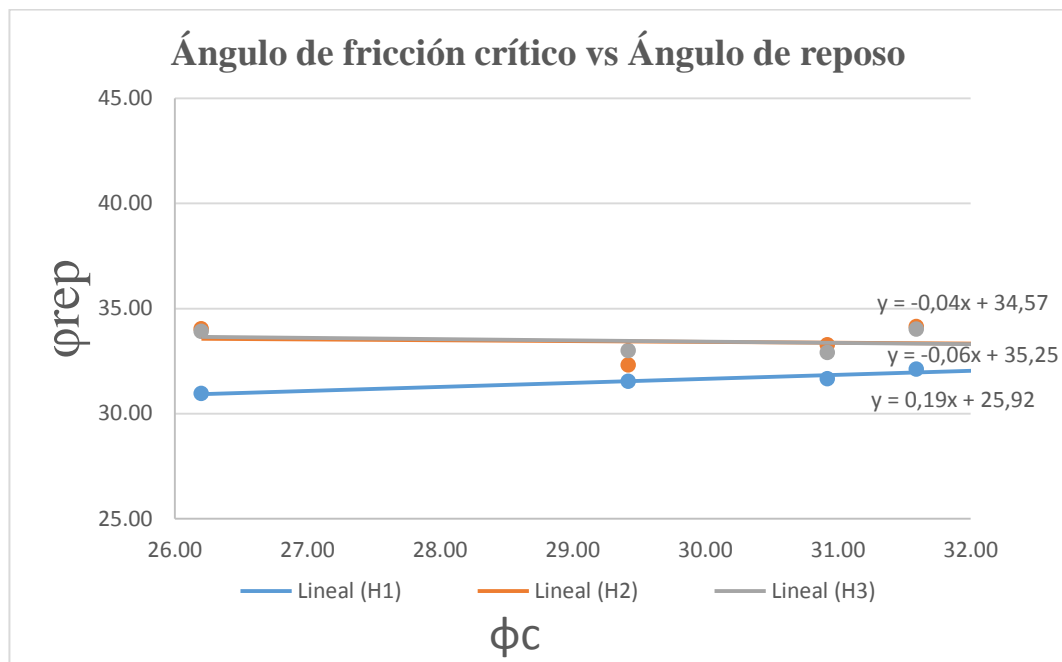


Figura 16. *Ángulo de reposo en función del ángulo de fricción crítica construido con los valores promedios de todos los tipos de materiales ensayados a tres alturas (h1, h2, h3) fijas.*

Fuente: Elaboración propia

Mediante una expresión empírica lineal se correlacionó al ángulo de reposo y al ángulo de fricción crítico, concluyendo que la ecuación correspondiente a la correlación de los datos ensayados con altura H1 presentan una constante menor, acortándose la diferencia entre estos dos ángulos (figura 16). Se observó también que para la altura H2 y H3 presentan la misma tendencia y constante similar en la ecuación lineal.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Los tipos de materiales elegidos para la presente investigación se definieron como arenas mal graduadas (SP), que presentaron $0,33\% \leq \omega \leq 1,02\%$, $2,65 \text{ gr/cm}^3 \leq G_s \leq 2,69 \text{ gr/cm}^3$ y el tipo 4 presente un $LL = 17,43\%$, $IP = NP$. Conformando éstos cuatro tipos de materiales cuya composición buscó la combinación de todos los tipos de arenas según tamaño de partícula: arenas gruesas, medias y finas en diferentes porcentajes; considerando para el tipo 4 un 5% de limos.

Se eligieron dos tipos de superficie para evaluar si la rugosidad de la base es un factor influyente sobre el ángulo de reposo de cada material. Una superficie lisa de vidrio para que no ejerza ninguna fuerza de fricción y una superficie rugosa de lija N° 80 con coeficiente de fricción de 0,32, según bibliografía.

Se establecieron tres alturas fijas para los ensayos, las cuales fueron de 8 cm, 18 cm y 28 cm. Estas se eligieron para poder evaluar el impacto del ensayo trabajando con alturas que varían en aumento de 10 cm de una a la otra.

De los resultados de los ensayos con todas las combinaciones de material, superficie y altura, con un total de 24 muestras se obtuvo que el ángulo de reposo calculado por el método del embudo, y el ángulo de fricción crítico, calculado por corte directo presentaron valores de $32,28^\circ \leq \phi_{\text{reposo}} \leq 33,42^\circ$ ensayados en estado seco, mediante el ensayo de corte directo en condiciones secas $26,20^\circ \leq \phi_c \leq 31,59^\circ$.

Pudiendo ser correlacionados mediante una expresión lineal con una constante promedio de $31,91^\circ$, en estado seco no consolidado (UU) concluyendo que estos dos ángulos son similares y la vez se muestra que el ángulo de reposo es ligeramente mayor que el ángulo de fricción crítico, obteniendo en promedios una diferencia de $3,29^\circ$.

En cuanto a la influencia que ejerce el tipo de material sobre el ángulo de reposo, se concluye que al trabajar con arenas el ángulo decrece ligeramente a medida que el tamaño de partículas disminuye.

El análisis de la rugosidad de la superficie del ensayo mostró que el ángulo de reposo en una superficie rugosa aumenta ligeramente respecto a los resultados sobre una superficie lisa. Al ser esta variación máxima de $1,02^\circ$, se concluye que a la escala del estudio, este no es un factor que influya de manera significativa.

En cuanto al análisis de la influencia de la altura del ensayo, la mayor diferencia en cuanto al ángulo de reposo se da al trabajar con una altura de 8 cm, teniendo una variación de $1,9^\circ$ en comparación con los resultados obtenidos para alturas de 18 cm y 28 cm. Concluyendo que el factor altura mostró una ligera influencia creciente y constante al aumentar la altura.

Recomendaciones

Se recomienda realizar los ensayos para calcular el ángulo de reposo mediante el método del embudo, utilizado en la presente investigación, en los diferentes suelos granulares de las provincias de la región Tacna.

Se recomienda analizar la influencia de la altura sobre el ángulo de reposo, para poder confirmar si al pasar los 28 cm este factor continúa con la tendencia de ligero crecimiento constante.

Realizar la determinación del ángulo de reposo mediante la utilización de otros métodos y comparar sus resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, K. H. (2007). *Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos*. Cybertesis- Universidad de Chile, 10.

Argandoña, J. (2014). *Metodología para determinar los parámetros de diseño Agroindustriales de Cereales*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

ASTM International. (2000). *ASTM D2487*. Obtenido de Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System): Recuperado de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2487-00.htm>

ASTM International. (2011). *ASTM D3080*. Obtenido de Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions: Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D3080.htm>

ASTM International. (2014). *ASTM D 854*. Obtenido de Métodos de prueba estándar para la gravedad específica de sólidos del suelo por agua picnómetro: Recuperado de <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D854-14>

ASTM International. (2017). *ASTM D 4318*. Obtenido de Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils: Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D4318.htm>

- Barrantes, S., & León, A. (2017). *Ángulo de reposo en suelos granulares de Lambayeque. Tesis*. Trujillo, Pimentel, Perú.
- Barrientos, J. (2014). *Comparación de resultados de métodos prácticos no normalizados con método ASTM c-1444 para la obtención del ángulo de reposo de un suelo tipo granular en la región del Bío – Bío*. Valparaíso, Chile. Chile: Universidad del Bío -Bío.
- Chik, Z., & Vallejo, L. (2005). *Characterization of the angle of repose of binary granular materials*. Canadian Geotechnical Journal 42(2), 683-692.
- Ghazavi, M., Hosseini, M., & Mollanouri, M. (2008). *A Comparison between Angle of Repose and Friction Angle of Sand*. 12th International Conference of the Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 1272- 1275.
- Gundogdu, M. (2006). *Discharge Characteristics of Polydisperse Powders through Conical Hoppers. Part 2: Predictions for Coarse, Granular, Free Flowing Powders*. Particulate Science And Technology, 23-37.
- Gundogdu, M., Kutlar, A., & Carpinlioglu, M. (2008). *Discharge Regimes of Polydisperse Powders through Conical Hoppers under Positive Flow Conditions*. Particulate Science and Technology, 551-562.
- Herle, I., & Gudehus, G. (1999). *Determination of Parameters of a Hypoplastic Constitutive Model from Properties of Grain Assemblies*. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials 4(5), 461-486.

- Jodson, L. (1968). *Fundamentos de Geología Física* 1era edición. Mexico: Limusa.
- Kalman, H., Goder, D., Rivkin, & Ben-Dor, G. (1993). *The effect of the particle-surface friction coefficient on the angle of repose*. Bulk Solids Handling 13, 123-128.
- Medina, P., Barra, E., & Guzmán, L. (2008). *Guía de Laboratorio de Geotecnia*. Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- Nieto, A., Camacho, J., & Ruiz, E. (2009). *Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening soil en suelos arcillosos*. Revista de Ingeniería Universidad de Medellín Vol 8 N°15, 75-91.
- Norma Técnica Peruana. (2001). *Norma Técnica Peruana NTP 400.012*. Lima: Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales-INDECOPI.
- Olivera, C., Carvajal, A., Benegas, G., & Gonzales, J. (Junio de 2014). *Mecánica de Suelos 1 UNITEC*. Recuperado de Wordpress: <https://mecanicadesuelos1unitec.wordpress.com/ensayo-de-corte-directo>
- Ortiz, M. (2018). *Determinación de los parámetros geotécnicos a partir del ángulo de reposo en la arena de la Cantera Tita Cruz, Pasco*. Cerro de Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Rodas, R., & Rouse, P. (2010). *Análisis Comparativo de Métodos para la medición del Ángulo de Reposo de suelos granulares*. Revista de la Construcción Vol.9 N°1, 98-106.

Rodrigo, J. A. (Enero de 2016). Recuperado de <https://rpubs.com/>.

Saez, E. (2010). *Fundamentos de Geotecnia*. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.

Solaque, D., & Lizcano, A. (2008). *Ángulo de fricción crítico y ángulo de reposo de la arena del Guamo*. Epsilon, 7-20.


Solaque, D. (2008). *Comparación del ángulo de fricción crítico con el ángulo de reposo. Análisis de la influencia de algunos factores en la determinación del ángulo de reposo*. Universidad de los Andes, 4.

Taylor, D. W. (1962). *Principios Fundamentales de mecánica de suelos*. México: Compañía Editorial Continental.

Train, D. (1958). *Some aspects of the property of angle of repose of powders*. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 10, 127-135.

ANEXOS

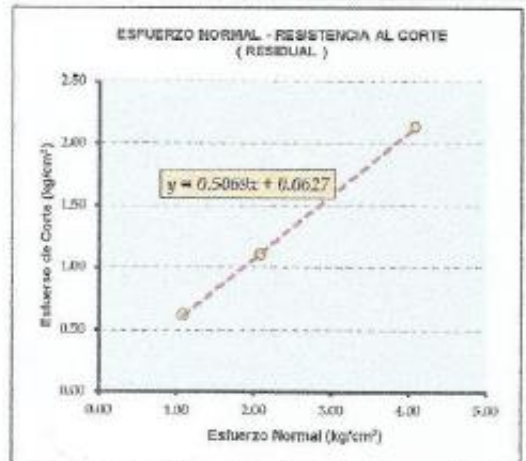
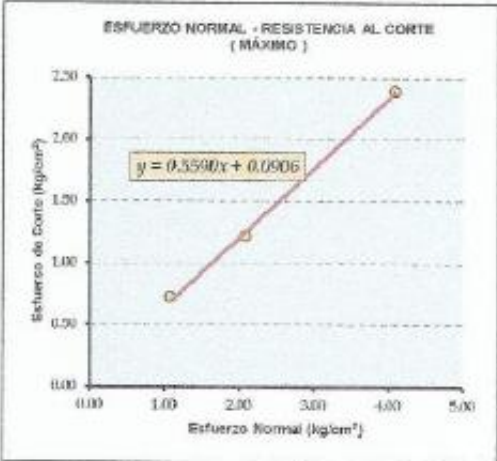
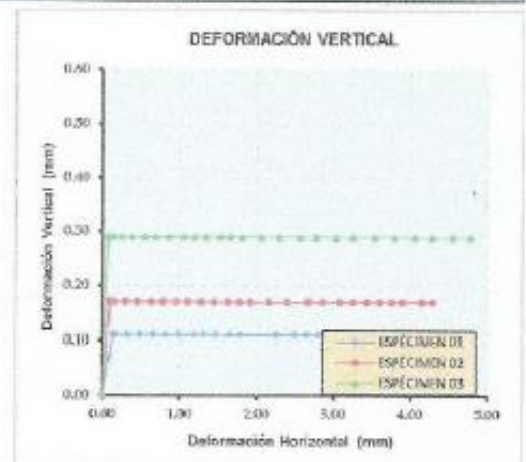
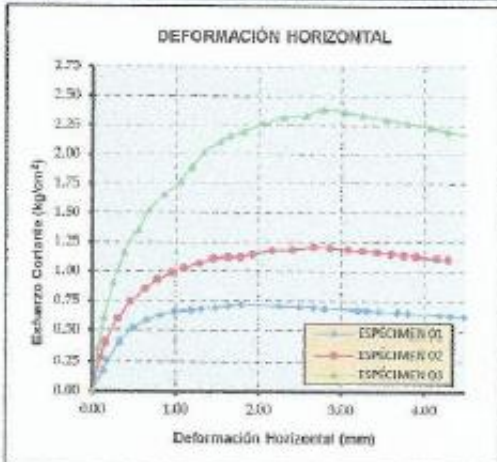
ANEXO 1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO

 IngeServicios S.A.C LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS	REGISTRO		CÓDIGO: LSCP-01-ING	
	INFORME DE RESULTADO DE ENSAYOS			
	Version:	01	Fecha:	15/02/2018
	Página:	4 de 4	Aprobado:	JRH
Informe N°: LSCP - 18 - 050	Fecha Emisión: 12/04/2019			

CORTE DIRECTO


PROYECTO : Determinación de la influencia del material superficial y altura sobre el ángulo de reposo	
SOLICITANTE : Priscila Meléndez Uribe	MATERIAL : Gravel
ESTUDIO : Tests	Kim / Prog : -
UBICACIÓN : Taana - Taana - Taana	PROF. : -
MUESTRA : Muestra T-01	MARGEN : -
FECHA : 12 de abril de 2019	

GRÁFICO DE CORTE DIRECTO



PARÁMETROS	MÁXIMO	RESIDUAL
COHESIÓN (C)	0.091	0.063
ÁNGULO DE FROCCIÓN (φ)	29.21	26.88

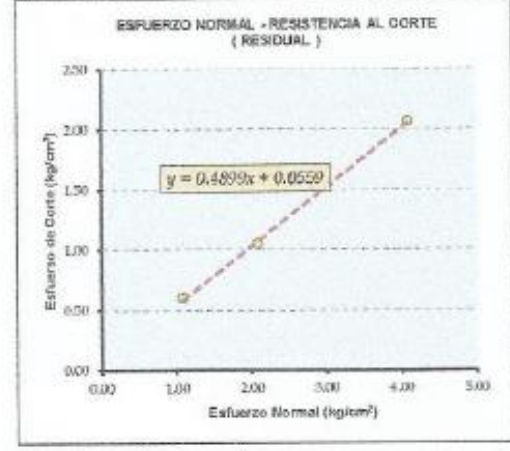
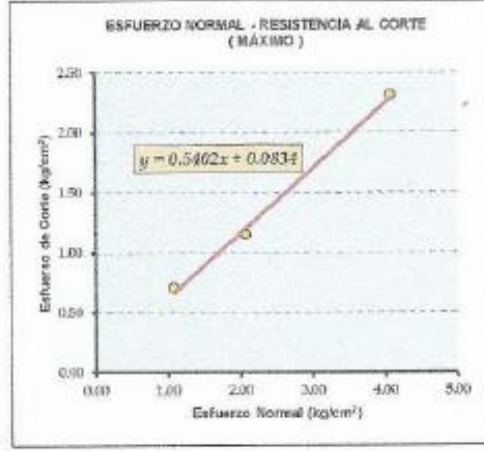
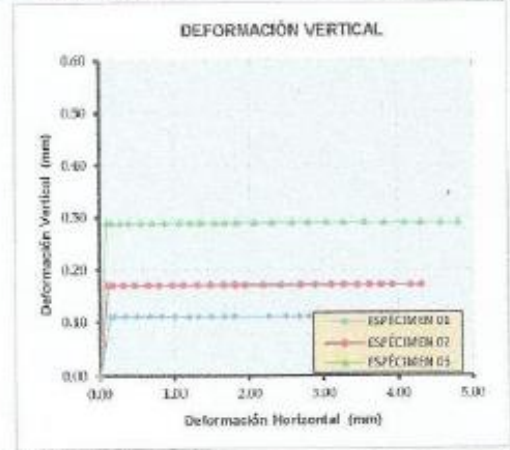
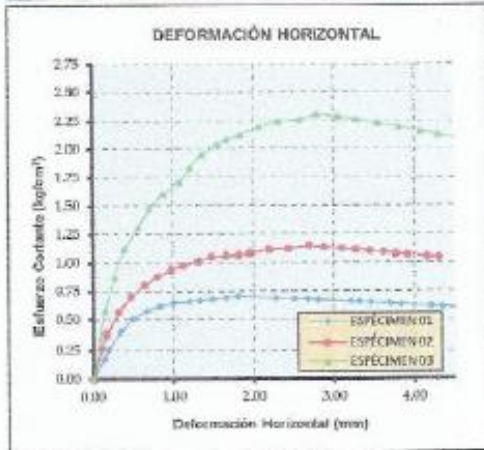
**Observaciones: La muestra fue proporcionada por el Solicitante

 LABORATORIO DE SUELOS, CONCRETO Y PAVIMENTOS	REGISTRO		CÓDIGO: LSCP-01-ING	
	INFORME DE RESULTADO DE ENSAYOS		Version:	Fecha:
			01	15/02/2018
			Página:	4 de 4
		Aprobado:	JRH	
Informe N°: LSCP - 18 - 050		Fecha Emisión:	12/04/2019	

CORTE DIRECTO

PROYECTO : Determinación de la influencia del material superficie y altura sobre el ángulo de reposo	
SOLICITANTE : Priscila Maldonado Uria	MATERIAL : Gravel
ESTUDIO : Tesis	Km / Prog. : -
UBICACIÓN : Tacna - Tacna - Tacna	PROF. : -
MUESTRA : Muestra T-02	MARGEN : -
FECHA : 12 de abril de 2019	

GRÁFICO DE CORTE DIRECTO



PARÁMETROS	MÁXIMO	RESIDUAL
COHESIÓN (C)	0.083	0.056
ÁNGULO DE FRICCIÓN (φ)	28.38	26.10

**Observaciones: La muestra fue proporcionada por el Solicitante

CORTE DIRECTO

PROYECTO : Determinación de la influencia del material superficial y altura sobre el ángulo de reposo

SOLICITANTE : Priscila Maldonado Uria

ESTUDIO : Tesis

UBICACIÓN : Tacna - Tacna - Tacna

MUESTRA : Muestra T-03

FECHA : 12 de abril de 2019

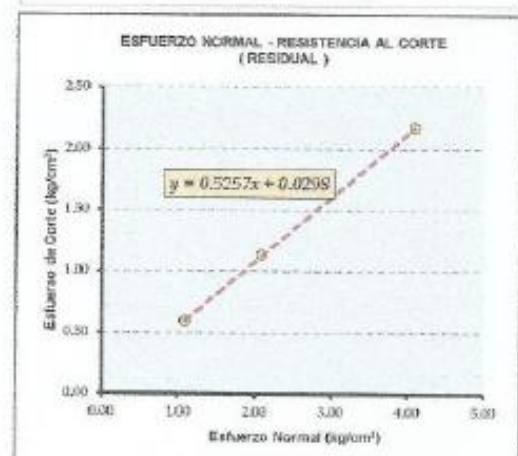
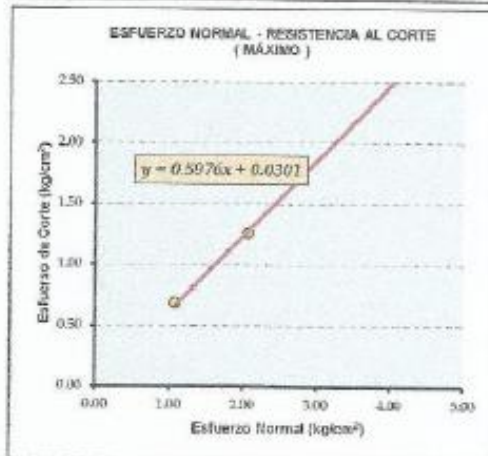
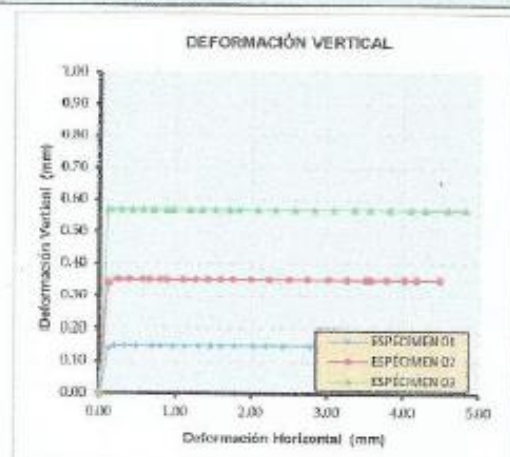
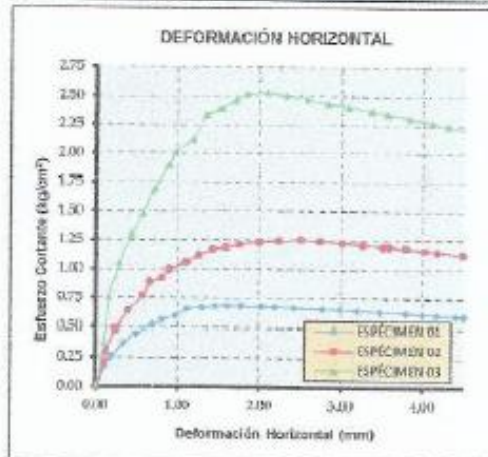
MATERIAL : Granular

Km / Prog : -

PROF. : -

MARGEN : -

GRÁFICO DE CORTE DIRECTO



PARÁMETROS	MÁXIMO	RESIDUAL
COHESIÓN (C)	0.602	0.029
ÁNGULO DE FRICCIÓN (φ)	31.77	27.70

**Observaciones: La muestra fue proporcionada por el Solicitante

CORTE DIRECTO

PROYECTO : Determinación de la influencia del material superficial y altura sobre el ángulo de reposo

SOLICITANTE : Priscila Maldonado Uribe

ESTUDIO : Tests

UBIGACIÓN : Tacna - Tacna - Tacna

MUESTRA : Muestra T-04

FECHA : 12 de abril de 2019

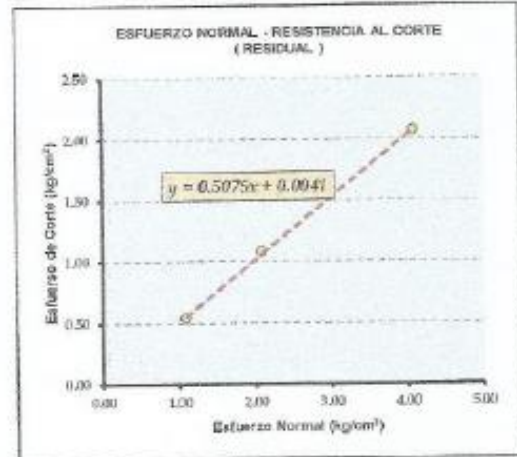
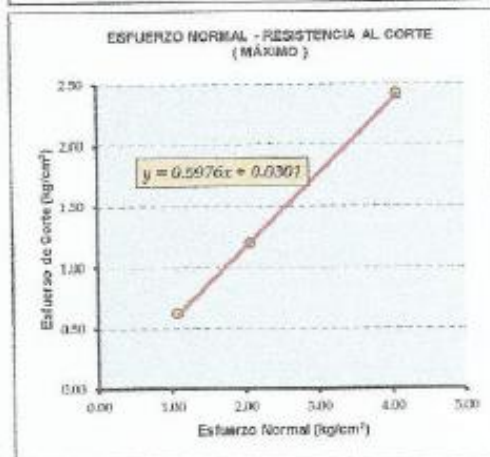
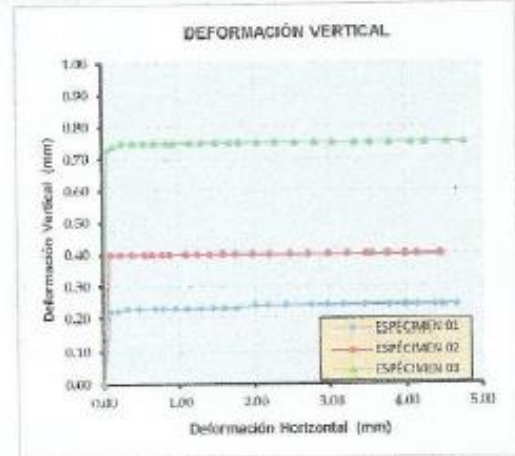
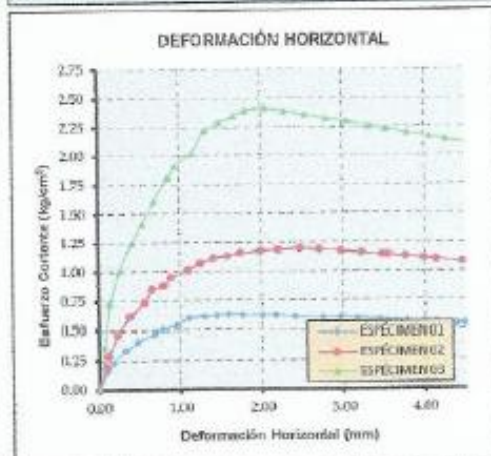
MATERIAL : Granular

Km / Prog : -

PROF. : -

MARGEN : -

GRÁFICO DE CORTE DIRECTO



PARÁMETROS	MÁXIMO	RESIDUAL
COHESIÓN (C)	0.031	0.004
ÁNGULO DE FRICCIÓN (φ)	30.84	26.89

**Observaciones: La muestra fue proporcionada por el Solicitante

ANEXO 2. HOJA RESUMEN DE RESULTADOS



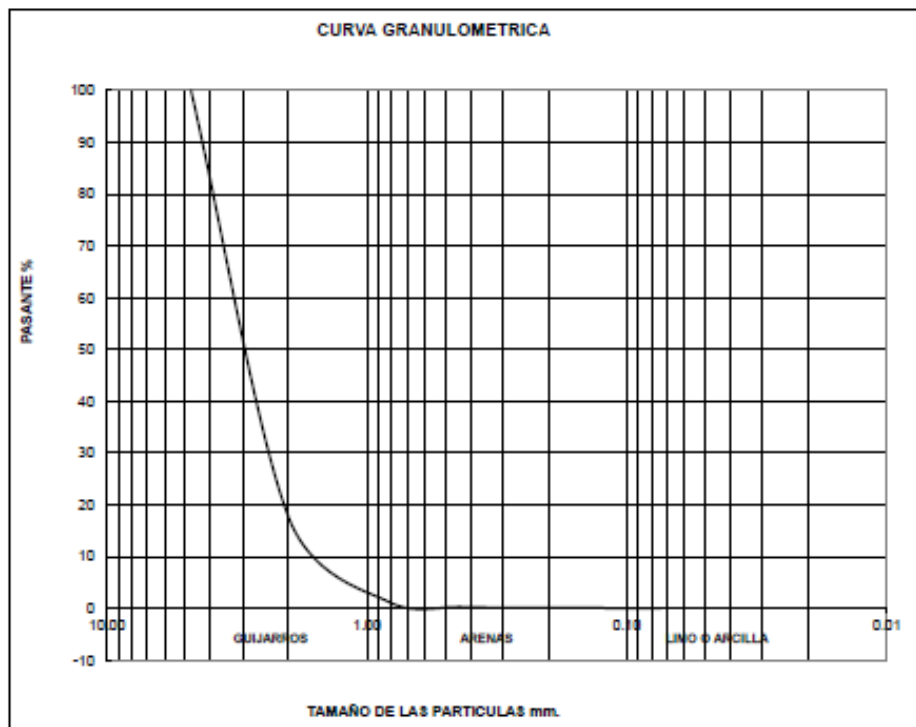
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
E.P. INGENIERIA GEOLOGICA Y GEOTECNIA



PROYECTO	"INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL, SUPERFICIE DE CONTACTO Y ALTURA DE ALMACENAJE SOBRE EL ÁNGULO DE REPOSO, EN MATERIALES GRANULARES"		
DEPARTAMENTO	TACNA	PROVINCIA	TACNA
FECHA	08/04/2019	MUESTRA	T1

HOJA RESUMEN RESULTADOS

DATOS GENERALES		
MATERIAL	TIPO 1	
COMPOSICION	100% ARENA GRUESA	
CLASIFICACION SUCS	SP	
CONTENIDO DE HUMEDAD	0.33	%
PESO ESPECIFICO	2.67	g/cm ³
COHESION	0.091	kg/cm ²
ANGULO DE FRICCION	29.21	grados
ANGULO DE REPOSO PROM	33.42	grados



RESULTADOS DEL METODO DEL EMBUDO

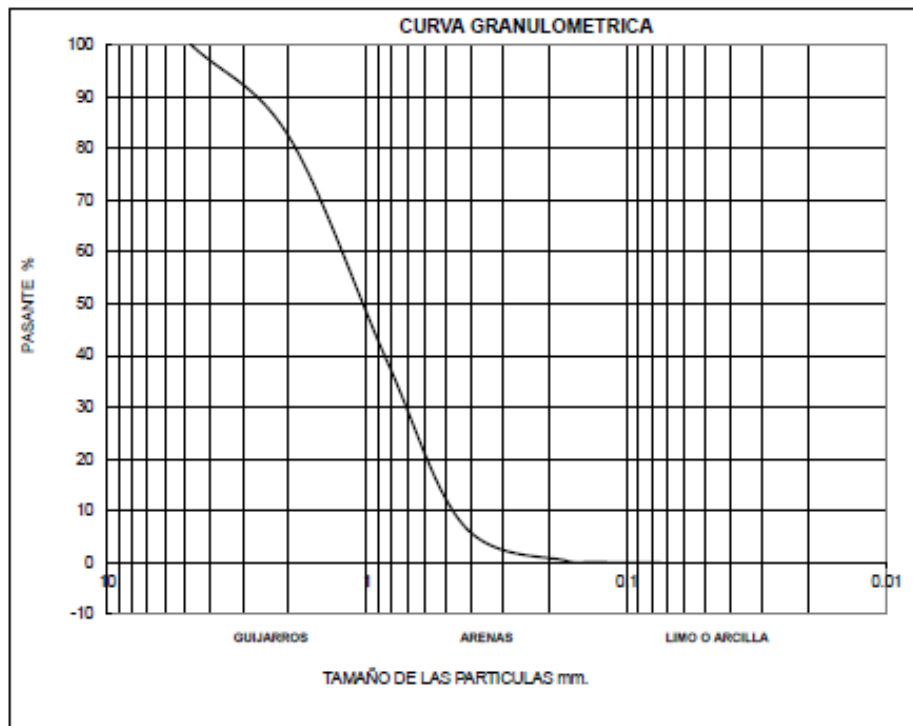
SUPERFICIE LISA - VIDRIO			SUPERFICIE RUGOSA - LIA		
ALTURA 1	cm	8	ALTURA 1	cm	8
Diametro Promedio	cm	26.10	Diametro Promedio	cm	26.9
Angulo de reposo	grados	32.52	Angulo de reposo	grados	31.71
ALTURA 2	cm	18	ALTURA 2	cm	18
Diametro Promedio	cm	53.025	Diametro Promedio	cm	53.15
Angulo de reposo	grados	34.17	Angulo de reposo	grados	34.11
ALTURA 3	cm	28	ALTURA 3	cm	28
Diametro Promedio	cm	83.1	Diametro Promedio	cm	82.85
ANGULO DE REPOSO	grados	33.97	Angulo de reposo	grados	34.06



PROYECTO	"INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL, SUPERFICIE DE CONTACTO Y ALTURA DE ALMACENAJE SOBRE EL ÁNGULO DE REPOSO, EN MATERIALES GRANULARES"		
DEPARTAMENTO	TACNA	PROVINCIA	TACNA
FECHA	10/04/2019	MUESTRA	T2

HOJA RESUMEN RESULTADOS

DATOS GENERALES		
MATERIAL	TIPO 2	
COMPOSICION	80% A GRUESA 40% A MEDIA	
CLASIFICACION SUCS	SP	
CONTENIDO DE HUMEDAD	0.95	%
PESO ESPECIFICO	2.85	g/cm ³
COHESION	0.080	kgf/cm ²
ANGULO DE FRICCION	28.38	grados
ANGULO DE REPOSO PROM	32.81	grados



RESULTADOS DEL METODO DEL EMBUDO

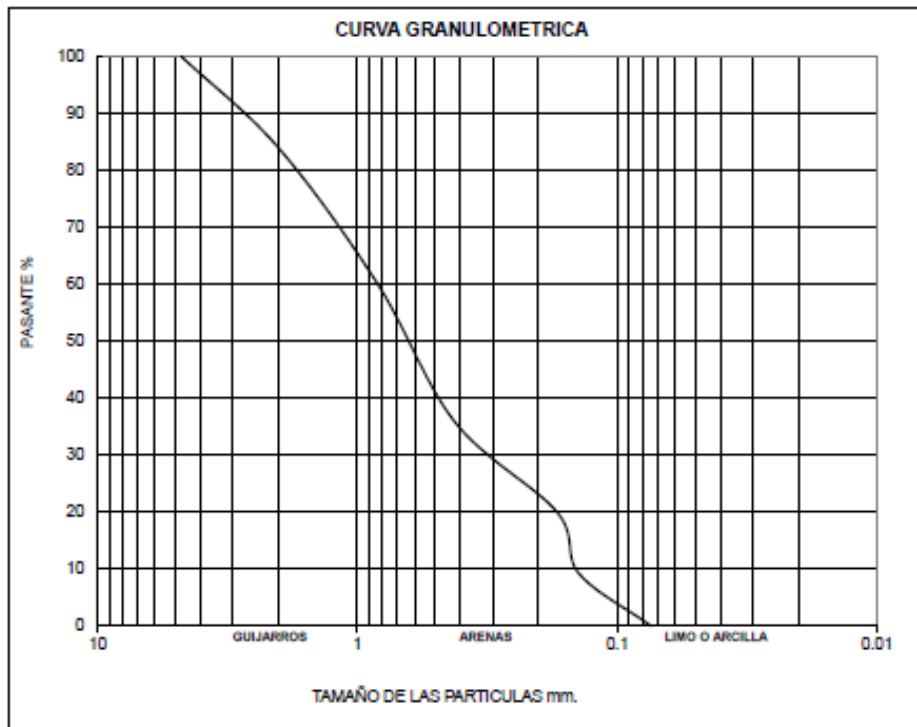
SUPERFICIE LISA - VIDRIO			SUPERFICIE RUGOSA - LIA		
ALTURA 1	cm	8	ALTURA 1	cm	8
Diametro Promedio	cm	28.25	Diametro Promedio	cm	28.85
Angulo de reposo	grados	31.96	Angulo de reposo	grados	31.96
ALTURA 2	cm	18	ALTURA 2	cm	18
Diametro Promedio	cm	57	Diametro Promedio	cm	52.9
Angulo de reposo	grados	32.28	Angulo de reposo	grados	34.24
ALTURA 3	cm	28	ALTURA 3	cm	28
Diametro Promedio	cm	87.4	Diametro Promedio	cm	85.75
ANGULO DE REPOSO	grados	32.85	Angulo de reposo	grados	33.15



PROYECTO	"INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL, SUPERFICIE DE CONTACTO Y ALTURA DE ALMACENAJE SOBRE EL ÁNGULO DE REPOSO, EN MATERIALES GRANULARES"		
DEPARTAMENTO	TACNA	PROVINCIA	TACNA
FECHA	12/04/2019	MUESTRA	T3

HOJA RESUMEN RESULTADOS

DATOS GENERALES		
MATERIAL	TIPO 3	
COMPOSICION	40% A. GRUESA 40% A. MEDIA 20% A. FINA	
CLASIFICACION SUCS	SP	
CONTENIDO DE HUMEDAD	1.02	%
PESO ESPECIFICO	2.89	g/cm ³
COHESION	0.002	kg/cm ²
ANGULO DE FRICCION	31.77	grados
ANGULO DE REPOSO PROM	32.26	grados



RESULTADOS DEL METODO DEL EMBUDO

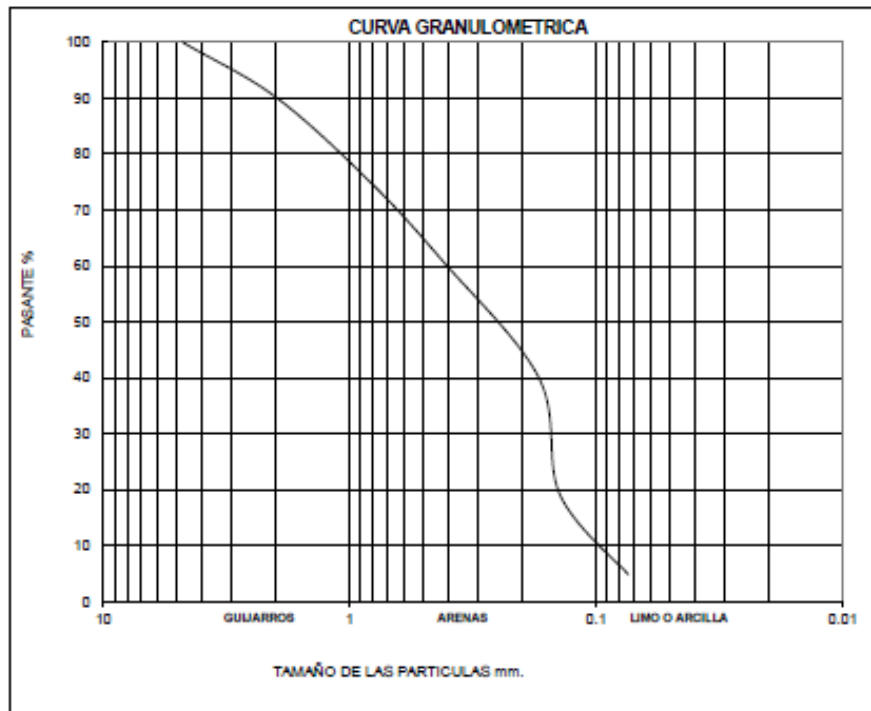
SUPERFICIE LISA - VIDRIO			SUPERFICIE RUGOSA - LIA		
ALTURA 1	cm	8	ALTURA 1	cm	8
Diametro Promedio	cm	26.95	Diametro Promedio	cm	26.26
Angulo de reposo	grados	30.7	Angulo de reposo	grados	32.36
ALTURA 2	cm	18	ALTURA 2	cm	18
Diametro Promedio	cm	56.9	Diametro Promedio	cm	56.96
Angulo de reposo	grados	32.32	Angulo de reposo	grados	32.3
ALTURA 3	cm	28	ALTURA 3	cm	28
Diametro Promedio	cm	85.75	Diametro Promedio	cm	86.75
ANGULO DE REPOSO	grados	33.15	Angulo de reposo	grados	32.64



PROYECTO	"INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL, SUPERFICIE DE CONTACTO Y ALTURA DE ALMACENAJE SOBRE EL ÁNGULO DE REPOSO, EN MATERIALES GRANULARES"		
DEPARTAMENTO	TACNA	PROVINCIA	TACNA
FECHA	16/04/2019	MUESTRA	T4

HOJA RESUMEN RESULTADOS

DATOS GENERALES		
MATERIAL	TIPO 4	
COMPOSICION	25% A.GRUESA 35% A. MEDIA 35% A.FINA 5%FINOS	
CLASIFICACION SUCS	SP	
CONTENIDO DE HUMEDAD	0.03	%
PESO ESPECIFICO	2.05	g/cm ³
LIMITE LIQUIDO	20.52	%
LIMITE PLASTICO	0	%
INDICE DE PLASTICIDAD	NP	%
COHESION	0.03	kg/cm ²
ANGULO DE FRICCION	30.84	grados
ANGULO DE REPOSO PROM	33.95	grados



RESULTADOS DEL METODO DEL EMBUDO

SUPERFICIE LISA - VIDRIO			SUPERFICIE RUGOSA - LIA		
ALTURA 1	cm	0	ALTURA 1	cm	0
Diámetro Promedio	cm	26.75	Diámetro Promedio	cm	26.6
Ángulo de reposo	grados	30.85	Ángulo de reposo	grados	31.03
ALTURA 2	cm	10	ALTURA 2	cm	10
Diámetro Promedio	cm	53.45	Diámetro Promedio	cm	53.15
Ángulo de reposo	grados	33.95	Ángulo de reposo	grados	34.11
ALTURA 3	cm	20	ALTURA 3	cm	20
Diámetro Promedio	cm	83.425	Diámetro Promedio	cm	83.25
Ángulo de reposo	grados	33.87	Ángulo de reposo	grados	33.93

ANEXO 3. GALERÍA FOTOGRÁFICA

3.1. Trabajo en campo

3.1.1. Procedimiento



3.1.2. Materiales y equipos



3.2. Tamizado

3.2.1. Procedimiento



Foto N°1.- Separación del material por tamizado por las mallas N° 20, N° 60, N°200 y fondo

3.2.2. Materiales y equipos



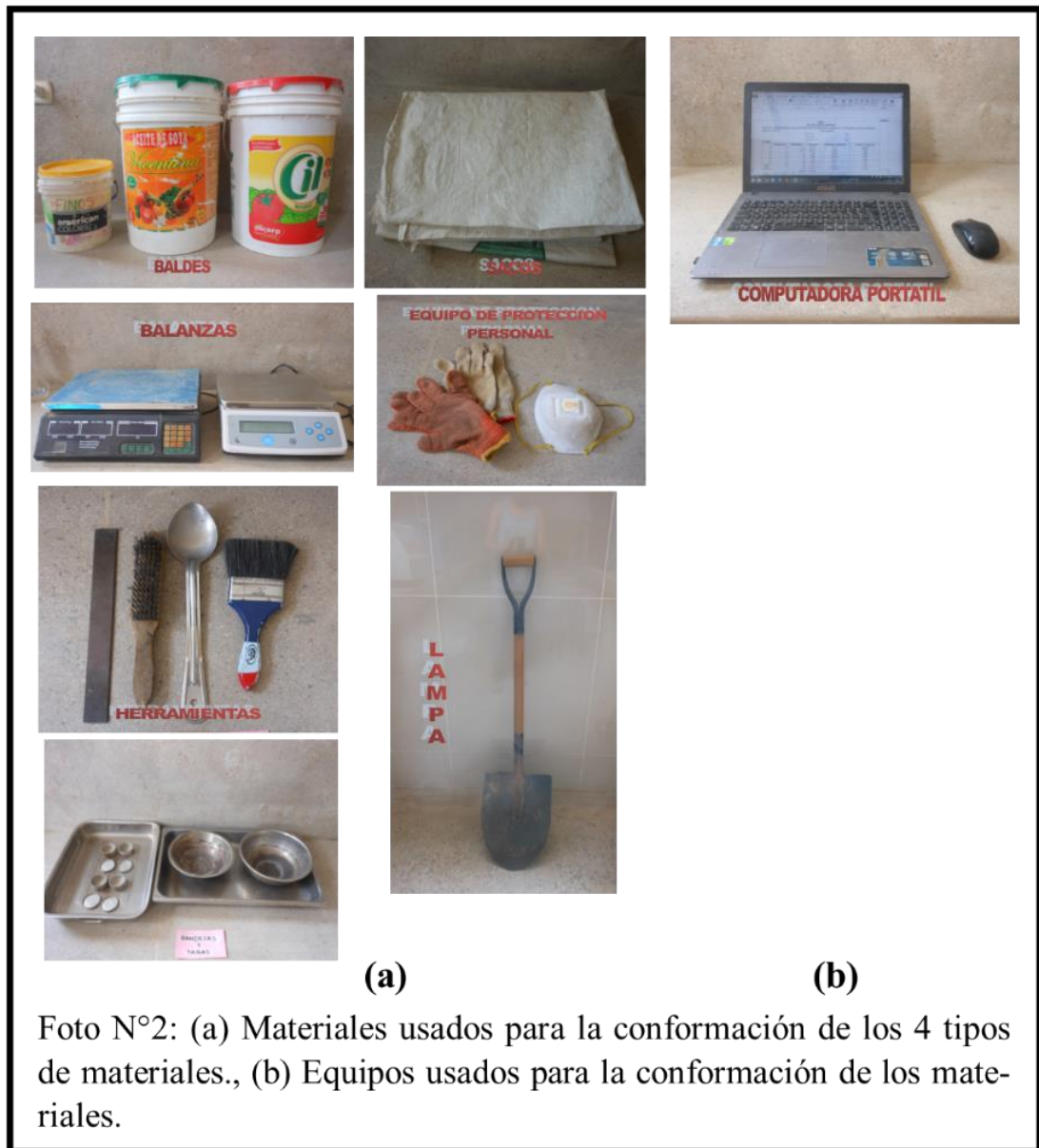
Foto N°2.- (a) herramientas usadas para el ensayo de tamizado, (b) equipos usados en el ensayo de tamizado.

3.3. Conformación de muestra

3.3.1. Procedimiento



3.3.2. Materiales y equipos



3.4. Granulometría

3.4.1. Procedimiento



3.4.2. Materiales y equipo



3.5. Límites de consistencia

3.5.1. Procedimiento

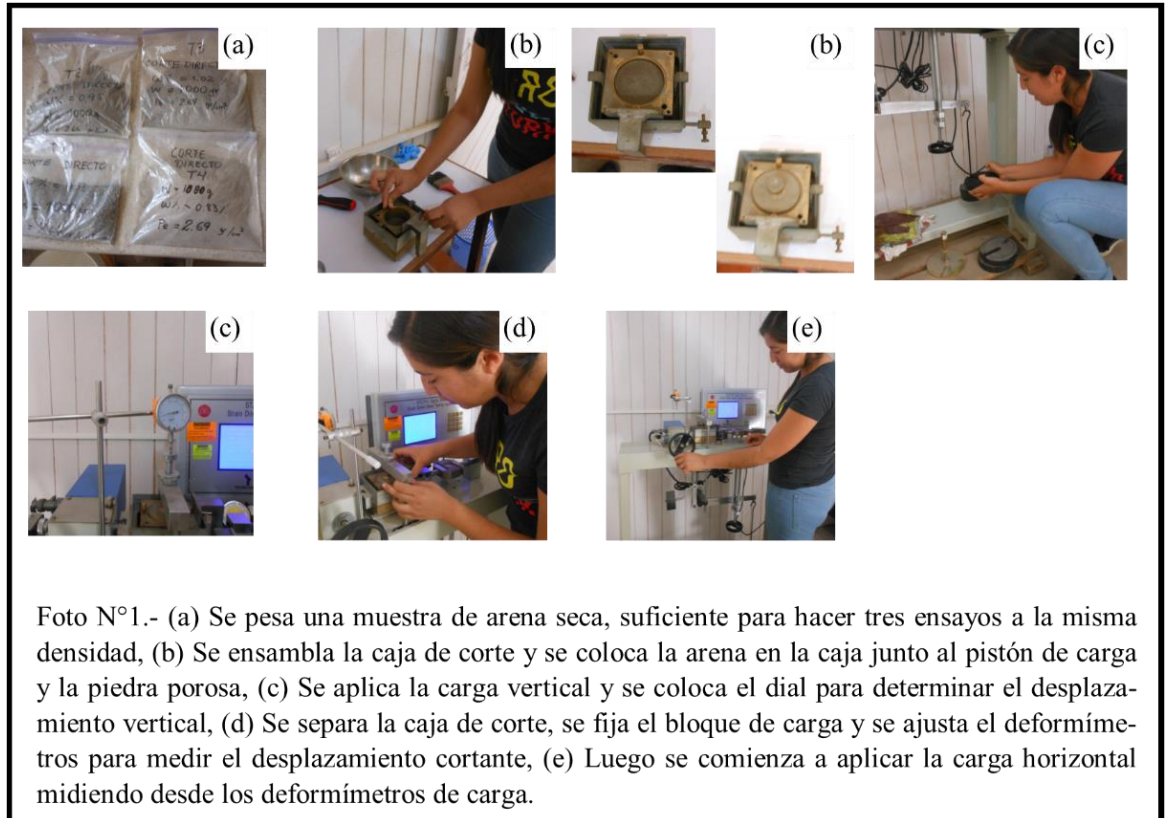


3.5.2. Materiales y equipos



3.6. Corte Directo

3.6.1. Procedimiento



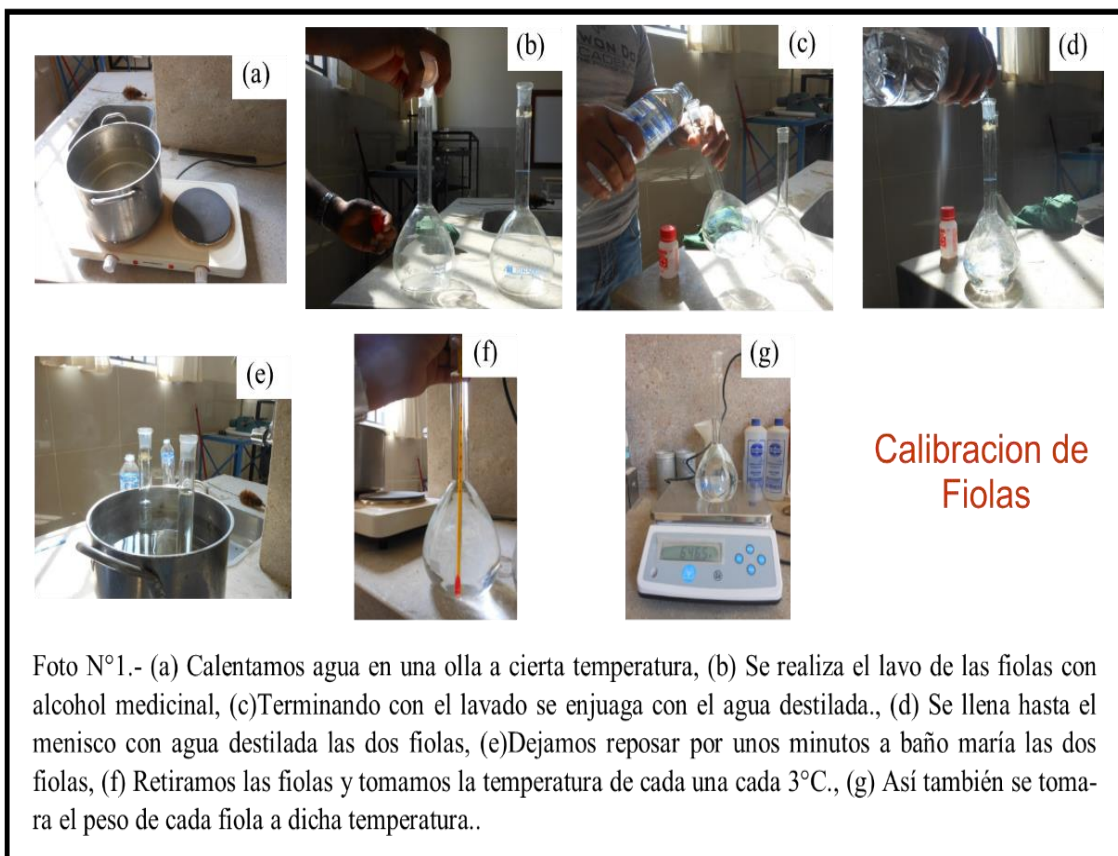
3.6.2. Materiales y equipos



3.7. Peso específico

3.7.1. Calibración de la fiola

3.7.1.1. Procedimiento

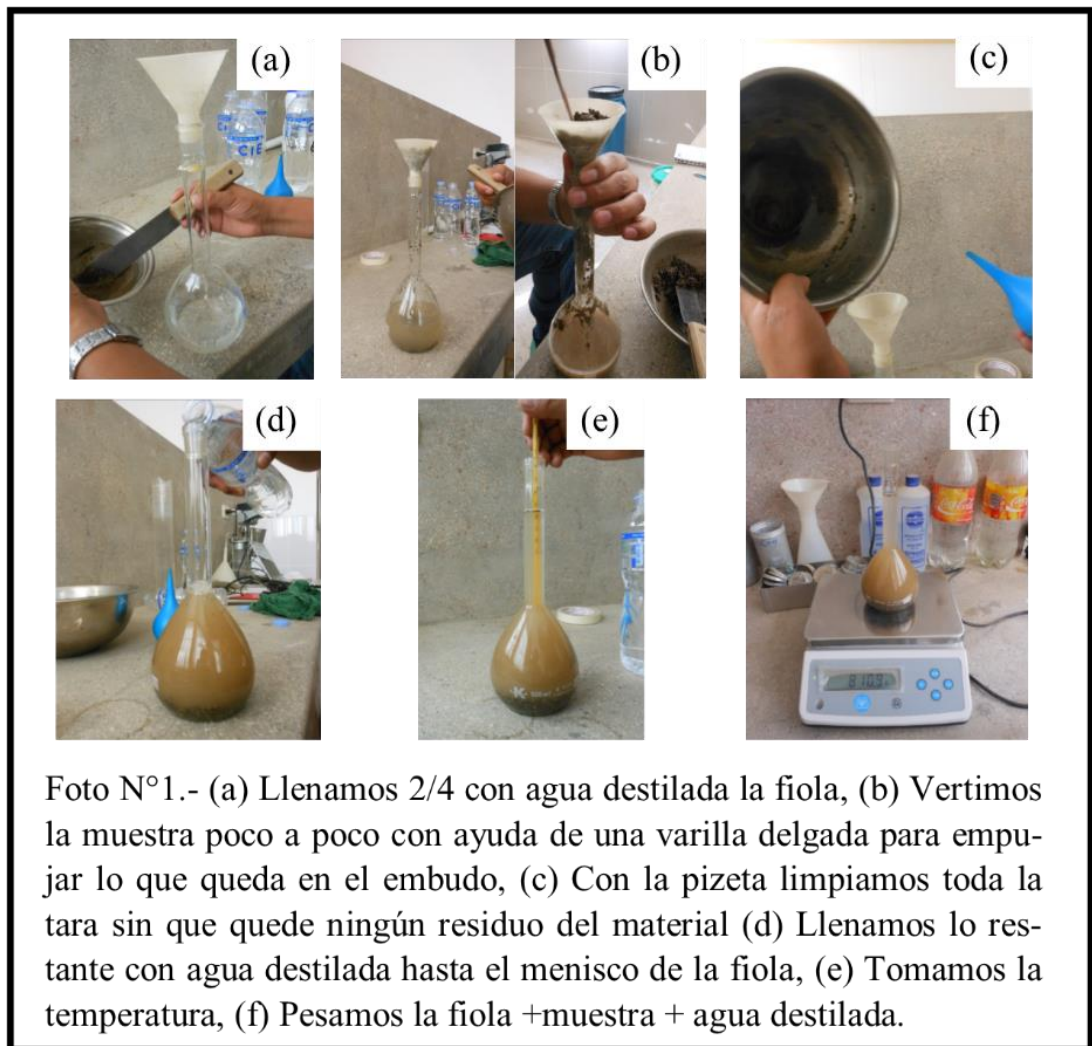


3.7.1.2. Materiales y equipos



3.7.2. Procedimiento para la determinación del peso específico

3.7.2.1. Procedimiento



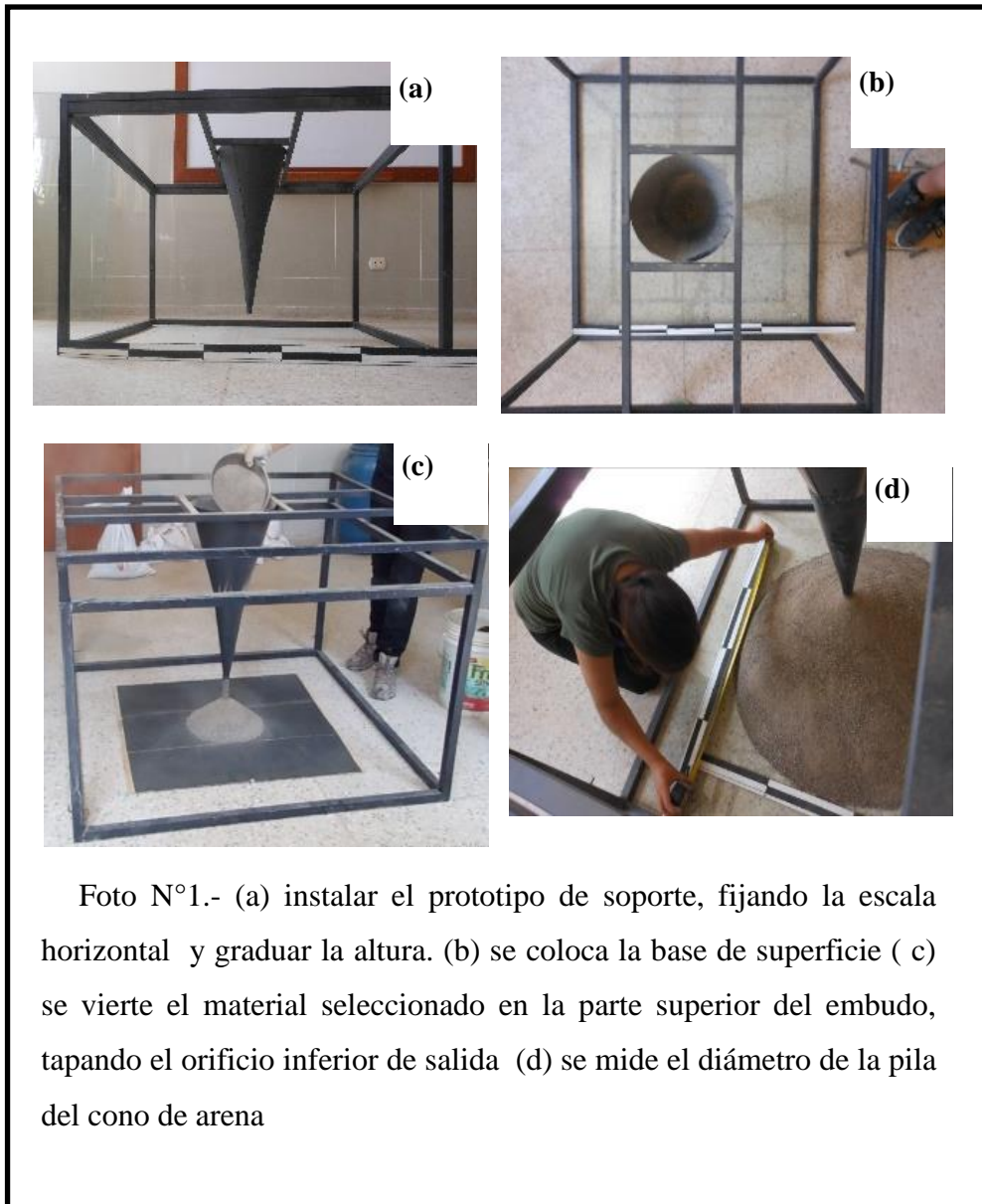
3.7.2.2. Materiales y equipos



Foto N°2: (a) Materiales usados para el ensayo de peso específico, (b) Equipos usados para el ensayo de peso específico.

3.8. Método del embudo

3.8.1. Procedimiento



3.8.2. Materiales y equipos



