

# DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE IN SITU DE LOS SUELOS EN ZONAS DE PELIGRO SÍSMICO

## SOIL SHEAR STRENGTH IN SITU OF SEISMIC DANGER AREAS

Hugo Bonifaz García<sup>1</sup>, Byron Morales Muñoz<sup>2</sup>, Diego Guadalupe Madonado<sup>3</sup>

1 Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador, hfbonifaz@espe.edu.ec

2 Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador, bomorales1@espe.edu.ec

3 Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador, dieguitogm\_18@hotmail.com

### RESUMEN

*El uso de los ensayos in situ para conocer los parámetros de corte de los suelos, como el ensayo triaxial y corte directo son métodos indirectos en que las muestras inalteradas de suelo in situ son transportadas y manipuladas en laboratorio, esto puede generar pérdidas en la propiedades índice y generar microfisuras para la evaluación del ensayo. En este tema de investigación se da a conocer el ensayo de ficómetro que es un equipo de exploración geotécnica, un ensayo directo que permite obtener los parámetros de corte del suelo in situ principalmente en suelos de difícil muestreo como arenas, suelos duros, tobas, rellenos compactados y rocas blandas. El uso del ficómetro en suelos de difícil muestreo del Nororiente de Quito se reciente, por lo que es necesario llevar a cabo calibraciones de los parámetros de resistencia al corte de los suelos obtenidos con esta técnica cohesión y ángulo de fricción interna ( $c$ ,  $\phi$ ) con los de pruebas triaxiales convencionales o de corte directo a fin de establecer su intervalo de aplicación y tener mayor certidumbre y confianza con esta prueba. En este trabajo se muestran los datos obtenidos del ensayo de ficómetro en el Nororiente de la ciudad de Quito y su correlación con resultados del ensayo de corte directo y triaxial UU, donde se observa una correlación alta con la prueba de corte directo y en menor grado con triaxial UU.*

*Se propone mediante los ensayos realizados un nuevo ensayo para la determinación de los parámetros de corte del suelo como método directo.*

**Palabras Clave:** Ficómetro, Cohesión, Ángulo de Fricción Interna, Triaxial UU, Corte Directo

## ABSTRACT

*The use of test in situ soil to know the shear parameters of soil, such as triaxial test and direct shear are indirect methods in which the undisturbed specimen of soil are transported and handled in the laboratory, this may generate losses to the index properties and generate fissure for test evaluation. In this investigation makes know the Phicometer test such as a geotechnical exploration, Phicometer is a direct test to allow obtaining the shear parameters in situ mainly in difficult soil such as sand, hard soil, tufas, backfilling and loose rock. The use of the Phicometer on difficult specimen's soils of the Northeastern Quito is recently so, and it is necessary to perform calibrations of the resistance parameters obtained with this technique Soil friction angle ( $\phi$ ) and soil cohesion ( $c$ ) with the conventional triaxial tests and direct shear test to establish its interval of application and have greater certainty and confidence with this test. In this paper we expose works of implementation of Phicometer in soils of Northeastern of Quito.*

*It's proposed to know Phicometer test by the survey soil test on the Northeastern of Quito to determine the shear parameters.*

**KeyWords:** Phicometer, Cohesion, Soil Friction Angle, Triaxial Test, Direct Shear Test

## 1. INTRODUCCIÓN

Históricamente en la ciudad de Quito se ha tenido fallas por corte como por ejemplo, falla de muro de contención en la avenida Eloy Alfaro; sector La Carolina año 2013, viviendas en el centro histórico que requieren de muros de contención, falla en el muro de contención ubicado en el lado oeste del lindero de la Estación del Tren en Chimbacalle.

Muchos de estos materiales existentes no permiten tomar muestras inalteradas, por lo que es necesario medir directamente en el sitio de evaluación.

La resistencia al corte de suelos, representado por el ángulo de fricción y la cohesión del modelo Mohr-Coulomb, un parámetro fundamental para geotécnica. Desempeña un papel vital en el estudio de capacidad de carga, estabilidad de taludes y presiones laterales sobre estructuras de contención de suelo.

Por lo general, la resistencia al corte se mide en el laboratorio utilizando ensayos triaxiales UU o ensayos de corte directo efectuados en muestras de campo. Esta medida sólo tiene sentido si el muestreo, conservación y preparación hacen lo posible para considerar a la muestra como inalterada y por lo tanto los especímenes de ensayo como suficientemente representativos.

En esta investigación se va a comparar los resultados de la prueba del ficómetro con el ensayo triaxial UU (no consolidado-no drenado) debido a que los sitios de investigación realizados en el presente proyecto de grado presentan situaciones en las que no hay drenaje y el análisis del triaxial UU está en función de esfuerzos totales y parámetros geomecánicos determinados in situ para estabilidad a corto plazo.

Muchos tipos de suelo y de los materiales no cumplen con estas condiciones de muestreo. Entre estos, es posible citar arena de grano fino, suelos blandos (ceniza volcánica, arenisca), suelos gruesos y suelos heterogéneos (gravas, arcilla, roca descompuesta, etc.) y con diversos materiales (relleno).

En el caso de tales suelos y materiales, el ensayo del ficómetro in situ permite una medición direccional y horizontal muy útil de la resistencia límite al corte y la determinación de los parámetros habituales  $C$  y  $\phi$  del modelo Mohr-Coulomb en términos de esfuerzos totales, el ensayo evita la alteración de las condiciones naturales del suelo por muestreo y transporte, realizando en condiciones reales "in situ"

Los resultados del ensayo ficómetro, permiten entender el comportamiento mecánico de los suelos, a partir de lo cual se pueden tomar decisiones de ingeniería para diseño y para construcción.

Los resultados de la prueba del ficómetro y del ensayo triaxial UU se correlacionan mediante la resistencia al corte obtenido de cada ensayo

El objetivo general de esta investigación es introducir una nueva técnica de ensayo para la determinación de los parámetros de resistencia al corte como método directo que elimina la incertidumbre de la alteración del suelo durante el muestreo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Descripción del Ficómetro

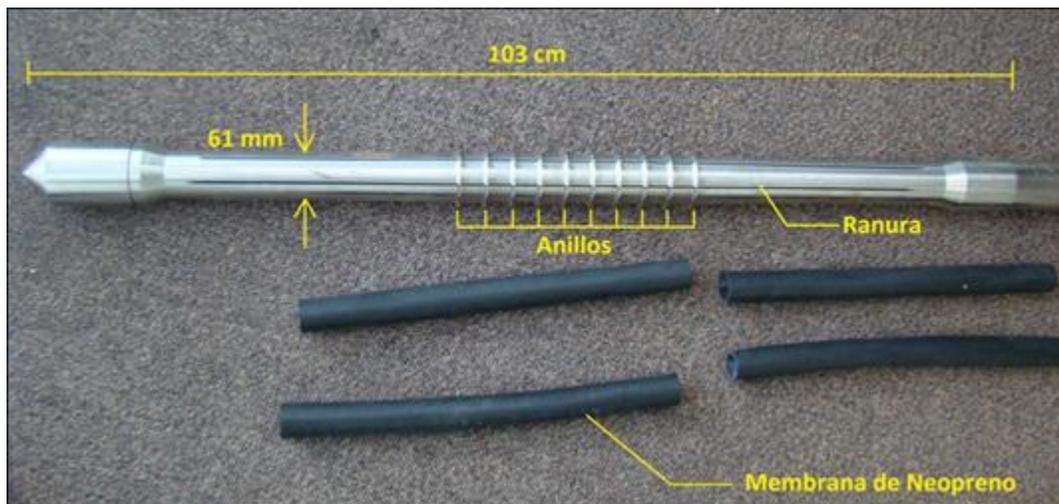
El Ficómetro es un equipo de exploración geotécnica aplicable en arenas, suelos duros, tobas, rellenos compactados y rocas blandas.

El Ficómetro consta de:

- Sonda del ficómetro
- Tubería de perforación
- Equipo superficial

#### 2.1.1 Sonda del ficómetro

La sonda del ficómetro consiste en una coraza cilíndrica de acero hueca y denticulada con 10 anillos de 5 mm de espesor; cuenta con una longitud de 103 cm y diámetro de 61 mm. Radialmente tiene seis ranuras longitudinales que le permiten expandirse al inflar una membrana de neopreno ubicada en el interior de la sonda. La membrana se infla inyectando agua a presión mediante un tanque de nitrógeno líquido. La presión se regula a través de la unidad de control.



**Figura 1. Sonda del ficómetro**

#### 2.1.2 Equipo de Conexión

La Tubería de perforación cuenta con un diámetro de 32 mm el cual va conectado a la sonda del ficómetro y al equipo de superficie, para el ingreso de la sonda hacia la perforación.

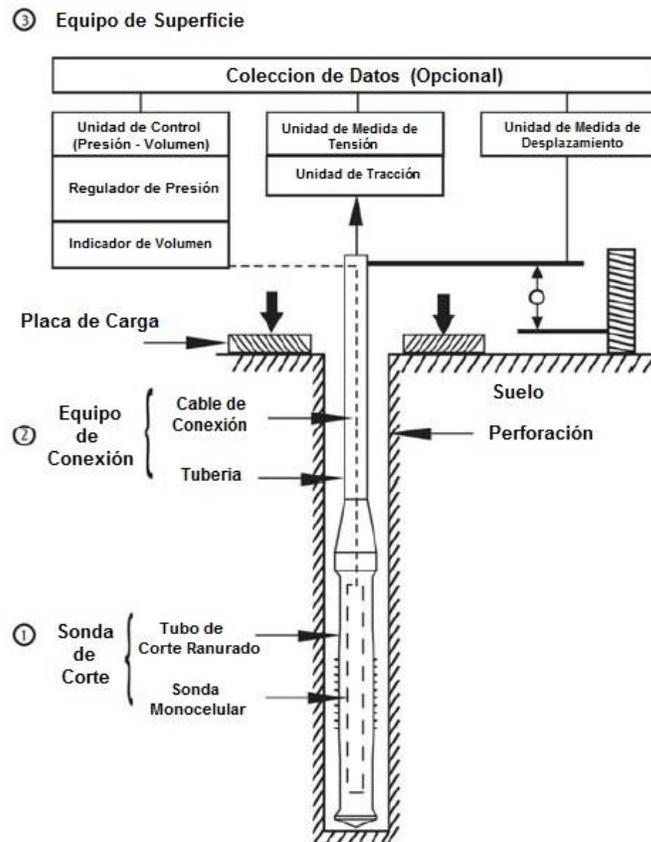
El conjunto de Tubería de perforación se compone de:

- 1 x 0,4 m de largo varilla
- 1 x 0,8 m de largo varilla
- 1 x 1,2 m de largo varilla

### 2.1.3 Equipo de Conexión

Dos operadores deben utilizar el equipo. El equipo de superficie incluye:

- Un sistema de tensado
- Una Unidad de Control de Presión - Volumen
- Un sistema para medir los movimientos verticales

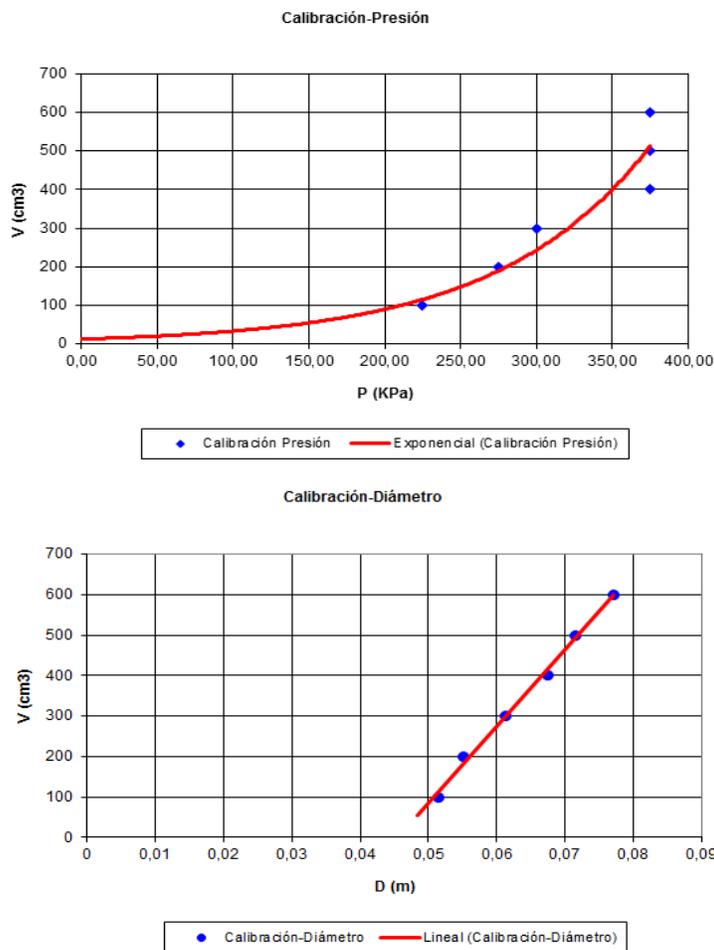


**Figura 2. Disposición típica del aparato de ensayo ficómetro**

## 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

### 3.1 Ejecución de la prueba del ficómetro

- Se conecta la sonda a un costado de la unidad de control de presiones y volumen. La sonda debe encontrarse libre para realizar una calibración.
- Se infla con agua a presión, en incrementos de volumen constantes de 100 cm<sup>3</sup>, iniciando desde 0 cm<sup>3</sup> hasta 600 cm<sup>3</sup>.
- Para cada incremento, se registra la presión y el diámetro de la sonda; el diámetro se registra en los anillos centrales de la sonda.
- Se grafica los resultados de presión y volumen inyectado así como volumen inyectado y diámetro constituyen las curvas de calibración.
- Con las curvas se emplean para la reducción y corrección de los datos del ensayo de ficómetro por presión y por área de corte.
- La calibración se realiza a cada prueba.



**Figura 0. Curvas volumen - diámetro de la sonda y volumen - presión de la sonda**

La curva de la presión ( $p_e$ ) - volumen se corrige en caso de que al momento de la calibración, la sonda no haya estado al mismo nivel de la consola, entonces: (APAGEO, 2011)

$$p_e = p_h + p_r \tag{1}$$

donde:

$p_e$  = Presión de calibración correspondiente al volumen final obtenido de la curva de calibración

$p_h$  = Presión hidrostática correspondiente a la profundidad entre la consola y la sonda

$p_r$  = Presión medida en la consola

### 3.2 Preparación de la prueba de ficómetro

#### 3.2.1 Instalación del equipo

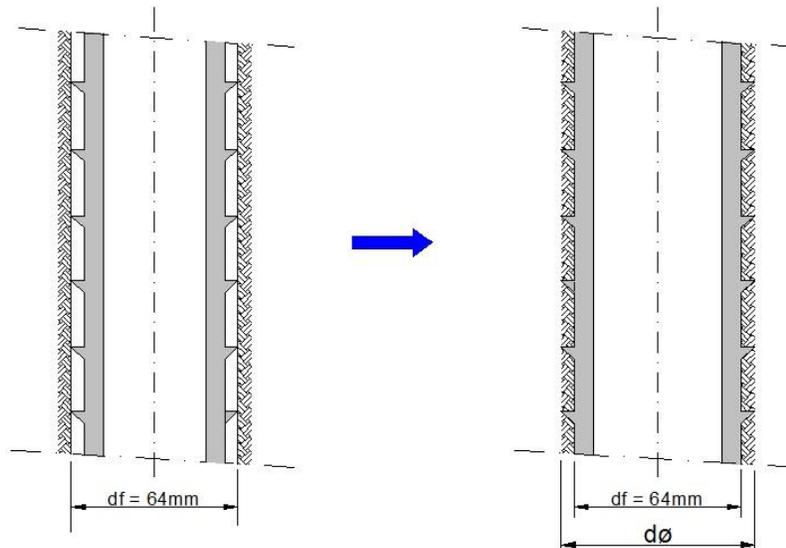
- Se introduce la sonda en el barreno hasta que su centro alcance la profundidad deseada.
- En la superficie se colocan dos vigas de reacción
- Se coloca el gato hidráulico y la celda de carga sobre la barra de perforación que sobresale del pozo con su arandela, se aprieta la tuerca de bloqueo y se instala el trípode con el comparador y el cronometro.

- En la parte superior se sujeta un sensor de carga con lector digital ajustado a cero, junto con un cronómetro y un comparador para medir el desplazamiento de la sonda.
- Finalmente, la manguera neumática del ficómetro se conecta a la consola de control para proceder con la prueba.

### 3.2.2 Contacto de la sonda con el suelo

Esta fase es necesaria para garantizar que la presión aplicada es suficiente para que la sonda esté en contacto efectivo con el suelo in-situ.

Se procede a la etapa de contacto, donde los anillos de la sonda tocan y penetran las paredes del suelo de forma controlada inyectando agua mediante la unidad de control con incrementos de presión de 0.5 bar (Fig. 4).



**Figura 4. Etapa de contacto de la sonda y el suelo.**

La correcta penetración de los anillos se observa claramente al graficar la curva presión versus volumen en la misma gráfica de calibración. El contacto y penetración se establece cuando la curva presenta un claro desvío respecto a la curva de calibración.

### 3.2.3 Falla:

Finalmente, se procede a la etapa de corte, donde se extrae la sonda en forma controlada con una velocidad constante igual a 2 mm/min, mediante el gato hidráulico y la bomba colocados en superficie. Para ello, se lleva el registro de lecturas de carga y volumen de la sonda a los 0 s, 30 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s, 150 s, 180 s y 210 s, hasta que se presenta la falla, que se alcanza si ocurren alguna de las condiciones siguientes:

- Tres lecturas consecutivas de la celda de carga estables con deformación creciente sin necesidad de llegar a los 210s
- Alcanzar una deformación de 7 mm (que ocurre en 210s).

La velocidad de extracción se controla visualmente con el seguimiento simultáneo del cronómetro y del comparador, logrando el movimiento sincronizado de una vuelta del cronómetro (30s) con una vuelta del micrómetro (1mm). Mediante la celda de carga se mide la fuerza  $T$ , mientras que la presión normal radial  $p_r$  y el volumen de la sonda en los tiempos indicados (0s a 210s) se miden en la consola de la unidad de control. Al iniciar cada incremento se mide el volumen de la sonda (VD) hasta finalizar la prueba (VF).



- Levantar la sonda de la perforación (si es necesario. conectar la bomba de vacío al circuito de agua para desinflar la celda suficientemente)
- Tenga en cuenta la cantidad de tierra atrapada entre los dientes anulares en la sonda, ya sea completo, medio lleno, vacío.
- Tenga en cuenta el tipo de suelo que queda en la sonda.
- Limpiar cuidadosamente la sonda antes de cualquier prueba nueva.
- Después de cada prueba la sonda se debe traer a la superficie a limpiar.

Para cada incremento se calcula el esfuerzo normal efectivo y el valor esfuerzo de resistencia al corte ( $\tau$ ) correspondiente a la falla, con los que se define la gráfica de comportamiento de resistencia a  $\tau$  vs. esfuerzo normal. Mediante el criterio Mohr – Coulomb se obtiene la cohesión y el ángulo de fricción interna.

#### 4. RESULTADOS

**Tabla I:** Resumen de resultados de Pruebas de ficómetro, Triaxial UU y Corte Directo

	Sondeo	Coordenadas UTM	Prof. (m)	Ensayo en Sondeo	Clasificación SUCS	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción interna (°)
<b>Sitio de Investigación 1</b>	P-3	N: 9977905 E: 784423	15.00	Ficómetro 1	ML	0.64	43
			20.00	Ficómetro 2	SM	1.64	33
			2.00	Corte Directo	SM	1.57	34.38
<b>Sitio de Investigación 2</b>	S-2B	N: 9988307 E: 791311	1.00	Ficómetro 3	SM	0.64	43
			3.00	Ficómetro 4	SM	1.64	33
	S-3B	N: 9988372 E: 791398	12.00	Ficómetro 5	SM	0.64	43
			2.00	Corte Directo	SM	0.08	37.92
	S-3B	N: 9988372 E: 791398	2.00	Corte Directo	SM	1.10	38.34
			2.00	Corte Directo	SM	0.87	39.23
<b>Sitio de Investigación 3</b>	P-1	N: 9992054 E: 791713	15.00	Ficómetro 6	SM	1.04	49.93
			10.00	Ficómetro 7	SM	0.33	39.39
	P-1	N: 9992054 E: 791713	2.00	Corte Directo	SM	1,11	34.89
			2.00	Corte Directo	SM	0.49	25.79
	P-1	N: 9992054 E: 791713	21.00	Triaxial	SM	1.53	16.5
			37.00	Triaxial	SM	1.24	24
<b>Sitio de Investigación 4</b>	P-2	N: 9978800 E: 780407	6.00	Ficómetro 8	SM	0.09	35.68
	P-6	N: 9978776 E: 780431	13.00	Ficómetro 9	SM	0.26	35.08
	P-2	N: 9978800 E: 780407	2.00	Corte Directo	SM	0.96	35.69
	P-6	N: 9992183 E: 791861	2.00	Corte Directo	SM	0.36	36.46
	P-1	N: 9978793 E: 780422	2.50	Triaxial	SM	0.59	26.5
<b>Sitio de Investigación 5</b>	P-3	N: 9977414.29 E:780128.91	12.00	Ficómetro 10	SM	0.24	37.18
			2.00	Corte Directo	SM	0.87	39.53

- Sitio de Investigación 1.

La magnitud de variación de la cohesión tiene una varianza del 4.2% y para el ángulo de fricción interna tiene una varianza de 4.01%.

- Sitio de Investigación 2.

En el sondeo S-2B, ficómetro 3 la magnitud de variación de la cohesión tiene una varianza del 88% y para el ángulo de fricción interna tiene una varianza del 12%.

En el sondeo S-3B, ficómetro 4 y el ensayo de corte directo la magnitud de variación de la cohesión tiene una varianza del 33% y para el ángulo de fricción interna tiene una varianza del 14%.

En el sondeo S-3B, ficómetro 5 y el ensayo de corte directo la magnitud de variación de la cohesión tiene una varianza del 26% y para el ángulo de fricción interna tiene una varianza del 9%.

- Sitio de Investigación 3.

En el sondeo P-1, ficómetro 6 y el ensayo de corte directo la magnitud de variación de la cohesión tiene una varianza del 6% y para el ángulo de fricción interna tiene una varianza del 30%.

En el sondeo P-2, ficómetro 7 y el ensayo de corte directo la magnitud de variación de la cohesión tiene una varianza del 33% y para el ángulo de fricción interna tiene una varianza del 35%.

- Sitio de Investigación 4.

En el sondeo P-2, ficómetro 8 y el ensayo de corte directo la magnitud de variación de la cohesión tiene una varianza del 91% y para el ángulo de fricción interna tiene una varianza del 0%.

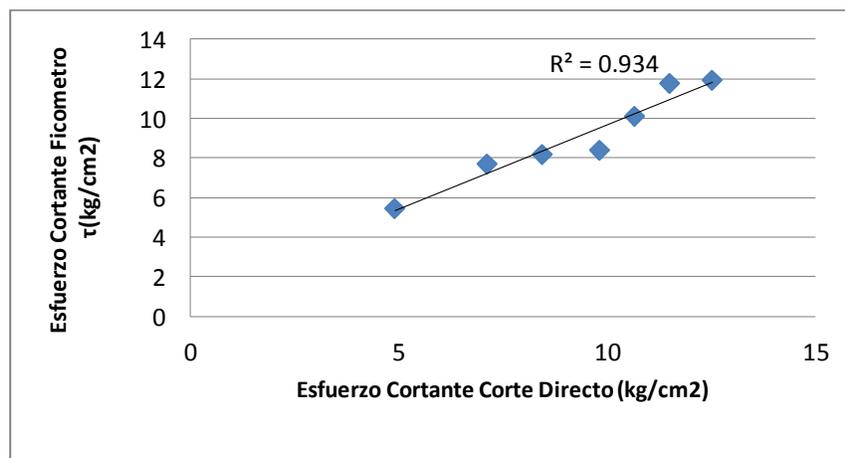
En el sondeo P-6, ficómetro 9 y el ensayo de corte directo la magnitud de variación de la cohesión tiene una varianza del 28% y para el ángulo de fricción interna tiene una varianza del 4%.

- Sitio de Investigación 5.

En el sondeo P-3, ficómetro 10 y el ensayo de corte directo la magnitud de variación de la cohesión tiene una varianza del 72% y para el ángulo de fricción interna tiene una varianza del 6%.

#### 4.1 Sitio de Investigación 1

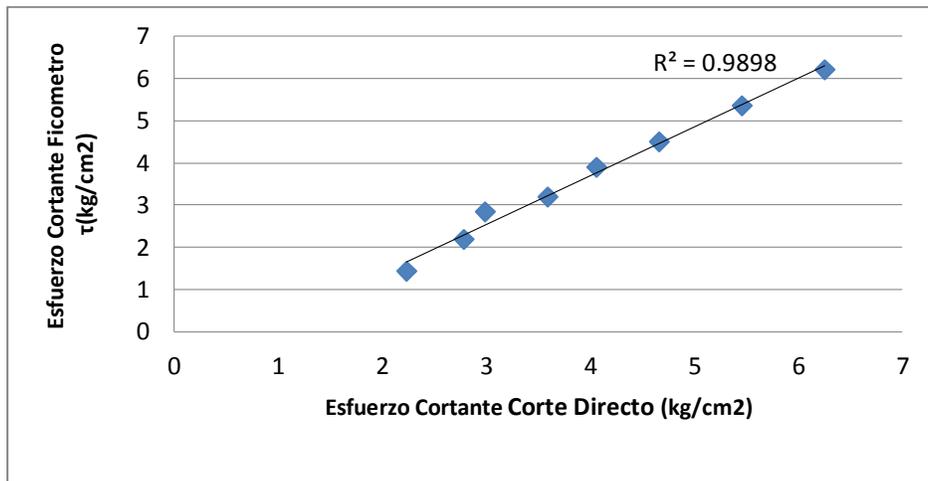
- Ficómetro 2



**Figura 7. Correlación entre los esfuerzos cortantes resistentes obtenidos con el ficómetro 2 y la prueba de corte directo del Sitio de Investigación 1.**

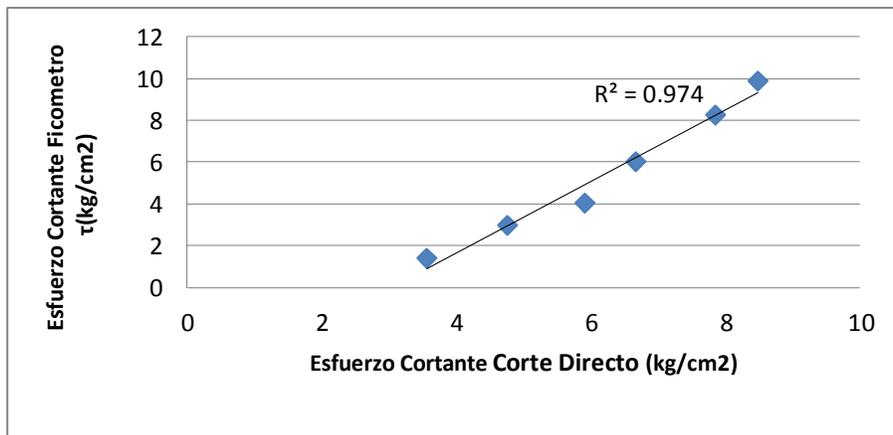
## 4.2 Sitio de Investigación 2

- **Ficómetro 3**



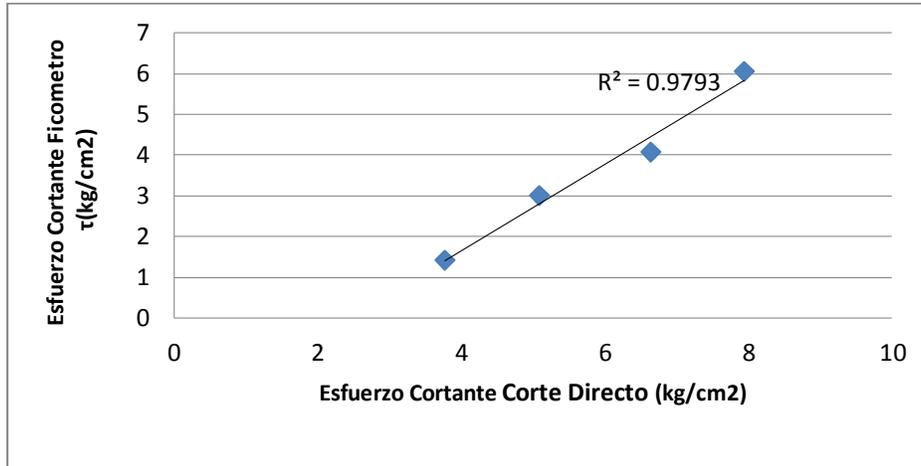
**Figura 8. Correlación entre los esfuerzos cortantes resistentes obtenidos con el ficómetro 3 y la prueba de corte directo del Sitio de Investigación 2.**

- **Ficómetro 4**



**Figura 9. Correlación entre los esfuerzos cortantes resistentes obtenidos con el ficómetro 4 y la prueba de corte directo del Sitio de Investigación 2.**

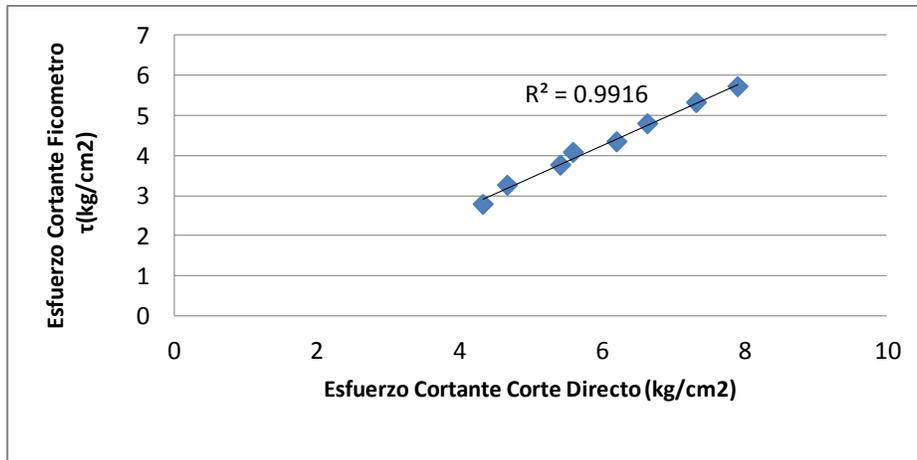
- **Ficómetro 5**



**Figura 10. Correlación entre los esfuerzos cortantes resistentes obtenidos con el ficómetro 5 y la prueba de corte directo del Sitio de Investigación 2.**

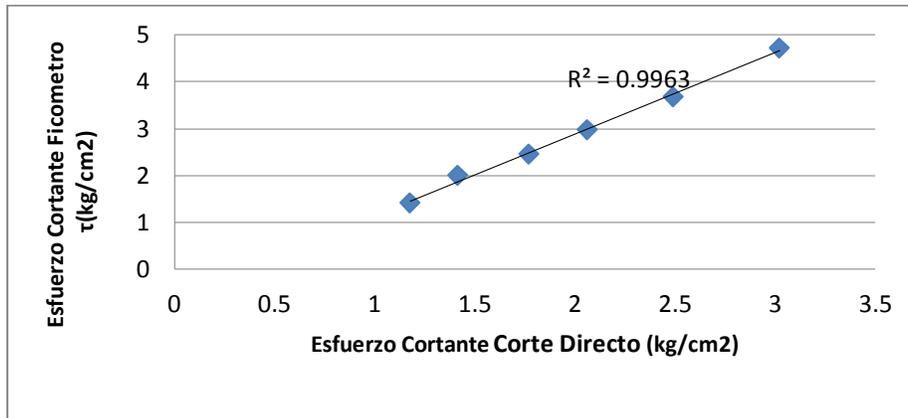
### 4.3 Sitio de Investigación 3

- **Ficómetro 6**



**Figura 11. Correlación entre los esfuerzos cortantes resistentes obtenidos con el ficómetro 6 y la prueba de corte directo del Sitio de Investigación 3.**

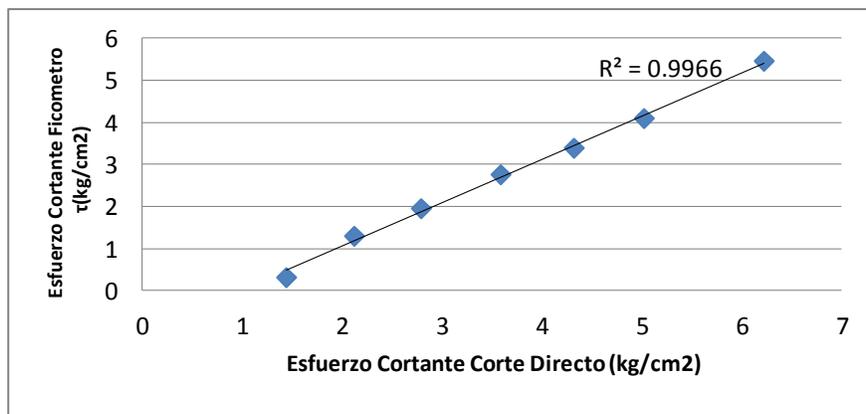
- **Ficómetro 7**



**Figura 12. Correlación entre los esfuerzos cortantes resistentes obtenidos con el ficómetro 7 y la prueba de corte directo del Sitio de Investigación 3.**

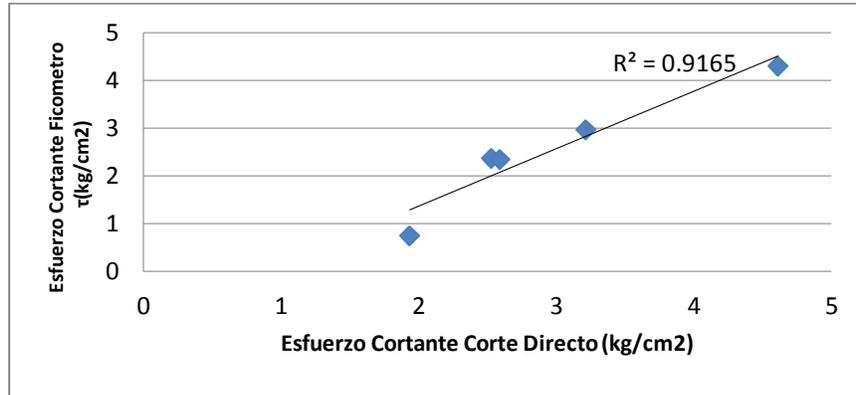
#### 4.4 Sitio de Investigación 4

- **Ficómetro 8**



**Figura 13. Correlación entre los esfuerzos cortantes resistentes obtenidos con el ficómetro 8 y la prueba de corte directo del Sitio de Investigación 4.**

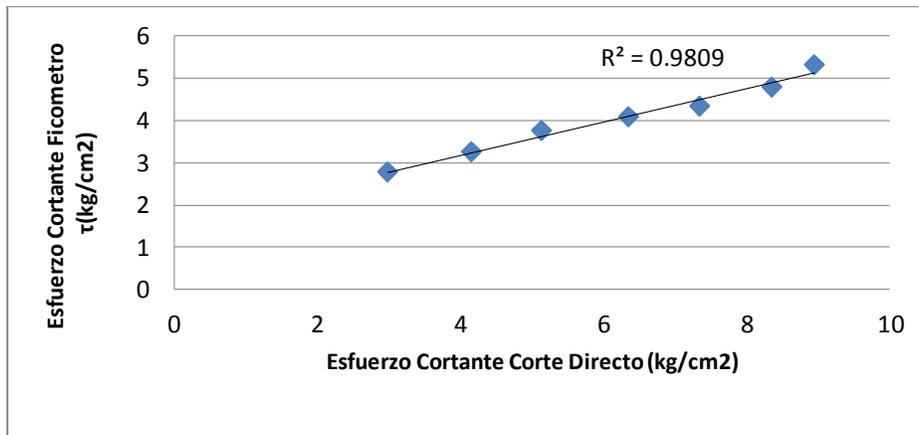
- **Ficómetro 9**



**Figura 14. Correlación entre los esfuerzos cortantes resistentes obtenidos con el ficómetro 9 y la prueba de corte directo del Sitio de Investigación 4.**

#### 4.5 Sitio de Investigación 5

- **Ficómetro 10**



**Figura 15. Correlación entre los esfuerzos cortantes resistentes obtenidos con el ficómetro 10 y la prueba de corte directo del Sitio de Investigación 5.**

Tomando en cuenta que los ensayos de corte directo se realizó a una profundidad de 2m. en todos los sitios de investigación, los resultados obtenidos entre la prueba de ficómetro y el ensayo de corte directo, presentan una varianza alta y baja en algunos sitios de investigación, esta diferencia se debe a un proceso llamado Intemperismo o meteorización que es la disgregación o descomposición de los materiales expuestos al aire, la humedad, la temperatura y al efecto de la materia orgánica que se dio en la toma de muestras para el corte directo.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Existe similitud entre las resistencias al esfuerzo cortante obtenidas con el ficómetro y la prueba de corte directo, con un coeficiente de correlación promedio alta (0.97).

Al comparar los resultados de las prueba triaxial UU en el sitio de investigación 3 con el ficómetro, se observa que la primera es mucho menor y que existe una dispersión importante al comparar los esfuerzos resistentes.

Se muestra que las pruebas de laboratorio comparables con los resultados del ficómetro para los suelos estudiados son las pruebas de corte directo.

Es recomendable continuar con las investigaciones de los parámetros de corte de los suelos en la ciudad de Quito comparando los resultados de triaxial CC, CD y pruebas tradicionales para determinar la cohesión y el ángulo de fricción interna con el ficómetro.

## 6. REFERENCIAS

APAGEO." ESSAI DE CISAILLEMENT – PHICOMÈTRE," 2013; <http://www.apageo.com>

Dumas, C., Orea, I., & Hernández, O., "Exploración in situ con la prueba de phicómetro," *Estudios geotécnicos para cimentaciones*, (227), pp. 42-43,2013

G. Philipponnat., "Le phicomètre : essai de cisaillement direct in situ the phicometer : in situ direct shear test," en *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur 2014*, Beauvais, 2014

Gonzalez, J., Ibarra, E., Rangel, J., & Ovando, E., "Empleo del ficómetro en los suelos duros y aluviales del valle de México," en *XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2012*, Cancún, 2012.

Philipponnat, G. and Zerhouni, M.I., "Interprétation de l'essai au Phicomètre," *Revue Française de Géotechnique*, (65). Pp. 49-65,1986

Moulay I. Zerhouni and Rabah Arab., . "In situ shear resistance of soils and particular materials measured by the Phicometer," en *7<sup>th</sup> Japanese – Korean – French Seminar on Geo-Environmental Engineering 2007*, Grenoble, 2007