

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Estimación de los parámetros de resistencia cortante para suelo tipo conglomerado

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil


Autores:

Paúl Andrés Aguirre Abad

Juan Diego Muñoz Espinoza

Director:

Karla Johana Santacruz Reyes

ORCID:  0009-0000-8192-7948

Cuenca, Ecuador

2023-06-12

Resumen

El presente trabajo se enfoca en el estudio del conglomerado, un suelo heterogéneo formado por boleos, rocas que abarcan un gran rango de tamaños (mayor a las 3") y la matriz conformada por grava, arena y finos. Este suelo se encuentra comúnmente en las orillas de los ríos de la ciudad de Cuenca. El objetivo principal es aproximar los parámetros de resistencia a corte, fricción y cohesión, mediante dos metodologías: relaciones empíricas y análisis inverso; para ello, en primer lugar, se realizaron ensayos de caracterización y resistencia sobre la matriz. Para la primera metodología se aplicó la teoría para Bimsoils presentada por Kalender et. al (2014), y la presentada por Duncan (2012), la primera requiere parámetros como: porcentaje y características de los boleos y resistencia de la matriz, tras aplicar esta metodología se obtuvo un ángulo de fricción aproximado de 39° y una cohesión entre 12 y 24 KPa; por otra parte, la segunda metodología empírica toma en cuenta parámetros como la granulometría, densidad relativa y presión de confinamiento, con esta se determinó un ángulo de fricción de 51.37°. Con la metodología del análisis inverso se determinó un ángulo de fricción cercano a 53° y cohesión de 2.6 KPa. Finalmente, comparando resultados se identifica que la diferencia en los valores obtenidos se debe a las distintas condiciones bajo las cuales se realiza el estudio, siendo los métodos empíricos una opción más practica y aplicable que el análisis inverso debido a las limitaciones del método e información que requiere.

Palabras clave: conglomerado, parámetros de resistencia, métodos empíricos, análisis de taludes

Abstract

The present work focuses on the study of conglomerate, a heterogeneous soil formed by blocks, rocks that cover a wide range of sizes (larger than 3") and the matrix formed by gravel, sand and fines. This soil is commonly found on the banks of rivers in the city of Cuenca. The main objective is to approximate the parameters of shear strength, friction and cohesion, by means of two methodologies: empirical relationships and back-analysis; for this, first, characterization and strength tests were performed on the matrix. For the first methodology, the theory for Bimsoils presented by Kalender et. al (2014), and the one presented by Duncan (2012) were applied, the first one requires parameters such as: percentage and characteristics of the blocks, and resistance of the matrix, after applying this methodology an approximate friction angle of 39° and a cohesion between 12 and 24 KPa were obtained; on the other hand, the second empirical methodology takes into account parameters such as granulometry, relative density and confining pressure, with this one a friction angle of 51.37° was determined. With the back-analysis methodology, a friction angle close to 53° and cohesion of 2.6 KPa were determined. Finally, comparing results it is identified that the difference in the values obtained is due to the different conditions under which the study is performed, being the empirical methods a more practical and applicable option than the back analysis due to the limitations of the method and the information it requires.

Keywords: conglomerate, strength parameters, empirical methods, slope analysis

Índice de contenido

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos	13
1.4 Estructura de la tesis	14
2 MARCO TEÓRTICO	15
2.1 Contexto geológico	15
2.1.1 Terrazas aluviales y fluvioglaciares	16
2.1.2 Terrazas fluvioglaciares en Cuenca	16
2.1.3 Comportamiento geotécnico	17
2.1.4 Definición de conglomerado	17
2.2 Propiedades físicas del suelo	17
2.2.1 Granulometría	18
2.2.2 Humedad	19
2.2.3 Límites de Atterberg	19
2.2.4 Clasificación del suelo	20
2.2.5 Densidad	20
2.2.6 Compactación (Proctor)	21
2.2.7 Densidad relativa	22
2.3 Parámetros de resistencia del suelo	22
2.3.1 Ensayos triaxiales	23
2.3.2 Ensayo compresión simple	24
2.4 Estabilidad de taludes	24
2.4.1 Métodos de equilibrio límite (MEL)	25
2.4.2 Métodos numéricos	26
2.4.3 Análisis inverso	26
2.5 Estudios realizados sobre suelos granulares gruesos	27
2.5.1 Método de la granulometría paralela	27
2.5.2 Método de corte y reemplazo	28
2.5.3 Método de la matriz	28
2.5.4 Método empírico para estimar la Resistencia de Bimsoil	28
2.5.5 Teoría de Duncan	32
2.5.6 Caracterización de suelos granulares gruesos en Chile.	32
2.5.7 Calibración del densímetro nuclear para obtención de densidades en suelo grueso	35

2.5.8	Determinación de las propiedades elásticas del conglomerado en la ciudad de Cuenca	36
2.5.9	Caracterización de suelos granulares gruesos. El caso de la Grava de Lima. 37	
2.5.10	Comportamiento mecánico de suelos grueso granulares de origen aluvial en Colombia.....	39
2.5.11	Aproximación de la capacidad portante para conglomerados en la ciudad de Cuenca.	39
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	41
3.1	Localización sitio de estudio	41
3.2	Recolección de muestras	42
3.2.1	Muestras para ensayos de clasificación y resistencia	42
3.2.2	Muestras para ensayos de densidad en laboratorio	43
3.3	Recolección de datos en campo.....	44
3.3.1	Muestras fotográficas	44
3.3.2	Levantamientos topográficos.....	45
3.4	Caracterización física	46
3.4.1	Granulometría por tamizado	47
3.4.2	Granulometría por imágenes tomadas en campo	49
3.4.3	Determinación de Límites de Atterberg	51
3.4.4	Densidad del suelo	52
3.4.5	Humedad	56
3.4.6	Ensayo Proctor	56
3.5	Parámetros de resistencia de la matriz.....	57
3.5.1	Conformación de muestras en laboratorio	57
3.5.2	Ensayos de compresión simple.....	58
3.5.3	Ensayos triaxiales.....	59
3.6	Parámetros de resistencia del conjunto.....	61
3.6.1	Metodologías empíricas (Metodología 1).....	61
3.6.2	Análisis inverso (Metodología 2)	63
4	RESULTADOS	66
4.1	Caracterización física	66
4.1.1	Granulometría	66
4.1.2	Límites de Atterberg.....	71
4.1.3	Clasificación de las muestras.....	72
4.1.4	Humedad y densidad	73

4.1.5	Proctor	75
4.2	Parámetros de resistencia de la matriz.....	76
4.2.1	Resistencia a compresión simple.....	76
4.2.2	Ensayos triaxiales.....	77
4.2.3	Parámetros de resistencia promedio de la matriz.....	82
4.3	Parámetros de resistencia del conjunto	82
4.3.1	Relaciones empíricas (Metodología 1)	82
4.3.2	Análisis inverso (Metodología 2)	86
4.4	Comparación entre las 2 metodologías	87
4.5	Comparación con trabajos similares.....	87
5	CONCLUSIONES	89
6	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	93
7.	REFERENCIAS	94
8.	ANEXOS.....	96
	Anexo A: Fotografías del talud y escala	96
	Anexo B: Granulometría y clasificación de muestras.....	99
	Anexo C: Fotografías procesadas.....	105
	Anexo D: Ensayo con aceite de parafina.....	110
	Anexo E: Ensayo Proctor.....	111
	Anexo F: Ensayos a compresión simple	112
	Anexo G: Ensayos triaxiales.....	116

Índice de figuras

Figura 1. Columna estratigráfica de la cuenca de Cuenca	16
Figura 2 Esquema con los métodos de cálculo para estabilidad de taludes.	25
Figura 3. Curvas empíricas para estimar el parámetro A en función de los parámetros de la matriz.	30
Figura 4. Diferentes tipos de formas de partículas..	31
Figura 5. Guía para estimar el ángulo de reposo. en función de las propiedades de los boleos.. 31	31
Figura 6. Triaxial a gran escala usado en Chile.....	33
Figura 7. Metodología para obtener muestras inalteradas de gran tamaño.....	34
Figura 8. Resultados de ángulo de fricción	35
Figura 9. Segmentación de imagen para determinar el % de boleos.....	36
Figura 10. Rangos granulométricos de todas las muestras ensayas en la ciudad de Lima .	37
Figura 11. Parámetros de resistencia aproximados obtenidos	38
Figura 12. Resultados de análisis inverso para determinar los parámetros de resistencia del conglomerado	38
Figura 13. Ensayo de corte directo realizado en campo en la ciudad de Cuenca.....	40
Figura 14. Ubicación de la zona de estudio en el mapa geológico de las terrazas de la ciudad de Cuenca	42
Figura 15. Toma de muestras del material para análisis granulométrico desprendido directamente del talud.....	43
Figura 16. Toma de muestras de material para ensayos triaxiales y a compresión simple..	43
Figura 17. Pedazo intacto de la matriz del talud cubierto con parafina.....	44
Figura 18. Parte del talud donde se tomaron fotografías para análisis de boleos.....	45
Figura 19. Fotografía #1 para determinar el porcentaje de boleos del talud.	45
Figura 20. Levantamiento topográfico del talud, en la primera imagen se puede observar los obstáculos para realizar el levantamiento, en la segunda el proceso de levantamiento mediante laser.	46
Figura 21. Desprendimiento de talud en obra provocado por las fuertes lluvias, se observa un deslizamiento en forma de desprendimiento de los boleos más grandes..	46
Figura 22. Proceso de secado y lavado del material para análisis granulométrico..	47
Figura 23. Análisis granulométrico mediante tamizado.	48
Figura 24. Complementación del análisis granulométrico con la ayuda de flexómetro para los boleos superiores a 3".....	48
Figura 25. Proceso manual de identificación de boleos con diámetros mayor a 3".....	49
Figura 26, Diámetros mayores y menores obtenidos tras aplicar el código desarrollado en Python.....	50
Figura 27. Ensayo de Casagrande para determinar el límite líquido.	51

Figura 28. Sección de material que se toma para obtener la humedad en el ensayo de Casagrande.	51
Figura 29 Ensayo de limite plástico.....	52
Figura 30. Primera toma de densidad con densímetro nuclear en material saturado, se puede observar la gran presencia de boleos en la zona.	53
Figura 31 Toma de densidades con densímetro ubicada al pie del talud donde existe un menor porcentaje de boleos.....	54
Figura 32 Factores de corrección para humedad y densidad.	54
Figura 33 Ensayo de parafina, recubrimiento de muestras.....	55
Figura 34 Muestras con parafina dentro de la probeta para determinar su volumen..	55
Figura 35. Compactación para ensayo Proctor..	56
Figura 36 Distribución de golpes para compactación del material.	56
Figura 37. Muestra luego de ensayo a compresión simple.....	59
Figura 38 Equipo completo de triaxial, con la celda y el panel de control de presiones y niveles de agua.....	60
Figura 39 Muestra de suelo ensayada den Triaxial CU, falla tipo barril.	61
Figura 40. Ubicación de estaciones meteorológicas en la zona.	62
Figura 41. Ubicación del levantamiento topográfico en el mapa para determinar puntos de control y empatar ambos levantamientos.	64
Figura 42 Configuración de los parámetros del suelo en el software Geo5.....	65
Figura 43 Configuración del talud previo a la falla para realizar el análisis de estabilidad en Geo5.....	65
Figura 44 Curvas granulométricas obtenidas por tamizado.....	66
Figura 45. Curvas granulométricas de suelo	67
Figura 46 Curvas granulométricas obtenidas para los boleos	69
Figura 47 Rango de curvas granulométricas completo.....	69
Figura 48 Comparación con curvas granulométricas de otros trabajos.	70
Figura 49 Carta de plasticidad con las muestras tomadas.	71
Figura 50 Comparación de la naturaleza de los finos entre este y otros trabajos similares.	72
Figura 51 Curva de compactación Proctor modificado.	75
Figura 52 Curvas esfuerzo-deformación tras ensayo compresión simple.....	76
Figura 53 Curvas esfuerzo deformación en triaxiales grandes.	77
Figura 54 Envoltorio de falla obtenida tras triaxiales en muestras grandes.	78
Figura 55 Curvas esfuerzo-deformación en triaxiales pequeños, grupo 1.	79
Figura 56 Círculos de Mohr en triaxiales pequeños, grupo 1.....	79
Figura 57 Curvas esfuerzo-deformación en triaxiales pequeños, grupo 2.	80
Figura 58 Círculos de Mohr en triaxiales pequeños, grupo 2.....	81

Figura 59 Comparación entre los ángulos de fricción obtenidos por el criterio de Duncan y ensayos triaxiales..	84
Figura 60. Definición del parámetro A..	84
Figura 61. Superficie de falla obtenida, con geometría irregular debido al desprendimiento de boleos..	86
Figura 62. Superficies de falla para diferentes combinaciones de Φ -C..	86

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros físico mecánicos para las terrazas de la ciudad de Cuenca.	17
Tabla 2. Valor de Densidad relativa según la compactación relativa.	22
Tabla 3 Valores para los coeficientes A, B, C y D en la Teoría de Duncan.	32
Tabla 4 Resultados obtenidos que muestran una relación directa entre el % de boleos y los parámetros elásticos del conglomerado.....	36
Tabla 5 Diámetros característicos de cada muestra en milímetros.....	67
Tabla 6 Desviación estándar de cada diámetro.....	68
Tabla 7 Valores de Cc y Cu para cada muestra.	68
Tabla 8 Rangos de porcentaje obtenidos para cada material.....	70
Tabla 9 Valores obtenidos para los Límites de Atterberg.	71
Tabla 10 Clasificación SUCS de las muestras de suelo.....	72
Tabla 11 Factores de corrección para lecturas de densidad.	73
Tabla 12 Factores de corrección para lecturas de humedad.....	73
Tabla 13 Valores de humedad del material obtenidos por densímetro y en laboratorio.....	74
Tabla 14 Valores de densidad del material obtenidos por densímetro nuclear y ensayo con parafina.....	74
Tabla 15 Comparación de valores de densidad y humedad.....	75
Tabla 16 Condiciones de ensayo par amuestras en compresión simple.	77
Tabla 17 Características de las muestras ensayadas con diámetro de 7 cm.	78
Tabla 18 Características de las muestras ensayadas con diámetro de 3.5 cm (Grupo 1). ..	80
Tabla 19 Características de las muestras ensayadas con diámetro de 3.5 cm (Grupo 2). ..	81
Tabla 20 Parámetros para metodología Bimsoil.....	85
Tabla 21 Resultados para valor máximo de VPB	85
Tabla 22 Resultados para valor mínimo de VPB.....	85
Tabla 23. Resultados de resistencia a corte por varios autores.	88

Dedicatoria

Aguirre Paúl

A mi hogar, Simone, Juan Pablo, Teodoro y Cocoa, por aguantarme durante todos estos años, sacarme sonrisas y brindarme su apoyo y amor incondicional.

A mis abuelos, Ñeca, Edgar, Ana y Patricio por su cariño y consejos, siempre velando por mi bienestar.

A toda mi familia, en especial a mi tío Iván, por ser mi guía y siempre motivarme a ser una mejor persona.

A mis amigos, Miguel, Santiago y las Gabys, quienes se convirtieron en mi familia y sin ellos no hubiera llegado a este punto.

A mi padre, a quien extraño siempre y que allá donde se encuentre espero hacerlo sentir orgulloso.

Y finalmente a mi madre, quien siempre ha sido mi motor para salir adelante, le debo todo y quiero como a nadie en este mundo.

Muñoz Juan Diego

A mis padres, Juan y Marcia, por siempre apoyarme a lo largo de mi vida y por ser mis dos ejemplos a seguir en mi formación.

A Fabián, mi hermano, por ser mi motivación para nunca rendirme y ser una mejor persona cada día.

A toda mi familia, en especial a mis abuelitos, Hernán y Humberto, por sus sabios consejos en los momentos difíciles y por siempre cuidarme desde el cielo.

A Katherine, mi compañera de vida, por su amor y apoyo incondicional en todo momento.

A mi pequeña Lulú, por todos estos años de compañía, por siempre estar a mi lado.

A todos mis amigos, en especial a Xavier, Nicolas y Daniel, por ser uno de los pilares fundamentales para poder culminar exitosamente esta etapa.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Cuenca y a todos los docentes de la facultad, quienes nos han brindado una educación excepcional y nos han apoyado en nuestro crecimiento intelectual y personal.

De manera especial, agradecer a nuestra directora, Ingeniera Karla Santacruz, quien ha sido una fuente constante de orientación y motivación para nosotros. Sus enseñanzas y conocimientos han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

A nuestro grupo de amigos, que estuvieron presentes durante toda la carrera.

A Geotest , especialmente a Leonel, por todo el apoyo brindado durante los ensayos de laboratorio necesarios para la elaboración de este trabajo.

Y finalmente a nuestros familiares, por haber estado siempre para nosotros y brindarnos su apoyo y cariño de forma incondicional.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El conglomerado es un tipo de material de origen aluvial formado por rocas o boleos que abarcan una gran variedad de tamaños, los cuales están unidos por una matriz formada principalmente por grava, arena y material fino. El principal problema al estudiar el conglomerado es la presencia de boleos de gran tamaño lo cual hace imposible extraer una muestra representativa para ensayar en laboratorio de manera convencional. Desde 1964 varias metodologías han sido desarrolladas para determinar las propiedades de este tipo de suelo como son las curvas homotéticas, el método de corte y remplazo, y el método de la matriz los cuales se basan en maneras de modificar la distribución granulométrica para obtener resultados “representativos” (Lowe, 1964; Donaghe y Torrey, 1979; Siddiqi et. al, 1987; Fragaszy et. al, 1990; Siddiqi y Fragaszy, 1991). PRECUPA (1998) realizó un análisis de todas las formaciones de la cuenca hidrográfica de Cuenca, donde se establecieron valores referenciales para los parámetros de resistencia de las terrazas de la ciudad. En Sonmez et. al (2009) se propuso una metodología empírica para estimar los parámetros de Bimrock y Bimsoils en base a análisis de varias formaciones. Se han realizado también varios análisis a gran escala como triaxiales y ensayos de corte tanto en Ecuador como en algunos países de Sudamérica donde se han determinado parámetros de resistencia más representativos (Verdugo, 2006; Sánchez et. al, 2016; Nanclares, 2018; Alvarez y Contreras, 2019).

1.2 Justificación

En la ciudad de Cuenca es muy frecuente la presencia del material tipo conglomerado, por lo que este forma parte del día a día de los ingenieros y las obras civiles de la ciudad. Debido a las grandes exigencias de las nuevas construcciones se necesita conocer con mejor aproximación los parámetros de resistencia para diseñar cimentaciones que soporten las cargas sin exceder la capacidad portante del suelo ni provocar asentamientos excesivos, manteniendo una relación costo beneficio adecuada para los constructores. Ya que no se cuenta con una metodología apropiada para determinar los parámetros de resistencia en este material, en este trabajo se busca estudiar la aplicación de métodos empíricos y análisis inverso en el material de la ciudad, centrando el estudio en un talud ubicado sobre una terraza fluvio-glacial.

1.3 Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es aproximar los parámetros de resistencia del conglomerado, para lo cual se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una caracterización del conglomerado mediante ensayos de laboratorio y campo.
- Determinar los parámetros de resistencia de la matriz mediante ensayos a compresión simple y triaxiales CU.
- Aplicar métodos empíricos para aproximar los parámetros de resistencia del material.
- Emplear el análisis inverso para estimar los parámetros de resistencia del talud.
- Comparar los resultados obtenidos tanto con análisis inverso como con relaciones empíricas.

1.4 Estructura de la tesis

Para alcanzar los objetivos propuestos se ha planteado la siguiente estructura para la tesis:

El primer capítulo correspondiente a la introducción tiene como objetivo dar un contexto del problema y una visión general de lo que se espera lograr con el presente trabajo.

El segundo capítulo correspondiente al marco teórico parte de un breve resumen del ámbito geológico de las formaciones fluvioglaciares presentes en la ciudad, definiendo sus orígenes, características y componentes. Posteriormente se describe la teoría tras todos los ensayos y metodologías, al igual que la base correspondiente a las relaciones empíricas que se aplicarán en el trabajo, y finaliza con una revisión del estado del arte donde se mencionan investigaciones similares realizadas en suelos heterogéneos.

El tercer capítulo abarca la metodología empleada, empezando por mencionar cómo se llevó a cabo la recolección y procesamiento de información, la ejecución de ensayos tanto en laboratorio como en campo, criterios tomados para realizar el análisis inverso y aplicar las relaciones empíricas.

El cuarto capítulo se presentan todos los resultados, comenzando por la caracterización donde se observa la distribución granulométrica, límites de Atterberg, porcentaje de boleos, densidad y humedad. Se presenta también los resultados de resistencia al corte obtenidos tras aplicar el ensayo a compresión simple y los triaxiales CU sobre la matriz, con estos resultados se aplican 2 metodologías para obtener los parámetros de resistencia del material, empleando relaciones empíricas y análisis inverso.

Finalmente se muestran las conclusiones obtenidas tras realizar el análisis de los resultados y recomendaciones para futuras investigaciones en esta área.

2 MARCO TEÓRTICO

2.1 Contexto geológico

En este apartado se aborda de manera breve el contexto geológico de la ciudad de Cuenca, para comprender los procesos que han llevado a su formación y así tener una mejor comprensión del origen y las características de las formaciones presentes en la zona.

En la cuenca interandina de la ciudad de Cuenca se pueden identificar indicios de un proceso de sedimentación desde el Oligo-Mioceno hasta el Plioceno. El sedimento muestra dos etapas importantes. La primera ocurrió desde el Oligoceno superior hasta el final del Mioceno inferior, cuando se formó la cuenca tras la deposición de la formación Saraguro. La segunda etapa tuvo lugar desde el Mioceno medio hasta el Plioceno e implicó el cierre de la cuenca (Lavenu y Noblet, 1990).

Los depósitos en la cuenca se iniciaron en el Mioceno inferior con la formación Biblián, que se encuentra sobre la formación Saraguro. Esta formación presenta una secuencia típica de un entorno fluvial y de conos aluviales, con un transporte fluvial de sur a norte y un espesor de hasta 1200 metros. Posteriormente, en el Mioceno superior, se depositaron las formaciones Loyola y Azogues. La formación Loyola, de origen lacustre, solo se observa en la subcuenca occidental y alcanza un espesor de 500 metros. Entre estas dos formaciones ocurrió una transición marcada por la llegada de sedimentos detríticos mediante un proceso turbidítico, relacionado con una intensa actividad volcánica que generó una gran cantidad de material clástico, así como actividad tectónica que condujo a la formación de pliegues en la formación Azogues. En las zonas más altas, se desarrollaron ambientes deltaicos y de conos aluviales.

El ambiente de deposición deltaico, ubicado al sur de la cuenca (Formación Azogues), se expandió hacia el norte, llenando por completo la cuenca y sentando las bases para la formación Mangán. Posteriormente, se produjo una sedimentación fluvial en la zona, con depósitos de conos aluviales que alcanzan el centro de la cuenca, donde la formación Mangán alcanza un espesor de casi 2000 metros. Sobre esta formación se encuentran las formaciones Llacao y Tarqui, que se formaron en el Cuaternario. Es importante destacar que una gran parte de la formación Tarqui corresponde a un conjunto de rocas volcánicas originadas en eventos que tuvieron lugar en el Oligoceno superior, Mioceno-Plioceno y eventos del Cuaternario. En la Figura 1 se muestra la columna estratigráfica de las formaciones presentes en la cuenca, junto con sus espesores y etapas de formación (Bristow, 1973; Eguez y Noblet, 1988; Lavenu y Noblet, 1990; Robalino y Noblet, 1990).

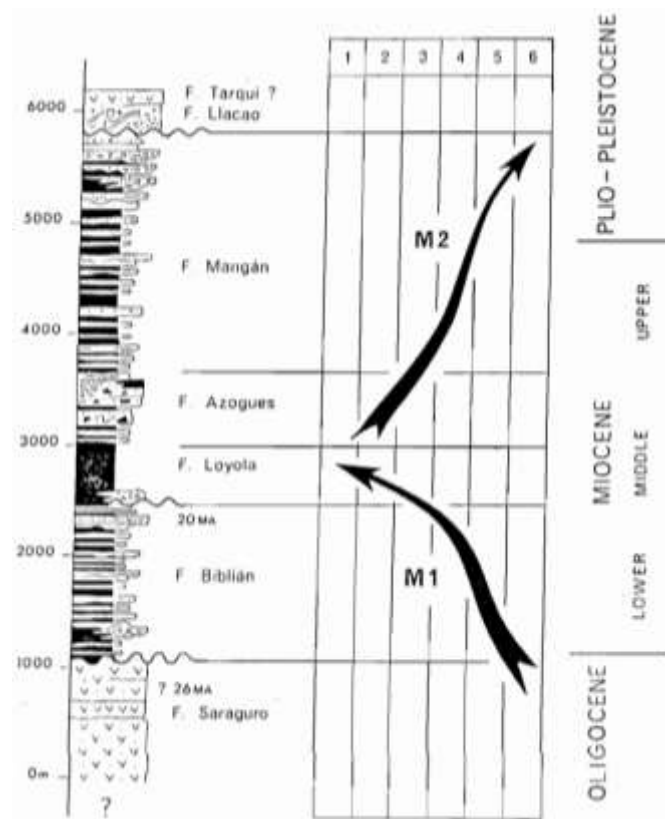


Figura 1. Columna estratigráfica de la cuenca de Cuenca. Fuente: (Lavenu y Noblet, 1990)

2.1.1 Terrazas aluviales y fluvio-glaciares

Las terrazas son superficies relativamente planas que se forman por sedimentos que llegan a un valle mediante corrientes de agua, socavando el cauce a un nivel inferior al original, por lo cual están siempre por encima del nivel del río, la presencia de terrazas significa que la cuenca ha tenido varios episodios de encajamiento donde las terrazas más antiguas son las que se encuentran a una altura mayor. Normalmente estas se forman con material arrastrado por las corrientes de agua, esta socavación se da como producto de cambios climáticos, mismos que producen incremento y disminución en el caudal del río de forma continua (Castro, 2005).

2.1.2 Terrazas fluvio-glaciares en Cuenca

En la ciudad de Cuenca existen extensas zonas planas, donde se encuentran 5 niveles de terrazas (Qt1-Qt5) de origen aluvial en su mayoría, repartidas a los bordes de los 4 ríos de la ciudad, Tomebamba, Yanuncay, Machángara y Tarqui. Las terrazas están formadas por capas de conglomerado, en el caso de las terrazas 2 hasta la 5 (Qt2-Qt5) se pueden encontrar bloques y boleos que pueden tener forma subangular, redondeada o semiesféricas, ocupando un porcentaje entre el 40% al 70% del conjunto y una matriz o cementante de grava areno

arcillosa que ocupa un porcentaje entre el 60% al 30% del conjunto. Por otro lado, en la terraza 1 (Qt1) el material no sigue un orden específico, se puede encontrar arena, limo y material depositado de origen aluvial. En la cuenca de los ríos Burgay y Gualaceo se observan terrazas poco desarrolladas (PRECUPA , 1998).

2.1.3 Comportamiento geotécnico

Los taludes expuestos generalmente son estables sin embargo la presencia de la erosión por el agua suele afectarlos provocando desprendimientos. La terraza 5 (Qt5), tiene niveles freáticos cercanos por ser la más cercana al río. El material que compone las terrazas tiene una permeabilidad alta, y su principal componente de resistencia es la fricción. En la tabla 1, se presenta un valor estimado para los parámetros de resistencia del material que conforma las terrazas fluvio-glaciares de la ciudad de Cuenca, la primera fila corresponde a las terrazas Qt2-Qt5 y la segunda a la terraza Qt1 (PRECUPA , 1998).

Clasificación SUCS	Parámetros físico-mecánicos			
	K (m/s)	Y' (KN/m)	C' (MN/m ²)	ϕ'
1) GW-SW	10-4-10-5	21-22	0	35-45
2) GW-SW Y CL	10-4-10-5	19-21	0	35

Tabla 1. Parámetros físico mecánicos para las terrazas de la ciudad de Cuenca. Fuente: (PRECUPA , 1998)

2.1.4 Definición de conglomerado

El conglomerado es un material compuesto por partículas con gran variación de tamaño, incluyendo rocas de grandes dimensiones (boleos) que se encuentran unidos por una matriz, que puede estar compuesta tanto por grava, arena y material fino (limo y arcilla) (Tarbuck et. al, 2005). Estos dos componentes (matriz y boleos) se diferencian por su tamaño, adoptando como límite el valor de 3", clasificando los boleos como material con un tamaño igual o mayor y la matriz como menor. Al ser un suelo heterogéneo el comportamiento del conjunto es difícil de determinar ya que la distribución y características de las partículas no son constantes, las propiedades de los boleos están determinadas por el tipo de roca (andesita, riolita, etc.), en cuanto a las propiedades de la matriz dependen del material que la conforman y como interactúan estos entre sí.

2.2 Propiedades físicas del suelo

En este apartado se presentan algunos de los parámetros más importantes a la hora de caracterizar un suelo, con la metodología respectiva para su obtención.

2.2.1 Granulometría

La clasificación de una muestra de suelo basada en su gradación de tamaños es crucial en el campo de la geotecnia. Este proceso nos permite identificar los componentes clave del suelo, como grava, arena, limo y arcilla. Los suelos compuestos principalmente por grava o arena se denominan suelos granulares, cuya resistencia se basa en la fricción y la interacción de las partículas, aprovechando los diferentes tamaños y formas presentes en el material. Por otro lado, los suelos arcillosos se consideran suelos cohesivos, ya que su resistencia principal depende de las fuerzas de interacción entre las partículas. Por último, los suelos limosos exhiben un comportamiento intermedio, compartiendo características tanto de los suelos granulares como de los suelos cohesivos mencionados previamente.

Los tamaños de partícula presentes en una muestra de suelo, se representan en una curva granulométrica, donde se muestran la apertura de los tamices, y el porcentaje de material capaz de pasar por este tamiz. De esta curva, se pueden obtener algunos diámetros claves para comprender la distribución de la muestra y con ellos calcular dos valores característicos de la curva granulométrica como son el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c). Estos se calculan según las siguientes ecuaciones:

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

Ecuación 1 Coeficiente de curvatura

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Ecuación 2 Coeficiente de uniformidad

donde:

C_u : Coeficiente de uniformidad

C_c : Coeficiente de curvatura

D_{60} : Diámetro por el que pasa el 60% del material

D_{30} : Diámetro por el que pasa el 30% del material

D_{10} : Diámetro por el que pasa el 10% del material

El coeficiente de uniformidad nos ayuda a tener una idea de la gradación de un suelo, comparando la cantidad de tamaños que abarca, entre más ancha sea la curva, abarcará mayor número de diámetros y por lo tanto estará mejor gradada. Por otro lado, el coeficiente

de curvatura estudia la calidad de la curva granulométrica, entendiéndose como que no existan cambios bruscos en la curvatura.

2.2.2 Humedad

la humedad se refiere a la cantidad de agua presente en un suelo o material geotécnico en relación a su peso o volumen. Es una propiedad fundamental que influye en las características y comportamiento del suelo, como su capacidad de carga, resistencia, compresibilidad y expansión, entre otros.

Se puede determinar mediante ensayos en campo, como son el densímetro nuclear y otros métodos basados en las propiedades eléctricas del suelo, o en laboratorio mediante un proceso de secado en horno.

La humedad se calcula con la siguiente ecuación:

$$w (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Ecuación 3 Contenido de humedad

donde:

w : contenido de humedad expresado en porcentaje (%)

W_w : peso de los sólidos del suelo

W_s : peso del agua

2.2.3 Límites de Atterberg

El comportamiento de un suelo arcilloso depende directamente de su contenido de humedad, ya que según su valor el suelo se comportará como un material semilíquido, plástico, semisólido o sólido, siendo los últimos cuando menor porcentaje de humedad presente. El límite líquido se presenta en el punto que el suelo cambia de un comportamiento semilíquido a plástico, y puede determinarse mediante el ensayo de Casagrande. En la misma normativa, se presenta el ensayo manual para la obtención del límite plástico (LP), mismo que se presenta en un contenido de humedad menor, cuando la muestra pasa de un estado plástico a uno semisólido.

Una vez obtenidos los límites antes mencionados, se puede obtener el valor del índice plástico, el cual representa el rango de humedades dentro del cual un suelo presentará un comportamiento plástico. Este valor puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$IP = LL - LP$$

Ecuación 4 Índice plástico

donde:

IP: Índice plástico

LL: Límite líquido

LP: Límite plástico

2.2.4 Clasificación del suelo

La clasificación del material va a depender principalmente del sistema empleado, el cual puede ser por AASHTO o SUCS (Sistema unificado de clasificación de suelos). AASHTO es una clasificación empleada principalmente en la conformación de pavimentos, separa a los suelos tipo grava de las arenas considerando arena a todas las partículas con un tamaño menor o igual a 2 mm, y considera material fino a todas las partículas de tamaño menor a 0.075 mm. Por otro lado, el método SUCS, coincide con el sistema de clasificación ASTM, siendo la principal diferencia con el método anterior, que el material se considera arena a partir de diámetros menores a 4.75 mm, el diámetro para clasificar la parte fina es el mismo en ambos métodos.

Debido a la aplicación de este trabajo, se desarrollará con más atención la metodología SUCS, en esta se presentan algunos símbolos para los materiales grava, arena, limo y arcilla, que se representan por las letras mayúsculas G, S, M y C respectivamente. Adicionalmente, se tienen también los modificadores, representados por las letras W, P, H y L. Las dos primeras se utilizan para representar la gradación del suelo, siendo W para una buena gradación y P para una mala; mientras que las dos restantes indican el grado de plasticidad de la parte fina, la H representa un material de alta plasticidad y la L uno de baja.

2.2.5 Densidad

La densidad es una propiedad geotécnica del suelo muy importante, se trata de una relación peso-volumen, que nos permite conocer la masa de suelo que puede encontrarse por unidad de volumen del mismo. Puede determinarse con la siguiente ecuación:

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

Ecuación 5 Peso específico seco

donde:

γ : peso específico.

W : peso de la muestra.

V : volumen total del suelo.

Existen varios métodos para determinar la densidad de un material, en campo existen algunos métodos como son el cono de arena, globo de hule, o el densímetro nuclear. En este trabajo se utilizó el método del densímetro nuclear y adicionalmente un método alternativo como el ensayo con aceite de parafina.

2.2.5.1 Ensayo de parafina

Este ensayo se puede aplicar sobre conjuntos de material grueso y fino, la dificultad en determinar su densidad está en obtener el volumen del conjunto, que con este método puede determinarse de manera sencilla.

Este método utiliza el principio de Arquímedes para poder determinar el volumen de la muestra, dado que al ingresar está en agua podría disgregarse, se utiliza el aceite de parafina para recubrir la muestra y así impedir que el agua ingrese e interfiera con el ensayo. Para poder descontar el volumen de parafina del resultado final, se deberá de usar su densidad, la cual es igual a 0.97 gr/cm^3 .

2.2.5.2 Densímetro nuclear

La densidad del material sobre el cual se esté realizando el ensayo, puede determinarse colocando una fuente y un detector gamma, la intensidad de radiación que reciba el detector es dependiente de la densidad del material. Dependiendo del método de ensayo, el detector puede estar encima, dentro o adyacente al material que se encuentre sometido al ensayo, definiéndose así las metodologías de retro dispersión, transmisión directa y espacios de aire, respectivamente (Mendoza y Ramirez, 2009).

2.2.6 Compactación (Proctor)

Para evaluar el peso específico seco máximo y la humedad de un material, se utilizan las pruebas Proctor, estas se clasifican en Proctor estándar y Proctor modificado. La diferencia entre ambas pruebas radica en la energía de compactación, la cual dependerá del número de capas, número de golpes y peso del martillo, usándose una energía mayor en la prueba modificada. En la prueba de Proctor estándar se utilizan 3 capas, mientras que para la prueba modificada se utilizan 5.

El ensayo debe de repetirse un mínimo de 3 veces, variando la humedad en cada ensayo para obtener una densidad seca distinta y poder graficar la curva de compactación. Si bien la humedad óptima, punto en el que se encuentra la densidad seca máxima, puede no encontrarse directamente, esta puede obtenerse realizando una estimación con los otros puntos obtenidos, ya que la curva tiene un comportamiento parabólico.

2.2.7 Densidad relativa

La densidad relativa es un parámetro utilizado para describir la compacidad de un suelo o material granular en relación a su estado de máxima compactación. Es un parámetro importante para evaluar la calidad del suelo, su capacidad portante, la permeabilidad, la estabilidad de taludes y otros aspectos relacionados con el comportamiento geotécnico.

La compactación relativa del suelo, puede relacionarse con la densidad relativa gracias al trabajo de Duncan y Dursey (2007). La compactación relativa puede obtenerse de manera sencilla realizando ya sea un ensayo Proctor modificado o Proctor estándar dependiendo del caso. Los valores obtenidos pueden compararse según se observe en la tabla 2.

Compactación relativa		
Proctor modificado ASTM D1577	Proctor estándar ASTM D698	Densidad Relativa (Dr)
100%	105%	100%
95%	100%	75%
90%	95%	50%
85%	90%	25%
80%	85%	0%

Tabla 2. Valor de Densidad relativa según la compactación relativa. Fuente (Duncan & Dursey, 2007)

2.3 Parámetros de resistencia del suelo

Para los ingenieros es de gran importancia conocer los parámetros de resistencia cortante del suelo debido a que son necesarios a la hora de analizar cimentaciones para estructuras, terraplenes, estructuras de contención, etc. “La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él” (Braja, 2001). La resistencia a corte es producto de la acción combinada de dos parámetros, el ángulo de fricción y la cohesión del suelo, esta se puede estimar mediante ecuación 6, misma que puede ser aplicada con parámetros efectivos y totales.

$$\tau_f = c + \sigma' * \tan \Phi$$

Ecuación 6 Resistencia cortante en función de cohesión y fricción

donde:

τ_f : Resistencia al esfuerzo cortante.

c: Cohesión.

σ' : Esfuerzo normal efectivo.

Φ : Ángulo de fricción interna.

2.3.1 Ensayos triaxiales

Estos ensayos se realizan principalmente sobre arenas y arcillas para obtener sus parámetros de resistencia a corte, como son el ángulo de fricción y la cohesión. Consiste en ensayar una muestra cilíndrica, que se encuentre confinada con presión lateral, y aplicarle una carga axial hasta que esta llegue al fallo, guardando registro de las deformaciones durante el ensayo para poder obtener una curva de esfuerzo-deformación.

Se deben de controlar las presiones de flujo y confinamiento durante el ensayo hasta llegar a las condiciones en las que se quiere realizar la rotura. Según las condiciones en las que se aplique la carga a la muestra, existen 3 tipos de ensayos que se podrían realizar: prueba consolidada drenada (CD), prueba consolidada no drenada (CU) y prueba no consolidada no drenada (UU).

Prueba consolidada drenada (CD): este es el ensayo más lento de los tres, en este se debe de brindar el tiempo suficiente a la muestra para consolidarse, permitiendo la salida de agua de la muestra debido al incremento en la presión de confinamiento, durante el proceso de rotura no debe existir un incremento en la presión de agua de poros. Con este ensayo se obtienen parámetros de resistencia efectivos.

Prueba consolidada no drenada (CU): son las pruebas triaxiales más comunes, en estas se realiza primeramente el proceso completo de consolidación sobre el espécimen, y durante el ensayo de rotura se permite que la presión de agua de poros también responda ante el incremento de esfuerzo. El resultado final de este ensayo se obtiene en parámetros totales.

Prueba no consolidada no drenada (UU): son la prueba más rápida de todas, deben de realizarse sobre muestras totalmente saturadas para llegar a la condición de que el ángulo de fricción sea igual a cero. El resultado de estos ensayos es la cohesión no drenada, que es un parámetro de resistencia utilizado para caracterizar arcillas saturadas.

2.3.2 Ensayo compresión simple

Este es un ensayo que se realiza principalmente sobre especímenes de suelo cohesivo, para que pueda mantenerse estable sin ningún confinamiento lateral durante el proceso de carga. Las muestras deben de tener forma cilíndrica y guardar una relación altura-diámetro igual o mayor a 2. A la muestra se le aplica carga axial que aumente gradualmente y se realiza lectura de las deformaciones obtenidas durante el proceso.

Durante el proceso de rotura no se permite la salida de agua por lo que no se produce consolidación, además el ensayo no tiene una larga duración, tardándose aproximadamente de 10 a 20 minutos, por lo que no se tiene el tiempo suficiente a que se consolide.

La resistencia a compresión simple es inversamente proporcional al grado de saturación del suelo, ya que conforme aumente la saturación del material, se pierde cohesión entre las partículas.

2.4 Estabilidad de taludes

Los taludes son superficies del terreno expuestas que forman un ángulo de inclinación con la horizontal, debido a la acción de la gravedad sobre la pendiente se puede producir un deslizamiento o falla, donde el suelo que conforma el talud se moviliza hacia abajo, en estos casos la fuerza actuante correspondiente al peso del talud, supera la resistencia cortante del suelo a lo largo de la superficie de falla. Los taludes se encuentran comúnmente en excavaciones, terraplenes, taludes naturales, etc. Donde se realiza el análisis de estabilidad de taludes que consiste en determinar la superficie de falla más probable para comparar los esfuerzos cortantes generados en la misma.

La ecuación 6, presentada anteriormente se puede utilizar para representar los parámetros de resistencia cortante al momento de la falla, al relacionar la resistencia del suelo, con el esfuerzo de la falla, se puede encontrar el factor de seguridad, mismo que se representa en la ecuación 7, donde el subíndice “d” representa el estado límite de falla.

$$FS: \frac{c + \sigma' * \tan \Phi}{c_d + \sigma' * \tan \Phi_d}$$

Ecuación 7 Factor de seguridad

Existen varias metodologías empleadas para realizar en análisis de estabilidad de taludes, las cuales se presentan en el esquema mostrado en la Figura 2, como se puede observar existen dos grandes grupos, correspondientes a los Métodos de equilibrio límite y Métodos

numéricos, a continuación, se desarrolla brevemente la teoría y fundamente detrás de cada metodología.

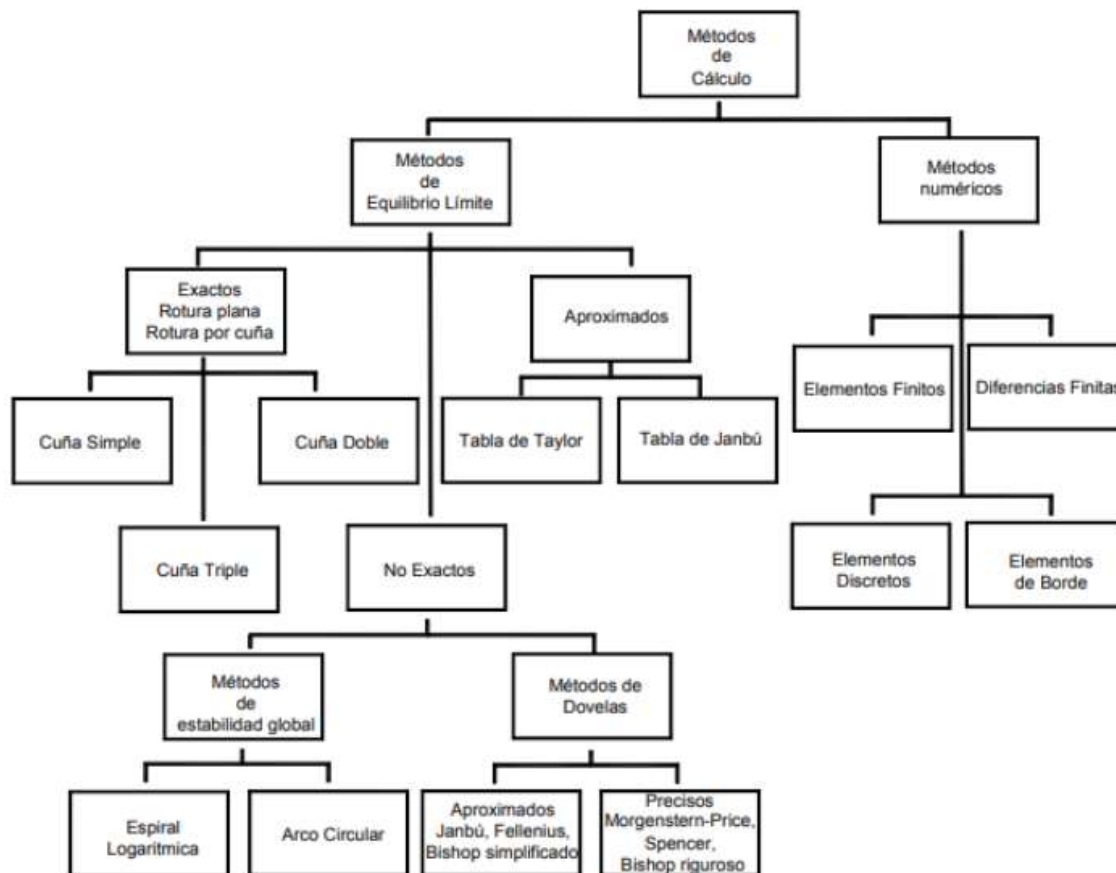


Figura 2 Esquema con los métodos de cálculo para estabilidad de taludes. Fuente: (Suárez, 1996)

2.4.1 Métodos de equilibrio límite (MEL).

Este tipo de métodos tienen como fundamento que las fuerzas y momentos generados durante el colapso son iguales a la resistencia del suelo, generando un factor de seguridad igual a 1. Los métodos empleados se pueden clasificar en exactos, aproximados y no exactos, donde se toma una geometría de falla simple como plana o de cuña en la que se realizan simplificaciones en base al método para obtener una solución estática exacta (IGME, 1987). Las metodologías aproximadas se basan en tablas o curvas basadas en condiciones geométricas específicas donde se puede obtener el factor de seguridad de manera directa aplicando las propiedades de las tablas (Suárez, 1996). Los métodos no exactos se aplican para configuraciones de superficies de falla complejas donde las condiciones de equilibrio son hiperestáticas por lo tanto se requiere simplificaciones o hipótesis para resolverlas (IGME, 1987).

2.4.2 Métodos numéricos.

Dentro de los métodos numéricos podemos encontrar tres principales grupos, los métodos continuos, discontinuos e hídricos. En los métodos continuos todo el espacio geométrico es discretizado con un número finito de elementos iguales, llegando a la solución mediante aproximaciones numéricas en las ecuaciones diferenciales. Por su parte, los métodos discontinuos consideran el espacio geométrico como un conjunto de elementos discretos relacionados entre sí, pueden ser útiles en el caso de discontinuidades en el suelo que controlen el comportamiento de la superficie de falla. Por último, los métodos hídricos buscan aplicar varios métodos a la vez para aprovechar las ventajas que presenta cada uno. En estas metodologías no es necesario incluir parámetros como la ubicación y forma de la superficie de falla, además se pueden considerar que su aproximación es más exacta desde el punto de vista matemático, sin embargo, para aplicar este tipo de métodos se necesita obligatoriamente de software especializado y recolección de datos adicionales (Bojorque, 2011).

2.4.3 Análisis inverso

El análisis inverso es una herramienta que sirve para estimar los parámetros de resistencia de un talud al momento de llegar a la falla, donde se usa la superficie al momento de colapso para encontrar la combinación de cohesión y ángulo de fricción que actuaron al momento de la falla, esto es posible ya que cada combinación de c y Φ generan una única superficie de falla (Wesley y Leelaratnam, 2001). Los resultados obtenidos tras aplicar esta metodología suelen ser mucho más representativos del material que ensayos realizados en laboratorio debido a que incorpora factores importantes que las muestras de laboratorio no pueden reflejar como la estructura del suelo, la heterogeneidad, la influencia de las fisuras, los efectos de los planos de corte preexistentes en la masa de suelo, etc. Considerándose como un ensayo in situ a gran escala. (Tang et. al, 1999; Duncan y Stark, 1992)

Al momento de realizar el análisis se debe estimar 2 parámetros, ángulo de fricción y cohesión, lo recomendable es aproximar al valor de ángulo de fricción y dejarlo con un valor fijo para variar únicamente la cohesión hasta encontrar una superficie de falla similar a la deseada con un factor de seguridad cercano a la unidad, se puede repetir este proceso para diferentes ángulos de fricción con el fin de determinar la combinación de c y Φ que genera una superficie de falla similar a la real. (Tang et. al, 1999)

2.4.3.1 Parámetros importantes para el análisis inverso:

Si bien el análisis inverso puede ser una herramienta muy útil para determinar los parámetros de resistencia reales al momento del colapso, la confiabilidad de dichos resultados dependerá de la confianza en los datos recolectados para recrear el modelo, algunos de los parámetros más importantes se presentan a continuación.

- Superficie de falla: Para determinar la superficie de falla se debe contar tanto con la configuración previa al deslizamiento como posterior, se puede obtener con levantamientos topográficos, imágenes satelitales, drones, etc.
- Propiedades de los materiales: Es importante realizar una buena caracterización del suelo donde identificar parámetros como: pesos específicos, humedad, altura de estratos. Esta información se puede obtener con ensayos de laboratorio y análisis en campo.
- Resistencia al corte: El suelo en función de parámetros como presencia de agua, condiciones de drenaje, tiempo de aplicación de cargas, el tipo de suelo, etc. Puede actuar en condiciones drenadas o no drenadas, siendo las condiciones drenadas características para suelos granulares que tienen características para disipar la presión de agua de poros de manera rápida, en el caso de los suelos cohesivos la disipación de esta presión es mucho más lenta debido a su permeabilidad, por lo que la condición no drenada suele ser más adecuada. (Suárez, 1996)
- Presencial del nivel freático: La presencia de agua afecta de manera directa a los resultados de análisis inverso debido a que su presencia disminuye los esfuerzos efectivos del suelo, reduciendo la capacidad del mismo, por ello es importante definir la posición del nivel freático en caso de existir.

2.5 Estudios realizados sobre suelos granulares gruesos

El principal problema al momento de determinar los parámetros de resistencia del conglomerado es la presencia de los boleos enormes que hacen imposible extraer una muestra representativa y ensayarla en laboratorio de manera tradicional, es por ello que se ha intentado estimar su resistencia en varias ocasiones.

2.5.1 Método de la granulometría paralela

Una de las primeras metodologías desarrolladas para estimar los parámetros de resistencia en suelos granulares gruesos fue desarrollada por Lowe (1964), el cual propuso usar una muestra generada con una curva granulométrica más fina pero paralela a la del material original, es decir equivalente, pero con un menor tamaño máximo de partícula. Esta metodología es aplicable cuando la curva paralela no supera un porcentaje de finos de 10%

- 12% y cuando las propiedades las partículas como: forma, dureza y mineralogía, son semejantes sin importar el tamaño de las partículas, ya que estos factores controlan la respuesta del material.

2.5.2 Método de corte y reemplazo

Esta metodología consiste en eliminar las partículas que no pueden ser ensayadas en el equipo y reemplazadas por un porcentaje igual con las partículas pequeñas, se espera que los resultados obtenidos tras ensayar las muestras pequeñas reflejen el comportamiento que se obtendría al ensayar todo el material. Donaghe y Torrey (1979) realizaron ensayos triaxiales no drenados con este método, con muestras de 38.1 cm de alto y 15.2 cm de diámetro, utilizando varios porcentajes de grava, tras analizar los resultados se observó que se obtienen mejores resultados cuando el porcentaje de grava es superior al 40%, si bien existen pruebas de que este método puede dar buenos resultados, no existe un fundamento teórico para emplearlo.

2.5.3 Método de la matriz

Este método tiene como fundamento que la resistencia cortante del suelo está controlada por la matriz y que la presencia de boleos no afecta la respuesta del conjunto (combinación de matriz y boleos), en este caso se descarta todo el material que sea demasiado grande para ensayarse de manera tradicional. Esta más justificado utilizar este método en suelos donde los boleos no estén en contacto entre sí, sino se encuentren aislados por la matriz; sin embargo, una de las limitaciones y a la vez claves del método está en determinar la densidad de la matriz sin tener en cuenta la presencia de los boleos, debido a que es únicamente esta la que controla la resistencia al corte. Las dos limitaciones más grandes serían que se pueden encontrar materiales donde los boleos si tengan contacto entre sí, afectando la respuesta del conjunto y que la densidad de la matriz no se puede obtener de manera directa en campo (Siddiqi et. al, 1987; Fragasz y et. al, 1990; Siddiqi y Fragasz, 1991).

2.5.4 Método empírico para estimar la Resistencia de Bimsoil

Bimsoil es un término utilizado para describir grandes bloques de roca unidos entre sí mediante un matriz de suelo fino (arcilla y limo), es decir en nuestro caso el conglomerado. La metodología para estimar los parámetros de resistencia del conjunto se basa en establecer la resistencia de la matriz, ya que este es el componente más débil del conjunto, sin embargo, no es recomendable ignorar la presencia de los bloques, debido a que la parte crítica del conjunto son los contactos bloque-matriz, controlando estos la superficie de falla (Medley, 2008). Se ha determinado que en un conjunto donde hay adherencia entre bloques y matriz

existe una relación entre el volumen porcentual de bloques (VBP) y la resistencia, producto de esta relación, un aumento de bloques genera un aumento en la rigidez y resistencia del conjunto.

En Sonmez et. al (2009) y Kalender et. al (2014) se propone una metodología para estimar el ángulo de fricción interna y la cohesión en base a las siguientes pautas.

1. El valor más bajo de ángulo de fricción interna de bimsoil corresponde al de la matriz, y se presenta cuando no existe volumen de bloques, algo similar sucede para valores de volumen porcentual de bloques (VBP) menores al 10%, cuando el VBP aumenta entre 10% y 75% el incremento en el ángulo de fricción es significativo y para valores superiores al 75% el incremento es muy bajo.
2. El ángulo de fricción es similar al ángulo de reposo de los bloques (α) cuando VBP es mayor al 75%.
3. Cuando el ángulo de reposo es mayor al de la matriz, se espera un incremento del ángulo de fricción del conjunto proporcional al incremento del VBP
4. La resistencia a compresión simple es inversamente proporcional al VBP, teniendo su valor máximo cuando no existen bloques y su valor mínimo cuando VBP es el 100%, esto se debe a que el aumento de VBP disminuye la cohesión del suelo.

En base a las pautas se recomienda las ecuaciones empíricas para determinar los parámetros de resistencia del conjunto.

$$\phi_{bimsoil} = \phi_{matriz} * \left[1 + \frac{1000 * \left[\frac{\alpha}{\phi_{matriz}} - 1 \right]}{1000 + 5 \left(\frac{100 - VBP}{15} \right)} * \frac{VBP}{VBP + 1} \right]$$

Ecuación 8 Ángulo de fricción del conjunto

$$UCS_{bimsoil} = \frac{(A - A \left(\frac{VBP}{100} \right))}{A - 1} * UCS_{matriz}$$

Ecuación 9 Resistencia a compresión simple del conjunto

$$C_{bimsoil} = \frac{UCS_{bimsoil} * (1 - \text{sen}(\phi_{bimsoil}))}{2\text{cos}(\phi_{bimsoil})}$$

Ecuación 10 Cohesión del conjunto

donde:

$\phi_{bimsoil}$: Ángulo de fricción del conjunto.

ϕ_{matriz} : Ángulo de fricción de la matriz.

VBP: Volumen porcentual de boleos.

α : Ángulo de reposo de bloques.

$UCS_{bimsoil}$: Resistencia a compresión simple del conjunto.

UCS_{matriz} : Resistencia a compresión simple de la matriz.

A: Parámetro que depende de las propiedades de la matriz.

Como se pudo observar en la ecuación 9, con la cual se calcula la resistencia a compresión simple del conjunto, se utiliza el parámetro “A” en el cálculo, este se puede recuperar de la Figura 3. Para emplear esta gráfica es necesario contar con algunas propiedades de la matriz, como son la resistencia a compresión simple y el ángulo de fricción

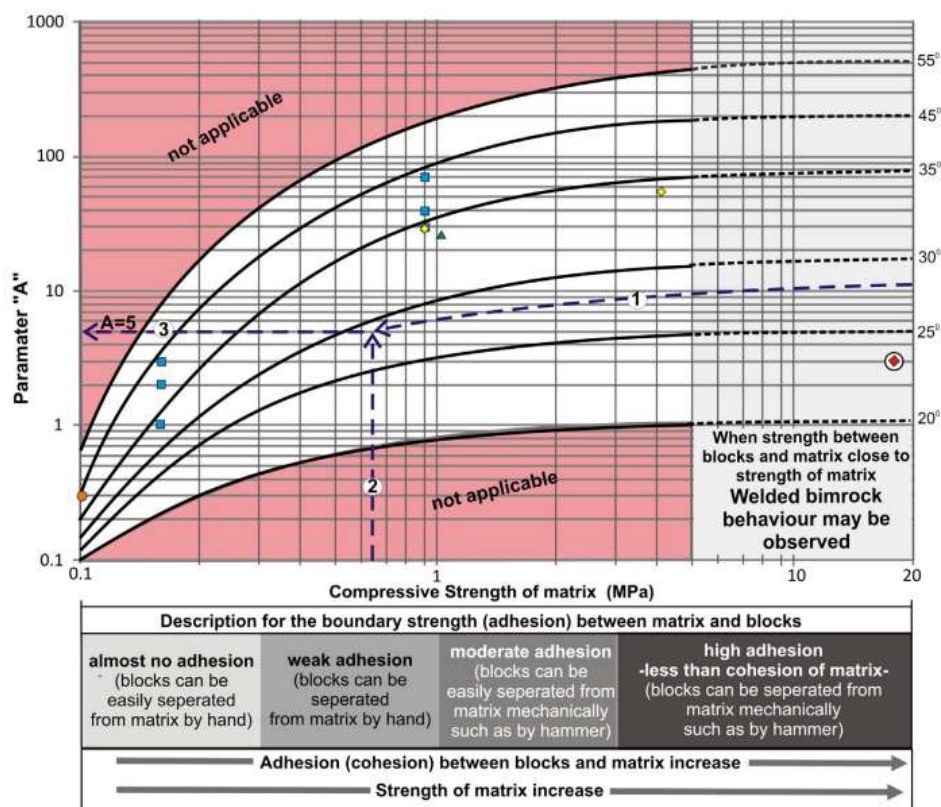


Figura 3. Curvas empíricas para estimar el parámetro A en función de los parámetros de la matriz. Fuente: (Kalender et. al, 2014)

En la Figura 4, se pueden observar las distintas formas de partículas que se pueden encontrar, esta será función del desgaste que han sufrido las partículas y se obtiene por

simple inspección visual. Identificar la forma de las partículas es importante puesto que influye significativamente en el ángulo de reposo del material.



Figura 4. Diferentes tipos de formas de partículas. Fuente: (Angelone y Garibay, 2020).

Una vez identificada la forma de las partículas, se puede obtener un valor aproximado para el ángulo de reposo utilizando la Figura 5, y escoger un valor dentro del rango establecido para cada forma en función de la rugosidad del material. Este valor puede medirse también en campo si es que el tamaño de las partículas lo permite.



↑ Aumenta ángulo de reposo (α) de bloques ↓ Aumenta la redondez de los bloques	 Angular $\alpha > 45^\circ$	↑ Aumenta rugosidad de superficie	
	 Subangular $35^\circ < \alpha < 45^\circ$	↑ Aumenta rugosidad de superficie	
	 Subredondeada $25^\circ < \alpha < 35^\circ$	Muy rugosa Rugosa Ligeramente rugosa Lisa Espejo de falla	↑ Rugosidad de superficie de bloques
	 Redondeada $\alpha < 25^\circ$	Muy rugosa Rugosa Ligeramente rugosa Lisa Espejo de falla	↓ Rugosidad de superficie de bloques

Figura 5. Guía para estimar el ángulo de reposo, en función de las propiedades de los bloques. Fuente: (Kalender et. al, 2014).

2.5.5 Teoría de Duncan

Duncan (2012) establece que los parámetros de resistencia de un suelo granular, están ligados a otros factores del material como pueden ser la densidad relativa, confinamiento, humedad, gradación y forma de las partículas. Tras haber realizado varios ensayos, se llega a la conclusión de que el coeficiente de uniformidad y el tamaño máximo de las partículas, tienen un efecto inverso en la resistencia a corte del material, esto debido a que perjudican significativamente el acomodo de las partículas.

Como parte de su teoría, Duncan (2012) asigna al material 4 parámetros, A, B, C y D, según la clasificación y gradación del mismo. Esto para reflejar la influencia que tienen el coeficiente de uniformidad y tamaño de las partículas en la resistencia final del suelo. Estos valores pueden verificarse en la tabla 3.

Tipo de material	A	B	C	D	Desviación estándar
Grava con $Cu > 4$	44	10	7	2	3.1°
Arena con $Cu > 6$	39	10	3	2	3.2°
Arena con $Cu < 6$	34	10	3	2	3.2°

Tabla 3 Valores para los coeficientes A, B, C y D en la Teoría de Duncan. Fuente: (Duncan, 2012)

El criterio desarrollado se presenta en la siguiente ecuación:

$$\phi = A + B(D_r) - [C + D(D_r)] \log_{10} \left(\frac{\sigma_N}{P_a} \right)$$

Ecuación 11 Ángulo de fricción según criterio de Duncan

donde:

ϕ : ángulo -de fricción del material.

A, B, C, D coeficientes dependientes de la uniformidad y tamaño de las partículas.

D_r : densidad relativa del material.

σ_N : Presión normal.

P_a : Presión atmosférica del sitio.

2.5.6 Caracterización de suelos granulares gruesos en Chile.

En 2001 el Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales (IDIEM) de la Universidad de Chile construyó un triaxial de gran tamaño, capaz de ensayar muestras de 1 metro de diámetro y 2 metros de alto, la máxima presión de confinamiento que puede ejercer es de 3 MPa junto a una carga axial máxima de 2000 toneladas gracias a cuatro pistones hidráulicos,

además puede medir presión de agua de poros, variación de volumen, presión de cámara, deformación sobre la muestra, deformación radial y carga axial. Con este equipo se ensayaron muestras “inalteradas” correspondientes al proyecto del túnel del Metro de Santiago, cuyo material tiene un tamaño de boleo máximo de 18 cm y 34% de finos que corresponden a arcilla de baja plasticidad (Verdugo, 2006).

Una vez extraída la muestra fue sometida a consolidación isotrópica con incrementos de presión de 0.5 kg/cm^2 , cada presión se mantuvo por 20 minutos con el objetivo de que las deformaciones experimentadas por las probetas sean estables, la falla de la probeta se estableció cuando se obtuvo una gran deformación axial al aplicar el incremento de carga. En cuanto a los ensayos triaxiales se realizaron de manera habitual, dejando un esfuerzo de confinamiento constante y cargando axialmente la probeta hasta que llegue al fallo. Tras realizar los ensayos se obtuvo una cohesión de 1.2 kg/cm^2 y un ángulo de fricción de 26.4° , cabe mencionar que los valores obtenidos reflejan un conglomerado donde la matriz de suelo fino tiene una gran influencia controlando el comportamiento del conjunto (Verdugo, 2006).

En la Figura 6, se puede observar el equipo montado en laboratorio, así como un esquema del mismo. Para el proceso de obtención de muestras, se realizó una perforación en la parte inferior, donde se colocó una gata que sostendría el material y permitiría que este se levante, posteriormente se excavó la zanja perimetral para poder recubrir la muestra y levantarla, este proceso se muestra en la Figura 7.

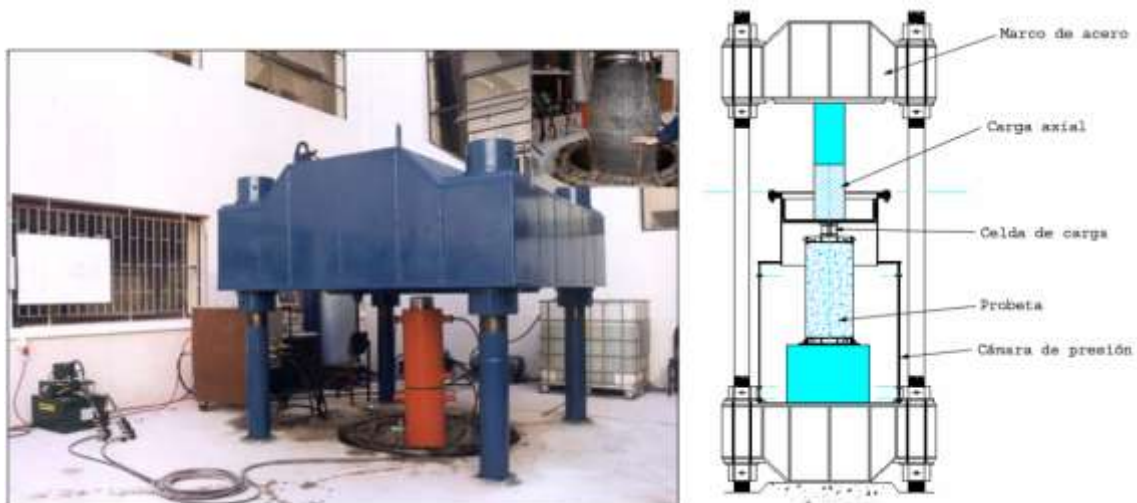


Figura 6. Triaxial a gran escala usado en Chile Fuente: (Verdugo y de la Hoz, 2006)

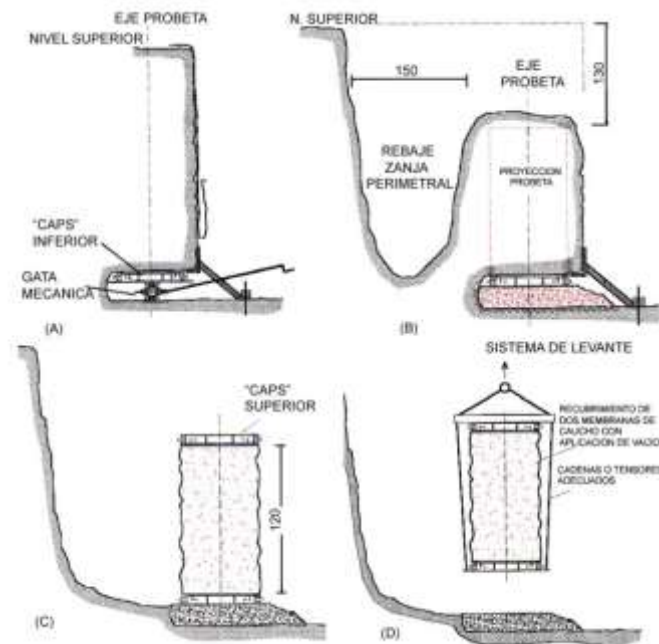


Figura 7. Metodología para obtener muestras inalteradas de gran tamaño. Fuente: (Verdugo, 2006)

Para verificar los resultados se conformaron 5 muestras más pequeñas, entre las cuales se encontraban muestras con material triturado, es decir partículas angulares, y muestras con partículas redondeadas, empleando el método de la granulometría paralela. Aunque se tenía un porcentaje de finos mayor, para la ejecución de los ensayos este valor se limitó al 10%, impidiendo así que las curvas sean completamente paralelas, esta limitación se realizó porque un elevado porcentaje de finos puede reducir los parámetros de resistencia del suelo y no reflejar el comportamiento del suelo grueso. Para cada tipo de muestra se utilizaron probetas de 5, 10 y 15 cm de diámetro con una relación altura-diámetro (H/D) igual a 2, las cuales se ensayarían mediante triaxiales CD.

Tras realizar los ensayos se obtuvo un ángulo de fricción que varía entre 65° y 42° para las muestras con partículas angulares y entre 50° y 45° para muestras con partículas redondeadas, la principal diferencia se da para esfuerzos de confinamiento bajos de (menores a 0.3 MPa). Estos resultados se muestran en la Figura 8, donde M-1 corresponde a las muestras con partículas angulares y M-2 a las partículas redondeadas.

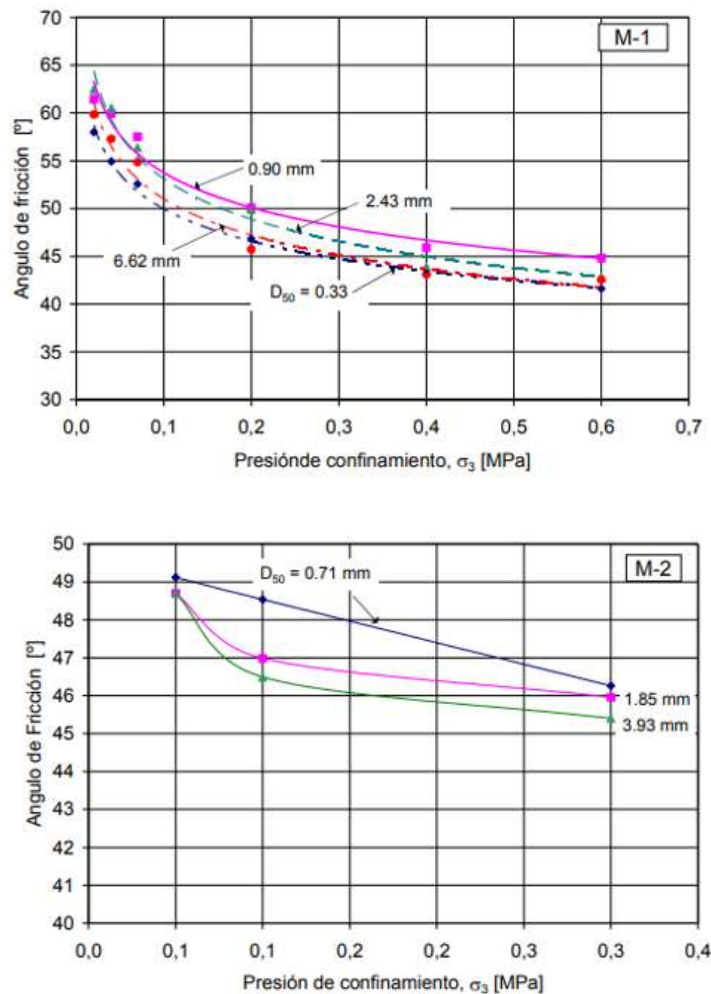


Figura 8. Resultados de ángulo de fricción. Fuente: (Verdugo y de la Hoz, 2006)

2.5.7 Calibración del densímetro nuclear para obtención de densidades en suelo grueso

En 2009, Mendoza y Ramirez (2009) realizaron varios ensayos con densímetro nuclear en las terrazas fluvio-glaciares, formación Turi y depósitos aluviales. En campo se realizó también un ensayo similar al método con globo de hule, que consistía en extraer una porción del suelo, cubrir el agujero con plástico y posteriormente llenarlo con agua para determinar el volumen que ocupada la masa de suelo extraída. De las muestras extraídas también se obtuvieron valores de humedad en laboratorio. El propósito final del trabajo, fue el de obtener factores de corrección para las lecturas de humedad y densidad del densímetro nuclear, contrastando los resultados con los obtenidos mediante las otras metodologías. Los factores de corrección se determinaron en función de los porcentajes de boleos, grava, arena y finos, y se definieron distintas ecuaciones para cada uno de los sitios de estudio.

2.5.8 Determinación de las propiedades elásticas del conglomerado en la ciudad de Cuenca

Santacruz (2009) realizó varios ensayos para estimar las propiedades elásticas del conglomerado en la ciudad de Cuenca para las terrazas Fluvioglaciares y la formación Turi. En esta investigación los boleos fueron definidos como el material mayor a 3/4”, para determinar los parámetros elásticos de la matriz se realizaron ensayos triaxiales UU. Las propiedades de los boleos se determinaron en laboratorio y en base a fuentes bibliográficas, mientras que para determinar los parámetros elásticos del conjunto se usó experimentación numérica y la teoría de homogeneización.

Los porcentajes de boleos se obtuvieron mediante fotografías en las cuales se distingue el material mayor a 3/4”, obteniendo valores que van desde 28.84% hasta 52% aproximadamente. Un ejemplo de las fotografías tomadas y su análisis puede observarse en la Figura 9.

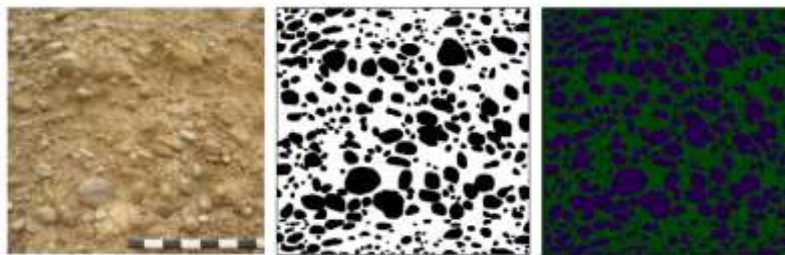


Figura 9. Segmentación de imagen para determinar el % de boleos fuente: (Santacruz, 2009)

Tras realizar la investigación se logró determinar que los parámetros elásticos del conjunto dependen las características de la matriz, características los boleos y del porcentaje de boleos, donde se observa que al aumentar el porcentaje de boleos aumenta también el módulo elástico (E) y el coeficiente de Poisson (v) del conjunto.

Foto	% Boleos	u	k (Kg/m2)	E (Kg/cm2)	v
T3 11 2 esc187	40.09	1041249	1453796	252.17	0.211
T3 2 1d esc 130	28.84	776191	1101485	188.56	0.215
T3 6 1 esc158	43.73	1226555	1726351	297.51	0.213
T4 3 1d esc170	30.98	824527	1154740	199.8	0.212
T4 3 1i esc170	32.99	864729	1218155	209.78	0.213
T4 4 1i esc135	51.98	1661102	2796355	415.97	0.252
TU 9 id esc106	31.45	821212	1153201	199.1	0.212
TU 8 2 esc230	24.82	643004	900186	155.8	0.212

Tabla 4 Resultados obtenidos que muestran una relación directa entre el % de boleos y los parámetros elásticos del conglomerado fuente: (Santacruz, 2009)

2.5.9 Caracterización de suelos granulares gruesos. El caso de la Grava de Lima.

Sánchez et. al (2016) en Lima, Perú, realizaron una investigación para definir las características del conglomerado de la ciudad, donde se encuentra un suelo heterogéneo de origen fluvio – aluvial. Para la determinación de sus características se llevaron a cabo varios ensayos tanto en laboratorio como en campo.

2.5.9.1 Características físicas

En el caso de la granulometría se han ensayado 226 muestras mediante calicatas llegando hasta los 30 metros de profundidad, tras los ensayos se determinó un porcentaje de finos aproximado del 2%, un 17% de arena, un 53% de gravas y un 28% de boleas o gravas gruesas, cabe mencionar que estos son los valores medios del rango granulométrico analizado.

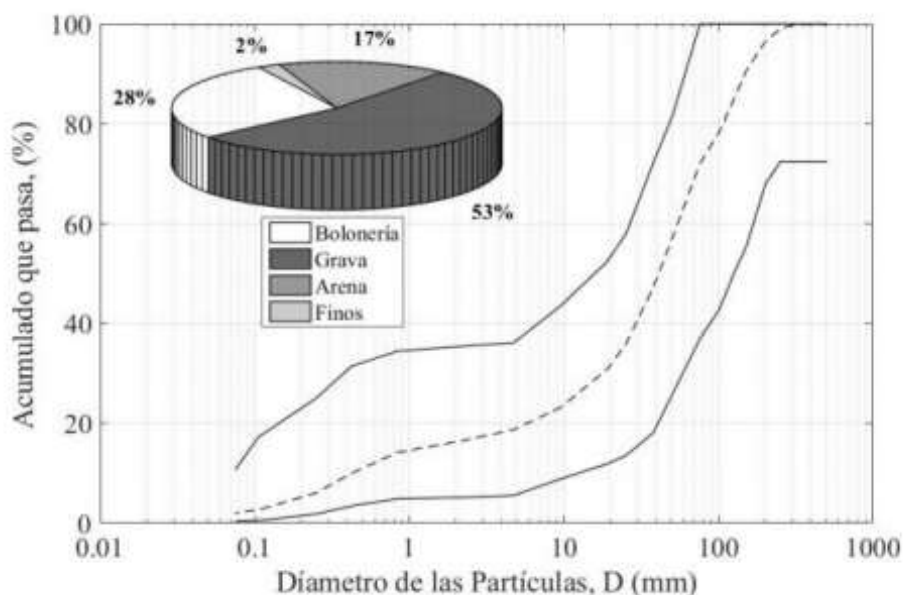


Figura 10. Rangos granulométricos de todas las muestras ensayadas en la ciudad de Lima. Fuente: (Sánchez et. al, 2016)

En el análisis de los límites de Atterberg se obtuvo que el material es no plástico (NP) debido al bajo porcentaje de finos, clasificando las muestras como gravas bien graduadas (GW) o mal graduadas (GP) según el método de clasificación SUCS. Para complementar se han medido aproximadamente 33500 cantos, obteniendo un tamaño máximo de 67 cm de diámetro. La densidad se obtuvo en campo con ayuda de las calicatas donde se ejecutaron ensayos de cono y arena, obteniendo densidades entre 20 y 24 KN/m^3 adoptando un valor medio de 22,2 KN/m^3 .

2.5.9.2 Características mecánicas

Desde el año 1982 hasta la fecha se realizaron varias investigaciones para determinar los parámetros de resistencia de este conglomerado con ensayos de corte en campo y de laboratorio a gran escala, cabe mencionar que la profundidad máxima analizada fue de 11 metros, donde se obtuvieron cohesiones que varían entre 64 y 10 KPa, y ángulos de fricción que van desde 34° hasta 43.5°. El rango de variación de ambos parámetros es alto, lo cual se debe principalmente al estado tensional a la hora de estimar los parámetros. Para un rango bajo de esfuerzos se recomienda adoptar un ángulo de fricción de 55° sin cohesión y para estados tensionales mayores se recomienda una cohesión de 40 KPa y un ángulo de fricción de 40°.

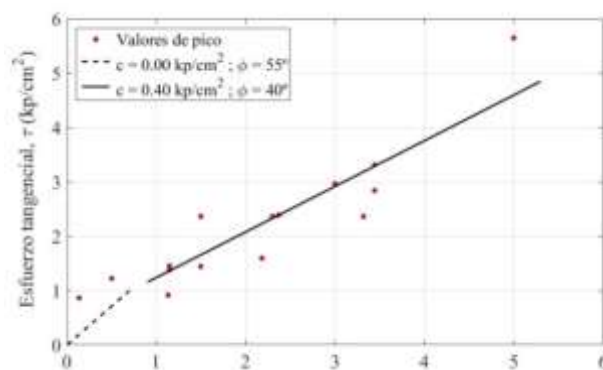


Figura 11. Parámetros de resistencia aproximados obtenidos. Fuente: (Sánchez et. al, 2016)

El retro análisis también fue utilizado para estimar los parámetros de resistencia mediante equilibrio límite en los taludes de la Costa Verde de Lima, alcanzando una altura de 70 metros con una inclinación de 65°, obteniendo valores de cohesión y ángulo de fricción ligeramente mayores a los mencionados anteriormente.

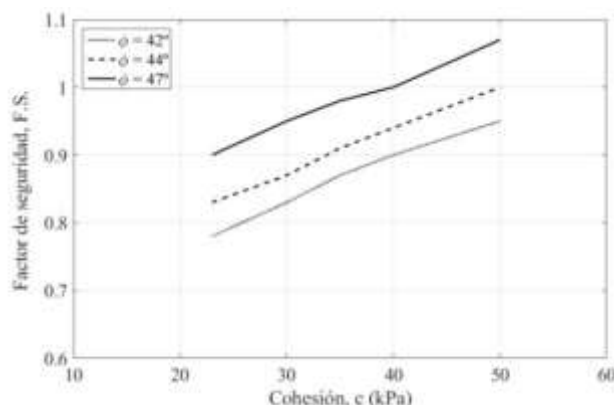


Figura 12. Resultados de análisis inverso para determinar los parámetros de resistencia del conglomerado.

Fuente: (Sánchez et. al, 2016)

2.5.10 Comportamiento mecánico de suelos grueso granulares de origen aluvial en Colombia

Colombia también presenta este tipo de formaciones de suelo granular grueso, Nanclares (2018) realizó 39 ensayos de corte directo en condición consolidado drenado y 21 triaxiales a gran escala; en el caso del corte directo el área de corte fue de 0.5 m^2 y para los triaxiales las dimensiones de las probetas fueron de 0.3 m de diámetro y 0.6 m de altura. Los ensayos en campo se realizaron con muestras talladas a mano, conservando las características de campo y en laboratorio se usaron muestras con diferentes granulometrías, las densidades para los ensayos de corte directo fueron muy cercanas a las de campo. En campo se obtuvieron valores de densidad de 23 KN/m^3 con una humedad del 6%, mientras que para los ensayos triaxiales se utilizó una densidad 10% menor a la obtenida en campo. Los resultados obtenidos fueron comparados con metodologías empíricas para determinar los parámetros de resistencia del conjunto como la metodología de los Bimsoil.

Los ensayos se realizaron para diferentes curvas granulométricas que sean representativas del rango que se puede encontrar en campo. Tras realizar los ensayos triaxiales, se obtuvo un rango para el ángulo de fricción entre 27° y 35° , para los ensayos de corte directo uno entre 54° y 50° , y por último se obtuvieron valores de cohesión entre 110 KPa a 186 KPa. En el caso de la metodología Bimsoil, se obtienen ángulos de fricción que varían entre 38° a 54° y cohesiones desde 75 KPa a 186 KPa, presentando en general un amplio rango de dispersión debido a la variación en la granulometría de las muestras ensayas, sin embargo, los rangos obtenidos mediante ensayos y relaciones empíricas son comparables.

2.5.11 Aproximación de la capacidad portante para conglomerados en la ciudad de Cuenca.

Alvarez y Contreras (2019) realizaron una aproximación de los parámetros de resistencia y capacidad portante para la ciudad de Cuenca (específicamente para la terraza 5). Para determinar los parámetros de resistencia se realizaron ensayos de corte directo a gran escala en campo, con un área de corte de 0.64 m^2 ; en campo también se realizaron ensayos geofísicos para obtener velocidades de ondas a corte y compresión. Por último, se utilizaron ecuaciones empíricas para estimar los parámetros de resistencia del suelo, mismas que utilizan coeficientes en base a la distribución granulométrica, densidad relativa, peso específico, etc.



Figura 13. Ensayo de corte directo realizado en campo en la ciudad de Cuenca. Fuente: (Alvarez y Contreras, 2019)

Tras realizar la investigación, se determinaron los siguientes rangos para algunas de las propiedades del material: un porcentaje de boleos entre 8.2 y 29.3 %, densidad desde 2000 a 2433 kg/m³, y humedad entre el 9.34 y 13.77 %. Los resultados obtenidos para los ensayos de corte directo realizados en campo reflejan un ángulo de fricción de 55° y una cohesión de 0.12 kg/cm², mientras que, aplicando metodología empírica, en base a las propiedades del material, se obtuvo un valor de ángulo de fricción que oscila entre 35° a 55°. Finalmente, tras procesar los ensayos geofísicos se obtiene un ángulo de fricción de 31° y una cohesión de 0.15kg/cm².

3 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se concentra en caracterizar el conglomerado perteneciente a un talud, producto de una excavación en la ciudad de Cuenca, a través de dos metodologías, relaciones empíricas y análisis inverso; para ello se inicia con la determinación de las propiedades físicas, siguiendo los siguientes pasos:

- Recolección de muestras y datos del talud en estudio.
- Granulometría por tamizado y por procesado de imágenes.
- Determinación de los límites de Atterberg.
- Ensayos en campo y laboratorio para determinar valores de densidad y humedad.
- Determinación del grado de compactación mediante ensayo Proctor.

Una vez se realizó la caracterización física del material, se procedió a determinar las propiedades mecánicas del mismo, para ello se realizaron los siguientes ensayos en la matriz:

- Ensayos de compresión simple.
- Ensayos triaxiales

Finalmente, con los datos recolectados tras la caracterización física y mecánica del material, se emplearon las dos metodologías indicadas anteriormente para obtener los parámetros de resistencia del conjunto.

3.1 Localización sitio de estudio

El estudio presentado se realizó en la ciudad de Cuenca, ubicada en la provincia del Azuay, al sur del Ecuador. La toma de muestras, recopilación de datos y ensayos en campo tuvieron lugar en el sitio de construcción de un nuevo edificio en la ciudad, donde se realizó una excavación de hasta 12 metros de profundidad y los taludes conformados quedaron expuestos durante las primeras etapas de la construcción.

El material del sitio corresponde a una terraza fluvio-glacial, conocida como Qt5, la ubicación del sitio se marca con un círculo rojo en la Figura 14.

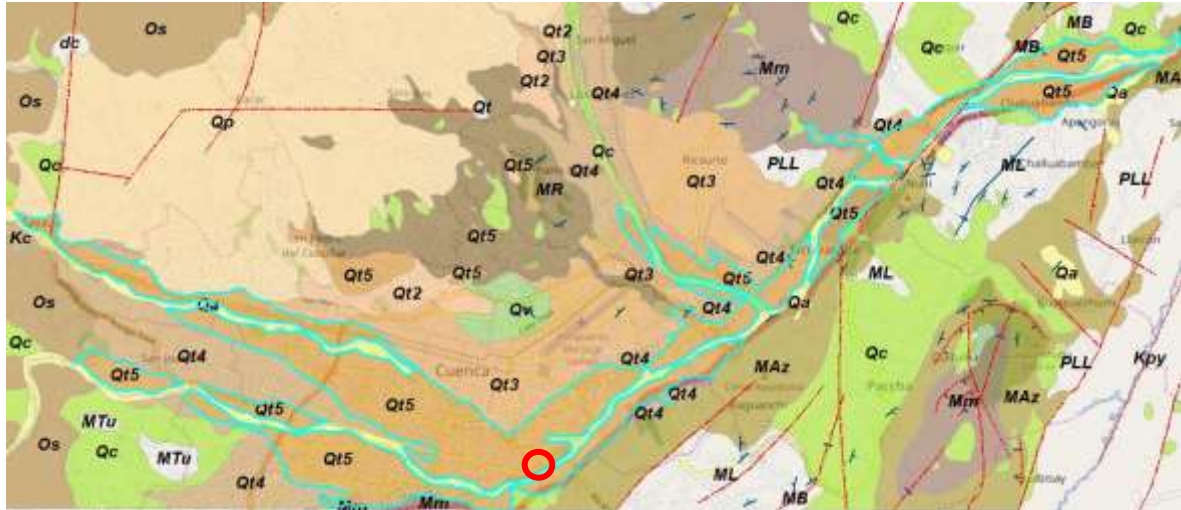


Figura 14. Ubicación de la zona de estudio en el mapa geológico de las terrazas de la ciudad de Cuenca.
Fuente: (Alvarez y Contreras, 2019)

El sitio se encuentra en el cruce entre la Av. Diez de Agosto y la calle Nicanor Corral, frente a la orilla del río Yanuncay, sector parque El Paraíso. Las coordenadas geográficas del sitio en el formato UTM, basadas en el globo de referencia WGS84 17 sur, son:

723281 E

9677819 N

3.2 Recolección de muestras

En el sitio descrito anteriormente, se tomaron muestras para los distintos ensayos a realizar, estas se clasifican en dos grupos: las muestras tomadas para realizar ensayos de clasificación y resistencia, y las muestras tomadas para los ensayos de densidad en laboratorio. A continuación, se describe el proceso seguido en ambos grupos.

3.2.1 Muestras para ensayos de clasificación y resistencia

En este grupo de muestras, se recolectaron saquillos de material aprovechando algunos de los desprendimientos de los taludes expuestos, como los que pueden observarse en la Figura 15, logrando recolectar 6 muestras de diferentes zonas cuyos pesos varían entre 50 y 75 kg, estas muestras fueron destinadas a los ensayos de granulometría y límites de Atterberg. Al momento de tomar la muestra se buscó abarcar el mayor tamaño y cantidad de boleos posible, además de verificar que el material se encuentre lo menos contaminado por escombros generados durante la construcción. Cabe mencionar que estas muestras no son representativas ya que en campo se pueden observar boleos mucho más grandes que resultan imposibles de transportar a laboratorio, peor aún ensayarlos de manera tradicional,

sin embargo, deben de ser considerados a la hora de determinar las propiedades y distribución granulométrica del material.



*Figura 15. Toma de muestras del material para análisis granulométrico desprendido directamente del talud.
Fuente: Autor*

Ahora para las muestras destinadas para los ensayos de resistencia, igualmente se recolectaron saquillos de material, pero en zonas donde se realizó también el ensayo de densidad, estas zonas se describirán más adelante en el informe. Estas muestras se diferencian de las anteriores puesto que en estas no se buscaba incluir boleos, debido a que los tamaños máximos que pueden ensayarse son mucho menores. Es así que se recolectaron 3 muestras, el sitio donde se tomaron las muestras puede observarse en la Figura 16 .



Figura 16. Toma de muestras de material para ensayos triaxiales y a compresión simple. Fuente: Autor

3.2.2 Muestras para ensayos de densidad en laboratorio

En campo, se recolectaron pequeñas muestras del talud, donde las partículas permanecen unidas debido a la cohesión del material fino. Se recolectaron algunas muestras

desprendiéndolas directamente del talud con sumo cuidado, y para otras se aprovecharon algunos pedazos que se habían desprendido previamente y podían encontrarse caídos. Estas muestras no son de gran tamaño, debido a que las partículas de mayor tamaño, difícilmente permanecían unidas a las demás. Un ejemplo de estas muestras puede observarse en la Figura 17.



Figura 17. Pedazo intacto de la matriz del talud cubierto con parafina. Fuente: Autor

Se recolectaron un total de 13 muestras, para su transporte se utilizaron bolsas plásticas para llevarlas por separado y evitar que se produzcan roces entre las muestras provocando que el material se disgregue.

3.3 Recolección de datos en campo

En esta sección se exponen los procesos y criterios seguidos para recopilar toda la información requerida para el posterior estudio y modelado del talud, necesarios para complementar los ensayos de laboratorio.

3.3.1 Muestras fotográficas

Complementario a los ensayos de granulometría convencionales, se busca obtener la distribución y porcentaje de los boleos, para ello, se debe contar con fotografías del talud expuesto. Las fotografías deben contar con su respectiva escala para posteriormente poder realizar el análisis, en nuestro caso se usó un flexómetro que marcaba 50 centímetros cumpliendo el papel de escala en todas las fotografías. Al momento de tomar la fotografía, también se debe buscar que esta sea tomada de forma frontal y lo más perpendicular posible, para así evitar que se produzcan distorsiones en la escala debido a la perspectiva. Las fotografías fueron tomadas ya en una etapa avanzada de la construcción, por lo que parte del talud ya se encontraba cubierto, es así que estas abarcan solamente alrededor de 3 a 4

metros de altura, y no lo cubren en su totalidad. El sitio donde se obtuvieron las fotografías se muestra en la Figura 18.



Figura 18. Parte del talud donde se tomaron fotografías para análisis de boleos. Fuente: Autor

Se tomaron un total de 5 fotografías, las cuáles pueden revisarse en el Anexo 1, un ejemplo de estas fotografías, puede observarse en la Figura 19.



Figura 19. Fotografía #1 para determinar el porcentaje de boleos del talud. Fuente: Autor

3.3.2 Levantamientos topográficos

Para poder realizar el estudio del talud por análisis inverso, se deberá de conocer el cambio en su configuración para así poder identificar los desprendimientos o fallas, y con ello los parámetros de resistencia del material. Para poder identificar el cambio en la configuración del talud, se recopiló un levantamiento topográfico realizado previamente a manera de control de obra, y se realizó un nuevo levantamiento para compararlo con el antes mencionado.

Debido a la fuerte pendiente del talud, no era posible realizar un levantamiento con prisma, por lo que se buscó una estación total que sea capaz de realizar lecturas únicamente con láser. Para el punto en que se realizó el levantamiento, parte del edificio estaba ya construida, por lo que el levantamiento pudo realizarse sin problema desde una de las plantas en construcción donde se podía observar con plenitud el talud en estudio, tal como se puede

verificar en la Figura 20. Debido a la construcción, existían algunos obstáculos en la visual como varillas, tablas, cables y sogas que podían llegar a interferir con la lectura del láser y provocar que estas no sean correctas, por ello los puntos se tomaron con especial cuidado para que estos se reflejen sobre el talud.



Figura 20. Levantamiento topográfico del talud, en la primera imagen se puede observar los obstáculos para realizar el levantamiento, en la segunda el proceso de levantamiento mediante laser. Fuente: Autor.

Los desprendimientos habían tenido lugar mayormente en la parte izquierda del talud, por lo que se tomaron puntos con una menor distancia en esa zona para que las curvas de nivel generadas tengan una mayor precisión. En la Figura 21, se puede observar este sector de forma más clara.



Figura 21. Desprendimiento de talud en obra provocado por las fuertes lluvias, se observa un deslizamiento en forma de desprendimiento de los boleos más grandes. Fuente: Autor.

3.4 Caracterización física

En este apartado se indican las normas, criterios y procedimientos utilizados para realizar los ensayos de granulometría, plasticidad, densidad y humedad.

3.4.1 Granulometría por tamizado

En laboratorio, se siguió la normativa INEN 696, desarrollada en base a ASTM C 136. Una vez recolectadas las muestras, estas fueron secadas al ambiente por un tiempo de aproximadamente 48 horas. Una vez las muestras se encontraban secas, se procedió a disgregar el material, acto seguido las partículas visiblemente de mayor tamaño se separaron manualmente de las demás para someterlas a un proceso de lavado, donde el material que se desprendía fue recolectado en bandejas para posteriormente secarlas en horno al igual que las partículas que se sometieron a lavado. El proceso de secado al ambiente y lavado puede observarse en la Figura 22.



Figura 22. Proceso de secado al ambiente y lavado del material para análisis granulométrico. Fuente: Autor.

Una vez las muestras se secaron nuevamente en el horno, se realizaron ensayos granulométricos por tamizado, utilizando todo el material de cada muestra para la parte gruesa conformada por los tamices: 3", 2.5", 2", 1.5", 1", ¾", ½", ⅜" y #4. Para obtener la granulometría del material pasante del tamiz #4, se seleccionó una cantidad aproximada de entre 500 y 700 gramos para cumplir con el mínimo establecido por la normativa, que es de 300 gramos. El material seleccionado se ensayó sobre los tamices: #4, #10, #40 y #200. Se utilizaron tamices normados, con un diámetro de 203.2 milímetros, y como se establece en la normativa, se cuidó que durante el proceso de tamizado no se acumule más de 7 Kg/m², que, en el caso de las dimensiones de los tamices empleados, equivaldría a no retener más de 200 gramos de material, puesto que puede interferir en el proceso de tamizado y perjudicar los resultados del ensayo, para ello el tamizado se realizó por porciones. En cada tamiz debe registrarse el peso del material que fue retenido para posteriormente poder determinar el porcentaje del total de material que es capaz de pasar por cada uno de los tamices. El valor de porcentaje correspondiente a cada tamiz debe expresarse con una precisión de 0.1% según lo establecido en la normativa.



Figura 23. Análisis granulométrico mediante tamizado. Fuente: Autor.

Tal como se especifica en la normativa, las partículas mayores de 3" se tamizaron manualmente, verificando por que tamiz podrían pasar, girando las partículas en caso de ser necesario, aunque sin aplicar fuerza. En caso de no poder pasar por ninguno de los tamices, las partículas se sometieron a un proceso de medición manual, buscando el diámetro menor de la partícula y midiendo con un flexómetro, aunque vale recalcar que este no es un procedimiento normado, sin embargo, se realizó de forma complementaria.



Figura 24. Complementación del análisis granulométrico con la ayuda de flexómetro para los boleos superiores a 3". Fuente: Autor.

Una vez calculados el porcentaje de partículas que pasa cada tamiz, utilizando el peso total de la muestra y el peso retenido en los tamices, se deben calcular los coeficientes característicos de la curva granulométrica, los cuales serían el coeficiente de curvatura, y el coeficiente de uniformidad, mismos que se calculan con las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, estas fueron enseñadas anteriormente en la sección 2.2.1 Para el cálculo de estos, se deben identificar primeramente los diámetros característicos de la muestra, estos pueden no encontrarse directamente una vez realizado el análisis de los pesos retenidos, por lo que muy probablemente se deba realizar un proceso de interpolación para encontrar los valores correspondientes.

3.4.2 Granulometría por imágenes tomadas en campo

Una vez tomadas las fotografías, se importan al software AutoCAD y se modifican para ajustarse a la escala, esta como se mencionó anteriormente en las muestras fotográficas se utilizó un flexómetro ajustado a 50 centímetros, con el objetivo de poder identificar todos los boleos. Debido a la gran cantidad de boleos que presentaba cada imagen, se intentó implementar la metodología presentada por Núñez y Orellana (2009), sin embargo, las imágenes obtenidas necesitan un post-procesado manual para definir con exactitud el contorno de los boleos, por lo que se buscó otra alternativa más actual como lo es el reconocimiento de contornos mediante Python (Martínez, 2019). Desafortunadamente debido a la gran cantidad de boleos y colores que presenta cada fotografía es muy complicado obtener los resultados deseados, al no ser este el objetivo de la investigación se decidió realizar el proceso de manera manual.

Una vez identificadas las partículas con tamaños mayores a 3" (boleos), se dibujó el contorno de los boleos con un polígono, tal como se puede observar en la Figura 25, se tomó en cuenta también espacios huecos donde evidentemente existía un boleo anteriormente intentando dibujar el que hubiera sido su contorno según la marca que dejó en el talud. Esta y las demás imágenes procesadas pueden revisarse también en el Anexo 3



Figura 25. Proceso manual de identificación de boleos con diámetros mayor a 3". Fuente: Autor.

Para poder clasificar por tamaños los boleos encontrados en cada imagen, la alternativa más eficiente fue desarrollar un algoritmo en Python el cual tiene por entrada un archivo de texto delimitado por comas (.csv), que contiene todas las coordenadas correspondientes a los nodos resultantes al graficar como un polígono cada uno de los boleos presentes en una misma fotografía. Para exportar este archivo se usó un complemento de AutoCAD llamado "VEXP" el cual exporta las coordenadas de todos los polígonos presentes en una capa. El

algoritmo separa cada boleto, determina su área, eje mayor y eje menor en base a las coordenadas obtenidas, para posteriormente comparar el eje mayor con cada tamiz superior a 3" (3",4",5", etc.) hasta encontrar en cuál se quedaría retenido, este proceso se realiza en un bucle con todos los boleos y finalmente se obtiene como salida el área retenida acumulada para cada tamiz y una gráfica de todos los boleos analizados como se puede observar en la Figura 26.

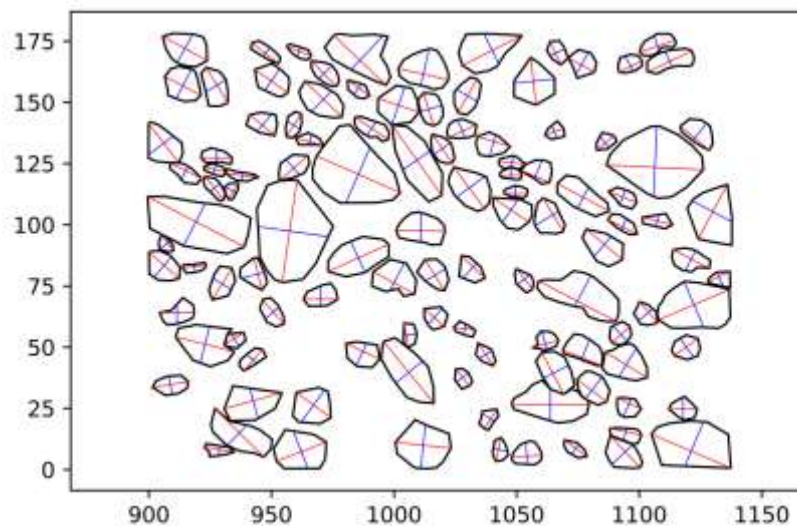


Figura 26, Diámetros mayores y menores obtenidos tras aplicar el código desarrollado en Python. Fuente: Autor.

Se tomó la consideración de usar el eje mayor puesto que al contar únicamente con un equivalente a lo que sería la sección transversal del boleto, se desconoce la dimensión de profundidad, por lo que, aunque un boleto fuera muy alargado y pudiera atravesar un tamiz en la posición correcta, esto no se podría saber con certeza.

Para realizar un análisis granulométrico adecuado se necesita transformar el área obtenida a peso, esto puede realizarse mediante la densidad de los boleos, Santacruz (2009) menciona que los boleos de las terrazas de Cuenca son en su mayoría rocas ígneas extrusivas como andesita, riolita y basalto, adicionalmente proporciona valores de densidad de estos materiales obtenidos en laboratorio, lo más práctico en este caso es tomar una densidad promedio de los resultados obtenidos de estudiar los diferentes tipos de boleos, adoptando un valor final de 2.48 gr/cm^3 . Para obtener los pesos retenidos en cada tamiz se multiplica el área por la densidad adoptada, y se toma la consideración de que hasta un metro de fondo el talud muestra la misma distribución, cabe mencionar que el "peso total" para cada muestra corresponde al área de toda la fotografía multiplicada por la densidad, obteniendo de esta forma la curva granulométrica correspondiente a los boleos. Finalmente, para obtener la curva granulométrica completa, se realiza una liga entre las curvas obtenidas por fotografía con las obtenidas en laboratorio de manera tradicional.

3.4.3 Determinación de Límites de Atterberg

Complementario a los ensayos de granulometría, se realizaron también ensayos de límites de Atterberg, siguiendo las normativas INEN 691 y ASTM D-4318, esto con el objetivo de clasificar el material mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Para la obtención del límite líquido, se tomó una porción de las muestras usando únicamente el material pasante del tamiz #40, se añadió agua destilada y mezcló hasta obtener una pasta homogénea. Posteriormente, se procedió a realizar el ensayo de Casagrande, para ello se siguió el proceso mencionado en INEN 691, la pasta se untó en la cuchara con ayuda de una espátula y por capas, para evitar así que se forman burbujas de aire dentro de la muestra y afecte en los resultados del ensayo. Una vez untada la muestra, se procede a usar el acanalador para formar una brecha en mitad de la muestra, este proceso debe de realizarse con cuidado de alzar la muestra y que esta se desprenda de la cuchara.



Figura 27. Ensayo de Casagrande para determinar el límite líquido. Fuente: Autor.

Una vez formado el canal, se procede con el ensayo, para ello se debe de girar la manivela a una velocidad de aproximadamente dos revoluciones por segundo, y registrar el número de golpes necesarios a que el canal se cierre una longitud de 13 mm, tras haber cumplido este objetivo, se debe de tomar la porción de material que cerró el canal y registrar su peso húmedo, someter a un proceso de secado en horno y para obtener su peso seco y así determinar la humedad correspondiente al número de golpes obtenido.



Figura 28. Sección de material que se toma para obtener la humedad en el ensayo de Casagrande. Fuente: Autor.

El ensayo debe de repetirse al menos 3 veces, modificando la humedad en cada una de las repeticiones para así obtener un número de golpes diferente. El límite líquido del material, es la humedad a la cual el canal se cierra 13 mm en exactamente 25 golpes de la cuchara, si este valor no se encuentra directamente, deberá realizarse un proceso de interpolación con los 3 puntos obtenidos.

Para la obtención del límite plástico, se siguió la normativa ASTM D-4318, se utilizó el mismo material usado en el ensayo anterior, aunque se realizó primero un proceso de secado manual, manipulando la mezcla hasta que esta no se adhiera a las manos. Una vez se logró la consistencia buscada, se procedió con el ensayo, para este caso se empleó el método manual, en el que se busca formar un tubo frotando la muestra con las manos contra una placa de vidrio. Mientras se moldea la muestra, debe de procurarse que la presión se ejerza sobre todo el tubo de manera uniforme, el objetivo es que el tubo se rompa antes de llegar a tener un diámetro de 3,2 mm, si es que se obtiene un diámetro menor entonces se debe de remoldar el tubo y repetir el ensayo, puesto que se entiende que la muestra aún se encuentra muy húmeda. Una vez cumplido el objetivo, se deberá de obtener la humedad del material.



Figura 29 Ensayo de limite plástico. Fuente: Autor.

El proceso descrito anteriormente se repitió hasta obtener 2 valores de humedad para cada una de las muestras, para cada valor se utilizó aproximadamente 6 gramos de material. Para definir el límite plástico de la muestra se realizó un promedio entre los valores de humedad obtenidos.

3.4.4 Densidad del suelo

Para determinar la densidad del material, se realizaron primero ensayos en campo con densímetro nuclear, y posteriormente un ensayo complementario en laboratorio para poder respaldar los resultados encontrados.

3.4.4.1 Densímetro nuclear

En campo se utilizó un densímetro nuclear para tomar lecturas en los puntos de interés. Al momento de la toma de datos se precisó de la ayuda de una retroexcavadora para poder retirar parte del material superficial debido a que este se encontraba algo compactado y contaminado con material de mejoramiento. Una vez se observaba que el material pareciera estar en buenas condiciones, se procedió con la toma de datos utilizando el equipo según lo explicado en la norma ASTM 6938. El equipo utilizado corresponde a un densímetro marca HUMBOLDT, modelo HS-5001EZ.

Uno de los puntos donde se tomaron lecturas se encontraba sumamente húmedo y con una cantidad de boleos muy elevada, por lo que estas lecturas tuvieron que ser descartadas, la condición del material puede observarse en la Figura 30.



Figura 30. Primera toma de densidad con densímetro nuclear en material saturado, se puede observar la gran presencia de boleos en la zona. Fuente: Autor.

Los demás datos se registraron en la base del talud, y en la parte media, se realizaron 7 lecturas registrando densidad seca y densidad húmeda. La toma de datos se realizó por el método de transmisión directa, para lo que primero se aplanó el terreno y posteriormente se introdujo la varilla en el talud aproximadamente 15 centímetros.



Figura 31 Toma de densidades con densímetro ubicada al pie del talud donde existe un menor porcentaje de boleos. Fuente: Autor.

Las lecturas de densidad y humedad registradas, se corrigieron según las correlaciones presentadas por Mendoza y Ramirez (2009), para las cuales se utilizaron los porcentajes máximos y mínimos de grava, arena y finos encontrados en la curva granulométrica completa. Para obtener el factor de corrección final, se obtuvo el promedio entre ambos valores.

Las correlaciones se obtuvieron en base a la tabla 32, utilizando las correlaciones expresadas para las terrazas fluvio-glaciares.

GEOLOGIA	ECUACION PARA OBTENER EL COEFICIENTE DE CORRECCION DE DENSIDAD			
	BOLEOS	GRAVA	ARENA	FINOS
TURI	-----	$Kd = 8E-05x^2 - 0,014x + 1,688$	-----	-----
T. FLUVIOGLACIARICAS	-----	$Kd = 0,001x + 1,008$	$Kd = 0,002x + 0,938$	$Kd = 0,007x + 0,962$
D. ALUVIALES	$Kd = 0,011x + 0,936$	$Kd = 0,062x - 0,434$	-----	-----

GEOLOGIA	ECUACION PARA OBTENER EL COEFICIENTE DE CORRECCION DE HUMEDAD			
	BOLEOS	GRAVA	ARENA	FINOS
TURI	-----	$Kh = 0,015x + 0,17$	-----	$Kh = -0,146x + 1,238$
T. FLUVIOGLACIARICAS	-----	$Kh = 0,003x + 0,516$	-----	$Kh = 0,037x + 0,204$
D. ALUVIALES	$Kh = -0,059x + 1,501$	$Kh = -0,254x + 16,09$	$Kh = 0,058x - 0,613$	$Kh = 0,641x - 1,637$

Figura 32 Factores de corrección para humedad y densidad. Fuente: (Mendoza y Ramírez, 2009)

3.4.4.2 Ensayo parafina

Para poder contrastar los resultados obtenidos con el densímetro, se realizó también un ensayo con aceite de parafina, aunque como se puede evidenciar en las fotografías, las muestras no son de gran tamaño, por lo que no se podrían considerar como representativas, sin embargo, se realizó únicamente con el propósito de servir de referencia y comparación.

El ensayo consiste en pesar las muestras, posteriormente bañarlas en parafina derretida y poner a secar, esto con el objetivo que la parafina recubra toda la muestra y esta quede sellada, para evitar el ingreso de agua en los siguientes pasos. Como se puede observar en la Figura 33, algunas muestras presentan un color oscuro, esto se debe a que la temperatura de la parafina era muy alta y no se lograba secar correctamente como las muestras que muestran un color más blanco.



Figura 33 Ensayo de parafina, recubrimiento de muestras. Fuente: Autor.

Una vez la muestra se haya secado y se verifique que la parafina cubra toda su extensión, esta debe de pesarse nuevamente, para encontrar la diferencia con el valor pesado anteriormente que corresponde al peso de la parafina, con este valor y el valor de su densidad puede obtenerse el volumen de parafina que recubre a la muestra, en este caso se utilizó un valor igual a 0.97 gr/cm^3 . Posteriormente, la muestra se sumerge en una probeta donde previamente se registró el nivel de agua existente para medir el cambio en el volumen una vez se libere la muestra dentro de la probeta, al valor medido se le deberá descontar el volumen de la parafina y así se obtiene el volumen del suelo.



Figura 34 Muestras con parafina dentro de la probeta para determinar su volumen. Fuente: Autor.

Una vez encontrado el volumen del suelo, y conociendo previamente su peso, se puede calcular la densidad según la relación entre estos dos valores, utilizando la ecuación 5. Cabe mencionar que si durante el ensayo, se desprenden partículas de la muestra, ésta deberá de ser descartada puesto que su peso y condiciones iniciales se verían alteradas.

3.4.5 Humedad

Los valores de humedad se obtuvieron tanto de las lecturas del densímetro de manera directa, así como también con un proceso de secado en laboratorio con las muestras recuperadas en campo para posteriormente determinar el contenido de agua mediante la ecuación presentada en la sección 2.3.2. Cabe resaltar que las lecturas del densímetro, se corrigieron con los parámetros mostrados en la Figura 32.

3.4.6 Ensayo Proctor

Se realizaron ensayos Proctor modificado siguiendo la designación ASTM D-1557, en nuestro caso se siguió la Metodología A expuesta anteriormente en el capítulo 2, buscando caracterizar el material con el que se conformaron los triaxiales, es decir material pasante del tamiz #4, por ello se utilizó el molde pequeño, de 101.6 mm de diámetro. El material se distribuyó en 5 capas y compactó con 25 golpes en cada una, golpeando primero en una cruz, y posteriormente en espiral, como se indica en la Figura 36.



Figura 35. Compactación para ensayo Proctor. Fuente: Autor.

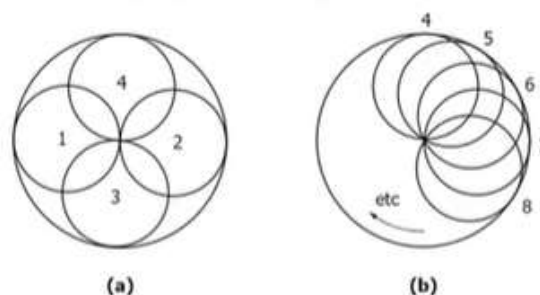


Figura 36 Distribución de golpes para compactación del material. Fuente: ASTM D-1557

El ensayo se replicó un total de 4 veces, variando el contenido de agua, procurando que no exista una diferencia en los valores de humedad mayor al 4%, tal como estipula la normativa, y procurando que el material sobrante al retirar el collar de extensión no exceda los 6 mm de altura.

Una vez se retira el collar de extensión con ayuda del enrasador se eliminó el material sobrante, y se utilizó el mismo material para rellenar cualquier irregularidad en la superficie. Posteriormente se pesó la masa de suelo y el molde, y se tomaron muestras para la obtención de la humedad.

Tras poner a secado las muestras tomadas para la humedad, y obtener el valor de esta, se puede obtener la densidad seca del material correspondiente a esa humedad según la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{w + 100} \times 100$$

Ecuación 12 Cálculo de la densidad seca en ensayo Proctor

donde:

γ_d : densidad seca del material.

γ_h : densidad húmeda del material.

w : humedad del material.

El valor de la densidad húmeda se obtuvo tras pesar la muestra y molde, descontar el valor conocido del peso del molde, y dividir el peso de suelo para el volumen del molde. El molde empleado para el ensayo tenía un peso de 3914 gr, y un diámetro y altura de 10.266 cm y 11.686 cm respectivamente.

3.5 Parámetros de resistencia de la matriz

Con el objetivo de determinar los parámetros de resistencia de la matriz en laboratorio se realizaron ensayos triaxiales CU según la norma ASTM-D4767-11, así como también ensayos a compresión simple según la norma ASTM D 2166-06.

3.5.1 Conformación de muestras en laboratorio

Las muestras para los ensayos triaxiales se realizaron en 2 tamaños, el primero un triaxial que admite un diámetro de 7,5 cm y 15 cm de altura conformada con material pasante del tamiz 1/2". Las muestras más pequeñas se realizaron con un diámetro de 3.5 cm y 7 cm de altura con el material pasante del tamiz #4; cabe mencionar que no se realizó ninguna

corrección granulométrica sino simplemente se tomó el material pasante de los tamices mencionados debido a que el objetivo era determinar los parámetros de resistencia de la matriz.

Para los ensayos triaxiales se ensayaron 3 muestras con diámetro de 7.5 cm y 6 con diámetro de 3.5cm; por su parte, para los ensayos a compresión simple se ensayaron utilizaron 2 muestras de 3.5 cm de diámetro.

En cuanto a la conformación de la muestra se usaron los valores medios de densidad y humedad de los datos obtenidos en laboratorio y campo; con la densidad media y las dimensiones de la muestra, se calculaba la cantidad de suelo y agua para llegar a la humedad y densidad deseada. Una vez encontrada la cantidad de suelo requerida, se dividía tanto la altura de la muestra como el peso total en 6 capas, tal como indica como indica la normativa. Antes de conformar la muestra se colocaba aceite en las paredes del molde para facilitar su posterior extracción, luego se compactaba capa por capa hasta conseguir la altura correspondiente a cada una, esta se media con ayuda de un calibrador o flexómetro según el tamaño del molde; adicionalmente, tras compactar cada capa se escarificaba antes de poner el material correspondiente a la siguiente, tal como lo indica la norma ASTM D7181-20. Para cada una de las muestras conformadas, se tomaban dos taras con material para calcular la humedad de las mismas, luego se enrazaba y se extraía la muestra con mucho cuidado, ya que se corría el riesgo de que la muestra se rompa o fisure al momento de desmoldar. Finalmente se tenía la muestra conformada lista para realizar cualquiera de los dos ensayos mencionados anteriormente.

3.5.2 Ensayos de compresión simple

El ensayo a compresión simple se realiza de manera similar al ensayo triaxial. Una vez conformada la muestra se colocan los apoyos de la celda para que la muestra pueda recibir la carga, tras colocar en la celda se procede directamente al ensayo de rotura. La velocidad de carga debe de escogerse tal que se genere una deformación de 2 a 14%/min, cuidando que la duración del ensayo no supere los 15 minutos; por las dimensiones de las muestras se seleccionó una tasa de deformación de 2%/min, resultando en una velocidad igual a 1.5 mm/min; en este caso solo se registraron datos de carga y deformación. Debido a que la muestra no estuvo sometida a un proceso de saturación ni consolidación no es necesario tomar la humedad final de la muestra. En la Figura 37 se observa una muestra ensayada con este proceso. Al igual que en los ensayos triaxiales, no se alcanzó una falla de tipo frágil, por lo que la resistencia última a compresión simple se toma al alcanzar una deformación igual al 15%.



Figura 37. Muestra luego de ensayo a compresión simple. Fuente: Autor.

3.5.3 Ensayos triaxiales

Para ejecutar los ensayos triaxiales, es necesario primero cubrir la muestra con una membrana de caucho, esto con el objetivo de impermeabilizarla. El ejemplar se debe de colocar sobre la base de la celda triaxial, dejando entre la muestra y la base papel filtro y una piedra porosa, mismos que fueron previamente saturados. Posteriormente se asegura la celda y se procede a llenarla de agua, una vez llenada, se elimina los vacíos presentes en las mangueras del equipo triaxial y se establecen las presiones de cámara y flujo, la presión de flujo debe ser menor a la presión de cámara para evitar que la muestra se hinche. La velocidad de flujo se define por la diferencia de presión entre la línea de entrada y la línea de salida, por lo que se procuró que la salida se encuentre sin presión para agilizar el proceso de saturación.

En la siguiente etapa, se busca que la muestra alcance la saturación, para lo cual se deja el flujo de agua a través de la muestra por un largo periodo de tiempo, en el caso de las muestras de mayor diámetro estas tomaron entre 1 y 2 meses, y en las muestras de menor tamaño un tiempo entre 1 y 2 semanas. Se verifica el nivel de saturación controlando que el cambio de presión de agua de poros resulte como mínimo el 95% del incremento de presión de confinamiento.



Figura 38 Equipo completo de triaxial, con la celda y el panel de control de presiones y niveles de agua. Fuente: Autor.

Una vez alcanzada la saturación de la muestra se elimina la presión de flujo dejando únicamente la presión de confinamiento y aumentándola hasta la presión de consolidación, se manejó un rango de presiones de consolidación entre 0.5 kg/cm^2 a 2.4 kg/cm^2 , es importante mencionar que en la etapa de saturación se debe realizar con presiones de confinamiento menores a la presión de consolidación, la etapa de consolidación suele tomar un día aproximadamente, siendo la etapa previa a la rotura.

Para la rotura de la muestra se mantiene la presión de confinamiento establecida en la consolidación, para ambas muestras se usó una velocidad de carga que produzca una deformación de $0.4\%/min$ en base a la norma, resultando en una velocidad igual a 0.6 mm/min para las muestras grandes y 0.3 mm/min para las demás muestras. Durante el proceso de rotura, se debe guardar registro de la carga, deformación, y como ya se mencionó anteriormente, la presión de agua de poros, la toma de datos se realizó de manera manual o automática dependiendo el equipo.

Una vez ensayada la muestra se procede a drenar la celda, extraer la muestra para pesarla y obtener su humedad final, ninguna de las muestras presentó una falla frágil, sino un tipo barril, alcanzando deformaciones excesivas. Aunque las muestras continuaban tomando carga, las deformaciones eran muy altas, por lo que, según la normativa, se seleccionó como esfuerzo último el alcanzado en una deformación igual al 15%. En la Figura 39 se puede observar una de las muestras ensayadas, y como se ensancha en la parte media debido a las deformaciones alcanzadas.



Figura 39 Muestra de suelo ensayada den Triaxial CU, falla tipo barril. Fuente: Autor.

3.6 Parámetros de resistencia del conjunto

Para determinar los parámetros de resistencia del conglomerado se llevaron a cabo 2 procesos diferentes, con el objetivo de tener diferentes enfoques y poder comparar los resultados obtenidos.

3.6.1 Metodologías empíricas (Metodología 1)

Las relaciones empíricas se utilizan para aproximar los parámetros de resistencia en base a propiedades físicas del conglomerado, se emplean dos metodologías, mismas que fueron presentadas en la sección 2.5.4 y 2.5.5, la teoría de Bimsoils y la teoría de Duncan, cuyo proceso se describe a continuación.

3.6.1.1 Metodología de Duncan

En el capítulo 2, se presentó la ecuación 11, con la cual se debe calcular el ángulo de fricción del material. A continuación, se explica la forma en que se obtuvo cada uno de los parámetros a utilizar.

- Coeficientes A, B, C y D

Con los resultados obtenidos de la granulometría, se obtuvo un valor promedio del coeficiente de uniformidad, y la clasificación del material en grava o arena. Con estos valores se utilizó la tabla 3, de donde se recuperaron los coeficientes correspondientes,

- Densidad relativa

Una vez obtenido el valor de la densidad seca máxima del material mediante el ensayo Proctor, se puede obtener el valor de la compactación relativa, utilizando la siguiente ecuación:

$$C_r = \frac{\gamma_d \text{ en campo}}{\gamma_d \text{ max}} \times 100$$

donde:

C_r : compactación relativa.

$\gamma_{d \text{ en campo}}$: Peso específico seco del material en campo.

$\gamma_{d \text{ max}}$: Peso específico seca máximo para una energía de Proctor modificado.

Con este valor se utilizó la tabla 2, para encontrar el valor de la densidad relativa, se utilizó la primera columna, correspondiente al Proctor modificado.

- Presión normal

Este parámetro varía según la densidad del material y la profundidad. El valor del esfuerzo normal depende directamente de los dos factores antes mencionados, calculándose según la siguiente ecuación:

$$\sigma_N = \gamma h$$

donde:

σ_N : Esfuerzo normal actuante en el suelo.

γ : Peso específico del suelo.

h : Profundidad a la que se realiza el análisis.

- Presión atmosférica

La presión atmosférica se recuperó del repositorio del INAMHI, como puede observarse en la Figura 40, la estación M5103 es la más cercana a la zona de estudio, por lo que de los registros de esta se obtuvo el valor de este parámetro.



Figura 40. Ubicación de estaciones meteorológicas en la zona. Fuente: INAMHI

Una vez obtenidos todos los parámetros, se puede emplear la ecuación antes mencionada para así encontrar un valor aproximado del ángulo de fricción del material. Este método no incluye el cálculo de la cohesión, por lo que una vez aplicada la ecuación el método concluye.

3.6.1.2 Metodología Bimsoils

Para aplicar el método se usaron dos valores de volumen porcentual de boleos (VBP), el mínimo y máximo, valores que se obtuvieron a partir de las curvas granulométricas completas, en esta metodología en particular, se tomó la consideración de que todo material con un tamaño mayor a $\frac{3}{4}$ " se definiría como boleó, esto debido a que las ecuaciones del método se obtuvieron a partir de ensayos realizados sobre material en ese rango de tamaños.

Primeramente, se determina el parámetro A mediante la Figura 3, en base a las propiedades de la matriz: resistencia a compresión simple y ángulo de fricción. Posteriormente, se define al ángulo de reposo de boleos (α) basándose en una inspección visual de los boleos y comparándose con la Figura 5. Finalmente se aplican las ecuaciones 8,9 y 10 presentadas en la sección 2.5.4 para determinar el ángulo de fricción(Φ), resistencia a compresión simple (UCS), y cohesión del conjunto (C).

3.6.2 Análisis inverso (Metodología 2)

Para el análisis inverso se debe contar con la siguiente información: configuración del talud, superficie de falla aproximada y características del suelo, a continuación, se detalla la obtención de estos parámetros.

3.6.2.1 Topografía

La topografía se consiguió mediante un levantamiento topográfico como se mencionó en la sección 3.3.2, para cada topografía, previa al deslizamiento y luego del deslizamiento, se generaron superficies en el software Civil 3D. Se ubicaron puntos de referencia en ambos levantamientos como se muestra en la Figura 41 y se crearon los perfiles correspondientes para aproximar la superficie de falla al montar ambos perfiles en una misma gráfica.



Figura 41. Ubicación del levantamiento topográfico en el mapa para determinar puntos de control y empatar ambos levantamientos. Fuente: Autor.

3.6.2.2 Características del suelo

Los parámetros necesarios para el análisis son los parámetros de resistencia, cohesión (c) y ángulo de fricción (Φ), y el peso específico del material. Los parámetros de resistencia comienzan con un valor aproximado ya que el objetivo del análisis inverso es encontrar la combinación de c y Φ que actuaron al momento de la falla. En cuanto a la densidad se tomó el valor medio de las densidades registradas tras realizar las tomas con el densímetro nuclear y corroborarlas con el ensayo de parafina.

3.6.2.3 Aproximación a superficie de falla

Una vez determinada la superficie de falla se procede a usar un software que permita realizar este análisis, en este caso se utilizó Geo5, en su sección de análisis de estabilidad de taludes, se configuró tanto las propiedades del suelo como la pendiente inicial del talud, tal como se observa en las Figuras 42 y 43 respectivamente. La metodología empleada fue usar varios ángulos de fricción, empezando con 35° , el cual es un valor recomendado para las terrazas de Cuenca por PRECUPA (1998), y variar el valor de la cohesión hasta llegar a un factor de seguridad igual a la unidad. Para el siguiente análisis se aumenta el ángulo de fricción en 5° es decir a 40° y se realiza el mismo proceso hasta encontrar una superficie de falla cercana a la suscitada en campo. Una vez se encontró un ángulo con el cuál se obtenga una superficie de falla lo suficientemente similar, se realizan pequeñas variaciones del ángulo de fricción, aproximadamente 1° , con el objetivo de afinar el proceso y determinar una superficie de falla más precisa.

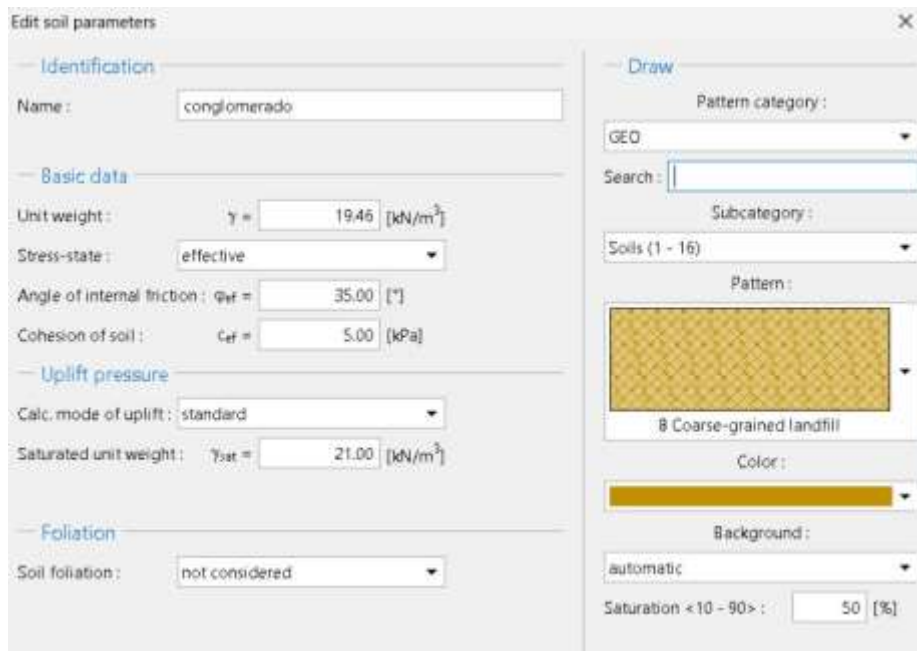


Figura 42 Configuración de los parámetros del suelo en el software Geo5. Fuente: Autor.

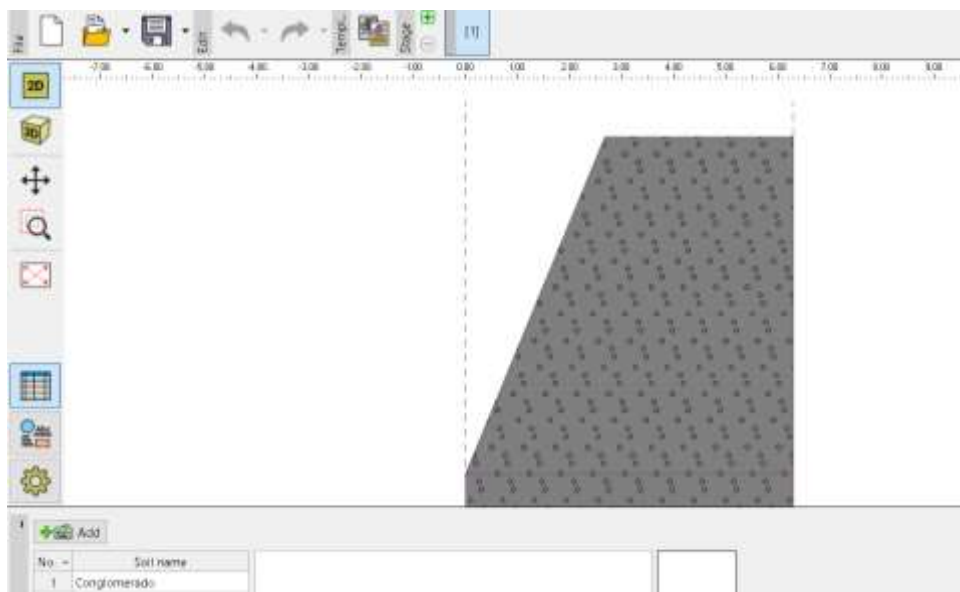


Figura 43 Configuración del talud previo a la falla para realizar el análisis de estabilidad en Geo5. Fuente: Autor.

Para el análisis se utilizaron métodos de equilibrio límite como: Bishop, Fellenius, Jambu, Spencer y Morgenstern-Price, todos presentes en el software, sin obtener mayores variaciones en los resultados finales.

4 RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos al concluir todos los ensayos y análisis expuestos en el capítulo número 3. Se incluye también discusiones sobre los resultados obtenidos y comparaciones con resultados de trabajos similares, así como también comparación entre los resultados obtenidos por las 2 metodologías seguidas.

4.1 Caracterización física

En este apartado del capítulo, se exponen los resultados y comparaciones obtenidos tras los ensayos de granulometría, plasticidad, humedad, densidad, Proctor y clasificación del material.

4.1.1 Granulometría

Como ya se ha explicado anteriormente, debido a la magnitud de algunas partículas, se siguieron 2 metodologías para la obtención de la curva granulométrica, los resultados obtenidos por cada una se observan a continuación, así como también el producto de su unión.

4.1.1.1 Granulometría por tamizado

En la Figura 44, se puede observar todas las curvas granulométricas obtenidas. Las 6 curvas muestran una buena correspondencia entre sí y un comportamiento similar, esto era de esperarse puesto que todas las muestras se recuperaron en un solo sitio de excavación, aunque distribuidas en 2 taludes. La curva correspondiente a la muestra 6 parece estar algo fuera de la tendencia y podría deberse a que durante la recolección de la muestra se tomaron más partículas gruesas que en las demás. Se observa también que todas tienen un porcentaje de material fino (pasante del tamiz #200) menor al 10%.

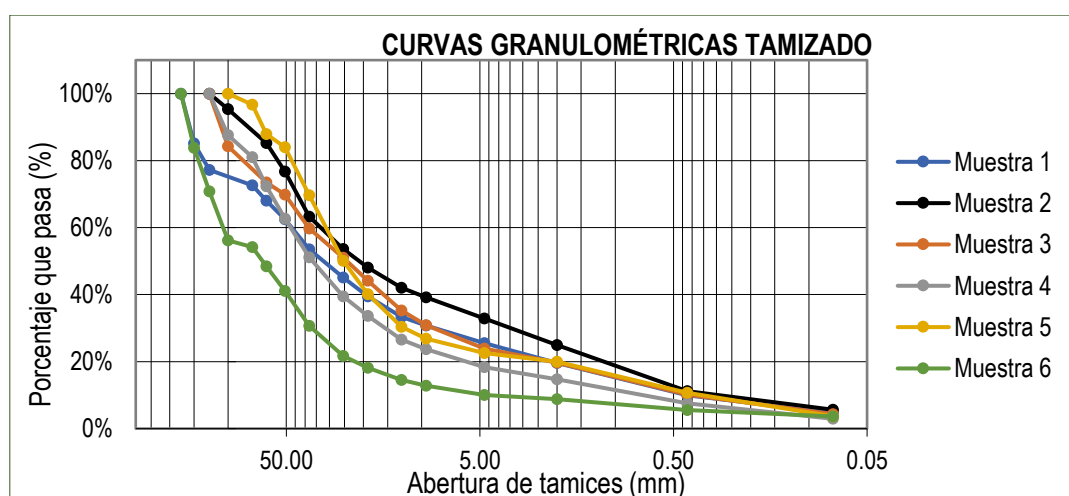


Figura 44 Curvas granulométricas obtenidas por tamizado. Fuente: Autor

Ya que posteriormente se determinará la granulometría de los boleos empleando las muestras fotográficas, se tomó la decisión de excluir de las curvas anteriores las partículas con un tamaño mayor a 3", para así obtener únicamente la distribución granulométrica correspondiente a la matriz. Al eliminar dichas partículas, puede observarse como la curva correspondiente a la muestra 6 se apega más a la tendencia de las demás curvas en la Figura 45.

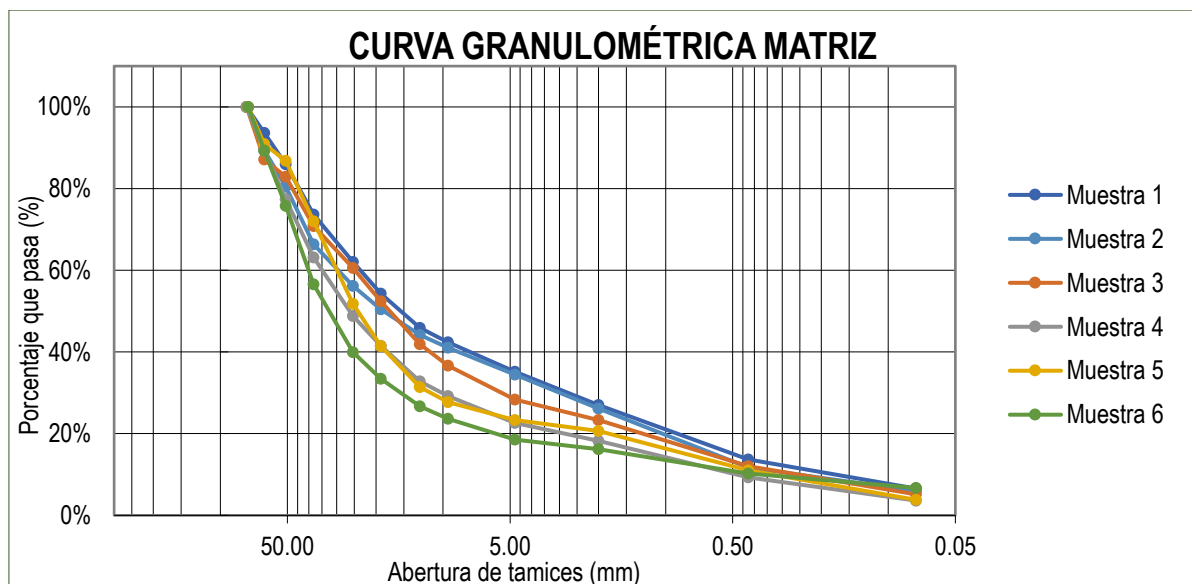


Figura 45. Curvas granulométricas de suelo. Fuente: Autor

Para posteriormente unir estas curvas con las obtenidas mediante el análisis de fotografías, se utilizaron únicamente los rangos superior e inferior, el límite inferior, correspondiente a las muestras con material más grueso se definió según la curva de la muestra número 6; mientras que el límite superior, que sería el material con partículas de menor tamaño, se definió según la muestra 1.

Para la obtención de los parámetros Cc y Cu, primeramente, se obtuvieron los diámetros característicos de cada muestra, estos se pueden revisar en la tabla 5.

	Muestra					
	1	2	3	4	5	6
D60	23.72	30.15	24.96	35.31	30.56	40.38
D30	3.01	3.28	5.71	10.19	11.48	15.77
D10	0.24	0.32	0.32	0.55	0.37	0.40

Tabla 5 Diámetros característicos de cada muestra en milímetros. Fuente: Autor.

En la tabla ensañada anteriormente, se puede observar que los diámetros para la muestra número 6 distan de los demás al estar más alejada de la tendencia, sin embargo, no es una variación muy fuerte, esto puede verificarse en los valores obtenidos para la desviación

estándar enseñados en la tabla 6. La desviación obtenida para el valor de D30 podría deberse a que las muestras 1, 2 y 3, contenían menos grava que las demás muestras, y por tanto los diámetros encontrados son menores.

	Desv. Estándar
D60	6.3
D30	5.1
D10	0.1

Tabla 6 Desviación estándar de cada diámetro. Fuente: Autor

Con los diámetros antes expuestos, se obtuvieron los siguientes valores para los parámetros Cc y Cu, mismos que serán utilizados posteriormente para la clasificación del material:

Muestra	Cu	Cc
1	96.97	1.57
2	94.42	1.12
3	77.79	4.07
4	63.96	5.32
5	81.70	11.54
6	100.84	15.38

Tabla 7 Valores de Cc y Cu para cada muestra. Fuente: Autor

Todas las muestras tienen un buen coeficiente de uniformidad, esto se puede evidenciar en como las curvas granulométricas abarcan una gran cantidad de tamices, mientras que en el coeficiente de curvatura llama la atención los obtenidos para las muestras número 5 y 6, cuya curva presenta algunos cambios de curvatura, produciendo que se encuentren valores más altos.

4.1.1.2 Granulometría por fotografías

En esta sección se muestran las curvas granulométricas obtenidas mediante la toma de fotografías del talud y su postproceso, estas fotografías, el trazado de boleos, y las curvas obtenidas para cada una pueden revisarse en el Anexo "3".

En la Figura 46, pueden verificarse las curvas obtenidas, donde se encuentran tamaños máximos de alrededor de los 400 mm para las curvas resultantes de las fotos 1, 2 y 4, representadas con colores naranja, azul y amarillo respectivamente. En el caso de las curvas correspondientes a las fotos 3 y 5 se alcanzaron tamaños máximos cercanos a 700 y 500 mm.

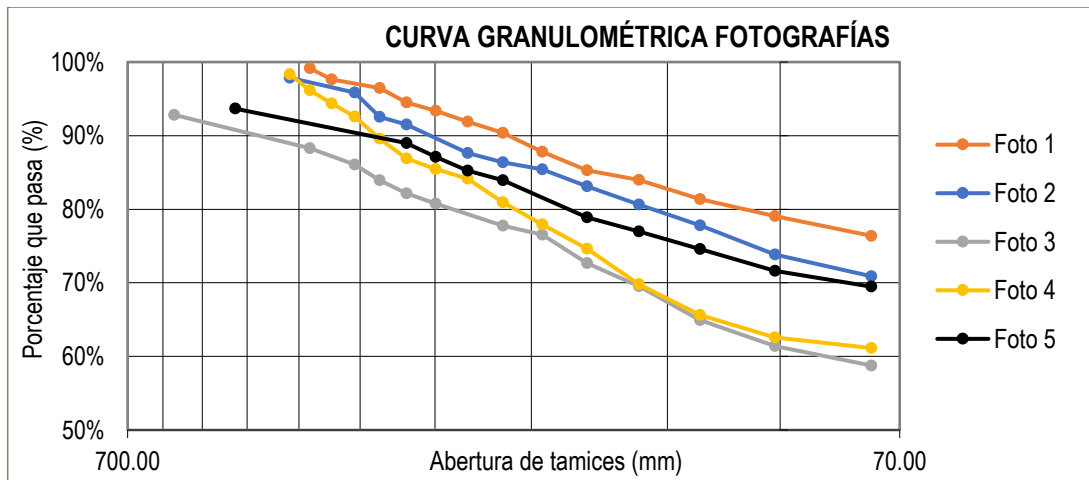


Figura 46 Curvas granulométricas obtenidas para los boleos. Fuente: Autor.

Al igual que con la granulometría por tamizado, para estas curvas también se definieron los límites superior e inferior, correspondientes a las fotografías con material de menor tamaño y material más grueso, respectivamente. En este caso los límites se vieron definidos por las curvas correspondientes a las fotografías 1 y 3.

4.1.1.3 Granulometría completa

Para la obtención de la granulometría completa, se realizó una liga entre los límites superiores e inferiores correspondientemente, entre la granulometría obtenida por las fotografías, y la granulometría obtenida por tamizado. El resultado final se observa en la Figura 47.

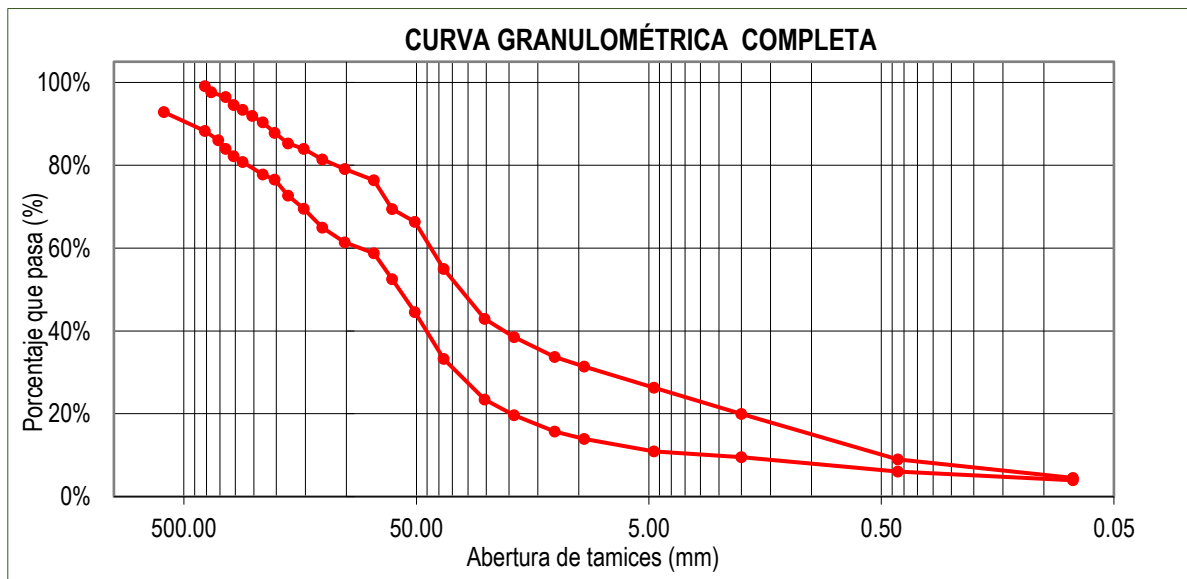


Figura 47 Rango de curvas granulométricas completo. Fuente: Autor

De la Figura anterior, gracias a los límites establecidos, se pueden recuperar los valores mínimos y máximos de boleos, grava, arena y finos que pueden encontrarse en el material.

Los valores obtenidos se observan en la tabla 8, donde se evidencia que los materiales predominantes serían la grava y boleos. Se tiene una variación en el porcentaje de boleos cercana al 20%, esta gran variación se debe a la presencia de algunos boleos de gran tamaño encontrados en las fotografías, sin embargo, el porcentaje de grava casi no varía, y sería el principal componente de la matriz del material. El porcentaje máximo de arena se presenta cuando se tiene la menor presencia de boleos.

	Mínimo	Máximo
Boleo	23.6%	41.2%
Grava	47.9%	50.5%
Arena	6.9%	21.5%
Finos	3.9%	4.5%

Tabla 8 Rangos de porcentaje obtenidos para cada material. Fuente: Autor

4.1.1.4 Comparación con trabajos similares

En la Figura 48, se puede observar la comparación realizada entre varios trabajos similares y el rango obtenido en el presente trabajo. Con trabajos realizados sobre la misma terraza, como es Alvarez y Contreras (2019), representado por la curva gris, se puede observar que a lo largo de toda la curva se encuentran dentro del rango definido.

Los resultados de otros trabajos entran en el rango establecido para tamaños algo inferiores a 8 mm; para tamaños entre 40 y 8 mm, los porcentajes se elevan máximo a una diferencia cercana al 10% y luego nuevamente la tendencia ingresa dentro de los límites establecidos, a excepción del material de la formación Turi. El estudio correspondiente al caso de estudio en Chile (Verdugo, 2006), no ingresa en los límites establecidos seguramente porque los boleos encontrados en el sitio tienen un tamaño máximo de 18 cm, que es considerablemente menor a los boleos que determinaron los límites del actual trabajo.

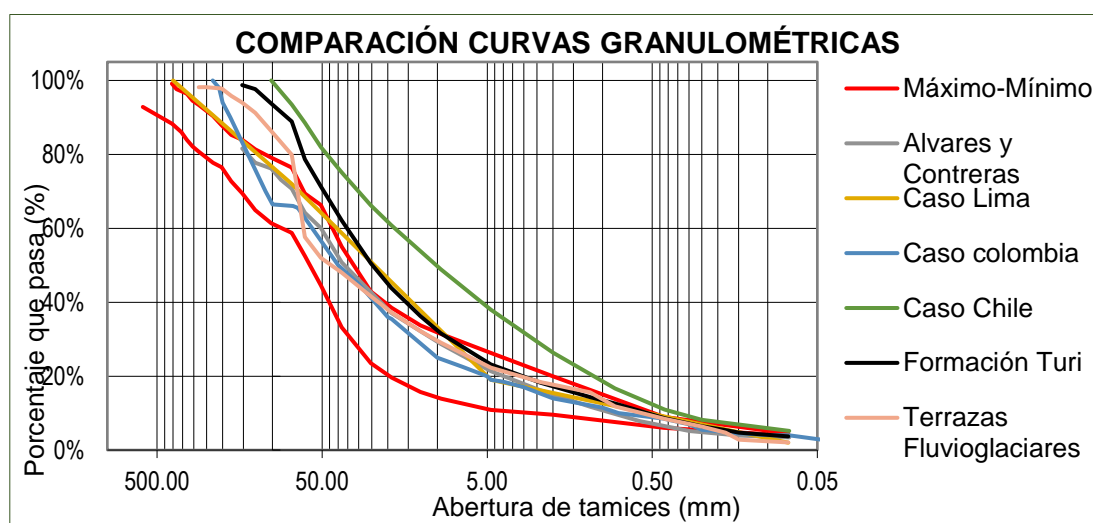


Figura 48 Comparación con curvas granulométricas de otros trabajos. Fuente: Autor

Se observa también que las curvas de color rojo, correspondientes al trabajo actual, alcanzan un tamaño máximo mayor, alcanzando dimensiones de hasta 60 cm aproximadamente.

4.1.2 Límites de Atterberg

Con las 6 muestras recolectadas para granulometría, también se realizaron los ensayos de plasticidad para su posterior clasificación. En esta sección se muestran los valores obtenidos para los límites de Atterberg, su representación en la carta de plasticidad, y una comparación con resultados de trabajos realizados sobre materiales similares.

En la tabla 9, se pueden observar los valores obtenidos. Donde se observa que el límite líquido tiene un valor medio de 30.6 % y el límite plástico de 18.6%, con desviaciones estándar del 2.4 y 1.63%, respectivamente.

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice plástico
1	33.0%	21.4%	11.6%
2	33.7%	17.5%	16.2%
3	29.3%	18.8%	10.5%
4	27.4%	18.6%	8.8%
5	29.4%	18.6%	10.8%
6	30.9%	16.5%	14.4%

Tabla 9 Valores obtenidos para los Límites de Atterberg. Fuente: Autor

En la Figura 49, se observan los valores de la tabla anterior representados en la carta de plasticidad, en esta se puede observar que la parte fina de todas las muestras tomadas, se clasificarían como arcilla de baja plasticidad, representada por CL en la nomenclatura SUCS.

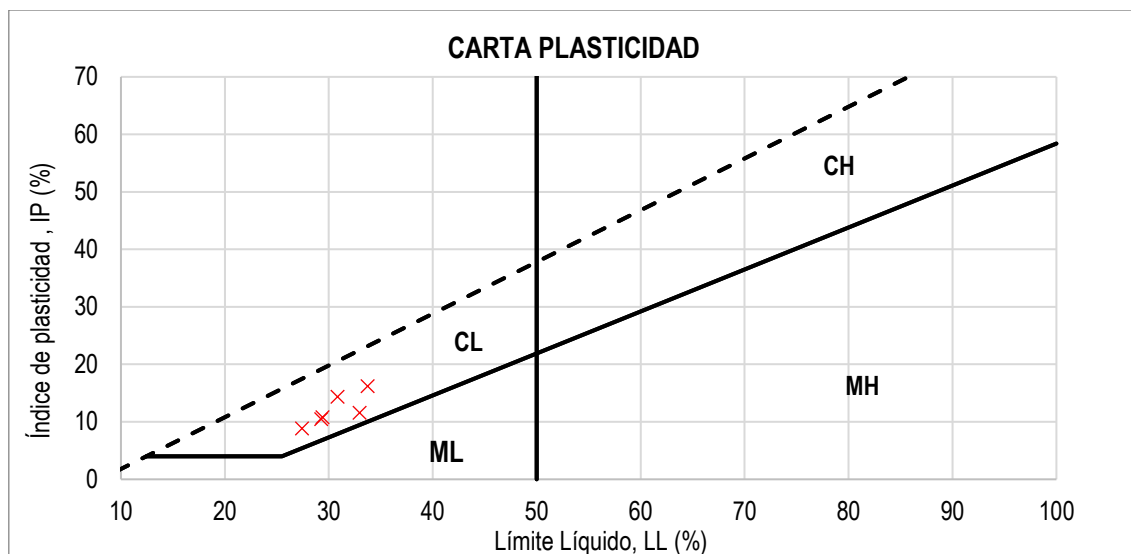


Figura 49 Carta de plasticidad con las muestras tomadas. Fuente: Autor

Se compararon los resultados obtenidos con los trabajos realizados por Alvarez y Contreras (2019), Santacruz (2009) y Verdugo (2006), este último correspondiente al caso de estudio en Chile. Todos los datos recopilados y los de este trabajo se graficaron en la carta de plasticidad enseñada en la Figura 50. En la Figura mencionada, puede observarse como todas las muestras pertenecen al material de baja plasticidad, y en su gran mayoría se trata también de arcillas, a excepción de algunos puntos recuperados de las trabajos de Alvarez y Contreras (2019) y Santacruz (2009), que se ubican en la zona correspondiente a material limoso, esto puede deberse a que al haberse realizado la toma de muestras en distintos puntos de la ciudad la naturaleza del material pudo variar, sin embargo no se encuentran muy distantes de los resultados obtenidos en demás trabajos. El caso contrario ocurre en el trabajo actual y el caso de estudio en Chile, donde todas las muestras se recuperaron en un mismo sitio y por ello todas presentan material fino con las mismas características.

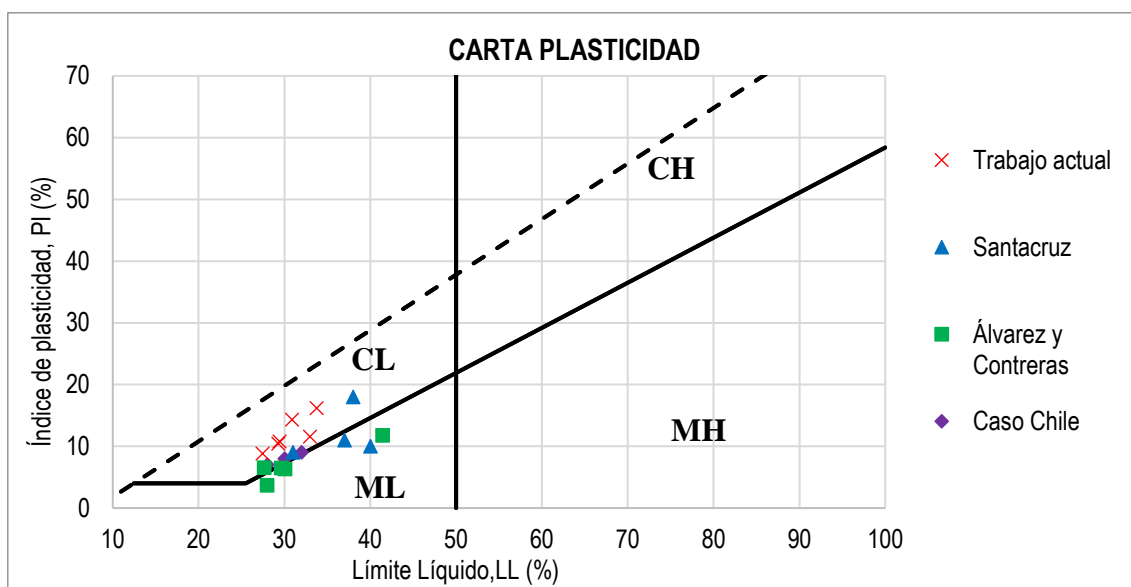


Figura 50 Comparación de la naturaleza de la parte fina entre este y otros trabajos similares. Fuente: Autor

4.1.3 Clasificación de las muestras

Según la metodología SUCS, se obtuvieron las siguientes clasificaciones para cada una de las muestras:

Muestra	Clasificación SUCS	
1	GW-GC	Grava bien graduada - Grava arcillosa
2	GW-GC	Grava bien graduada - Grava arcillosa
3	GP-GC	Grava mal graduada - Grava arcillosa
4	GP	Grava mal graduada
5	GP	Grava mal graduada
6	GP-GC	Grava mal graduada - Grava arcillosa

Tabla 10 Clasificación SUCS de las muestras de suelo. Fuente: Autor.

Todas las muestras se clasificaron como grava, aunque las muestras 1, 2, 3 y 6, llevan doble nomenclatura debido a que contenía un porcentaje de finos mayor a 5%. Podría concluirse que el material del sitio se trata de una grava arcillosa, en donde priman características granulométricas.

4.1.4 Humedad y densidad

Dentro de este apartado se muestran los resultados obtenidos para la humedad natural del suelo y la densidad del material en sitio y laboratorio, estos comparten sección puesto que mediante el ensayo del densímetro nuclear se obtuvieron ambos valores.

4.1.4.1 Factores de corrección

Para el cálculo de los factores de corrección para las lecturas del densímetro nuclear, se utilizaron los porcentajes máximos y mínimos de material mostrados en la tabla 8, obtenidos a partir de la curva granulométrica completa.

El factor de corrección para la lectura de densidad, K_d , fue obtenido a partir del promedio de todos los factores calculados y enseñados en la tabla 11, resultando en un factor de corrección igual a 1.01.

	Factor corrección Densidad	
	Mínimo	Máximo
Grava	1.06	1.06
Arena	0.95	0.98
Finos	0.99	0.99

Tabla 11 Factores de corrección para lecturas de densidad. Fuente: Autor.

Al igual que para el factor de corrección para la densidad, la corrección para la humedad K_h , se obtuvo a partir del promedio de todos los factores calculados y enseñados en la tabla 12, resultando en un factor de corrección igual a 0.51.

	Humedad	
	Mínimo	Máximo
Grava	0.66	0.67
Finos	0.35	0.37

Tabla 12 Factores de corrección para lecturas de humedad. Fuente: Autor.

4.1.4.2 Humedad

La humedad del material obtenida el momento que se realizó el ensayo con densímetro nuclear, y los valores obtenidos en laboratorio, se exponen en la tabla 13. El valor corregido de las lecturas del densímetro, corresponden a una humedad promedio del conjunto igual a 10.6%, mientras que las humedades obtenidas en laboratorio, corresponden a una humedad promedio de la matriz igual a 20.3%.

Humedad (%)		
Densímetro	Densímetro corregido	Laboratorio
25.0	12.8	22.1
23.0	11.8	16.9
21.1	10.8	19.2
20.1	10.3	21.0
15.0	7.7	22.4
17.7	9.0	20.2
23.2	11.8	-

Tabla 13 Valores de humedad del material obtenidos por densímetro y secado en laboratorio. Fuente: Autor

4.1.4.3 Densidad

Al igual que los valores de humedad, la densidad del material se definió mediante dos ensayos, por densímetro nuclear, y en laboratorio con el ensayo de aceite de parafina, los valores obtenidos pueden revisarse en la tabla 14. Con todos los valores se obtiene un peso específico seco promedio igual a 1794 Kg/m³, que equivaldría a 1.79 gr/cm³. En el ensayo de parafina únicamente se observan 8 resultados, aunque se recolectaron un total de 13 muestras, esto debido a que durante el proceso de ensayo algunas muestras se disgregaron.

Peso específico seco (kg/m3)		
Densímetro	Densímetro corregido	Parafina
1622	1630	1732
1627	1635	1792
1899	1908	1892
1890	1900	1578
2007	2017	1943
1672	1680	1911
1781	1790	1646
-	-	1593

Tabla 14 Valores de densidad del material obtenidos por densímetro nuclear y ensayo con parafina. Fuente: Autor

4.1.4.4 Comparación con trabajos similares

Para obtener un mejor concepto del estado en que se encontraba el material en campo, se realizó una comparación con resultados obtenidos en los trabajos realizados por Alvarez y Contreras (2019), Santacruz (2009), Sánchez et. al (2016) y Nanclares (2018), como puede observarse en la tabla 15, el material del sitio tiene una densidad menor a la obtenida en otros casos de estudio. En lo que respecta a los valores de humedad, la obtenida en el sitio es muy similar a la encontrada en los demás estudios.

Fuente	Peso específico húmedo (Kg/m ³)	Humedad (%)
Trabajo actual	1984	10.6%
Alvares y Contreras	2158	8.1%
Santacruz Terrazas	1810	9.0%
Santacruz Turi	2261	11.0%
Caso Lima	2263	-
Caso Colombia	2345	6.0%

Tabla 15 Comparación de valores de densidad y humedad. Fuente: Autor

4.1.5 Proctor

Los resultados de cada punto tomado para la gráfica de la curva de compactación pueden revisarse en el anexo 5, se tomaron un total de 4 puntos, y se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 51.

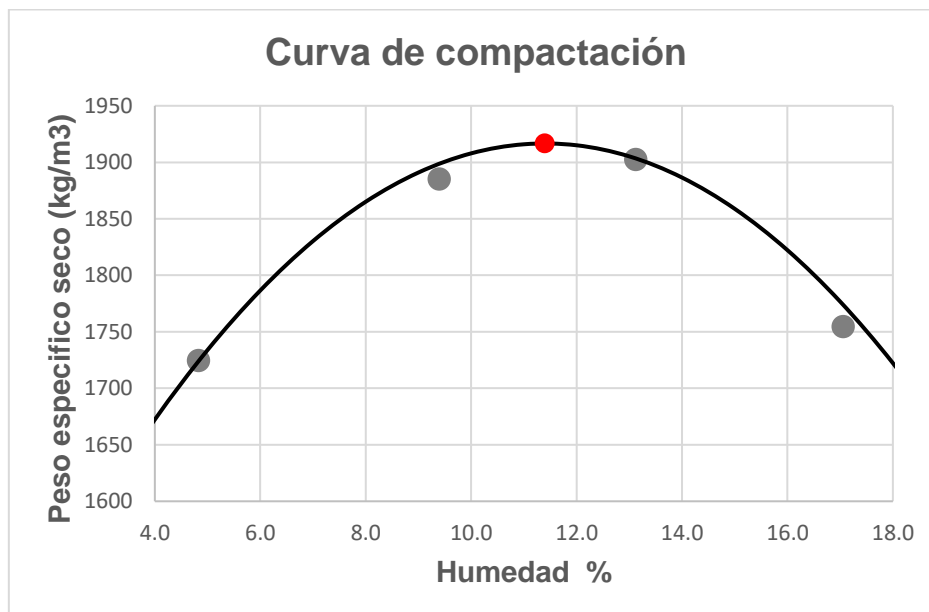


Figura 51 Curva de compactación Proctor modificado. Fuente: Autor

Como se puede observar en la Figura anterior, para el material del sitio se obtuvo una humedad óptima igual a 11.4 % para un peso específico seco máximo igual a 1917 kg/m^3 , representado en la gráfica mediante un punto color rojo. Utilizando el valor promedio obtenido para el peso específico seco en campo, de 1794 kg/m^3 se obtiene un grado de compactación igual a 93.58%.

4.2 Parámetros de resistencia de la matriz

En esta sección se exponen los resultados tras realizar los ensayos de compresión simple, y los ensayos triaxiales, tanto en muestras grandes como pequeñas, con diámetros de 7 y 3.5 cm, respectivamente.

4.2.1 Resistencia a compresión simple

Los resultados a los 2 ensayos de compresión simple realizados, se muestran en la Figura 52, la muestra 1 alcanza un esfuerzo máximo de 2.51 Kg/cm^2 a una deformación del 12%, por su parte la muestra 2 un esfuerzo máximo de 2.59 Kg/cm^2 a una deformación del 3%, con lo que se obtiene una resistencia promedio igual a 2.55 Kg/cm^2 .

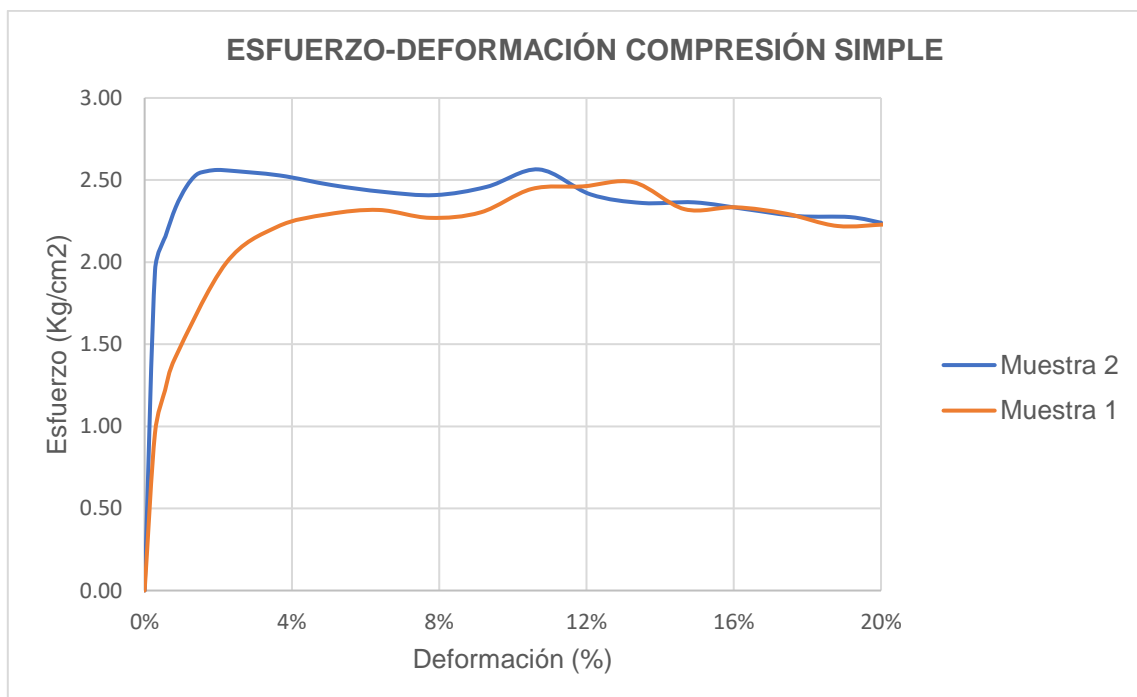


Figura 52 Curvas esfuerzo-deformación tras ensayo compresión simple. Fuente: Autor

En la tabla 16, se pueden verificar las condiciones de ensayo de cada muestra. En esta se puede observar que, aunque los valores de humedad obtenidos varían, el peso específico

seco tiene un valor muy similar. Además, la muestra 2 con un peso específico seco algo mayor, alcanzó el esfuerzo máximo.

	Peso específico seco (gr/cm ³)	Humedad
Muestra 1	1.70	17.74%
Muestra 2	1.76	19.21%

Tabla 16 Condiciones de ensayo par amuestras en compresión simple. Fuente: Autor

4.2.2 Ensayos triaxiales

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en los ensayos triaxiales, primeramente, las curvas esfuerzo-deformación y la envolvente de rotura obtenida con las 3 muestras de 7 cm de diámetro, y posteriormente las obtenidas con los 2 grupos de triaxiales con diámetro de 3.5 cm.

4.2.2.1 Ensayo en muestras de 7 cm de diámetro

En la Figura 53, se observan las curvas esfuerzo-deformación encontradas tras cada uno de los ensayos. Cada curva se distingue según la presión de confinamiento utilizada durante el ensayo, las curvas muestran una buena correlación puesto que los esfuerzos máximos alcanzados son mayores conforme se aumenta el confinamiento, tal como era de esperarse.

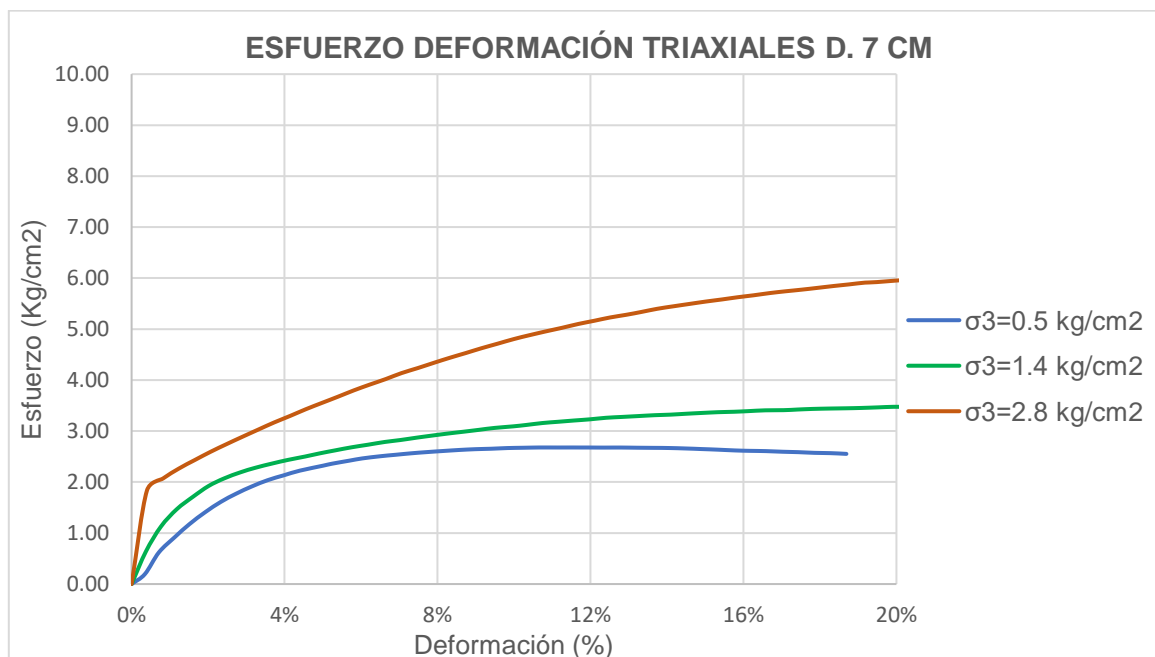


Figura 53 Curvas esfuerzo deformación en triaxiales grandes. Fuente: Autor

Con los esfuerzos de confinamiento, de 0.5, 1.4 y 2.8 Kg/cm², se obtuvieron esfuerzos máximos de 3.18, 4.77 y 8.34 Kg/cm², respectivamente al alcanzar una deformación igual al 15%. En estos casos se tomó este valor como resistencia máxima puesto que las muestras

tuvieron una falla tipo barril, y la carga no disminuía, sin embargo, las deformaciones alcanzaron ya valores muy altos.

Para la obtención de los valores de phi y cohesión, mediante la envolvente de rotura, se graficaron los círculos de Mohr correspondientes a los esfuerzos de confinamiento y esfuerzos máximos antes expuestos. El resultado se puede observar en la Figura 54.

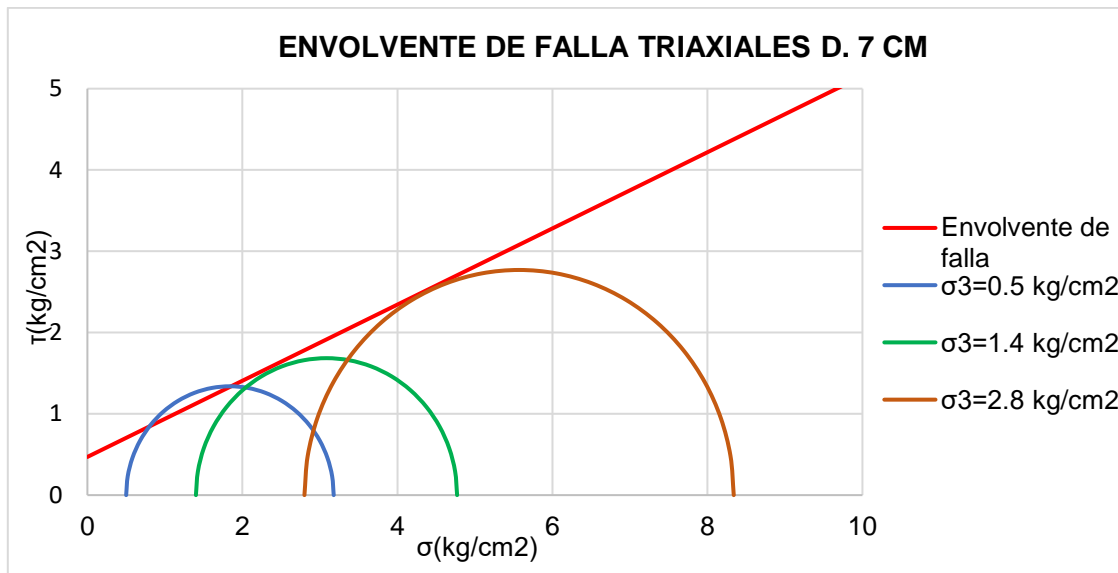


Figura 54 Envolvente de falla obtenida tras triaxiales en muestras grandes. Fuente: Autor

De la envolvente de rotura expuesta anteriormente se obtienen los siguientes parámetros de resistencia:

$$\phi_1 = 25.1^\circ$$

$$C_1 = 0.47 \text{ kg/cm}^2$$

Las propiedades de las muestras ensayadas se pueden verificar en la tabla 17. La tercera muestra tiene una humedad mayor a las otras dos muestras, resultando en un peso específico seco algo menor, esto pudo haber afectado en la resistencia final del espécimen y el ángulo de fricción podría tener un valor mayor al obtenido. También se verifica que el grado de saturación en las 3 muestras resultó ser mayor al 95%.

σ_3 (Kg/cm ²)	H/D	Peso específico seco (gr/cm ³)	Humedad (%)	Grado de saturación (%)
0.5	2.01	1.80	16.5	98
1.4	2.01	1.82	16.9	96
2.8	2.02	1.76	19.4	95

Tabla 17 Características de las muestras ensayadas con diámetro de 7 cm. Fuente: Autor

4.2.2.2 Ensayo en muestras de 3.50 cm de diámetro

- Primer grupo:

Para el primer grupo de los triaxiales en muestras pequeñas, se utilizaron presiones de confinamiento de 0.7, 1.4 y 2.8 Kg/cm². Las curvas esfuerzo deformación se pueden observar en la Figura 55.

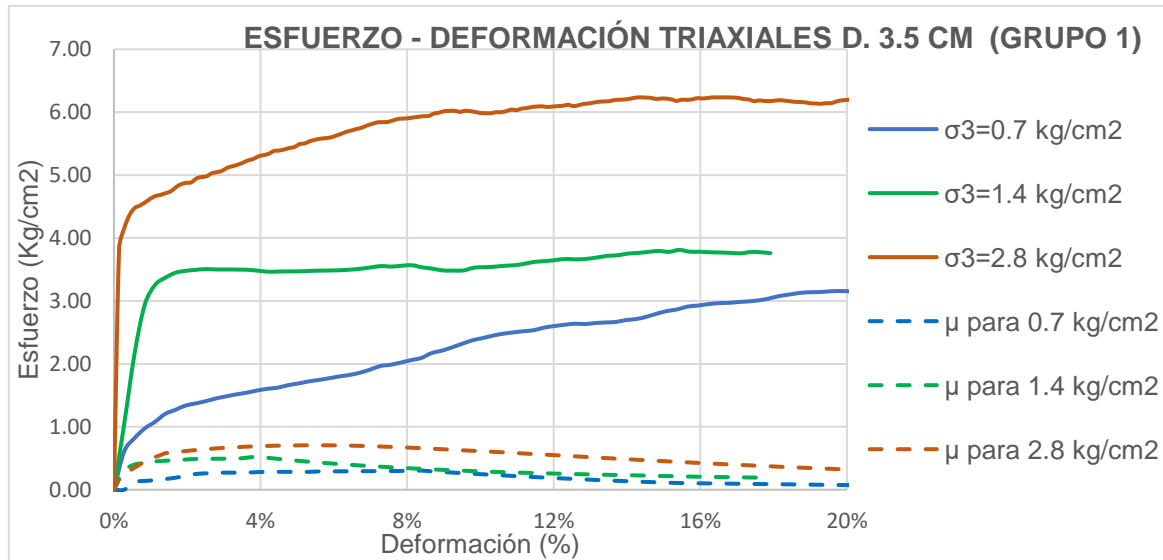


Figura 55 Curvas esfuerzo-deformación en triaxiales pequeños, grupo 1. Fuente: Autor

Para las presiones de confinamiento antes mencionadas, se obtuvieron esfuerzos máximos efectivos de 3.47, 5.02 y 8.56 Kg/cm², mismos con los que se graficaron los círculos de Mohr observados en la Figura 56. Al igual que en los triaxiales grandes, se tomó el esfuerzo máximo al alcanzar una deformación igual al 15%, debido a la falla tipo barril.

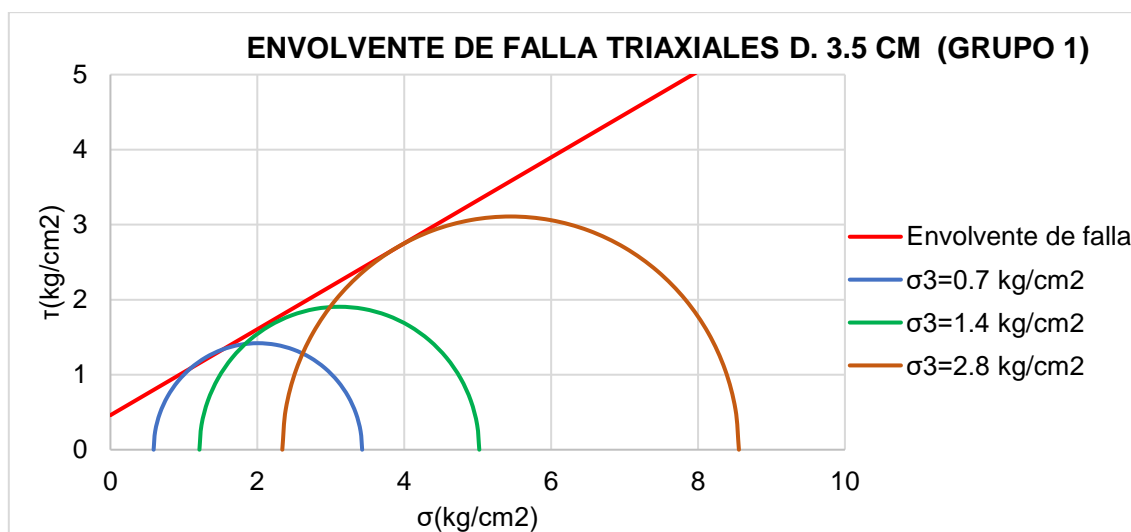


Figura 56 Círculos de Mohr en triaxiales pequeños, grupo 1. Fuente: Autor

Con este primer grupo, se obtuvieron los siguientes parámetros de resistencia:

$$\phi'_2 = 29.8^\circ$$

$$c'_2 = 0.46 \text{ kg/cm}^2$$

En la tabla 18, se observan las condiciones bajo las cuales se ensayaron este grupo de muestras, la muestra con menor confinamiento alcanzó el grado de saturación más alto y por lo tanto se ensayó en las condiciones menos favorables, sin embargo, tuvo una resistencia acorde a su presión de confinamiento ya que mantiene la tendencia establecida por las muestras en conjunto, esto se pudo evidenciar en la envolvente de rotura enseñada anteriormente.

σ_3 (Kg/cm ²)	H/D	Peso específico seco (gr/cm ³)	Humedad (%)	Grado de saturación (%)
0.7	2.00	1.68	20.0	99
1.4	2.01	1.76	20.1	97
2.8	2.00	1.75	18.5	96

Tabla 18 Características de las muestras ensayadas con diámetro de 3.5 cm (Grupo 1). Fuente: Autor

- Segundo grupo

Para el segundo grupo de los triaxiales en muestras pequeñas, se utilizaron presiones de confinamiento de 0.5, 1.0 y 2.0 Kg/cm². Las curvas esfuerzo deformación se pueden observar en la Figura 57.

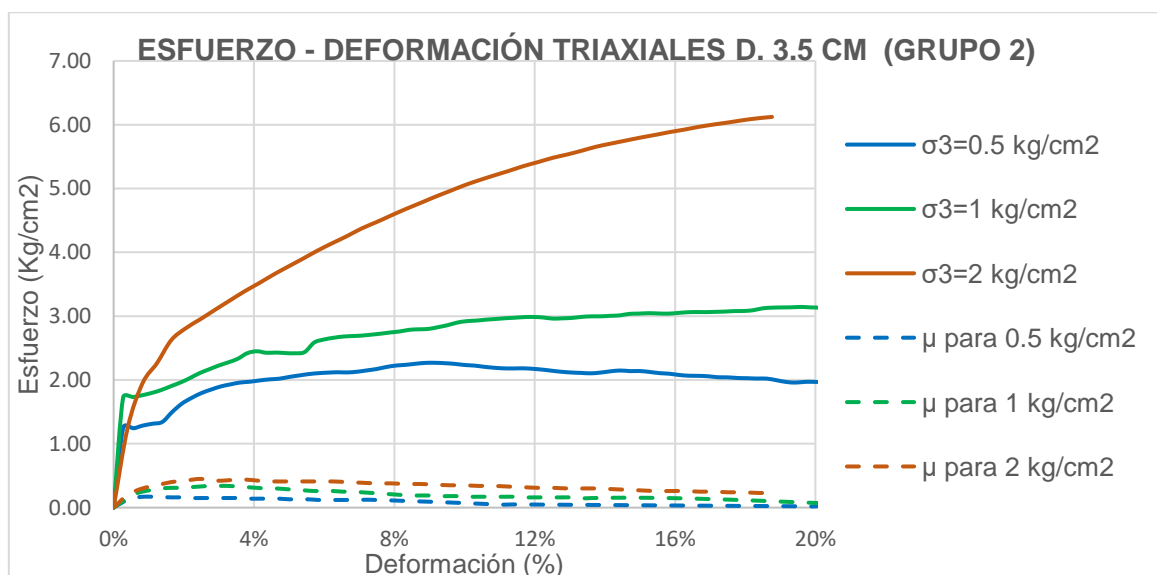


Figura 57 Curvas esfuerzo-deformación en triaxiales pequeños, grupo 2. Fuente: Autor

Para las presiones de confinamiento antes mencionadas, se obtuvieron esfuerzos efectivos máximos de 2.68, 3.97 y 7.61 Kg/cm², igualmente los valores se tomaron al alcanzar el 15% de deformación, a excepción del primer valor, que fue alcanzado por la muestra con menor confinamiento al alcanzar una deformación igual a 9%. Los círculos resultantes se observan en la Figura 58.

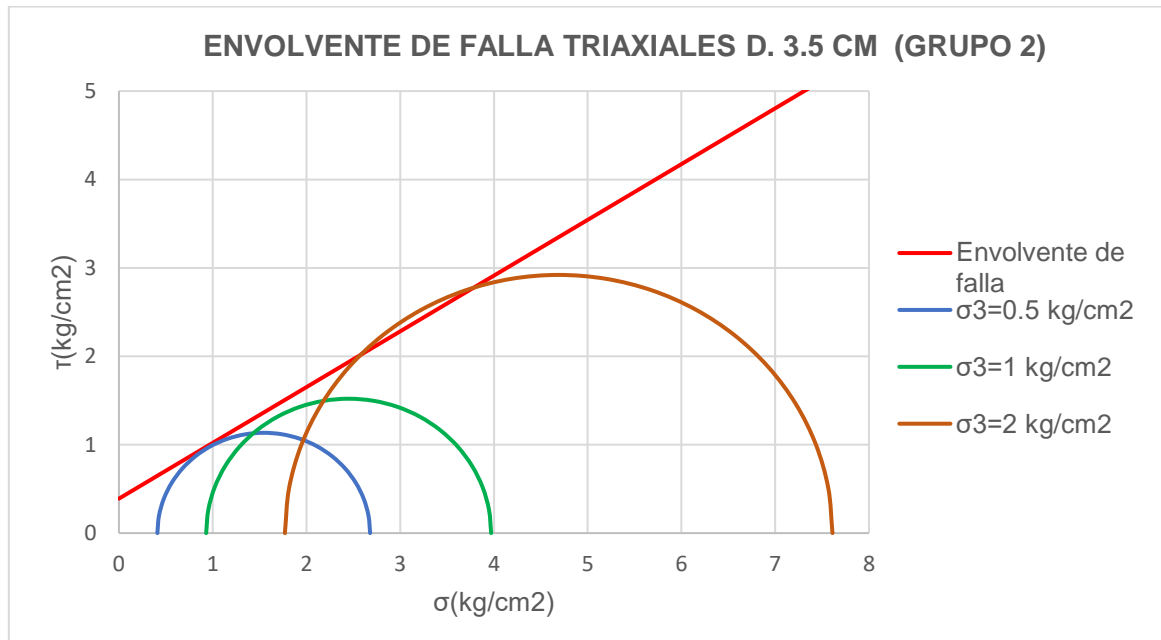


Figura 58 Círculos de Mohr en triaxiales pequeños, grupo 2. Fuente: Autor

Con el segundo grupo, se obtuvieron los siguientes parámetros de resistencia:

$$\phi'_3 = 32.2^\circ$$

$$c'_3 = 0.39 \text{ kg/cm}^2$$

En la tabla 19, se resumen las características de las muestras ensayadas en este grupo. Como se puede observar en todos los parámetros existe una buena correlación entre las 3 muestras, ya que no existe mayor variación, esto se puede observar también en como la envolvente de rotura se ajusta de buena manera para los 3 círculos obtenidos.

σ_3 (Kg/cm ²)	H/D	Peso específico seco (gr/cm ³)	Humedad (%)	Grado de saturación (%)
0.5	2.01	1.65	21.1	97
1	2.06	1.66	19.8	97
2	2.01	1.69	19.7	95

Tabla 19 Características de las muestras ensayadas con diámetro de 3.5 cm (Grupo 2). Fuente: Autor

4.2.3 Parámetros de resistencia promedio de la matriz

Una vez realizados todos los ensayos, se obtuvieron los siguientes parámetros de resistencia para la matriz, cabe mencionar que para el ángulo y cohesión promedio únicamente se tomó en cuenta los valores obtenidos en los grupos de triaxiales con diámetro de 3.5 cm, esto puesto que los parámetros obtenidos con las otras muestras eran totales.

$$\phi'_m = 31.2^\circ$$

$$c'_m = 0.42 \text{ kg/cm}^2$$

$$UCS_m = 2.55 \text{ kg/cm}^2$$

4.3 Parámetros de resistencia del conjunto

En este apartado se muestran los parámetros de resistencia encontrados para todo el conjunto (matriz y boleos), tanto por el uso de metodologías empíricas como por la aplicación del análisis inverso.

4.3.1 Relaciones empíricas (Metodología 1)

Como ya se ha explicado anteriormente en el trabajo, se utilizaron dos metodologías empíricas para el cálculo de los parámetros de resistencia, por lo que en este apartado se muestran los resultados de algunos de los factores que intervienen en las ecuaciones y los resultados finales.

4.3.1.1 Método de Duncan

Para la obtención de la densidad relativa, se utilizó la tabla 2, para la cual se debe conocer primero la compactación relativa, que como se detalló en los resultados del ensayo Proctor, se obtuvo un grado de compactación de 93.6%. Si bien este valor no existe exactamente en la tabla, se realizó un proceso de interpolación y se obtuvo una densidad relativa igual a:

$$Dr = 68.1\%$$

Los valores para los parámetros A, B, C y D, se obtuvieron de la tabla 3, anteriormente, en lo que refiere a la clasificación del material, se evidenció que todas las muestras calificaban como grava, y se obtuvo un valor promedio del coeficiente de uniformidad igual 75.3 entre las 6 muestras. Por lo que los valores correspondientes serían:

$$A = 44$$

$$B = 10$$

$$C = 7$$

$$D = 2$$

Como se explicó ya en la sección de metodología, el valor de la presión atmosférica se obtuvo de la estación meteorológica ubicada en la ciudad de Cuenca, teniéndose un valor igual a:

$$P_a = 1027 \text{ HPa} - 1.048 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Para la presión normal se utilizó la densidad seca en campo, y una profundidad media del talud igual a 5 m. Se tiene una presión normal resultante igual a:

$$\sigma_N = 0.89 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Una vez encontrados todos los parámetros, se calculó el ángulo de fricción utilizando la ecuación 1, recordando que en este método se considera una cohesión nula, se obtuvo un ángulo igual a:

$$\phi_D = 51.37^\circ$$

Ya que este método no considera la presencia o características de los boleos, este ángulo de fricción podría ser comparable con el obtenido en laboratorio mediante los ensayos triaxiales. En la gráfica 59, se presenta la envolvente de rotura promedio obtenida tras los ensayos, representada por la línea roja, y el círculo de Mohr correspondiente a un confinamiento igual a la presión normal empleada en el método de Duncan. Ya que este método no considera el aporte a la resistencia de la cohesión, se eliminó la cohesión de la envolvente de falla anterior y se obtuvo una con un ángulo de fricción igual a 41° , representada con color morado; este ángulo ya podría ser comparado con el obtenido al aplicar el método de Duncan. La diferencia entre ambos ángulos es cercana a los 10° , y podría deberse a que en el método de Duncan se toma en cuenta la granulometría completa del suelo, considerando el aporte de las partículas de grava, mientras que en los ensayos triaxiales el tamaño de las partículas se vio limitado por las dimensiones de la muestra.

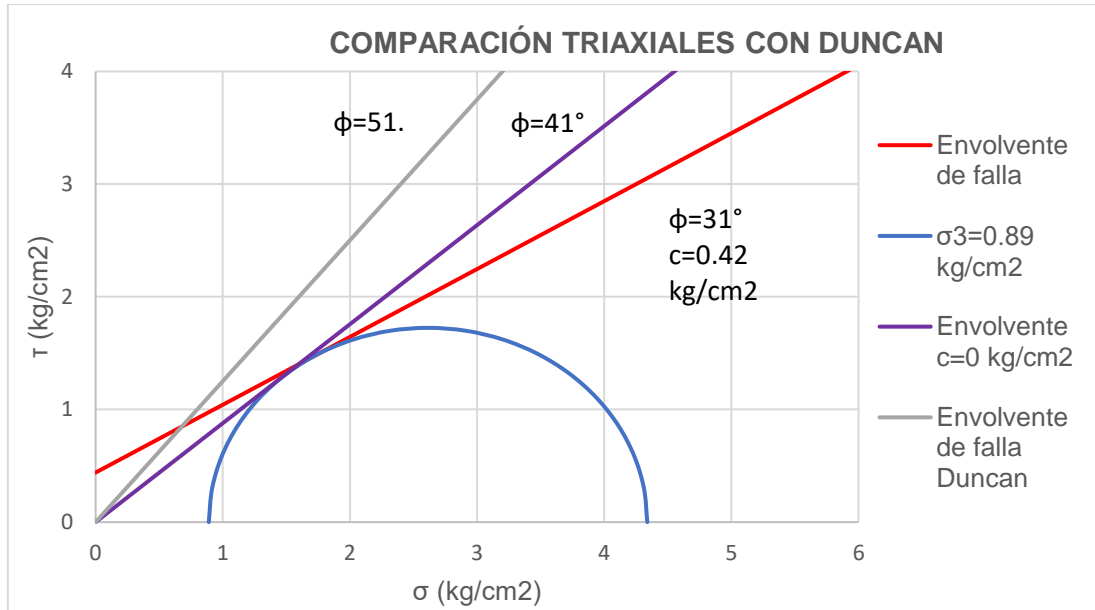


Figura 59 Comparación entre los ángulos de fricción obtenidos por el criterio de Duncan y ensayos triaxiales. Fuente: Autor.

4.3.1.2 Método de Bimsoil

Con los resultados obtenidos en la sección 4.2, correspondientes a los parámetros de resistencia de la matriz, se procede a implementar esta metodología, empezando por definir al valor del parámetro A, que como se muestra en la Figura 60 se obtuvo un valor aproximado de 1.3.

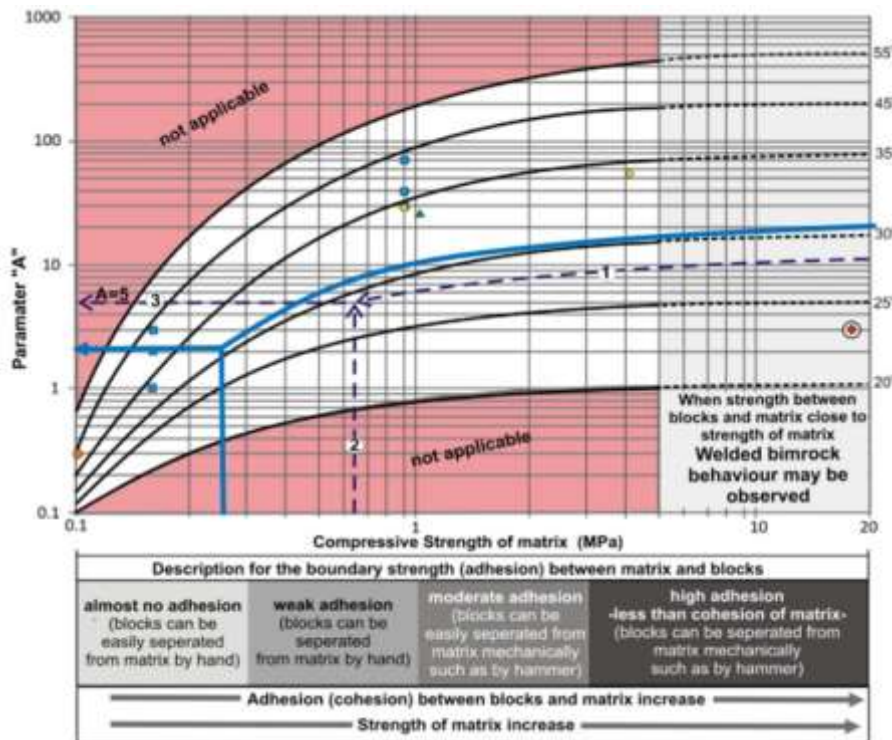


Figura 60. Definición del parámetro A. Fuente: Autor.

Posteriormente se define el parámetro alfa el cual en base a las Figuras 4 y 5 se define con un valor de 40° , el valor medio para partículas subangulares ya que en las fotografías recolectadas en campo se puede observar que los boleos presentan secciones algunas secciones rectangulares, asemejándose de mejor manera a esta clasificación, las fotografías se pueden observar en anexos.

En cuanto a los valores de volumen porcentual de boleos (VBP), se obtuvieron directamente de la curva granulométrica completa, mostrada en la Figura 46, verificando el porcentaje de material mayor a $3/4"$, obteniendo así un valor entre el 62% y 80%, aproximadamente.

En la tabla 20, se muestran un resumen de todos los parámetros obtenidos anteriormente que serán aplicados en este método.

Parámetros		
ϕ matriz	31.02	$^\circ$
C matriz	43.16	KPa
UCS matriz	2.55	kg/cm ²
UCS matriz	0.25	MPa
α	40	Figura #5
A	2	Figura #60
VBP max	80.4	%
VBP min	61.5	%

Tabla 20 Parámetros para metodología Bimsoil. Fuente: Autor

Tras aplicar las ecuaciones de la sección 2.5.4 para ambos valores de VBP, se obtiene un ángulo de fricción del conjunto de 39.1° y 39.7° y una cohesión que varía entre 12.77 KPa y 24.44 KPa. Como se presenta en las siguientes tablas.

Resultados VBP=80.4%		
ϕ bimsoil	39.7	$^\circ$
UCS bim	0.05	MPa
C bimsoil	12.77	KPa

Tabla 21 Resultados para valor máximo de VPB. Fuente: Autor

Resultados VBP=61.5%		
ϕ bimsoil	39.1	$^\circ$
UCS bim	0.10	MPa
C bimsoil	24.81	KPa

Tabla 22 Resultados para valor mínimo de VPB. Fuente: Autor

Los valores de ángulo de fricción se asemejan al ángulo de reposo de boleos debido al elevado valor de VBP, la definición de este parámetro (α) tiene gran influencia en los resultados finales. Por otro lado, la cohesión depende directamente de la resistencia a compresión simple de la matriz, siendo estos tres parámetros (VBP, UCS matriz y α) los más significativos para caracterizar este tipo de suelos.

4.3.2 Análisis inverso (Metodología 2)

En base a la información recolectada en campo se genera la superficie de falla presentada en la Figura 61, donde se genera una superficie de falla irregular debido a que las fallas en el conglomerado son provocadas por el desprendimiento de boleos.



Figura 61. Superficie de falla obtenida, con geometría irregular debido al desprendimiento de boleos. Fuente: Autor.

Tras definir la superficie de falla, se observa que existió movimiento hasta el pie del talud, lo cual no pudo suceder y podría deberse a un proceso de limpieza y desalojo de material llevado a cabo en el sitio de construcción; por ello en la Figura 62 se representa con una línea roja entrecortada la superficie de falla estimada que pudo presentarse. Se realizaron varios análisis para diferentes valores de ángulo de fricción y cohesión siguiendo la metodología explicada en la sección, en la Figura 62 se observan las superficies de falla generadas para diferentes combinaciones Φ -C que generan un factor de seguridad de 1, es decir alcanzan el colapso. La superficie que mejor se ajusta es la correspondiente a la generada con un $\Phi= 53^\circ$ y $C=2.60$ KPa.

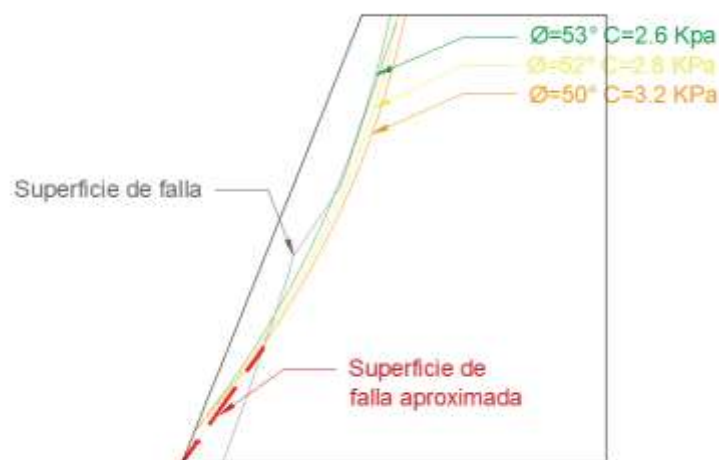


Figura 62. Superficies de falla para diferentes combinaciones de Φ -C. Fuente: Autor.

Estos valores pueden ser un reflejo del alto porcentaje de boleos que producen un aumento del ángulo de fricción, acompañado del ablandamiento del material, generada en este caso por los altos valores de humedad que afectan directamente a la matriz provocando una reducción considerable de su cohesión.

4.4 Comparación entre las 2 metodologías

Los valores obtenidos en las relaciones empíricas muestran un ángulo de fricción entre 39° y 51° aproximadamente debido a la gran cantidad de boleos que presenta el suelo, en cuanto a los valores de cohesión se encuentran entre 12 y 24 KPa, valores relativamente bajos debido a las muestras fueron reconformadas con humedades altas, reduciendo la resistencia de la matriz y por ende la cohesión.

En la segunda metodología correspondiente al análisis inverso se observa un ángulo de fricción de 53° y un valor de cohesión casi nulo de 2.4 KPa, esto se puede deber a que la humedad en campo al momento de la falla fue incluso mayor que la registrada con el densímetro, lo que provocó una pérdida casi completa de la cohesión y por ende el desprendimiento de los boleos. Cabe mencionar que para el análisis inverso se asumió que el comportamiento del conglomerado a gran escala es homogéneo, y se idealizó a una superficie de falla circular, aunque con un radio tan alto que se aproxima bastante bien a la superficie de falla real.

4.5 Comparación con trabajos similares

En la tabla 23 se muestran los diferentes valores de ángulo de fricción y cohesión obtenidos en trabajos similares, junto a la metodología empleada para su obtención y una breve descripción del material estudiado. Se puede observar un amplio rango de valores que depende de las características de cada caso, en general se observan valores de ángulos de fricción superiores a 31° y llegando hasta los 55° en algunos casos; en cuanto a la cohesión los valores encontrados son muy bajos, menores a 30 KPa, a excepción del caso de estudio en Colombia, donde se tenía una matriz muy resistente y el valor supera los 100 KPa. Centrándonos solamente en el tipo de material ensayado, el del actual trabajo es muy similar al estudiado en Lima, con tamaños y porcentajes de boleos cercanos, entre ambos estudios se puede observar que se obtiene un rango de valores muy similar para el ángulo de fricción, entre 40-55°, aunque los valores de cohesión tienen una gran diferencia, esto podría deberse al método de ensayo utilizado y las condiciones de fallo sobre las que se realizó el análisis inverso. Con otro trabajo sobre un material con condiciones parecidas, como es el de Álvares y Contreras (2019), se observa que el ángulo de fricción obtenido en este trabajo por la metodología de Duncan, estaría dentro del rango establecido en su trabajo; de la misma

forma, los valores que se determinaron para cohesión se encuentran dentro del rango establecido en este trabajo por el método para Bimsoils.

Fuente	Breve descripción del material	Metodología	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (Kpa)
Trabajo actual	Suelo granular grueso, conformado por grava mal graduada y un porcentaje de boleos entre 23 y 40%, con tamaños máximos alrededor de 610 mm	Análisis inverso	53	2.6
		Método Bimsoils	39.1-39.7	12.8-24.8
		Método Duncan	51.4	-
Alvares y Contreras (2019)	Suelo granular grueso, conformado por grava bien graduada y un porcentaje de boleos cercano al 30%, con tamaños máximos alrededor de 280 mm	Método Duncan	35-55	-
		Corte directo en campo	55.0	12
		Relaciones geofísicas	31.0	15
Caso Lima (Sánchez et. al, 2016)	Suelo granular, predomina grava mal graduada y presencia de boleos cercana al 30%, tamaños máximos de 670 mm	Corte directo en campo	40-55	0-40
		Análisis inverso	45	40
Caso Colombia (Nanclares, 2018)	Depósito aluvial, material granular grueso, grava con lentes de arena. Tamaño de boleos entre 75 y 200 mm	Corte directo en campo	50.2-53.8	120-165
		Método Bimsoils	37.8-54.7	75-186
Caso Chile (Verdugo, 2006)	Material granular grueso con forma redondeada, clasificado como grava y tamaños máximos aproximados de 200 mm	Triaxial gran escala	45-50	-
		Recopilado de trabajos anteriores	44.20	36.3

Tabla 23. Resultados de resistencia a corte por varios autores. Fuente: Autor.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se aproximaron los parámetros de resistencia a corte en un talud con material tipo conglomerado, el talud se encuentra geológicamente ubicado en la terraza fluvio-glaciar Qt5 en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Los parámetros del conjunto se determinaron por medio de relaciones empíricas y análisis inverso, mientras que para los parámetros de la matriz se llevaron a cabo ensayos de laboratorio.

Para la aplicación de las metodologías propuestas para el estudio del conjunto, se realizaron primeramente algunos ensayos necesarios para la caracterización física del material, llegando así a los resultados presentados a continuación. La matriz del conglomerado se clasificó según la metodología SUCS como una grava arcillosa, y la parte fina como una arcilla de baja plasticidad. En las muestras ensayadas se obtuvieron valores del coeficiente de uniformidad (Cu) máximo de 100.84 y mínimo de 63.96, resultando en un valor promedio entre todas las muestras igual a 85.95, un valor significativamente alto y representativo de la variedad de tamaño en las partículas que componen este material. De forma complementaria a la granulometría, mediante un análisis de fotografías se determinó el porcentaje de boleos del talud, material con tamaño mayor a 3", obteniéndose valores mínimos y máximos igual a 23.60% y 41.20%, respectivamente. Complementario a la granulometría, se realizaron ensayos de límites de Atterberg, encontrando límites líquido y plástico promedio igual a 30.6% y 18.6%, mismos con los que se clasificó el material fino como una arcilla de baja plasticidad. Con los resultados antes mencionados, se clasificó al material según la metodología SUCS, como una grava mal graduada.

Para la determinación de la densidad y humedad del material se realizaron ensayos en campo y laboratorio, obteniéndose en campo una densidad húmeda igual a 1.97 gr/cm³, una humedad del 20.7%, debido a que se realizan las mediciones a través de un densímetro nuclear, los resultados deben ser corregidos, resultando un peso específico seco igual a 1.79 gr/cm³; en laboratorio se obtuvo una densidad húmeda de 2.13 gr/cm³ y una humedad del 20.3%; los valores presentados anteriormente corresponden al promedio de varios ensayos realizados. Finalmente, para la caracterización del material se realizaron ensayos Proctor modificado, para así poder determinar la compactación relativa del material al relacionar la densidad seca máxima con la densidad seca encontrada en campo, para una humedad óptima del 11.4% se obtiene una densidad seca máxima igual a 1.91 gr/cm³, resultando en una compactación relativa del 93.6%.

Con el fin de obtener los parámetros de resistencia de la matriz del conjunto, se llevaron a cabo también ensayos triaxiales tipo CU (consolidado-no drenado), los ensayos se llevaron a cabo en 3 grupos de muestras, en un grupo se utilizaron muestras con diámetros de 7 cm y

en los siguientes dos, se ensayaron muestras de menor tamaño, con diámetros alrededor de los 3.50 cm. En cada grupo se ensayaron un total de 3 muestras para así poder determinar las envolventes de rotura correspondientes, se obtuvo un ángulo de fricción promedio igual a 31° y una cohesión resultante de 0.42 kg/cm^2 . Adicionalmente, se realizaron ensayos de compresión simple sobre muestras con diámetros de 3.50 cm, con los que se obtuvo una resistencia última promedio igual a 2.55 kg/cm^2 .

Con los parámetros tanto físicos como de resistencia de la matriz se utilizaron 2 metodologías empíricas para determinar los parámetros de resistencia a cortante del conjunto, estas metodologías fueron las desarrolladas por Duncan (2012) y Kalender et. al, (2014).

La metodología expuesta en Duncan (2012), estima únicamente el ángulo de fricción del conjunto, esto a partir de la clasificación del suelo, el valor del coeficiente de uniformidad, la densidad relativa del suelo, presión de confinamiento y presión atmosférica en el sitio. La densidad relativa obtenida a partir de la compactación relativa antes expuesta, fue del 68.1%. La presión de confinamiento se estimó para una profundidad media del talud igual a 5 m, utilizando para su cálculo el valor de la densidad seca corregida, mencionada anteriormente. Tras aplicar el criterio se obtuvo un ángulo de fricción igual a 51.4° , un valor mayor al obtenido mediante los ensayos realizados sobre la matriz, lo cual se considera lógico puesto que toma en cuenta el aporte de toda la granulometría de la matriz, contrastando con los ensayos triaxiales, donde el tamaño máximo de las partículas se ve limitado por el diámetro de la muestra.

La metodología propuesta por Kalender et. al, (2014) para Bimsoils, está enfocada en suelos heterogéneos. Para aplicar esta metodología se debe contar con parámetros físicos como el porcentaje y forma de los boleos, identificar estos parámetros puede dificultarse si no se cuenta con un talud expuesto donde se pueda observar la distribución de boleos en la matriz, en nuestro caso de estudio se pudo determinar mediante el análisis de fotografías en conjunto con la distribución granulométrica por tamizado; además se debe contar con los parámetros de resistencia de la matriz, que como se expuso anteriormente, fueron obtenidos mediante ensayos de laboratorio tradicionales. Esta metodología en particular, utiliza el criterio que los boleos serían todo el material con tamaño mayor a $\frac{3}{4}$ ", esto debido a que esta metodología se fundamentó en ensayos sobre partículas que abarcaban ese rango de tamaños; con este criterio, en nuestro caso se recuperaron estos nuevos porcentajes de boleos de la curva granulométrica completa, obteniéndose un rango entre 61.5 y 80.4%. Al tener un alto volumen de boleos, el ángulo de fricción del conjunto se acerca al ángulo de reposo de los boleos, siendo estos dos parámetros los más importantes para definir el ángulo de fricción del conjunto, obteniendo un valor aproximado de 39° . Por otro lado, la cohesión depende de la

resistencia a compresión simple de la matriz y del ángulo de fricción del conjunto, al ser este cercano al ángulo de reposo, los valores de cohesión disminuyen, encontrándose valores alrededor de 12.8 y 24.8 KPa.

Debido a la aleatoriedad en la distribución de partículas y sus tamaños en este tipo de material, la determinación de sus parámetros no puede realizarse de manera exacta, pero bien aplicadas las dos metodologías empíricas expuestas anteriormente, pueden representar una buena aproximación. La metodología de Duncan, podría ser considerada una buena opción cuando el suelo no tenga un porcentaje de boleos muy elevado, esto debido a que no considera su aporte a la resistencia del conjunto, sin embargo, entrega un valor bastante alto, también debe mencionarse que el método utiliza únicamente el ángulo de fricción para caracterizar resistencia. Los parámetros que entran en la ecuación pueden determinarse de manera sencilla con ensayos tradicionales, por lo que este método podría representar una buena primera aproximación. Por otro lado, la metodología propuesta por Kalender et. al, (2014), incluye parámetros cuya forma de determinar puede llevar a ensayos y análisis más complejos, sin embargo los valores obtenidos representan una mejor aproximación al tomar en cuenta el aporte de los boleos y cohesión a la resistencia final del conjunto; como una desventaja de este segundo método, la determinación del ángulo de reposo de los boleos podría dificultarse si estos son de gran tamaño, puesto que tendría que obtenerse mediante inspección visual y esto podría conllevar a errores humanos.

En el análisis inverso se aplicó el método de Bishop, un método de equilibrio límite, para ello se asumió que el comportamiento del conglomerado a gran escala es homogéneo, y se idealizó a una superficie de falla circular, aunque con un radio tan alto que se aproxima bastante bien a la superficie de falla real. En el caso de estudio, la falla del talud se generó debido a la disminución de resistencia de la matriz, reflejada como una disminución de la cohesión provocada por un alto porcentaje de humedad. Tras aplicar el análisis, la superficie de falla que mejor se ajusta a la realidad es la generada con un ángulo de fricción de 53° y una cohesión de 2.6 KPa.

Los valores obtenidos por ambas metodologías, muestran que tras el análisis inverso se obtienen ángulos de fricción mayores y cohesiones más bajas, esto puede deberse a que el estudio representa de mejor manera el comportamiento del material en campo; sin embargo, los valores obtenidos por ambas metodologías no presentan un rango de variabilidad muy amplio.

Finalmente, para nuestro caso la metodología propuesta por Duncan entrega valores muy similares al obtenido según el análisis inverso, en tanto que el método de Bimsoil entrega

valores mucho menores y dependientes prácticamente de la apreciación con la cual se aproximó el ángulo de reposo de los boleos. De las dos metodologías aplicadas en este trabajo, la desarrollada por Duncan podría ser una opción viable cuando se trabaje con material conglomerado donde prima el comportamiento de la matriz, mientras que para aplicar la metodología de Bimsoils sería necesario generar más puntos de análisis y ajustar las ecuaciones y parámetros al material del medio.

6 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para futuras investigaciones se recomienda optimizar la metodología para determinar los porcentajes de boleos, bien sea en base a fotografías del talud u otra metodología, debido a que el proceso de reconocimiento manual consume mucho tiempo, limitando la cantidad de fotografías que se pueden analizar.

Las metodologías empleadas en este trabajo se podrían replicar en otros puntos de la ciudad de Cuenca con suelo tipo conglomerado, con ello se podría llegar a conclusiones más generales y representativas

Durante procesos constructivos que se generen en conglomerados, se podría realizar el ejercicio de determinar el ángulo de reposo natural de los boleos y contrastar con las recomendaciones de la metodología Bimsoil. Lo que podría colaborar en su aplicación para nuestros materiales.

7. REFERENCIAS

- Alvarez, D. A., & Contreras, J. V. (2019). *Aproximación de la capacidad portante de un suelo tipo conglomerado de la ciudad de Cuenca*. Cuenca.
- Angelone, S., & Garibay, T. (2020). Tipos de Suelos: Características tacto visuales.
- ASTM. (2004). Annual Book of ASTM Standards.
- Bojorque, J. (2011). Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes. *Maskana*.
- Braja M, D. (2001). *FUNDAMENTOS DE INGENIERIA GEOTÉCNICA*.
- Bristow, C. R. (1973). Guía Geológica de la Cuenca de Cuenca. *Sociedad Ecuatoriana de Geología y Geofísica*.
- Castro, C. (2005). *Geomorfología dinámica y climática*. Obtenido de https://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/3_3_2.html
- Donaghe, R., & Torrey, V. (1979). Scalping and replacement effects on strength parameters of earth-rock mixtures. *Proceedings of the Conference on Design Parameters in Geotechnical Engineering*.
- Duncan, & Dursey. (2007). *Soil and Rock Modulus Correlations For Geotechnical Engineering (Reporte N.o 44)*. Virginia.
- Duncan, J. M., & Stark, T. D. (1992). Soil strengths from back analysis of slope failure.
- Duncan, M. (2012). *Estimating friction angles of sands and rockfills*.
- Eguez, A., & Noblet, C. (1988). Nuevos Datos sobre la estratigrafía de la cuenca de Cuenca (Sur del Ecuador): Implicaciones Geológicas y Geodinámicas.
- Fragaszy, R., Su, W., & Siddiqi, F. (1990). Effects of oversize particles on the density of clean granular soils. *Geotechnical Testing Journal*, 13.
- IGME. (1987). Manual de Taludes. (S. A. (EPTISA) Empresa, Instituto Geológico y Minero.
- INEN. (2014). Norma técnica Ecuatoriana .
- Ishibashi, I., & Hazarika, H. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals and Applications*.
- Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., & Kasapoglu, K. E. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks. *Elsevier*.
- Lavenu, A., & Noblet, C. (1990). ANALISIS SEDIMENTOLOGICO Y TECTONICO DE LA CUENCA INTRAMONTAÑOSA TERCIARIA DE CUENCA (SUR DEL ECUADOR).
- Lowe, J. (1964). Shear strength of coarse embankment dam material. *Proceedings of the 8th Congress on Large*.
- Martínez, A. (2019). DETECCIÓN DE CONTORNOS EN IMÁGENES CON PYTHON Y "opencv".
- Medley, E. W. (2008). Engineering the Geological Chaos of Franciscan and Other Bimrocks. *42nd U.S. Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*.

- Mendoza, D., & Ramirez, F. (2009). *Calibración del densímetro nuclear para la obtención de densidades en suelo grueso: conglomerados y evaluación de la carpeta asfáltica en vías*. Cuenca.
- Nanclares Arango, F. J. (2018). COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SUELOS GRUESOS GRANULARES DE ORIGEN ALUVIAL.
- Núñez Ávila, A. G., & Orellana Alvear, J. M. (2009). optimización de la segmentación de imágenes orientada a la homogenización de conglomerados.
- PRECUPA . (1998). *Informe final del Proyecto PRECUPA*.
- Robalino, S., & Noblet, C. (1990). SEDIMENTACION Y DEFORMACIONES SIN-SEDIMENTARIAS MIO-PLIOCENICAS EN LA CUENCA DE CUENCA (SECTOR DELEG).
- Sánchez Rodríguez, S., Rodríguez Ortiz, J. M., López Valero, J. D., Laina Gómez, C., & Juménez Morales, Á. (2016). Caracterización de suelos granulares gruesos. El caso de la Grava de Lima.
- Santacruz, K. (2009). Determinación de las Propiedades Elásticas del Conglomerado de las Formaciones Turi y Terrazas Fluvioglaciáricas de la Ciudad de Cuenca a partir de las Propiedades de su Matriz.
- Siddiqi, F., & Fragaszy, R. (1991). Strength evaluation of coarse grain dam material. *IX Pan-American Conference*, 1293-1302.
- Siddiqi, F., Seed, R., Chan, C., Seed, H., & Pyke, R. (1987). "Strength evaluation of coarse-grained soils.
- Sonmez, H., Kasapoglu, K. E., Coskun, A., Tunusluoglu, C., Medley, E. W., & Zimmerman, R. W. (2009). A Conceptual empirical approach for the overall strength of unwelded bimrocks. *Presented*.
- Suárez, J. (1996). Deslizamientos: Análisis Geotécnico.
- Tang, W. H., Stark, T. D., & Angulo, M. (Octubre de 1999). RELIABILITY IN BACK ANALYSIS OF SLOPE FAILURES. *Japanese Geotechnical Society*, 39(5).
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S. A.
- Verdugo, R., & de la Hoz, K. (2006). CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE SUELOS GRANULARES. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*.
- Wesley, L., & Leelaratnam, V. (2001). Shear strength parameters from back-analysis of single slips. *Geotechnique*, 373-374.

8. ANEXOS

Anexo A: Fotografías del talud y escala







Anexo B: Granulometría y clasificación de muestras

Muestra 1

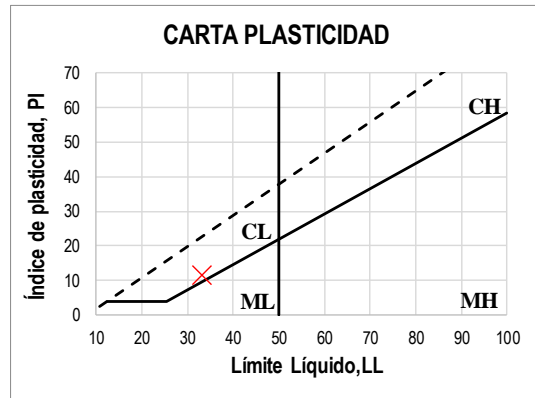
CLASIFICACIÓN MÉTODO SUCS

Límites de Atterberg

Límite Líquido				
# Golpes	W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad
35	48.91	70.28	65.14	31.7%
27	50.51	70.12	65.29	32.7%
18	47.94	71.92	65.85	33.9%
LL				33.0%

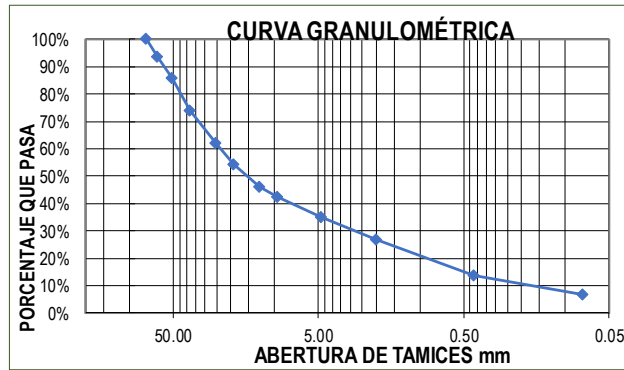
Límite Plástico				
W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad	% Humedad
47.81	52.22	51.43	21.82%	21.38%
50.06	53.18	52.64	20.93%	

Tipo de fino	Arcilla de baja plasticidad
--------------	-----------------------------



Análisis Granulométrico

Tamiz	Tamaño(mm)	%Pasa
3	76.2	100.0%
2.5	63.5	93.6%
2	50.8	86.0%
1.5	38.1	73.7%
1	25.4	62.0%
3/4	19	54.3%
1/2	12.7	45.9%
3/8	9.5	42.4%
#4	4.75	35.2%
#10	2	27.0%
#40	0.425	13.7%
#200	0.075	6.6%



Tipo de suelo	Grava bien graduada - Grava arcillosa
---------------	---------------------------------------

Muestra 2

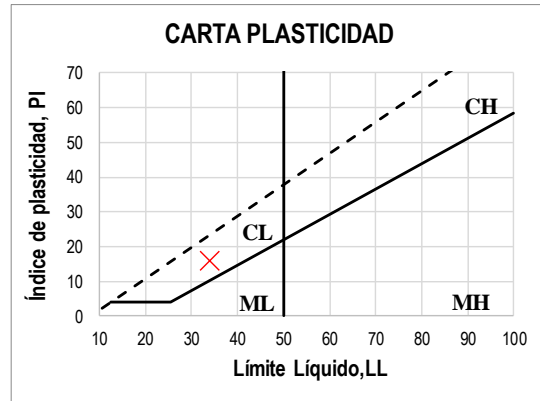
CLASIFICACIÓN MÉTODO SUCS

Límites de Atterberg

Límite Líquido				
# Golpes	W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad
35	18.73	36.27	31.95	32.7%
27	19.13	38.05	33.33	33.2%
17	18.98	36.48	31.96	34.8%
LL				33.7%

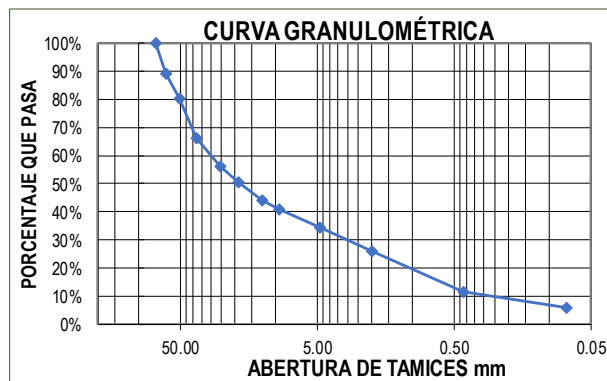
Límite Plástico				
W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad	% Humedad
18.36	23.36	22.61	17.65%	17.55%
19.02	24	23.26	17.45%	

Tipo de fino Arcilla de baja plasticidad



Análisis Granulométrico

Tamiz	Tamaño(mm)	%Pasa
3	76.2	100.0%
2.5	63.5	89.4%
2	50.8	80.5%
1.5	38.1	66.4%
1	25.4	56.2%
3/4	19	50.4%
1/2	12.7	44.2%
3/8	9.5	41.1%
#4	4.75	34.5%
#10	2	26.1%
#40	0.425	11.8%
#200	0.075	5.9%



Tipo de suelo Grava bien graduada-arcilla baja plasticidad

Muestra 3

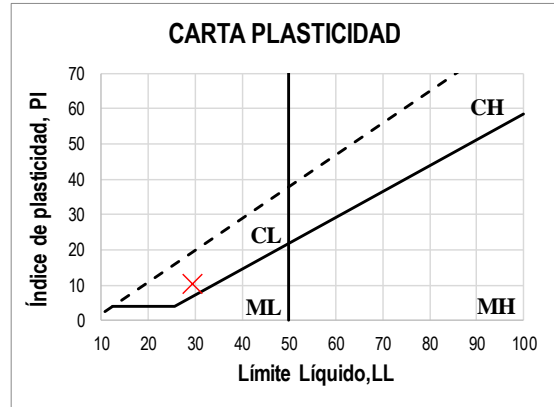
CLASIFICACIÓN MÉTODO SUCS

Límites de Atterberg

Límite Líquido				
# Golpes	W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad
35	50.68	73.43	68.46	28.0%
27	50.08	69.94	65.48	29.0%
19	47.41	67.81	63.09	30.1%
LL				29.3%

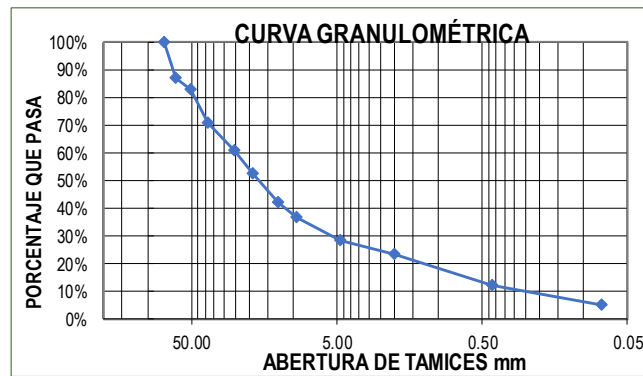
Límite Plástico				
W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad	% Humedad
9.26	21.28	19.38	18.77%	18.83%
9.36	18.74	17.25	18.88%	

Tipo de fino Arcilla de baja plasticidad



Análisis Granulométrico

Tamiz	Tamaño(mm)	%Pasa
3	76.2	100.0%
2.5	63.5	87.1%
2	50.8	82.9%
1.5	38.1	70.8%
1	25.4	60.6%
3/4	19	52.4%
1/2	12.7	41.9%
3/8	9.5	36.6%
#4	4.75	28.3%
#10	2	23.3%
#40	0.425	12.1%
#200	0.075	5.1%



Tipo de suelo Grava mal graduada - Grava arcillosa

Muestra 4

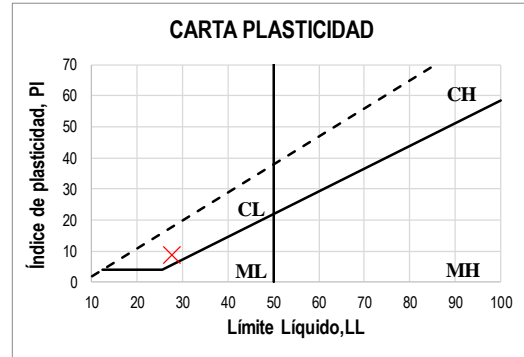
CLASIFICACIÓN MÉTODO SUCS

Límites de Atterberg

Límite Líquido				
# Golpes	W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad
34	50.69	71.94	67.54	26.1%
26	50.18	68.91	64.89	27.3%
17	50.07	73.47	68.27	28.6%
LL				27.4%

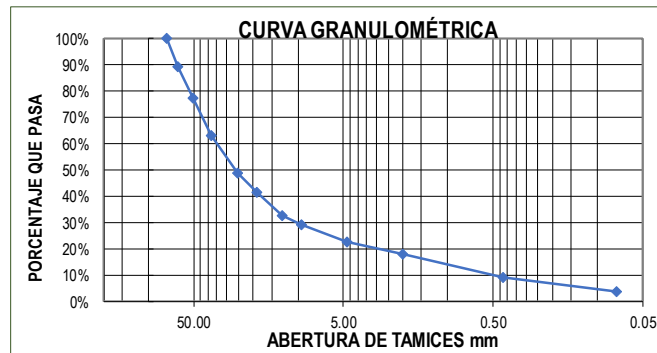
Límite Plástico				
W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad	% Humedad
9.24	21.92	19.93	18.62%	18.63%
9.42	18.65	17.2	18.64%	

Tipo de fino	Arcilla de baja plasticidad
---------------------	-----------------------------



Análisis Granulométrico

Tamiz	Tamaño(mm)	%Pasa
3	76.2	100.0%
2.5	63.5	89.3%
2	50.8	77.4%
1.5	38.1	63.2%
1	25.4	48.8%
3/4	19	41.5%
1/2	12.7	32.8%
3/8	9.5	29.2%
#4	4.75	22.6%
#10	2	18.2%
#40	0.425	9.3%
#200	0.075	3.6%



Tipo de suelo	Grava mal graduada
----------------------	--------------------

Muestra 5

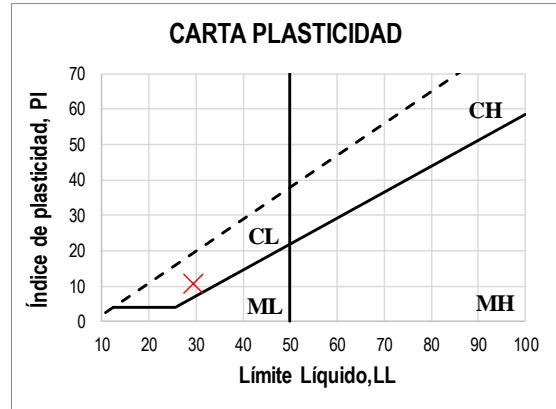
CLASIFICACIÓN MÉTODO SUCS

Límites de Atterberg

Límite Líquido				
# Golpes	W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad
34	47.8	66.88	62.61	28.8%
25	50.21	80	73.25	29.3%
15	50.78	63.73	60.73	30.2%
LL				29.4%

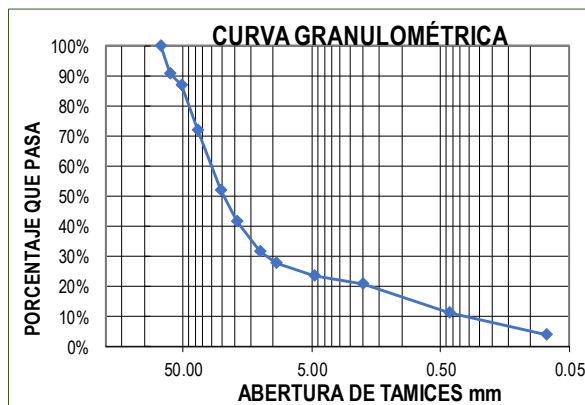
Límite Plástico				
W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad	% Humedad
9.24	21.92	19.93	18.62%	18.63%
9.42	18.65	17.2	18.64%	

Tipo de fino: Arcilla de baja plasticidad



Análisis Granulométrico

Tamiz	Tamaño(mm)	%Pasa
3	75	100.0%
2.5	63.5	90.9%
2	50.8	86.8%
1.5	38.1	72.0%
1	25.4	51.8%
3/4	19	41.5%
1/2	12.7	31.4%
3/8	9.5	27.7%
#4	4.75	23.3%
#10	2	20.7%
#40	0.425	11.1%
#200	0.075	3.8%



Tipo de suelo: Grava mal graduada

Muestra 6

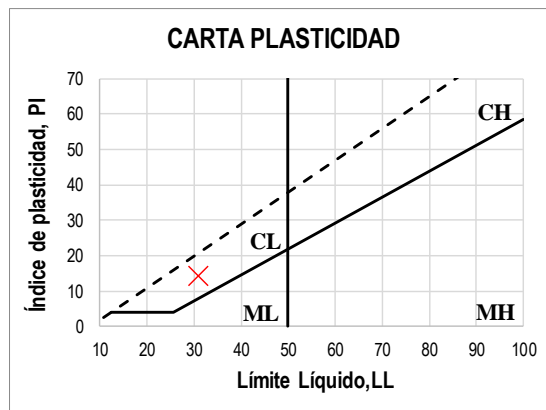
CLASIFICACIÓN MÉTODO SUCS

Límites de Atterberg

Límite Líquido				
# Golpes	W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad
28	49.44	70.73	65.79	30.2%
21	47.11	64.67	60.45	31.6%
16	48.49	64.22	60.31	33.1%
LL				30.9%

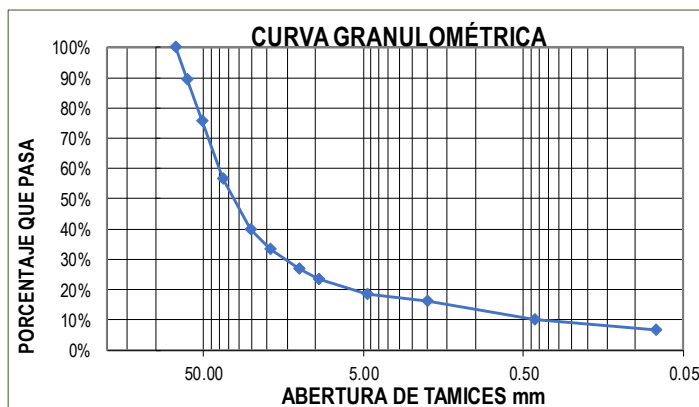
Límite Plástico				
W Tarro	W Humedo	W Seco	Humedad	% Humedad
8.91	15.01	14.16	16.19%	16.53%
9.36	15.11	14.28	16.87%	

Tipo de fino: Arcilla de baja plasticidad



Análisis Granulométrico

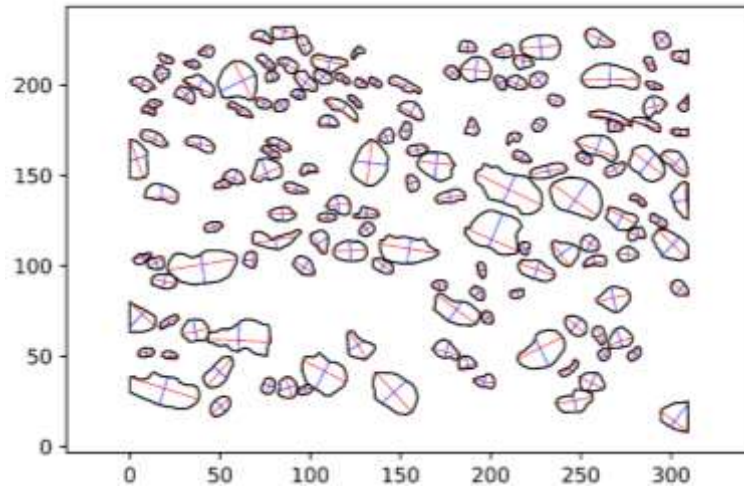
Tamiz	Tamaño(mm)	%Pasa
3	75	100.0%
2.5	63.5	89.4%
2	50.8	75.8%
1.5	38.1	56.5%
1	25.4	39.9%
3/4	19	33.4%
1/2	12.7	26.7%
3/8	9.5	23.7%
#4	4.75	18.5%
#10	2	16.2%
#40	0.425	10.2%
#200	0.075	6.7%



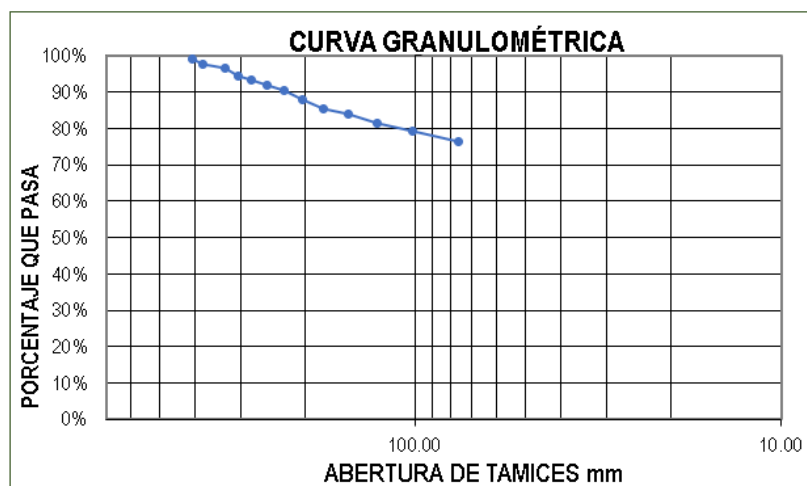
Tipo de suelo: Grava mal graduada - Grava arcillosa

Anexo C: Fotografías procesadas

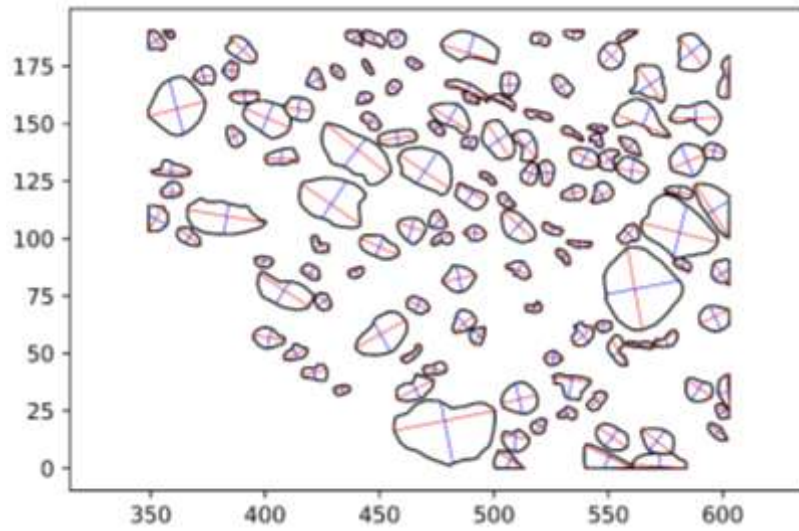
Fotografía #1



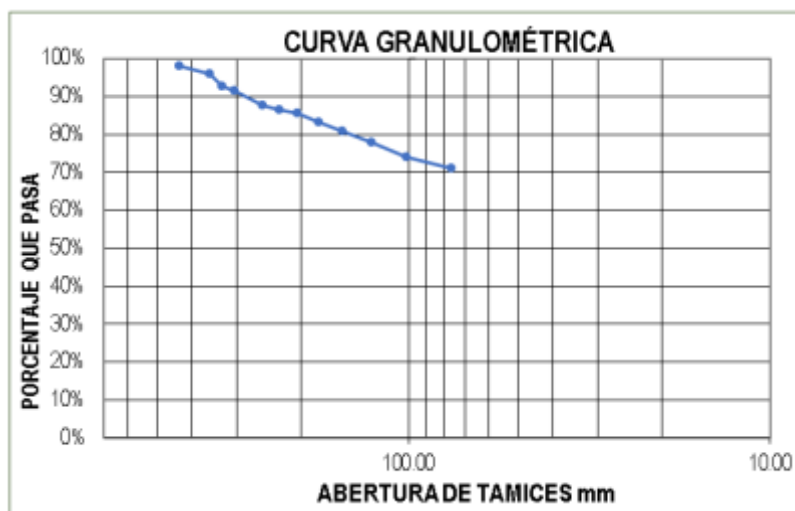
Tamiz	Area retenida	Peso retenido	%Pasa
16	596.6	148.0	99.1%
15	1055.9	261.9	97.6%
13	812.2	201.4	96.4%
12	1341.4	332.7	94.5%
11	784.0	194.4	93.4%
10	1033.2	256.2	91.9%
9	1049.4	260.2	90.4%
8	1779.4	441.3	87.8%
7	1751.9	434.5	85.3%
6	907.1	224.9	84.0%
5	1806.2	447.9	81.4%
4	1597.2	396.1	79.1%
3	1868.4	463.4	76.4%



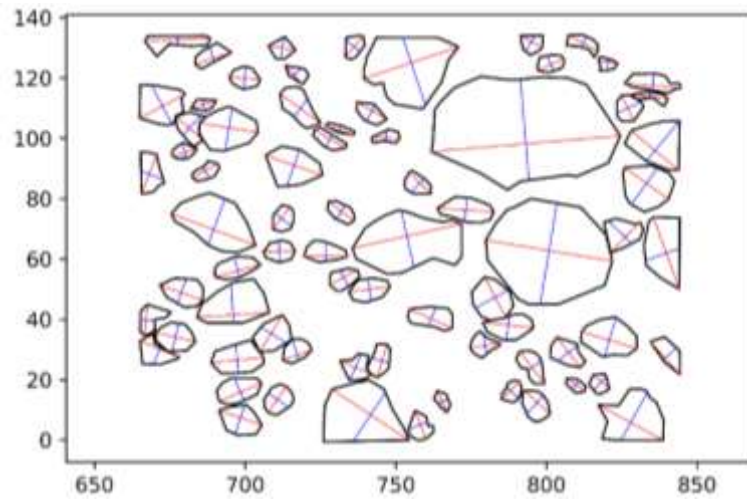
Fotografía #2



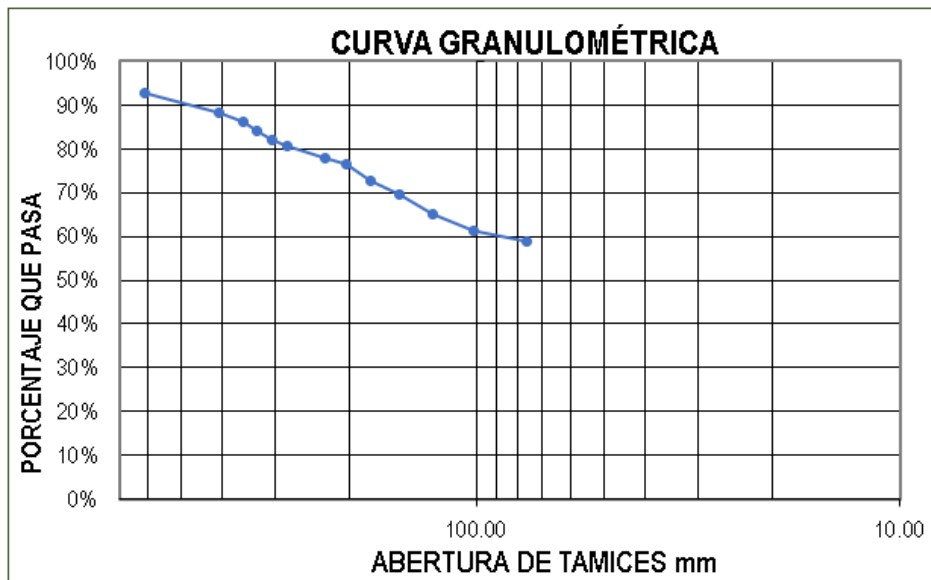
Tamiz	Area retenida	Peso retenido	%Pasa
17	922.1	228.7	97.9%
14	867.0	215.0	95.9%
13	1427.2	354.0	92.6%
12	463.7	115.0	91.5%
10	1667.5	413.5	87.6%
9	545.2	135.2	86.4%
8	424.7	105.3	85.4%
7	991.5	245.9	83.1%
6	1068.0	264.9	80.6%
5	1228.7	304.7	77.8%
4	1702.6	422.2	73.9%
3	1285.0	318.7	70.9%



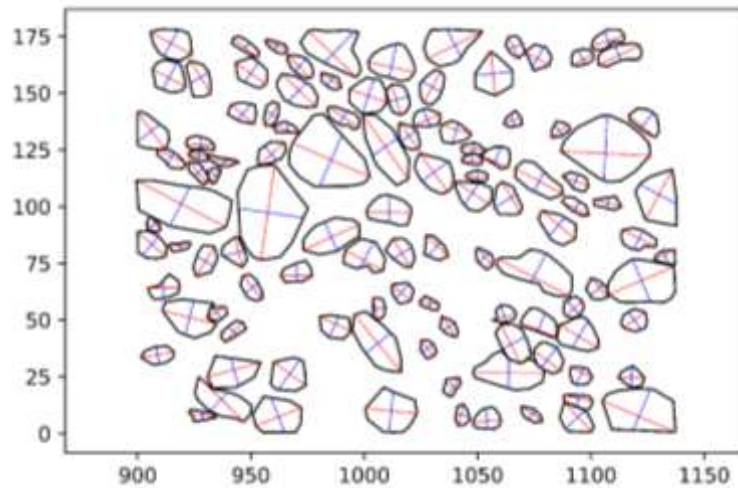
Fotografía #3



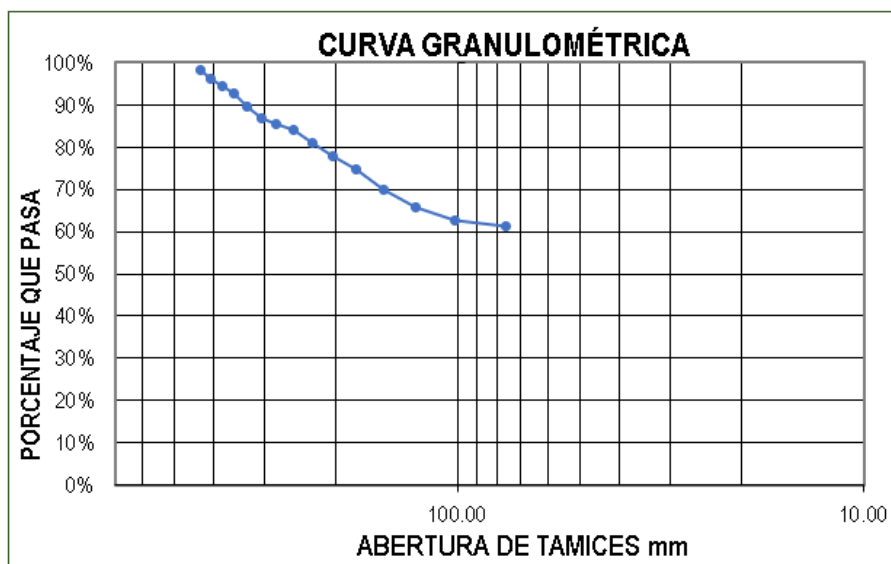
Tamiz	Area acumulada	Peso retenido	%Pasa
24	1743.2	432.3	92.8%
16	1104.1	273.8	88.3%
14	541.3	134.2	86.1%
13	518.0	128.5	83.9%
12	432.7	107.3	82.2%
11	338.1	83.8	80.8%
9	735.9	182.5	77.7%
8	290.4	72.0	76.5%
7	939.7	233.0	72.7%
6	765.9	189.9	69.5%
5	1117.6	277.2	64.9%
4	863.5	214.2	61.4%
3	637.3	158.0	58.8%



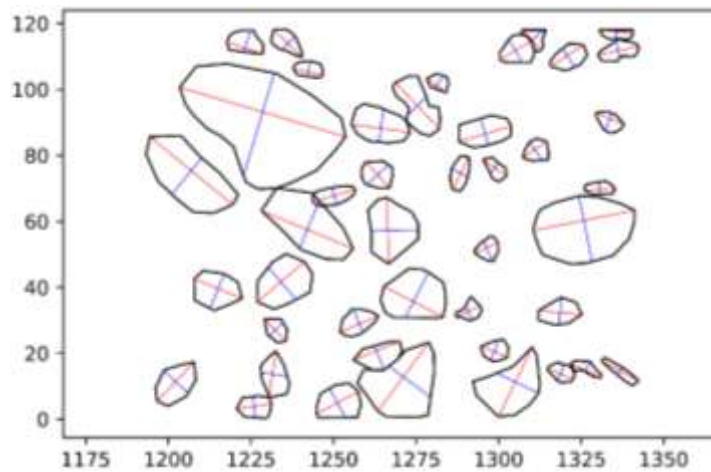
Fotografía #4



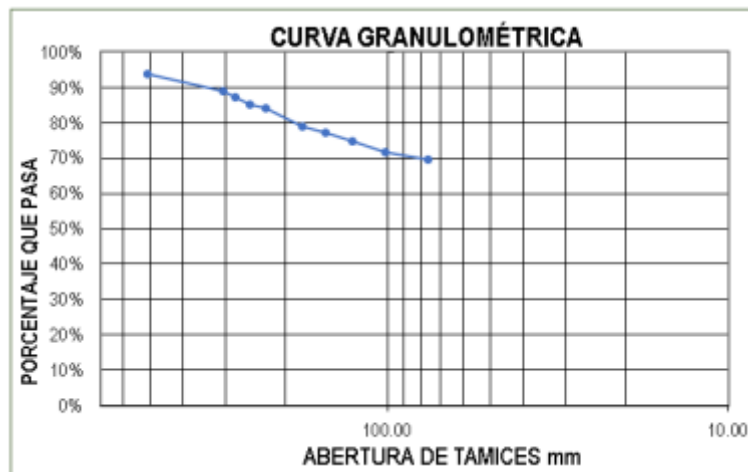
Tamiz	Area acumulada	Peso retenido	%Pasa
17	700.1	173.6	98.4%
16	930.2	230.7	96.2%
15	763.5	189.4	94.4%
14	753.9	187.0	92.6%
13	1271.2	315.3	89.6%
12	1149.5	285.1	86.9%
11	598.6	148.5	85.5%
10	558.6	138.5	84.1%
9	1355.1	336.1	81.0%
8	1274.5	316.1	78.0%
7	1405.6	348.6	74.6%
6	2046.5	507.5	69.8%
5	1787.8	443.4	65.6%
4	1283.0	318.2	62.6%
3	610.4	151.4	61.1%



Fotografía #5



Tamiz	Area retenida	Peso retenido	%Pasa
20	1177.0	291.9	93.7%
12	871.9	216.2	89.0%
11	342.4	84.9	87.1%
10	351.0	87.1	85.2%
9	242.1	60.0	83.9%
7	939.1	232.9	78.9%
6	353.2	87.6	77.0%
5	443.0	109.9	74.6%
4	549.2	136.2	71.6%
3	402.1	99.7	69.5%



Anexo D: Ensayo con aceite de parafina

#Muestra	Δ Peso (gr)	Δ volumen (ml)	V. Parafina (ml)	V. Suelo(ml)	Y. Suelo(gr/cm ³)
1	11.00	60	11.34	48.66	2.09
2	1.60	22	1.65	20.35	2.16
3	2.75	30	2.84	27.16	2.28
4	5.11	40	5.27	34.73	1.90
5	3.68	35	3.79	31.21	2.35
6	2.64	10	2.72	7.28	2.31
7	4.52	25	4.66	20.34	1.99
8	4.65	45	4.79	40.21	1.92

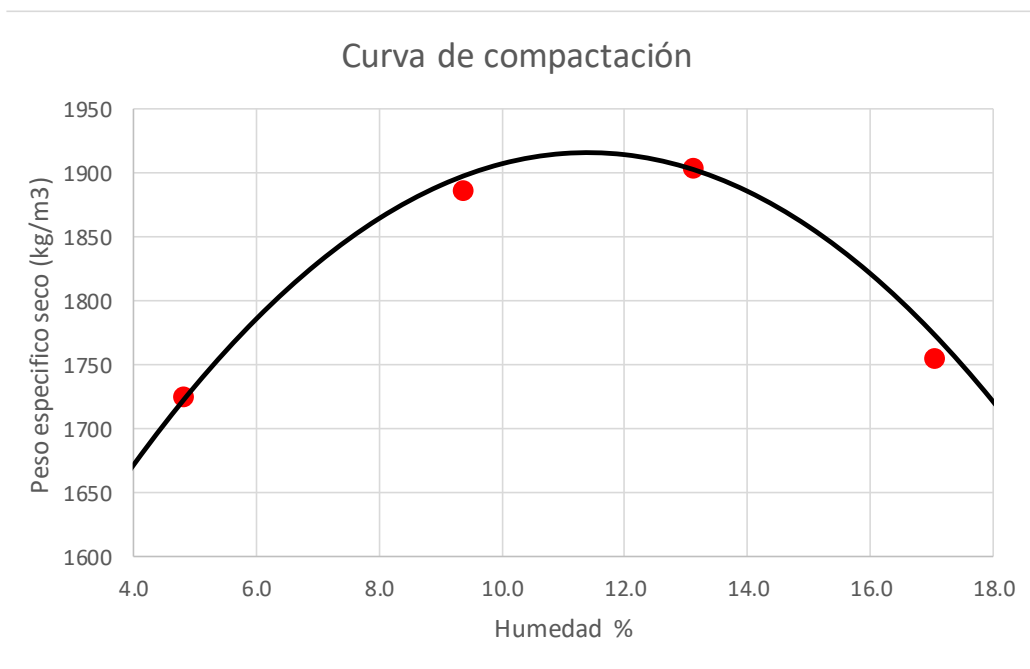
Anexo E: Ensayo Proctor

PROCOTOR MODIFICADO

Molde		
Peso	3914	gr
Volumen	967.3	cm ³

Resultados		
Humedad Opt	11.4	%
Ys max	1917	Kg/m ³

DATOS								
Paramtro	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
Peso T (Gr)	52.5	54.7	50.5	58.1	39.1	46.1	47.4	51.4
Peso T+Mh (Gr)	294.7	336.7	298.4	286.8	218.2	280.8	313.0	334.7
Peso T+Ms (Gr)	283.5	323.8	275.5	268.7	197.6	253.3	274.1	293.7
Humedad	4.8	4.8	10.2	8.6	13.0	13.3	17.2	17.0
Humedad P	4.8		9.4		13.1		17.1	
Peso Total (Gr)	5663		5909		5996		5901	
Peso Suelo (Gr)	1749		1995		2082		1987	
Peso Seco (Gr)	1668		1824		1840		1698	
Densidad (Kg/m ³)	1725		1885		1903		1755	



Anexo F: Ensayos a compresión simple

Compresión simple #1

Dimensiones	
Diametro(cm)	3.6
Alto(cm)	7.23
A/D	2.01
Volumen(cm3)	73.6

Densidad	
Peso humedo(gr)	147.34
Peso seco(gr)	125.1
Yh(g/cm3)	2.00
Ys(g/cm3)	1.70
Gs(g/cm3)	2.70

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm2)	0	σ_1 (Kg/cm2)	2.51

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
51.47	95.3	88.93	17.00%	17.74%
45.63	94.35	86.75	18.48%	

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm2)	Esfuerzo(kg/cm2)	Deformación
0.00	0.00	10.18	0.00	0.00
9.76	0.20	10.21	0.96	0.00
12.48	0.40	10.24	1.22	0.01
14.55	0.60	10.26	1.42	0.01
16.40	0.80	10.29	1.59	0.01
17.58	1.00	10.32	1.70	0.01
19.01	1.20	10.35	1.84	0.02
19.87	1.40	10.38	1.91	0.02
20.77	1.60	10.41	2.00	0.02
21.54	1.80	10.44	2.06	0.02
22.32	2.00	10.47	2.13	0.03
22.60	2.20	10.50	2.15	0.03
22.80	2.40	10.53	2.17	0.03
23.38	2.60	10.56	2.21	0.04
23.42	2.80	10.59	2.21	0.04
23.80	3.00	10.62	2.24	0.04
24.05	3.20	10.65	2.26	0.04
24.56	3.40	10.68	2.30	0.05
24.55	3.60	10.71	2.29	0.05
24.69	3.80	10.74	2.30	0.05
24.92	4.00	10.78	2.31	0.06
24.45	4.20	10.81	2.26	0.06
24.84	4.40	10.84	2.29	0.06
25.20	4.60	10.87	2.32	0.06
25.38	4.80	10.90	2.33	0.07
25.37	5.00	10.94	2.32	0.07
25.05	5.20	10.97	2.28	0.07
25.01	5.40	11.00	2.27	0.07
25.04	5.60	11.03	2.27	0.08

25.20	5.80	11.07	2.28	0.08
25.33	6.00	11.10	2.28	0.08
25.58	6.20	11.13	2.30	0.09
25.81	6.40	11.17	2.31	0.09
25.80	6.60	11.20	2.30	0.09
25.81	6.80	11.24	2.30	0.09
26.31	7.00	11.27	2.33	0.10
26.35	7.20	11.30	2.33	0.10
27.12	7.40	11.34	2.39	0.10
27.82	7.60	11.37	2.45	0.11
28.18	7.80	11.41	2.47	0.11
27.90	8.00	11.45	2.44	0.11
28.23	8.20	11.48	2.46	0.11
28.43	8.40	11.52	2.47	0.12
28.43	8.60	11.55	2.46	0.12
28.75	8.80	11.59	2.48	0.12
29.18	9.00	11.63	2.51	0.12
28.80	9.20	11.66	2.47	0.13
29.13	9.40	11.70	2.49	0.13
29.18	9.60	11.74	2.49	0.13
29.03	9.80	11.78	2.46	0.14
28.17	10.00	11.81	2.38	0.14
28.12	10.20	11.85	2.37	0.14
27.90	10.40	11.89	2.35	0.14
27.70	10.60	11.93	2.32	0.15
27.90	10.80	11.97	2.33	0.15
28.08	11.00	12.01	2.34	0.15
28.13	11.20	12.04	2.34	0.15
27.93	11.40	12.08	2.31	0.16
28.30	11.60	12.12	2.33	0.16
28.32	11.80	12.16	2.33	0.16
28.63	12.00	12.20	2.35	0.17
28.32	12.20	12.24	2.31	0.17
28.21	12.40	12.29	2.30	0.17
28.29	12.60	12.33	2.30	0.17
28.03	12.80	12.37	2.27	0.18
28.04	13.00	12.41	2.26	0.18
27.80	13.20	12.45	2.23	0.18
27.95	13.40	12.49	2.24	0.19
27.84	13.60	12.54	2.22	0.19
28.07	13.80	12.58	2.23	0.19
27.68	14.00	12.62	2.19	0.19
27.85	14.20	12.67	2.20	0.20
28.08	14.40	12.71	2.21	0.20
28.45	14.60	12.75	2.23	0.20

Compresión simple #2

Dimensiones	
Diametro(cm)	3.55
Alto(cm)	7.1
A/D	2.00
Volumen(cm ³)	70.3

Densidad	
Peso humedo(gr)	147.34
Peso seco(gr)	123.6
Yh(g/cm ³)	2.10
Ys(g/cm ³)	1.76
Gs(g/cm ³)	2.70

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm ²)	0	σ_1 (Kg/cm ²)	2.59

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
51.29	92.3	85.87	18.59%	19.21%
57.96	91.01	85.54	19.83%	

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm ²)	Esfuerzo(kg/cm ²)	Deformación
0.89	0.40	9.95	0.00	0.00
20.38	0.60	9.98	1.95	0.00
22.48	0.80	10.01	2.16	0.01
24.33	1.00	10.04	2.33	0.01
25.64	1.20	10.07	2.46	0.01
26.48	1.40	10.10	2.53	0.01
26.77	1.60	10.13	2.55	0.02
26.92	1.80	10.16	2.56	0.02
26.97	2.00	10.19	2.56	0.02
27.26	2.20	10.21	2.58	0.03
27.45	2.40	10.24	2.59	0.03
27.42	2.60	10.27	2.58	0.03
27.28	2.80	10.30	2.56	0.03
27.05	3.00	10.33	2.53	0.04
27.01	3.20	10.37	2.52	0.04
26.80	3.40	10.40	2.49	0.04
26.78	3.60	10.43	2.48	0.05
26.80	3.80	10.46	2.47	0.05
26.85	4.00	10.49	2.47	0.05
26.97	4.20	10.52	2.47	0.05
27.05	4.40	10.55	2.47	0.06
26.96	4.60	10.58	2.46	0.06
26.76	4.80	10.62	2.43	0.06
26.81	5.00	10.65	2.43	0.06
26.75	5.20	10.68	2.42	0.07
26.84	5.40	10.71	2.42	0.07
26.85	5.60	10.75	2.41	0.07
26.95	5.80	10.78	2.41	0.08
27.01	6.00	10.81	2.41	0.08
27.18	6.20	10.85	2.42	0.08
27.65	6.40	10.88	2.45	0.08

27.84	6.60	10.91	2.46	0.09
27.92	6.80	10.95	2.46	0.09
27.99	7.00	10.98	2.46	0.09
28.53	7.20	11.02	2.50	0.10
29.19	7.40	11.05	2.55	0.10
29.42	7.60	11.08	2.56	0.10
29.47	7.80	11.12	2.56	0.10
29.61	8.00	11.15	2.56	0.11
29.71	8.20	11.19	2.57	0.11
29.66	8.40	11.23	2.55	0.11
29.36	8.60	11.26	2.52	0.12
28.65	8.80	11.30	2.45	0.12
28.36	9.00	11.33	2.41	0.12
28.50	9.20	11.37	2.42	0.12
28.55	9.40	11.41	2.41	0.13
28.41	9.60	11.45	2.39	0.13
28.28	9.80	11.48	2.37	0.13
28.22	10.00	11.52	2.36	0.14
28.25	10.20	11.56	2.35	0.14
28.39	10.40	11.60	2.36	0.14
28.42	10.60	11.64	2.35	0.14
28.52	10.80	11.67	2.35	0.15
28.74	11.00	11.71	2.36	0.15
28.84	11.20	11.75	2.36	0.15
28.69	11.40	11.79	2.34	0.15
28.72	11.60	11.83	2.34	0.16
28.76	11.80	11.87	2.33	0.16
28.73	12.00	11.91	2.32	0.16
28.60	12.20	11.95	2.30	0.17
28.69	12.40	11.99	2.30	0.17
28.72	12.60	12.03	2.30	0.17
28.82	12.80	12.07	2.30	0.17
28.72	13.00	12.12	2.28	0.18
28.76	13.20	12.16	2.28	0.18
28.81	13.40	12.20	2.27	0.18
28.89	13.60	12.24	2.27	0.19
29.09	13.80	12.29	2.28	0.19
29.15	14.00	12.33	2.27	0.19
29.18	14.20	12.37	2.27	0.19
29.06	14.40	12.42	2.25	0.20
29.02	14.61	12.46	2.24	0.20

Anexo G: Ensayos triaxiales

Triaxial #1 Grande

Dimensiones	
Diametro(cm)	7.2
Alto(cm)	14.5
A/D	2.01
Volumen(cm ³)	590.4

Densidad	
Peso humedo(gr)	1234.5
Peso seco(gr)	1060.0
Yh(g/cm ³)	2.09
Ys(g/cm ³)	1.80
Gs(g/cm ³)	2.8

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm ²)	0.5	σ_1 (Kg/cm ²)	3.18

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
50.74	71.33	68.41	16.53%	16.46%
49.95	68.12	65.56	16.40%	
514.19	1742.64	1572.47	16.08%	Humedad final

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm ²)	Esfuerzo(kg/cm ²)	Deformación
0.00	0.00	40.72	0.00	0.00
7.99	0.99	40.99	0.19	0.00
25.52	1.52	41.15	0.62	0.01
37.94	2.12	41.32	0.92	0.01
48.75	2.68	41.48	1.18	0.02
58.74	3.28	41.66	1.41	0.02
67.40	3.87	41.83	1.61	0.02
74.42	4.45	42.00	1.77	0.03
80.79	5.05	42.18	1.92	0.03
86.33	5.65	42.37	2.04	0.04
90.69	6.25	42.55	2.13	0.04
95.07	6.87	42.74	2.22	0.04
99.86	7.75	43.01	2.32	0.05
101.79	8.09	43.12	2.36	0.05
104.83	8.74	43.33	2.42	0.06
107.12	9.23	43.48	2.46	0.06
109.48	9.90	43.70	2.51	0.06
111.26	10.49	43.89	2.53	0.07
113.03	11.09	44.09	2.56	0.07
114.59	11.68	44.28	2.59	0.08
116.07	12.29	44.49	2.61	0.08
117.47	12.89	44.69	2.63	0.09
118.73	13.51	44.90	2.64	0.09
119.70	14.12	45.11	2.65	0.09
120.88	14.74	45.32	2.67	0.10
121.69	15.34	45.53	2.67	0.10

122.50	15.94	45.74	2.68	0.11
123.17	16.65	46.00	2.68	0.11
123.68	17.18	46.19	2.68	0.12
124.27	17.81	46.42	2.68	0.12
124.80	18.41	46.64	2.68	0.12
125.46	19.03	46.87	2.68	0.13
125.91	19.65	47.10	2.67	0.13
126.42	20.27	47.33	2.67	0.14
126.87	20.87	47.56	2.67	0.14
127.09	21.49	47.80	2.66	0.14
127.17	22.10	48.04	2.65	0.15
127.23	22.72	48.28	2.64	0.15
127.17	23.35	48.53	2.62	0.16
127.39	23.94	48.77	2.61	0.16
127.76	24.54	49.01	2.61	0.17
127.82	25.18	49.27	2.59	0.17
128.06	25.76	49.51	2.59	0.17
128.06	26.38	49.77	2.57	0.18
128.41	26.98	50.02	2.57	0.18
128.35	27.59	50.28	2.55	0.19

Triaxial #2 Grande

Dimensiones	
Diametro(cm)	7.21
Alto(cm)	14.47
A/D	2.01
Volumen(cm ³)	590.8

Densidad	
Peso humedo(gr)	1258.08
Peso seco(gr)	1076.3
Yh(g/cm ³)	2.13
Ys(g/cm ³)	1.82
Gs(g/cm ³)	2.8

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm ²)	1.4	σ_1 (Kg/cm ²)	4.77

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
45.97	64.29	61.61	17.14%	16.89%
37.52	73.26	68.16	16.64%	
682.43	1930.72	1779.79	13.75%	Humedad final

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm ²)	Esfuerzo(kg/cm ²)	Deformación
9.45	1.22	41.18	0.00	0.00
35.82	1.76	41.33	0.64	0.00
56.29	2.33	41.50	1.13	0.01
70.73	2.93	41.67	1.47	0.01
81.36	3.55	41.86	1.71	0.02
90.42	4.13	42.03	1.92	0.02
97.11	4.72	42.20	2.07	0.02
102.62	5.34	42.39	2.19	0.03
106.82	5.9	42.56	2.28	0.03
110.88	6.54	42.76	2.36	0.04
114.43	7.14	42.95	2.43	0.04
117.84	7.79	43.15	2.50	0.05
120.99	8.34	43.33	2.56	0.05
124.15	8.94	43.52	2.62	0.05
127.29	9.55	43.71	2.68	0.06
130.04	10.16	43.91	2.73	0.06
133.06	10.8	44.12	2.79	0.07
135.29	11.38	44.31	2.82	0.07
138.05	12.01	44.52	2.87	0.07
140.42	12.58	44.72	2.91	0.08
143.04	13.22	44.93	2.95	0.08
145.13	13.77	45.12	2.99	0.09
147.50	14.37	45.33	3.02	0.09
149.86	14.95	45.53	3.06	0.09
152.09	15.66	45.78	3.09	0.10
153.93	16.15	45.96	3.12	0.10
156.42	16.77	46.18	3.16	0.11
158.26	17.35	46.39	3.18	0.11
160.22	17.97	46.62	3.21	0.12

162.06	18.57	46.84	3.23	0.12
164.29	19.18	47.07	3.26	0.12
165.87	19.79	47.30	3.28	0.13
167.44	20.38	47.52	3.29	0.13
169.15	21.02	47.77	3.31	0.14
170.46	21.61	48.00	3.32	0.14
172.17	22.21	48.23	3.34	0.15
173.74	22.8	48.46	3.36	0.15
175.31	23.4	48.70	3.37	0.15
176.63	24.01	48.95	3.38	0.16
177.94	24.52	49.16	3.39	0.16
179.78	25.2	49.44	3.41	0.17
180.96	25.89	49.73	3.41	0.17
182.40	26.42	49.95	3.42	0.17
183.85	26.97	50.18	3.43	0.18
185.29	27.64	50.47	3.44	0.18
186.47	28.23	50.72	3.45	0.19
187.78	28.83	50.99	3.45	0.19
189.36	29.45	51.26	3.46	0.20
190.94	30.05	51.53	3.48	0.20
191.85	30.64	51.80	3.47	0.20
192.90	31.06	51.99	3.48	0.21
193.30	31.38	52.13	3.48	0.21
194.61	31.96	52.40	3.48	0.21
196.05	32.57	52.69	3.49	0.22
197.49	33.18	52.98	3.50	0.22
198.94	33.78	53.26	3.51	0.23
200.38	34.35	53.54	3.51	0.23
201.56	34.96	53.83	3.51	0.23
203.01	35.57	54.14	3.52	0.24
204.32	36.23	54.47	3.52	0.24
205.76	36.82	54.76	3.53	0.25
207.08	37.4	55.06	3.53	0.25
207.87	38	55.37	3.52	0.25
208.65	38.57	55.67	3.52	0.26
209.83	39.19	55.99	3.52	0.26
210.75	39.89	56.37	3.51	0.27
212.06	40.51	56.70	3.51	0.27
213.51	41.04	56.99	3.52	0.28
214.56	41.64	57.32	3.51	0.28
215.47	42.21	57.64	3.51	0.28
216.26	42.84	58.00	3.50	0.29
217.58	43.43	58.34	3.50	0.29
217.83	43.69	58.49	3.49	0.29
219.67	44.78	59.13	3.49	0.30
219.80	44.91	59.20	3.48	0.30
220.46	45.8	59.74	3.46	0.31

221.12	46.42	60.11	3.45	0.31
220.99	47.04	60.49	3.42	0.32
221.90	47.67	60.89	3.41	0.32
222.42	48.27	61.27	3.40	0.33
224.26	48.87	61.65	3.41	0.33
225.05	49.46	62.03	3.40	0.33
226.49	50.06	62.42	3.40	0.34
227.15	50.4	62.65	3.40	0.34
227.28	50.51	62.72	3.39	0.34
228.60	51.12	63.13	3.39	0.34
229.51	51.8	63.59	3.38	0.35
230.69	52.31	63.94	3.38	0.35
231.48	53.03	64.45	3.36	0.36
232.67	53.51	64.79	3.36	0.36
234.50	54.14	65.24	3.37	0.37
235.29	54.74	65.67	3.35	0.37
236.87	55.39	66.15	3.35	0.37
237.78	55.94	66.56	3.34	0.38
238.57	56.54	67.01	3.33	0.38
239.88	57.14	67.47	3.33	0.39
240.67	57.74	67.94	3.31	0.39
226.10	58.14	68.25	3.08	0.39

Triaxial #3 Grande

Dimensiones	
Diametro(cm)	7.16
Alto(cm)	14.48
A/D	2.02
Volumen(cm ³)	583.0

Densidad	
Peso humedo(gr)	1225.6
Peso seco(gr)	1026.6
Yh(g/cm ³)	2.10
Ys(g/cm ³)	1.76
Gs(g/cm ³)	2.8

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm ²)	2.8	σ_1 (Kg/cm ²)	8.34

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
8.72	48.11	41.84	18.93%	19.39%
8.5	61.89	53.05	19.84%	
592.22	1815.71	1654.81	15.14%	Humedad final

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm ²)	Esfuerzo(kg/cm ²)	Deformación
6.56	0.49	40.26	0.00	0.00
80.65	1.07	40.43	1.83	0.00
90.66	1.68	40.60	2.07	0.01
98.98	2.28	40.77	2.26	0.01
106.09	2.87	40.94	2.43	0.02
113.33	3.48	41.11	2.59	0.02
119.96	4.08	41.29	2.74	0.02
126.35	4.67	41.46	2.88	0.03
132.86	5.28	41.64	3.03	0.03
139.37	5.89	41.82	3.17	0.04
145.40	6.5	42.01	3.30	0.04
151.42	7.08	42.18	3.43	0.05
157.46	7.7	42.37	3.55	0.05
163.36	8.31	42.56	3.68	0.05
169.39	8.91	42.75	3.80	0.06
175.06	9.52	42.94	3.91	0.06
180.48	10.12	43.13	4.02	0.07
186.27	10.71	43.32	4.14	0.07
191.45	11.33	43.52	4.24	0.07
196.76	11.93	43.72	4.34	0.08
202.06	12.54	43.92	4.44	0.08
207.12	13.15	44.12	4.53	0.09
212.19	13.74	44.32	4.62	0.09
217.13	14.35	44.53	4.71	0.10
222.19	14.96	44.73	4.80	0.10
226.53	15.54	44.93	4.88	0.10
230.99	16.16	45.15	4.95	0.11
235.33	16.78	45.37	5.02	0.11
239.91	17.4	45.59	5.10	0.12

243.90	18	45.80	5.16	0.12
248.12	18.61	46.02	5.23	0.13
251.73	19.22	46.25	5.28	0.13
255.59	19.81	46.46	5.34	0.13
259.57	20.39	46.68	5.40	0.14
263.30	21.03	46.92	5.45	0.14
266.68	21.62	47.14	5.49	0.15
270.18	22.23	47.38	5.54	0.15
273.56	22.85	47.62	5.58	0.15
276.93	23.44	47.85	5.62	0.16
280.19	24.05	48.09	5.66	0.16
283.68	24.66	48.33	5.71	0.17
286.81	25.26	48.57	5.74	0.17
289.83	25.87	48.82	5.77	0.18
292.96	26.46	49.06	5.81	0.18
296.34	27.08	49.32	5.85	0.18
299.36	27.66	49.56	5.88	0.19
302.61	28.26	49.82	5.91	0.19
304.30	28.71	50.01	5.92	0.19
313.70	30.69	50.87	6.00	0.21
316.11	31.25	51.12	6.02	0.21
318.76	31.87	51.40	6.04	0.22
321.41	32.46	51.67	6.06	0.22
323.59	33.05	51.94	6.07	0.22
326.24	33.66	52.23	6.08	0.23
328.65	34.26	52.51	6.10	0.23
331.18	34.87	52.80	6.11	0.24
333.83	35.48	53.09	6.12	0.24
336.12	36.07	53.38	6.13	0.25
338.77	36.67	53.68	6.15	0.25
341.31	37.26	53.97	6.16	0.25
343.84	37.86	54.27	6.17	0.26
346.25	38.47	54.58	6.18	0.26
349.14	39.09	54.90	6.20	0.27

Triaxial #1 Pequeño

Dimensiones	
Diametro(cm)	3.575
Alto(cm)	7.156
A/D	2.00
Volumen(cm ³)	71.8

Densidad	
Peso humedo(gr)	145.06
Peso seco(gr)	120.9
Yh(g/cm ³)	2.02
Ys(g/cm ³)	1.68
Gs(g/cm ³)	2.85

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm ²)	0.7	σ_1 (Kg/cm ²)	3.54
μ (kg/cm ²)	0.11		

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
9.03	32.4	28.49	20.09%	20.00%
9.54	38.7	33.86	19.90%	
32.21	173.09	152.19	17.42%	Humedad final

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm ²)	Esfuerzo(kg/cm ²)	μ (kg/cm ²)	Deformación
0.00	0.00	10.04	0.00	0.00	0.00
6.13	0.20	10.07	0.61	0.1	0.00
8.26	0.40	10.09	0.82	0.12	0.01
9.85	0.60	10.12	0.97	0.14	0.01
10.94	0.80	10.15	1.08	0.15	0.01
12.26	1.00	10.18	1.20	0.17	0.01
12.96	1.20	10.21	1.27	0.19	0.02
13.70	1.40	10.24	1.34	0.22	0.02
14.08	1.60	10.27	1.37	0.25	0.02
14.51	1.80	10.30	1.41	0.26	0.03
14.99	2.00	10.33	1.45	0.27	0.03
15.38	2.20	10.36	1.49	0.27	0.03
15.75	2.40	10.39	1.52	0.27	0.03
16.07	2.60	10.42	1.54	0.27	0.04
16.48	2.80	10.45	1.58	0.28	0.04
16.80	3.00	10.48	1.60	0.28	0.04
17.05	3.20	10.51	1.62	0.28	0.04
17.51	3.40	10.54	1.66	0.28	0.05
17.84	3.60	10.57	1.69	0.28	0.05
18.24	3.80	10.60	1.72	0.28	0.05
18.55	4.00	10.63	1.74	0.29	0.06
18.89	4.20	10.66	1.77	0.29	0.06
19.25	4.40	10.70	1.80	0.29	0.06
19.56	4.60	10.73	1.82	0.29	0.06
20.00	4.80	10.76	1.86	0.29	0.07
20.59	5.00	10.79	1.91	0.30	0.07
21.28	5.20	10.82	1.97	0.30	0.07
21.56	5.40	10.86	1.99	0.30	0.08

22.01	5.60	10.89	2.02	0.30	0.08
22.50	5.80	10.92	2.06	0.30	0.08
22.93	6.00	10.96	2.09	0.30	0.08
23.86	6.20	10.99	2.17	0.29	0.09
24.36	6.40	11.02	2.21	0.28	0.09
25.02	6.60	11.06	2.26	0.27	0.09
25.72	6.80	11.09	2.32	0.26	0.10
26.42	7.00	11.13	2.37	0.25	0.10
26.90	7.20	11.16	2.41	0.25	0.10
27.41	7.40	11.20	2.45	0.24	0.10
27.84	7.60	11.23	2.48	0.23	0.11
28.17	7.80	11.27	2.50	0.22	0.11
28.46	8.00	11.30	2.52	0.21	0.11
28.75	8.20	11.34	2.54	0.20	0.11
29.30	8.40	11.37	2.58	0.19	0.12
29.68	8.60	11.41	2.60	0.18	0.12
30.01	8.80	11.45	2.62	0.18	0.12
30.29	9.00	11.48	2.64	0.17	0.13
30.32	9.20	11.52	2.63	0.16	0.13
30.61	9.40	11.56	2.65	0.16	0.13
30.81	9.60	11.59	2.66	0.15	0.13
31.01	9.80	11.63	2.67	0.14	0.14
31.47	10.00	11.67	2.70	0.14	0.14
31.75	10.20	11.71	2.71	0.13	0.14
32.29	10.40	11.74	2.75	0.12	0.15
32.97	10.60	11.78	2.80	0.12	0.15
33.57	10.80	11.82	2.84	0.11	0.15
33.99	11.00	11.86	2.87	0.11	0.15
34.63	11.20	11.90	2.91	0.10	0.16
34.94	11.40	11.94	2.93	0.10	0.16
35.32	11.60	11.98	2.95	0.10	0.16
35.63	11.80	12.02	2.96	0.10	0.16
35.81	12.00	12.06	2.97	0.10	0.17
36.10	12.20	12.10	2.98	0.09	0.17
36.34	12.40	12.14	2.99	0.09	0.17
36.68	12.60	12.18	3.01	0.09	0.18
37.17	12.80	12.22	3.04	0.09	0.18
37.77	13.00	12.27	3.08	0.09	0.18
38.20	13.20	12.31	3.10	0.08	0.18
38.64	13.40	12.35	3.13	0.08	0.19
38.90	13.60	12.39	3.14	0.08	0.19
39.07	13.80	12.44	3.14	0.08	0.19
39.36	14.00	12.48	3.15	0.08	0.20
39.54	14.20	12.52	3.16	0.07	0.20
39.61	14.40	12.57	3.15	0.07	0.20
39.73	14.60	12.61	3.15	0.07	0.20

Triaxial #2 Pequeño

Dimensiones	
Diametro(cm)	3.56
Alto(cm)	7.13
A/D	2.01
Volumen(cm ³)	70.8

Densidad	
Peso humedo(gr)	145.31
Peso seco(gr)	124.6
Yh(g/cm ³)	2.05
Ys(g/cm ³)	1.76
Gs(g/cm ³)	2.85

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm ²)	1.4	σ_1 (Kg/cm ²)	5.21
μ (kg/cm ²)	0.19		

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
50.95	96.54	88.88	20.20%	20.08%
45.64	83.42	77.13	19.97%	
47.33	188.95	168.8	16.59%	Humedad final

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm ²)	Esfuerzo(kg/cm ²)	μ (kg/cm ²)	Deformación
8.71	0.80	10.04	0.00	0.00	0.00
19.26	1.00	10.07	1.05	0.30	0.00
30.54	1.20	10.10	2.16	0.40	0.01
38.56	1.40	10.12	2.94	0.42	0.01
41.85	1.60	10.15	3.25	0.45	0.01
43.15	1.80	10.18	3.37	0.46	0.01
44.08	2.00	10.21	3.45	0.47	0.02
44.52	2.20	10.24	3.48	0.48	0.02
44.82	2.40	10.27	3.50	0.49	0.02
45.06	2.60	10.30	3.51	0.49	0.03
45.12	2.80	10.33	3.50	0.49	0.03
45.26	3.00	10.36	3.50	0.49	0.03
45.38	3.20	10.39	3.50	0.49	0.03
45.47	3.40	10.42	3.50	0.51	0.04
45.46	3.60	10.45	3.48	0.52	0.04
45.42	3.80	10.48	3.46	0.51	0.04
45.58	4.00	10.52	3.47	0.49	0.04
45.75	4.20	10.55	3.47	0.47	0.05
45.89	4.40	10.58	3.47	0.46	0.05
46.09	4.60	10.61	3.48	0.44	0.05
46.29	4.80	10.64	3.48	0.43	0.06
46.45	5.00	10.67	3.48	0.42	0.06
46.64	5.20	10.71	3.49	0.41	0.06
46.88	5.40	10.74	3.50	0.40	0.06
47.18	5.60	10.77	3.51	0.39	0.07
47.55	5.80	10.80	3.53	0.38	0.07

47.92	6.00	10.84	3.55	0.37	0.07
47.98	6.20	10.87	3.55	0.36	0.08
48.27	6.40	10.90	3.56	0.35	0.08
48.52	6.60	10.94	3.57	0.34	0.08
48.29	6.80	10.97	3.53	0.33	0.08
48.22	7.00	11.01	3.51	0.32	0.09
48.05	7.20	11.04	3.48	0.32	0.09
48.18	7.40	11.08	3.48	0.31	0.09
48.35	7.60	11.11	3.48	0.30	0.10
48.99	7.80	11.15	3.53	0.30	0.10
49.24	8.00	11.18	3.54	0.29	0.10
49.48	8.20	11.22	3.54	0.28	0.10
49.80	8.40	11.25	3.56	0.28	0.11
50.07	8.60	11.29	3.57	0.27	0.11
50.52	8.80	11.32	3.59	0.27	0.11
51.01	9.00	11.36	3.62	0.26	0.12
51.29	9.20	11.40	3.63	0.26	0.12
51.67	9.40	11.43	3.65	0.26	0.12
52.02	9.60	11.47	3.67	0.25	0.12
52.10	9.80	11.51	3.66	0.25	0.13
52.38	10.00	11.55	3.67	0.24	0.13
52.80	10.20	11.58	3.69	0.24	0.13
53.28	10.40	11.62	3.72	0.24	0.13
53.55	10.60	11.66	3.73	0.23	0.14
54.06	10.80	11.70	3.75	0.23	0.14
54.34	11.00	11.74	3.76	0.23	0.14
54.73	11.20	11.78	3.78	0.22	0.15
55.08	11.40	11.81	3.79	0.22	0.15
55.10	11.60	11.85	3.78	0.22	0.15
55.65	11.80	11.89	3.81	0.21	0.15
55.50	12.00	11.93	3.78	0.21	0.16
55.68	12.20	11.97	3.78	0.21	0.16
55.76	12.40	12.02	3.77	0.20	0.16
55.92	12.60	12.06	3.77	0.20	0.17
56.02	12.80	12.10	3.76	0.20	0.17
56.14	13.00	12.14	3.76	0.20	0.17
56.60	13.20	12.18	3.78	0.19	0.17
56.72	13.40	12.22	3.77	0.19	0.18
56.74	13.57	12.26	3.76	0.19	0.18

Triaxial #3 Pequeño

Dimensiones	
Diametro(cm)	3.55
Alto(cm)	7.1
A/D	2.00
Volumen(cm ³)	70.3

Densidad	
Peso humedo(gr)	145.97
Peso seco(gr)	123.2
Yh(g/cm ³)	2.08
Ys(g/cm ³)	1.75
Gs(g/cm ³)	2.85

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm ²)	2.8	σ_1 (Kg/cm ²)	9.02
μ (kg/cm ²)	0.32		

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
50.95	81.09	76.32	18.80%	18.47%
50.26	87.11	81.45	18.15%	
43.59	187.57	167.11	16.56%	Humedad final

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm ²)	Esfuerzo(kg/cm ²)	μ (kg/cm ²)	Deformación
1.23	0.40	9.95	0.00	0.00	0.00
39.29	0.50	9.97	3.82	0.20	0.00
42.72	0.60	9.98	4.16	0.25	0.00
44.85	0.70	10.00	4.36	0.30	0.00
46.05	0.80	10.01	4.48	0.35	0.01
46.51	0.90	10.03	4.52	0.40	0.01
47.07	1.00	10.04	4.56	0.45	0.01
47.71	1.10	10.05	4.62	0.50	0.01
48.23	1.20	10.07	4.67	0.52	0.01
48.49	1.30	10.08	4.69	0.55	0.01
48.84	1.40	10.10	4.71	0.58	0.01
49.19	1.50	10.11	4.74	0.59	0.02
49.93	1.60	10.13	4.81	0.60	0.02
50.50	1.70	10.14	4.86	0.61	0.02
50.78	1.80	10.16	4.88	0.62	0.02
50.94	1.90	10.17	4.89	0.62	0.02
51.65	2.00	10.18	4.95	0.63	0.02
51.95	2.10	10.20	4.97	0.64	0.02
52.17	2.20	10.21	4.98	0.65	0.03
52.73	2.30	10.23	5.03	0.65	0.03
52.98	2.40	10.24	5.05	0.66	0.03
53.29	2.50	10.26	5.07	0.66	0.03
53.87	2.60	10.27	5.12	0.67	0.03
54.17	2.70	10.29	5.14	0.67	0.03
54.51	2.80	10.30	5.17	0.68	0.03
54.92	2.90	10.32	5.20	0.68	0.04
55.38	3.00	10.33	5.23	0.68	0.04
55.69	3.10	10.35	5.26	0.69	0.04

56.21	3.20	10.37	5.30	0.69	0.04
56.48	3.30	10.38	5.32	0.69	0.04
56.80	3.40	10.40	5.34	0.70	0.04
57.34	3.50	10.41	5.38	0.70	0.04
57.49	3.60	10.43	5.39	0.70	0.05
57.76	3.70	10.44	5.41	0.70	0.05
58.08	3.80	10.46	5.43	0.70	0.05
58.35	3.90	10.47	5.45	0.70	0.05
58.92	4.00	10.49	5.49	0.70	0.05
59.12	4.10	10.50	5.50	0.71	0.05
59.59	4.20	10.52	5.54	0.71	0.05
59.90	4.30	10.54	5.56	0.71	0.05
60.17	4.40	10.55	5.58	0.71	0.06
60.36	4.50	10.57	5.59	0.71	0.06
60.57	4.60	10.58	5.60	0.71	0.06
60.95	4.70	10.60	5.63	0.70	0.06
61.35	4.80	10.62	5.66	0.70	0.06
61.78	4.90	10.63	5.69	0.70	0.06
62.12	5.00	10.65	5.71	0.70	0.06
62.45	5.10	10.66	5.73	0.70	0.07
62.76	5.20	10.68	5.75	0.70	0.07
63.23	5.30	10.70	5.79	0.69	0.07
63.61	5.40	10.71	5.81	0.69	0.07
63.96	5.50	10.73	5.84	0.69	0.07
64.10	5.60	10.75	5.84	0.69	0.07
64.23	5.70	10.76	5.84	0.68	0.07
64.58	5.80	10.78	5.87	0.68	0.08
64.95	5.90	10.80	5.89	0.68	0.08
65.11	6.00	10.81	5.90	0.67	0.08
65.27	6.10	10.83	5.90	0.67	0.08
65.50	6.20	10.85	5.92	0.67	0.08
65.72	6.30	10.86	5.93	0.66	0.08
65.93	6.40	10.88	5.94	0.66	0.08
66.07	6.50	10.90	5.94	0.65	0.09
66.58	6.60	10.91	5.98	0.65	0.09
66.85	6.70	10.93	5.99	0.65	0.09
67.21	6.80	10.95	6.02	0.64	0.09
67.36	6.90	10.96	6.02	0.64	0.09
67.49	7.00	10.98	6.02	0.63	0.09
67.41	7.10	11.00	6.01	0.63	0.09
67.69	7.20	11.01	6.02	0.62	0.10
67.74	7.30	11.03	6.02	0.62	0.10
67.70	7.40	11.05	6.00	0.62	0.10
67.63	7.50	11.07	5.99	0.61	0.10
67.70	7.60	11.08	5.98	0.61	0.10
67.80	7.70	11.10	5.98	0.60	0.10
68.10	7.80	11.12	6.00	0.60	0.10

68.20	7.90	11.14	6.00	0.60	0.11
68.50	8.00	11.15	6.02	0.59	0.11
68.88	8.10	11.17	6.04	0.59	0.11
68.89	8.20	11.19	6.03	0.58	0.11
69.28	8.30	11.21	6.06	0.58	0.11
69.48	8.40	11.23	6.07	0.57	0.11
69.78	8.50	11.24	6.08	0.57	0.11
69.99	8.60	11.26	6.09	0.56	0.12
70.12	8.70	11.28	6.09	0.56	0.12
70.12	8.80	11.30	6.08	0.56	0.12
70.32	8.90	11.32	6.09	0.55	0.12
70.51	9.00	11.33	6.10	0.55	0.12
70.69	9.10	11.35	6.10	0.54	0.12
70.98	9.20	11.37	6.12	0.54	0.12
70.84	9.30	11.39	6.10	0.53	0.13
71.13	9.40	11.41	6.11	0.53	0.13
71.48	9.50	11.43	6.13	0.52	0.13
71.68	9.60	11.45	6.14	0.52	0.13
71.97	9.70	11.46	6.15	0.51	0.13
72.23	9.80	11.48	6.17	0.51	0.13
72.39	9.90	11.50	6.17	0.50	0.13
72.58	10.00	11.52	6.18	0.50	0.14
72.90	10.10	11.54	6.19	0.50	0.14
73.07	10.20	11.56	6.20	0.49	0.14
73.24	10.30	11.58	6.20	0.49	0.14
73.50	10.40	11.60	6.21	0.48	0.14
73.82	10.50	11.62	6.23	0.48	0.14
73.99	10.60	11.64	6.24	0.47	0.14
74.08	10.70	11.65	6.23	0.47	0.15
74.15	10.80	11.67	6.23	0.46	0.15
74.07	10.90	11.69	6.21	0.46	0.15
74.27	11.00	11.71	6.22	0.46	0.15
74.37	11.10	11.73	6.22	0.45	0.15
74.35	11.20	11.75	6.20	0.45	0.15
74.20	11.30	11.77	6.18	0.44	0.15
74.55	11.40	11.79	6.20	0.44	0.15
74.65	11.50	11.81	6.20	0.43	0.16
74.86	11.60	11.83	6.20	0.43	0.16
75.22	11.70	11.85	6.22	0.43	0.16
75.28	11.80	11.87	6.22	0.42	0.16
75.50	11.90	11.89	6.23	0.42	0.16
75.74	12.00	11.91	6.24	0.41	0.16
75.86	12.10	11.93	6.23	0.41	0.16
76.00	12.20	11.95	6.24	0.41	0.17
76.12	12.30	11.97	6.23	0.40	0.17
76.24	12.40	11.99	6.23	0.40	0.17
76.28	12.50	12.01	6.23	0.40	0.17

76.21	12.60	12.03	6.21	0.39	0.17
76.24	12.70	12.05	6.20	0.39	0.17
76.07	12.80	12.07	6.18	0.38	0.17
76.33	12.90	12.10	6.19	0.38	0.18
76.37	13.00	12.12	6.18	0.38	0.18
76.47	13.10	12.14	6.18	0.37	0.18
76.68	13.20	12.16	6.18	0.37	0.18
76.91	13.30	12.18	6.19	0.37	0.18
76.94	13.40	12.20	6.18	0.36	0.18
76.97	13.50	12.22	6.17	0.36	0.18
77.00	13.60	12.24	6.17	0.35	0.19
77.09	13.70	12.26	6.16	0.35	0.19
77.15	13.80	12.29	6.16	0.35	0.19
77.09	13.90	12.31	6.14	0.34	0.19
77.20	14.00	12.33	6.14	0.34	0.19
77.28	14.10	12.35	6.13	0.34	0.19
77.54	14.20	12.37	6.14	0.33	0.19
77.69	14.30	12.39	6.14	0.33	0.20
78.16	14.40	12.42	6.17	0.33	0.20
78.51	14.50	12.44	6.19	0.32	0.20
78.73	14.60	12.46	6.19	0.32	0.20
78.88	14.65	12.47	6.20	0.32	0.20

Triaxial #4 Pequeño

Dimensiones	
Diametro(cm)	3.58
Alto(cm)	7.2
A/D	2.01
Volumen(cm3)	72.5

Densidad	
Peso humedo(gr)	145.02
Peso seco(gr)	119.8
Yh(g/cm3)	2.00
Ys(g/cm3)	1.65
Gs(g/cm3)	2.85

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm2)	0.5	σ_1 (Kg/cm2)	2.77
μ (kg/cm2)	0.09		

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
44.91	88.9	81.45	20.39%	21.07%
57.42	90.9	84.92	21.75%	
45.64	188.54	167.9	16.88%	Humedad final

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm2)	Esfuerzo(kg/cm2)	μ (kg/cm2)	Deformación
0.95	0.80	10.18	0.00	0.00	0.00
13.81	1.00	10.21	1.26	0.09	0.00
13.67	1.20	10.24	1.24	0.15	0.01
14.15	1.40	10.27	1.29	0.17	0.01
14.49	1.60	10.29	1.31	0.17	0.01
14.82	1.80	10.32	1.34	0.17	0.01
16.46	2.00	10.35	1.50	0.16	0.02
17.87	2.20	10.38	1.63	0.16	0.02
18.86	2.40	10.41	1.72	0.15	0.02
19.70	2.60	10.44	1.79	0.15	0.02
20.34	2.80	10.47	1.85	0.15	0.03
20.92	3.00	10.50	1.90	0.15	0.03
21.32	3.20	10.53	1.93	0.15	0.03
21.69	3.40	10.56	1.96	0.15	0.04
21.89	3.60	10.60	1.97	0.14	0.04
22.17	3.80	10.63	1.99	0.14	0.04
22.41	4.00	10.66	2.01	0.14	0.04
22.59	4.20	10.69	2.02	0.14	0.05
22.94	4.40	10.72	2.05	0.13	0.05
23.25	4.60	10.75	2.07	0.13	0.05
23.56	4.80	10.78	2.09	0.13	0.06
23.79	5.00	10.82	2.11	0.12	0.06
23.96	5.20	10.85	2.12	0.12	0.06
24.09	5.40	10.88	2.12	0.12	0.06
24.14	5.60	10.91	2.12	0.12	0.07
24.33	5.80	10.95	2.13	0.12	0.07
24.63	6.00	10.98	2.15	0.12	0.07
24.95	6.20	11.01	2.17	0.12	0.07

25.38	6.40	11.05	2.20	0.12	0.08
25.70	6.60	11.08	2.23	0.11	0.08
25.91	6.80	11.12	2.24	0.10	0.08
26.17	7.00	11.15	2.25	0.10	0.09
26.40	7.20	11.18	2.27	0.09	0.09
26.50	7.40	11.22	2.27	0.09	0.09
26.51	7.60	11.25	2.26	0.08	0.09
26.48	7.80	11.29	2.25	0.08	0.10
26.36	8.00	11.32	2.23	0.07	0.10
26.34	8.20	11.36	2.23	0.06	0.10
26.21	8.40	11.40	2.21	0.06	0.11
26.12	8.60	11.43	2.19	0.05	0.11
26.09	8.80	11.47	2.18	0.05	0.11
26.15	9.00	11.50	2.18	0.05	0.11
26.27	9.20	11.54	2.18	0.05	0.12
26.26	9.40	11.58	2.17	0.05	0.12
26.19	9.60	11.61	2.16	0.05	0.12
26.07	9.80	11.65	2.14	0.05	0.12
25.96	10.00	11.69	2.13	0.05	0.13
25.92	10.20	11.73	2.12	0.04	0.13
25.93	10.40	11.77	2.11	0.04	0.13
25.94	10.60	11.80	2.10	0.04	0.14
26.17	10.80	11.84	2.12	0.04	0.14
26.48	11.00	11.88	2.14	0.04	0.14
26.72	11.20	11.92	2.15	0.04	0.14
26.69	11.40	11.96	2.14	0.04	0.15
26.80	11.60	12.00	2.14	0.04	0.15
26.71	11.80	12.04	2.13	0.04	0.15
26.58	12.00	12.08	2.11	0.04	0.16
26.55	12.20	12.12	2.10	0.03	0.16
26.41	12.40	12.16	2.08	0.03	0.16
26.35	12.60	12.20	2.07	0.03	0.16
26.42	12.80	12.24	2.06	0.03	0.17
26.42	13.00	12.28	2.06	0.03	0.17
26.32	13.20	12.33	2.04	0.03	0.17
26.40	13.40	12.37	2.04	0.03	0.17
26.36	13.60	12.41	2.03	0.03	0.18
26.41	13.80	12.45	2.03	0.03	0.18
26.43	14.00	12.50	2.02	0.03	0.18
26.51	14.20	12.54	2.02	0.02	0.19
26.29	14.40	12.58	2.00	0.02	0.19
26.04	14.60	12.63	1.97	0.02	0.19
26.00	14.80	12.67	1.96	0.02	0.19
26.24	15.00	12.71	1.97	0.02	0.20
26.32	15.20	12.76	1.97	0.02	0.20
26.36	15.40	12.80	1.97	0.02	0.20
26.33	15.60	12.85	1.96	0.02	0.21

26.35	15.80	12.90	1.95	0.02	0.21
26.35	16.00	12.94	1.94	0.02	0.21

Triaxial #5 Pequeño

Dimensiones	
Diametro(cm)	3.565
Alto(cm)	7.35
A/D	2.06
Volumen(cm3)	73.4

Densidad	
Peso humedo(gr)	145.85
Peso seco(gr)	121.7
Yh(g/cm3)	1.99
Ys(g/cm3)	1.66
Gs(g/cm3)	2.85

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm2)	1	σ_1 (Kg/cm2)	4.04
μ (kg/cm2)	0.15		

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
56.52	90.81	85.12	19.90%	19.82%
64.59	99.41	93.67	19.74%	
63.15	85.29	82.11	16.77%	Humedad final

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm2)	Esfuerzo(kg/cm2)	μ (kg/cm2)	Deformación
0.32	0.20	10.01	0.00	0.00	0.00
17.68	0.40	10.04	1.73	0.10	0.00
17.74	0.60	10.06	1.73	0.20	0.01
18.09	0.80	10.09	1.76	0.25	0.01
18.51	1.00	10.12	1.80	0.28	0.01
19.02	1.20	10.15	1.84	0.30	0.01
19.68	1.40	10.18	1.90	0.31	0.02
20.33	1.60	10.20	1.96	0.31	0.02
21.11	1.80	10.23	2.03	0.32	0.02
21.94	2.00	10.26	2.11	0.33	0.02
22.62	2.20	10.29	2.17	0.34	0.03
23.30	2.40	10.32	2.23	0.34	0.03
23.87	2.60	10.35	2.28	0.34	0.03
24.53	2.80	10.38	2.33	0.33	0.04
25.51	3.00	10.41	2.42	0.32	0.04
25.90	3.20	10.44	2.45	0.31	0.04
25.72	3.40	10.47	2.43	0.30	0.04
25.83	3.60	10.50	2.43	0.30	0.05
25.82	3.80	10.53	2.42	0.29	0.05
25.86	4.00	10.56	2.42	0.28	0.05
26.13	4.20	10.59	2.44	0.27	0.05
27.79	4.40	10.62	2.59	0.26	0.06
28.37	4.60	10.65	2.63	0.26	0.06
28.75	4.80	10.68	2.66	0.26	0.06
29.05	5.00	10.71	2.68	0.25	0.07
29.21	5.20	10.74	2.69	0.25	0.07
29.38	5.40	10.77	2.70	0.24	0.07
29.63	5.60	10.81	2.71	0.23	0.07

29.89	5.80	10.84	2.73	0.22	0.08
30.18	6.00	10.87	2.74	0.21	0.08
30.45	6.20	10.90	2.76	0.20	0.08
30.81	6.40	10.93	2.79	0.19	0.08
30.99	6.60	10.97	2.79	0.19	0.09
31.15	6.80	11.00	2.80	0.19	0.09
31.56	7.00	11.03	2.83	0.18	0.09
31.99	7.20	11.07	2.86	0.18	0.10
32.54	7.40	11.10	2.90	0.18	0.10
32.88	7.60	11.13	2.92	0.17	0.10
33.08	7.80	11.17	2.93	0.17	0.10
33.34	8.00	11.20	2.95	0.17	0.11
33.56	8.20	11.24	2.96	0.17	0.11
33.80	8.40	11.27	2.97	0.17	0.11
34.00	8.60	11.30	2.98	0.17	0.11
34.21	8.80	11.34	2.99	0.16	0.12
34.34	9.00	11.37	2.99	0.16	0.12
34.35	9.20	11.41	2.98	0.16	0.12
34.26	9.40	11.45	2.96	0.16	0.13
34.42	9.60	11.48	2.97	0.16	0.13
34.60	9.80	11.52	2.97	0.16	0.13
34.89	10.00	11.55	2.99	0.15	0.13
35.10	10.20	11.59	3.00	0.15	0.14
35.22	10.40	11.63	3.00	0.15	0.14
35.42	10.60	11.66	3.01	0.15	0.14
35.62	10.80	11.70	3.01	0.15	0.14
36.01	11.00	11.74	3.04	0.16	0.15
36.17	11.20	11.78	3.04	0.15	0.15
36.37	11.40	11.81	3.05	0.15	0.15
36.44	11.60	11.85	3.04	0.15	0.16
36.52	11.80	11.89	3.04	0.15	0.16
36.74	12.00	11.93	3.05	0.15	0.16
37.01	12.20	11.97	3.06	0.14	0.16
37.18	12.40	12.01	3.06	0.14	0.17
37.29	12.60	12.05	3.06	0.14	0.17
37.46	12.80	12.09	3.07	0.13	0.17
37.64	13.00	12.13	3.07	0.13	0.17
37.86	13.20	12.17	3.08	0.12	0.18
38.00	13.40	12.21	3.08	0.12	0.18
38.28	13.60	12.25	3.09	0.11	0.18
38.77	13.80	12.29	3.12	0.11	0.19
39.03	14.00	12.33	3.13	0.10	0.19
39.20	14.20	12.37	3.14	0.09	0.19
39.36	14.40	12.41	3.14	0.09	0.19
39.56	14.60	12.46	3.14	0.08	0.20
39.61	14.80	12.50	3.14	0.08	0.20

Triaxial #6 Pequeño

Dimensiones	
Diametro(cm)	3.59
Alto(cm)	7.21
A/D	2.01
Volumen(cm ³)	73.0

Densidad	
Peso humedo(gr)	147.31
Peso seco(gr)	123.0
Yh(g/cm ³)	2.02
Ys(g/cm ³)	1.69
Gs(g/cm ³)	2.85

Esfuerzos			
σ_3 (Kg/cm ²)	2	σ_1 (Kg/cm ²)	7.84
μ (kg/cm ²)	0.26		

Humedad				
Peso Tarro	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad	Humedad Prom
50.34	80.13	75.3	19.35%	19.73%
51.12	90.13	83.6	20.10%	
49.12	85.12	80.12	16.13%	Humedad final

Carga (Kg)	Desplazamiento (mm)	Área (cm ²)	Esfuerzo(kg/cm ²)	μ (kg/cm ²)	Deformación
1.68	0.00	10.12	0.00	0	0.00
12.71	0.99	10.16	1.25	0.2	0.00
19.86	1.52	10.21	1.95	0.3	0.01
23.20	2.12	10.25	2.26	0.35	0.01
27.02	2.68	10.29	2.63	0.4	0.02
29.08	3.28	10.34	2.81	0.425	0.02
30.66	3.87	10.38	2.95	0.45	0.02
32.29	4.45	10.42	3.10	0.42	0.03
33.96	5.05	10.47	3.24	0.43	0.03
35.62	5.65	10.51	3.39	0.44	0.04
37.16	6.25	10.56	3.52	0.42	0.04
38.70	6.87	10.60	3.65	0.41	0.05
40.25	7.75	10.65	3.78	0.41	0.05
41.76	8.09	10.70	3.90	0.41	0.05
43.30	8.74	10.75	4.03	0.41	0.06
44.74	9.23	10.80	4.14	0.41	0.06
46.13	9.90	10.84	4.25	0.4	0.07
47.61	10.49	10.89	4.37	0.39	0.07
48.94	11.09	10.94	4.47	0.38	0.07
50.29	11.68	10.99	4.58	0.38	0.08
51.65	12.29	11.04	4.68	0.37	0.08
52.94	12.89	11.09	4.77	0.37	0.09
54.23	13.51	11.14	4.87	0.36	0.09
55.50	14.12	11.19	4.96	0.35	0.10
56.79	14.74	11.25	5.05	0.35	0.10
57.90	15.34	11.30	5.13	0.34	0.10

59.04	15.94	11.35	5.20	0.34	0.11
60.15	16.65	11.41	5.27	0.33	0.11
61.32	17.18	11.46	5.35	0.32	0.12
62.34	17.81	11.51	5.41	0.31	0.12
63.42	18.41	11.57	5.48	0.31	0.13
64.34	19.03	11.63	5.53	0.3	0.13
65.33	19.65	11.68	5.59	0.3	0.13
66.35	20.27	11.74	5.65	0.3	0.14
67.30	20.87	11.80	5.71	0.29	0.14
68.16	21.49	11.85	5.75	0.28	0.15
69.06	22.10	11.91	5.80	0.27	0.15
69.92	22.72	11.97	5.84	0.26	0.15
70.78	23.35	12.03	5.88	0.26	0.16
71.62	23.94	12.09	5.92	0.26	0.16
72.51	24.54	12.15	5.97	0.25	0.17
73.31	25.18	12.21	6.00	0.25	0.17
74.08	25.76	12.27	6.04	0.24	0.18
74.88	26.38	12.33	6.07	0.24	0.18
75.65	26.98	12.40	6.10	0.23	0.18
76.28	27.59	12.46	6.12	0.23	0.19