



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



**“INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CORTE EN LA  
RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE CON EL ENSAYO DE  
CORTE DIRECTO EN UN SUELO COHESIVO DE LA CIUDAD DE  
PUNO”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. EDWIN DENIS SUCASACA CANAZA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PUNO – PERÚ**

**2022**



## DEDICATORIA

*A mis padres, quienes depositaron en mí, sus sueños, ilusiones y fueron mi más grande apoyo en cada etapa de mi vida. A mis hermanos y hermana por su apoyo incondicional y su constante motivación.*

*Edwin Denis Sucasaca Canaza.*



## AGRADECIMIENTOS

*Un profundo agradecimiento a mi alma mater Universidad Nacional del Altiplano Puno y la escuela profesional de Ingeniería Civil por permitirme formar parte de ella. A mis docentes por sus consejos y sus enseñanzas sobre la esencia de esta hermosa profesión: Ingeniería Civil.*

*Mi especial reconocimiento y agradecimiento a miembros del jurado revisor quienes estimularon, facilitaron con interés y entusiasmo la elaboración de este trabajo. Sus consejos y orientación fueron un apoyo fundamental que se aprecian con especial gratitud.*

*Y un agradecimiento de todo corazón a mis amigos y compañeros que me brindaron su apoyo, haciendo posible la culminación de mis estudios.*

***Edwin Denis Sucasaca Canaza.***



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**LISTA ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 12**

**ABSTRACT..... 13**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 14**

**1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ..... 15**

1.2.1. Problema general ..... 15

1.2.2. Problemas específicos..... 15

**1.3. JUSTIFICACIÓN ..... 15**

**1.4. OBJETIVOS ..... 18**

1.4.1. Objetivo general..... 18

1.4.2. Objetivos específicos ..... 18

**1.5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN ..... 18**

1.5.1. Tipo de investigación..... 18

1.5.2. Nivel de investigación ..... 18

1.5.3. Método de investigación..... 19



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

<b>2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE DE SUELOS.....</b>	<b>23</b>
2.2.1. Criterios de falla .....	23
2.2.1.1. Criterio de falla de Coulomb.....	23
2.2.1.2. Criterio de falla de Taylor .....	25
2.2.1.3. Criterio de falla de Mohr-Coulomb .....	26
2.2.1.4. Criterio de falla de Tresca.....	26
<b>2.3. ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....</b>	<b>27</b>
2.3.1. Significado y descripción del ensayo de corte.....	27
2.3.1.1. Dispositivo de corte .....	29
2.3.1.2. Caja de corte.....	29
2.3.1.3. Carro deslizante.....	30
2.3.1.4. Placas porosas .....	30
2.3.1.5. Dispositivos de carga .....	30
2.3.1.6. Dispositivo para el corte del espécimen.....	31
2.3.1.7. Medidor de la fuerza de corte .....	31
2.3.1.8. Medidor de desplazamiento horizontal .....	31
2.3.1.9. Medidor de desplazamiento vertical .....	31
2.3.2. Procedimiento en laboratorio.....	31
2.3.2.1. Consolidación.....	32
2.3.2.2. Determinación de la velocidad de corte .....	32
2.3.2.2.1. Método de Casagrande .....	33
2.3.2.2.2. Método de Taylor o de la raíz cuadrada del tiempo .....	35
2.3.2.3. Rotura de la muestra de suelos.....	38
<b>2.4. PARÁMETROS FUNDAMENTALES.....</b>	<b>38</b>



2.4.1. Cohesión .....	38
2.4.2. Ángulo de fricción .....	38
<b>2.5. VELOCIDAD DE CORTE.....</b>	<b>39</b>
<b>2.6. CARACTERÍSTICAS DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN.....</b>	<b>39</b>
<b>2.7. CAPACIDAD DE CARGA .....</b>	<b>42</b>
<b>2.8. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>46</b>
2.8.1. Hipótesis general .....	46
2.8.2. Hipótesis específicas.....	46
<b>2.9. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....</b>	<b>46</b>
2.9.1. Variable independiente .....	46
2.9.2. Variable dependiente .....	47
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
<b>3.1. IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>48</b>
3.1.1. Ubicación geográfica.....	48
3.1.2. Descripción de la zona de estudio .....	49
3.1.3. Condición climática.....	50
<b>3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....</b>	<b>50</b>
3.2.1. Población .....	50
3.2.2. Muestra .....	51
3.2.3. Muestreo .....	51
<b>3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS ..</b>	<b>52</b>
<b>3.4. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS .....</b>	<b>54</b>
3.4.1. Análisis granulométrico (ASTM D422) .....	55
3.4.2. Determinación de límites de consistencia (ASTM D4318).....	56
3.4.3. Humedad natural.....	58
3.4.4. Clasificación del suelo.....	58



3.4.5. Densidad natural .....	58
-------------------------------	----

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. VELOCIDAD DE CORTE.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2. RESPUESTA DEL SUELO AL ESFUERZO CORTANTE.....</b>	<b>63</b>
4.2.1. Para el esfuerzo normal de 27.5 kPa.....	63
4.2.2. Para el esfuerzo normal de 54.9 kPa.....	65
4.2.3. Para el esfuerzo normal de 81.4 kPa.....	67
4.2.4. Para el esfuerzo normal de 108.9 kPa.....	69
<b>4.3. PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE ...</b>	<b>72</b>
4.3.1. Ángulo de fricción .....	75
4.3.2. Cohesión .....	77
<b>4.4. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE .....</b>	<b>80</b>
<b>4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>86</b>
<b>4.6. PRUEBA DE HIPÓTESIS .....</b>	<b>90</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>94</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>95</b>
<b>VII. REFERENCIAS.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>101</b>

**Área:** Geotecnia

**Tema:** Resistencia al esfuerzo cortante

**Línea de investigación:** Geotecnia

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 09 DE FEBRERO DEL 2022



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Deslizamiento de un bloque sobre una superficie.....	24
<b>Figura 2</b>	Deslizamiento de una masa de suelo en un plano.....	24
<b>Figura 3</b>	Esquema del aparato de corte directo .....	29
<b>Figura 4</b>	Método del logaritmo de tiempo para determinar el coeficiente de consolidación .....	34
<b>Figura 5</b>	Método de la raíz cuadrada del tiempo de Taylor.....	37
<b>Figura 6</b>	Comportamiento del esfuerzo cortante en los suelos.....	40
<b>Figura 7</b>	Envoltentes de falla del suelo.....	41
<b>Figura 8</b>	Método de Meyerhof.....	44
<b>Figura 9</b>	Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	49
<b>Figura 10</b>	Velocidad de corte-esfuerzo normal .....	61
<b>Figura 11</b>	Curvas esfuerzos - deformación para el esfuerzo normal de 27.5 kPa .....	64
<b>Figura 12</b>	Curvas esfuerzo-deformación para esfuerzo normal de 54.9kPa.....	66
<b>Figura 13</b>	Curva esfuerzo deformación para esfuerzo normal de 81.4 kPa .....	68
<b>Figura 14</b>	Curva esfuerzo deformación para esfuerzo normal de 108.9 kPa .....	71
<b>Figura 15</b>	Envoltentes de falla, para los diferentes ensayos de corte directo .....	73
<b>Figura 16</b>	Variación del ángulo de fricción.....	76
<b>Figura 17</b>	Variación del ángulo de fricción para ensayos rápidos .....	77
<b>Figura 18</b>	Variación de la cohesión .....	79
<b>Figura 19</b>	Variación de la cohesión en ensayos rápidos.....	80
<b>Figura 20</b>	Variación de la capacidad de carga última con el ancho de la cimentación	82
<b>Figura 21</b>	Carga admisible para los diferentes valores de B .....	85
<b>Figura 22</b>	Variación del ángulo de fricción y cohesión con la velocidad. ....	89



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Matriz de operacionalización de variables.....	47
<b>Tabla 2</b>	Codificación de los ensayos de corte directo.....	54
<b>Tabla 3</b>	Distribución granulométrica del suelo.....	55
<b>Tabla 4</b>	Límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad e índice de fluidez del suelo estudiado en la investigación.....	57
<b>Tabla 5</b>	Velocidades calculadas para los ensayos de corte directo.....	60
<b>Tabla 6</b>	Velocidades de corte ejecutados.....	62
<b>Tabla 7</b>	Velocidades para ensayos rápidos con respecto al promedio de velocidades calculadas.....	62
<b>Tabla 8</b>	Valores del ángulo de fricción y cohesión para los diferentes ensayos.....	74
<b>Tabla 9</b>	Valores del ángulo de fricción para diferentes velocidades(calculadas).....	75
<b>Tabla 10</b>	Ángulo de fricción para velocidades promedio.....	76
<b>Tabla 11</b>	Valores de la cohesión para ensayo con velocidad calculada.....	78
<b>Tabla 12</b>	Cohesión para velocidades promedio.....	79
<b>Tabla 13</b>	Capacidad de carga última para los diferentes valores de ángulo de fricción y cohesión.....	81
<b>Tabla 14</b>	Carga admisible para los diferentes parámetros de resistencia.....	84
<b>Tabla 15</b>	Resultados de ángulo de fricción y cohesión con velocidades calculadas...	87



## LISTA ACRÓNIMOS

$A$	=	Área
$B$	=	Ancho de zapata o cimentación.
$b_c, b_q, b_\gamma$	=	Factores de inclinación de la base.
$c$	=	Cohesión del suelo.
$c'$	=	Cohesión efectiva.
$C_v$	=	Coefficiente de consolidación.
$d_f$	=	Desplazamiento lateral relativo.
$d_c, d_q, d_\gamma$	=	Factores de profundidad.
$e$	=	Relación de vacíos.
$e_0$	=	Relación de vacíos inicial.
$\Delta e$	=	Cambio en la relación de vacíos.
$FS$	=	Factor de seguridad.
$G$	=	Peso específico relativo de las partículas del suelo.
$H_s$	=	Altura drenada durante el corte.
$i_c, i_q, i_\gamma$	=	Factores de inclinación de carga.
$L$	=	Longitud; longitud de zapata.
$m_v$	=	Coefficiente de compresibilidad volumétrica.
$N_c, N_q, N_\gamma$	=	Factores de capacidad portante.
$N$	=	Componente normal de la fuerza.
$OCR$	=	Razón o relación de sobreconsolidación.
$q$	=	Sobrecarga del suelo sobre la base del cimiento.



- $q_u$  = Capacidad de carga última o capacidad portante última.
- $Q_u$  = Carga o fuerza última aplicable.
- $s_c, s_q, s_\gamma$  = Factores de forma.
- $t_f$  = Tiempo estimado hasta la falla.
- $t_{50}$  = Tiempo correspondiente al 50% de la consolidación primaria.
- $t_{90}$  = Tiempo correspondiente al 90% de la consolidación primaria.
- $U_f$  = Grado de consolidación del suelo.
- $\phi$  = Ángulo de fricción o ángulo de fricción interna.
- $\phi'$  = Ángulo de fricción interna efectiva.
- $\gamma$  = Peso unitario del suelo.
- $\gamma'$  = Peso unitario sumergido del suelo.
- $\sigma_n$  = Esfuerzo normal a la superficie de falla.
- $\sigma'_n$  = Esfuerzo normal efectivo.
- $\tau_f$  = Resistencia al esfuerzo cortante en la superficie de falla.



## RESUMEN

La velocidad de corte en el ensayo de corte directo tiene una trascendental influencia en la obtención de parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. El objetivo de esta investigación es evidenciar la influencia de la velocidad de corte en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. La presente investigación está referida a un suelo fino que se encuentra en la Ciudad de Puno. La población de estudio en esta investigación está constituida por material obtenido de la bahía interior del Lago Titicaca, zona norte de la Ciudad de Puno. Para la extracción de la muestra de suelo se ha determinado por la técnica de muestreo No probabilístico a criterio del investigador, por la proximidad y accesibilidad al punto de investigación. La velocidad de corte apropiada en el ensayo de corte directo se determina a partir de los resultados de la etapa de consolidación. En esta investigación se utilizó el Método de Taylor para determinar el tiempo de falla y, considerando una deformación en falla de 10 mm, la velocidad de corte correspondiente. Los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo son determinados en laboratorio mediante los resultados del ensayo de corte directo consolidado-drenado. Después de haber realizado una serie de ensayos con las velocidades calculadas, se ejecutaron otra serie de ensayos variando las velocidades de corte calculadas, multiplicándolos por 4, 5, 10 y 20 veces. Por último, se determinaron los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo para cada serie de ensayos. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que las velocidades calculadas para los diferentes esfuerzos normales tienden a disminuir a medida que el esfuerzo normal crece y el incremento de las velocidades calculadas de desplazamiento en el equipo de corte directo influye significativamente, disminuyendo el ángulo de fricción, mientras que la cohesión aumenta, para el suelo investigado de la ciudad de Puno.

**Palabras Clave:** Resistencia al corte, velocidad de corte, ensayo de corte directo, suelo cohesivo.



## ABSTRACT

The shear rate in the direct shear test has a transcendental influence in obtaining resistance parameters to the shear stress of the soil. The objective of this research is to demonstrate the influence of the shear rate on the shear strength parameters of the soil. The present investigation is referred to a fine soil, which is located in the City of Puno. The study population in this research is made up of material obtained from the inner bay of Lake Titicaca, north of the City of Puno. For the extraction of the soil sample, it has been determined by the non-probabilistic sampling technique at the discretion of the researcher, due to the proximity and accessibility to the research point. The appropriate shear rate in the direct shear test is determined from the results of the consolidation stage. In this investigation, the Taylor Method was used to determine the failure time and, considering a failure strain of 10 mm, the corresponding shear rate. The soil shear strength parameters are determined in the laboratory using the results of the direct consolidated-drained shear test. After having carried out a series of tests with the calculated speeds, another series of tests were carried out, varying the calculated cutting speeds, multiplying them by 4, 5, 10 and 20 times. Finally, the constant stress resistance parameters of the soil were determined for each series of tests. From the results obtained, it is concluded that the speeds calculated for the different normal stresses tend to decrease as the normal stress grows and the increase in the calculated displacement speeds in the direct shear equipment has a significant influence, decreasing the angle of friction, while cohesion increases, for the investigated soil of the city of Puno.

**Keywords:** Shear strength, shear rate, direct shear test, cohesive soil.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En ingeniería geotécnica, determinar adecuadamente los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo es muy importante para el proyecto de cimentaciones, estabilidad de taludes, empujes de tierras, etc. (Budhu, 2011; Taylor, 1961). Para obtener estos parámetros se realizan ensayos de laboratorio, uno de los más utilizados es el ensayo de corte directo; debido a su simplicidad, economía y facilidad de interpretación de resultados.

Todos los materiales cohesivos presentan una resistencia a la deformación por corte, que depende de la velocidad a la cual se produce dicha deformación por corte (Taylor, 1961). Usualmente, el ensayo de corte directo es realizado con una velocidad de corte de 0.5 mm/min (Bowles, 1981). Sin embargo, la velocidad de corte se determina a partir de los resultados de la etapa de consolidación del ensayo de corte directo, así como se indica en el procedimiento de la norma ASTM D3080 (Ensayo de Corte Directo bajo condiciones de Consolidado y Drenado), y estas velocidades podrían ser diferentes con respecto al valor de 0.5 mm/min.

El ensayo de corte directo permite la determinación “rápida” de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de suelos, bajo condiciones de consolidado y drenado (ASTM D3080, 2011), debido a que las trayectorias de drenaje son cortas ( $\leq 10$  mm, aproximadamente). Estas condiciones permiten que la presión de poros sea disipada rápidamente. La velocidad de corte debe ser tal que permita asegurar la condición de drenaje, en la etapa de corte, y así obtener resultados que permitan determinar parámetros de resistencia de manera adecuada.



Debido a la importancia de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante y condiciones de realización del ensayo de corte directo, mayormente utilizado para obtener estos parámetros, se formulan las siguientes preguntas de investigación.

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1 Problema general**

¿De qué manera influirá la velocidad de corte en el ensayo de corte directo sobre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- ¿Cuáles son las características del suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno?
- ¿Cómo influirá la velocidad de corte en el ensayo de corte directo en la cohesión de un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno?
- ¿Cómo influirá la velocidad de corte en el ensayo de corte directo en el ángulo de fricción interna de un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno?

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La importancia de este trabajo de investigación, radica en que la realización del ensayo de corte directo es uno de los más solicitados, por lo tanto, su ejecución correcta es de primordial importancia para obtener los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de suelos. La determinación adecuada de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante, mediante el ensayo de corte directo, permitirá al responsable del proyecto tomar mejores decisiones, de acuerdo a las condiciones del problema. Estos



parámetros son fundamentales para la estabilidad de estructuras geotécnicas, por lo cual se propone evidenciar el efecto de la velocidad de corte en su determinación.

El suelo fino está involucrado en la mayoría de problemas de estabilidad. Para las cimentaciones de edificaciones u otras construcciones el estudio de mecánica de suelos no es considerado muy importante; sin embargo, es muy importante determinar adecuadamente los parámetros de resistencia al corte de suelos. Para obtener estos parámetros de resistencia al esfuerzo cortante uno de los métodos, mayormente utilizados, es el ensayo de corte directo en laboratorio.

Según Peck et al. (2002) la resistencia al esfuerzo cortante depende principalmente de la presión de poro existente en el momento de la falla. La rapidez con la que puede disiparse y, por lo tanto, la resistencia al corte que puede desarrollarse en el campo depende de la permeabilidad y de las dimensiones de la masa de suelo influida por los esfuerzos cortantes.

Para los suelos de baja permeabilidad, como los suelos finos, en el periodo de construcción de un edificio, durante el cual la carga de las zapatas va actuando, puede ser relativamente corto, en comparación con el necesario para la consolidación del suelo. Por lo que la selección del procedimiento de prueba para determinar los parámetros de resistencia del suelo se obtiene de la condición no drenada. De acuerdo a Jimenez & de Justo (1975) el aparato de corte directo no permite el control de drenaje por lo que los ensayos sin drenaje solo se pueden realizar en suelos de baja permeabilidad y realizando el ensayo con gran rapidez para evitar que dé tiempo a que éste se produzca.

Según Bardet (1997) muestra resultados de un suelo fino que fueron sometidas a pruebas de corte directo no consolidado, estas muestra se cortaron en 7 minutos, lo que dejó poco tiempo para que se disipe la presión de poro, según Ahmed Mir (2021) indica que para ensayos sin drenaje en el ensayo de corte directo, la velocidad de corte es de 1 a



1.5 mm/minuto en suelos finos y para pruebas con drenaje la velocidad de corte es de 0.0005 a 0.03 mm/minuto en suelos finos, según DIN 18137-3(2002, como se citó en Thermann et al., 2006) recomienda que la velocidad de corte máxima para suelos cohesivos es 0.5mm/min como valor apropiado y según Kalinski (2011) indica que la prueba de corte directo (ASTM D3080) proporciona los parámetros de resistencia la esfuerzo cortante de los suelos en condiciones drenadas y, rara vez se usa para probar suelos finos. Estos manuales no expresan una justificación de la rapidez para que se pueda realizar ensayos sin drenaje por lo que se propone realizar la presente investigación.

La aplicación de la velocidad de corte es uno de los factores de mucha importancia para muchos investigadores, quienes observaron que un aumento de esta puede aumentar o reducir los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. La velocidad de corte tiene una influencia trascendental en la obtención de parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo en ingeniería geotécnica, como una de las especialidades de la ingeniería civil.

El objetivo de esta investigación fue el de establecer el efecto de la variación de la velocidad de corte para determinar los parámetros de resistencia al corte que podrían experimentar un incremento o disminución. Con los resultados de esta investigación se pretende que los ensayos de corte directo en laboratorio, lo mismo que otros ensayos, se realicen con responsabilidad, para obtener los parámetros adecuados para el análisis y diseño de diversas estructuras geotécnicas.

La zona norte de la bahía interior de la ciudad de Puno es una zona de crecimiento potencial, teniendo como referencia a esta investigación para esta zona de estudio, obtenemos los parámetros de resistencia del suelo a tener en consideración en las futuras construcciones.



## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

Determinar la influencia de la velocidad de corte en el ensayo de corte directo sobre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Describir las características del suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno.
- Determinar la influencia de la velocidad de corte en el ensayo de corte directo en la cohesión de un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno.
- Determinar la influencia de la velocidad de corte en el ensayo de corte directo en el ángulo de fricción interna de un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno.

## **1.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1 Tipo de investigación**

La presente investigación es del tipo experimental pura, debido a que la variable velocidad de corte en el ensayo de corte directo será manipulada intencionalmente para evaluar su influencia en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. En las investigaciones experimentales puras se realiza una manipulación intencional de variables independientes (Hernández, 2019; Kothari, 2004; Ñaupas et al., 2014).

### **1.5.2 Nivel de investigación**

La presente investigación es de nivel explicativo, ya que se estudian las causas que originan la variación de resultados al manipular la variable independiente. La



investigación explicativa tiene como propósito establecer las causas de los sucesos, problemas o fenómenos que se estudian (Hernández, 2019; Ñaupas et al., 2014).

### **1.5.3 Método de investigación**

Por la naturaleza de la información y del tipo de datos a analizar el método de investigación empleado es el cuantitativo. Los planteamientos cuantitativos del problema pueden dirigirse a varios propósitos y siempre existe la intención de estimar magnitudes o cantidades y generalmente de probar hipótesis y teoría (Hernández, 2019; Ñaupas et al., 2014).



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Builes (2014) identificó la importancia de la velocidad de corte en la resistencia de los suelos y, conocer cuál es la respuesta del suelo cuando varían estas velocidades, que es importante debido a su incidencia en la estabilidad de las estructuras que apoyan sobre el terreno. Por lo cual realizó una investigación con la finalidad de determinar la velocidad de corte necesaria para determinar los parámetros mecánicos según requerimientos de un estudio, sin considerar el efecto de la succión sobre la resistencia del suelo. Utilizó un equipo de corte de deformación controlada, que genera resultados confiables. Realizó ensayos de corte no consolidado no drenado, en laboratorio, con muestras de suelo residual de anfibolita obtenidas mediante la utilización de Tubos Shelby de pared delgada. Mediante ensayos de corte directo con velocidades de 0.5, 1.0 y 2.0 mm/min, concluyó que la resistencia presenta variaciones significativas y el módulo de elasticidad presenta variaciones para velocidades entre 0.5 y 1.0 mm/min y sin variaciones para velocidades entre 1.0 y 2.0 mm/min. Además, la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos residuales provenientes de la anfibolita es directamente proporcional a la velocidad con la que se realiza el ensayo, de allí la importancia de una buena selección de la velocidad con la que se hacen los ensayos en el ejercicio de la geotecnia.

Almonte (2014) plantea su estudio del comportamiento de la resistencia al corte de una arcilla denominadas Boom Clay en un estado saturado, considerando la importancia que tiene la velocidad de corte en la resistencia del suelo y analizar el efecto de los tiempos de reposo. El objetivo de esta investigación es establecer una relación



experimental entre la resistencia residual de superficies reales de deslizamiento y la velocidad de corte, y el efecto de los tiempos de reposo en la resistencia residual en la superficie de rotura. Los experimentos se realizarán en un equipo de corte anular en laboratorio manteniendo las condiciones óptimas de humedad y altura efectiva de la muestra. Los resultados de esta investigación confirman que en cuanto a la influencia de la velocidad de corte en la resistencia residual, dio como resultado una proporcionalidad inversa entre la velocidad con que se aplican los desplazamientos y la resistencia residual disponible también indica que el envejecimiento puede causar un aumento de la resistencia al corte reactivado por encima del valor residual, dependiendo directamente del tiempo de reposo e inversamente a la tensión vertical.

Huat et al. (2006) resaltan la importancia de la velocidad de carga aplicada y su comportamiento del cambio de volumen de un suelo residual granítico no saturado, pues, la no comprensión del comportamiento geotécnico de suelos en estado parcialmente saturado o no saturado ha causado mucho daño en las infraestructuras y edificios. Esta investigación se realizó con la finalidad de encontrar el efecto de la velocidad de carga aplicada al esfuerzo principal en el comportamiento del cambio de volumen en un suelo residual granítico no saturado. En este estudio, se realizaron una serie de pruebas de compresión isotrópica controlada por succión para determinar el cambio de volumen del suelo residual insaturado. Considerando tres velocidades de carga: carga lenta, carga rápida y carga muy rápida. Concluyendo que la velocidad de carga tiene un efecto en la relación de vacíos y en el grado de saturación, pero tiene un efecto insignificante en la humedad natural sometida a una succión aplicada constante. En el caso del suelo sin succión tiene un efecto insignificante en la relación de vacíos, contenido de humedad y grado de saturación. Una velocidad de carga rápida genera sobre el suelo una gran compresión comparada con las velocidades lentas.



Eid et al. (1999) explican el efecto de la velocidad de desplazamiento en el comportamiento interno de una arcilla al corte saturado reforzado con un Geosintético a diferentes esfuerzos normales. Usando un equipo de corte de anillo torsional, se saturaron diferentes muestras reforzadas con Geosintético a un esfuerzo normal de 17 kPa y luego se consolidaron y cortaron internamente a esfuerzos normales de 17, 100, 200 y 400 kPa con velocidades de desplazamiento al corte que van desde 0,015 a 36,5 mm/minuto. Encontró que la resistencia al corte aumenta considerablemente al aumentar la velocidad de desplazamiento con la que se realiza el ensayo, la resistencia máxima al corte interno depende de la velocidad de desplazamiento del corte y del esfuerzo normal aplicado.

Jácome (2006) indica que la composición mineralógica, la relación de vacíos o estado de esfuerzos y la estructura interna se ve reflejado en las diferentes respuestas que puede experimentar un mismo material ante diferentes velocidades de deformación esto lleva a suponer que parámetros propios del material como el ángulo de fricción crítico, que se cree que es constante, son susceptibles de cambios y se vuelven variables de estado del material. El objetivo fue realizar ensayos a diferentes velocidades de deformación y así establecer solo una línea de estado crítico para suelos blandos o si estos pueden exhibir más de un estado crítico de acuerdo a la velocidad de deformación impuesta. Concluyendo que de las características viscosas del material como la fluencia bajo esfuerzo constante y el ensayo de consolidación se aprecia una relación directa, o los saltos de resistencia cortante a medida que se aumenta la velocidad de corte en órdenes de magnitudes iguales al aumento de la velocidad de deformación. También indica que la plasticidad está ligada con el esfuerzo cortante, pues el agua libre entre las partículas queda atrapada por fuerzas de atracción producto de las condiciones de drenaje del material.



## **2.2 RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE DE SUELOS**

Se define a la resistencia al corte, o resistencia al esfuerzo cortante, de un suelo como el valor máximo o límite del esfuerzo cortante al que puede ser sometido una masa de suelo antes de que ceda o se deslice (Bowles, 1996; Fang & Daniels, 2006; Nicholson, 2015; Simons & Menzies, 2000; Whitlow, 1998).

La resistencia del suelo es una de las propiedades que permiten establecer la estabilidad de cualquier estructura geotécnica; si el suelo falla, la estructura que se apoya en él puede colapsar, poniendo en peligro vidas y causando daños económicos (Budhu, 2011; Nicholson, 2015; Taylor, 1961). La resistencia al esfuerzo cortante de los suelos es producto de la contribución de los efectos de la cohesión y el ángulo de fricción interna de los mismos que son considerados los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante (Das, 2013).

Determinar los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos es fundamental para la solución de muchos problemas de ingeniería, relacionados con la capacidad de los suelos para adaptarse a las cargas que actúen sobre ellas, por lo tanto, es importante realizar un análisis de estabilidad del suelo para evitar riesgos de pérdidas de vidas humanas y también las implicaciones económicas generadas por un inadecuado estudio de mecánica de suelos (Peck et al., 2002; Rico & Del Castillo, 1988; Taylor, 1961).

### **2.2.1 Criterios de falla**

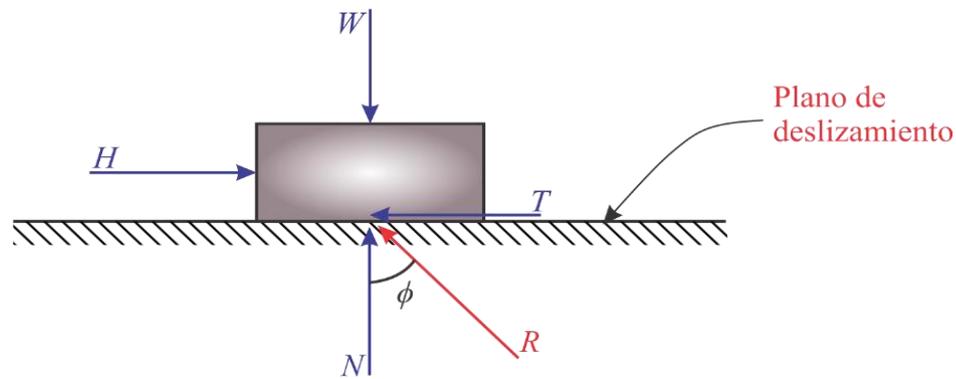
#### **2.2.1.1 Criterio de falla de Coulomb**

El primero en explicar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos fue el físico e ingeniero francés C. A. Coulomb, quien estableció que un material falla cuando el esfuerzo cortante actuante en un plano alcanza su valor límite máximo, que dicho esfuerzo

cortante limite depende del esfuerzo normal actuante en el plano de falla (Berry & Reid, 1993; Budhu, 2011; Whitlow, 1998).

### Figura 1

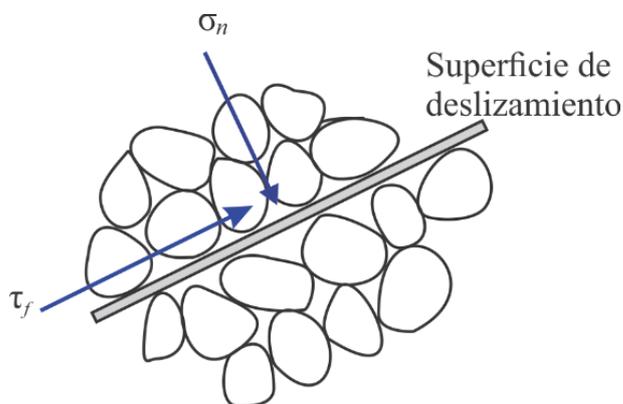
*Deslizamiento de un bloque sobre una superficie*



*Nota.* Tomado de (Budhu, 2011).

### Figura 2

*Deslizamiento de una masa de suelo en un plano*



*Nota.* Tomado de (Budhu, 2011)

La ley de Coulomb requiere la existencia o el desarrollo de un plano de deslizamiento, la fuerza transmitida por dos cuerpos en contacto (Figura 2) puede resolverse en dos componentes; la componente normal  $N$  perpendicular a la superficie de deslizamiento y, la componente tangencial  $T$  paralela a la misma .

La ecuación de falla en términos de esfuerzos totales se expresa como:



$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi$$

Donde:

$\tau_f$  = Es el esfuerzo cortante en el plano de falla.

$\sigma_n$  = Es el esfuerzo normal en el plano de falla.

$\phi$  = Es el ángulo de fricción del suelo.

$c$  = Es la cohesión.

En la actualidad, generalmente se acepta que la resistencia al esfuerzo cortante del suelo está relacionada con el esfuerzo efectivo.

$$\tau_f = c' + \sigma_n' \tan \phi'$$

Donde:

$\tau_f$  = Es el esfuerzo cortante en el plano de falla.

$\sigma_n'$  = Es el esfuerzo normal en el plano de falla.

$\phi'$  = Es el ángulo de fricción del suelo.

### 2.2.1.2 Criterio de falla de Taylor

Taylor (1948) usó un método de energía para derivar un modelo de suelo simple. Asumió que la resistencia al esfuerzo cortante del suelo se debe a la fricción por deslizamiento del corte y al entrelazamiento de las partículas del suelo. Este criterio solamente es para el análisis de esfuerzos totales debido a que no considera presiones de poro (Budhu, 2011).

A diferencia del criterio de falla de Coulomb, el criterio de falla de Taylor no requiere la suposición de ningún mecanismo físico de falla, como un plano de deslizamiento. Se puede aplicar en todas las etapas de carga para suelos que son homogéneos y se deforman en condiciones de deformación plana similares a corte simple. Este criterio de falla no se aplicaría a los suelos que fallan a lo largo de una junta o una interfaz entre dos suelos. El criterio de falla de Taylor proporciona un ángulo de dilatación pico más alto que el criterio de falla de Coulomb (Budhu, 2011).

### **2.2.1.3 Criterio de falla de Mohr-Coulomb**

La ley de Coulomb para encontrar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos requiere que conocer el ángulo de fricción y el esfuerzo normal en el plano de deslizamiento, estos valores no se conocen fácilmente porque están sujetos a la variación de esfuerzos, sin embargo, en los cuerpos sólidos se encuentra que la relación entre las tensiones tangenciales y normal que producen la rotura no es lineal, sino que se sigue una curva llamada envolvente de Mohr (Jimenez & de Justo, 1975; Juárez & Rico, 2010; Peck et al., 2002).

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb indica que, en un punto cualquiera de un cuerpo continuo se produce la rotura cuando en algún plano que pase por dicho punto existe la combinación de esfuerzo normal y tangencial definida por la envolvente de Mohr (Fang & Daniels, 2006; Jimenez & de Justo, 1975; Zeevaert, 1983).

### **2.2.1.4 Criterio de falla de Tresca**

El criterio de falla de Tresca indica que el esfuerzo cortante en la falla es la mitad de la diferencia de los esfuerzos principales. Este criterio se utiliza para interpretar la



resistencia al corte del suelo en condiciones no drenadas; la resistencia al corte en condiciones no drenadas es el radio del círculo de Mohr (Budhu, 2011).

La resistencia al esfuerzo cortante no drenado depende solo de la relación de vacío inicial o del contenido de agua inicial, con el aumento de la presión de confinamiento, causa una disminución en la relación de vacío inicial y un cambio en la presión de poro cuando un suelo se corta bajo condiciones sin drenaje, el resultado implica un aumento de la resistencia al corte no drenado, por lo tanto, el valor de la resistencia al corte no drenado, no es una propiedad fundamental del suelo, este valor depende de la magnitud de la presión de confinamiento inicial o la relación de vacío inicial (Budhu, 2011).

## **2.3 ENSAYO DE CORTE DIRECTO**

### **2.3.1 Significado y descripción del ensayo de corte directo**

La prueba de corte directo de resistencia al esfuerzo cortante del suelo es el procedimiento más simple, más antiguo y más directo para medir la resistencia al corte "inmediata" o de corto plazo de los suelos en términos de esfuerzos totales (Head, 1994; Jimenez & de Justo, 1975; Powrie, 2004). Actualmente el equipo de corte directo es uno de los aparatos más populares para determinar los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Este ensayo recibe el nombre de corte directo, puesto que se miden directamente los esfuerzos normales y de corte, induciendo un plano de falla en una muestra de suelo (Whitlow, 1998).

Al aplicar una carga vertical constante normal al plano de movimiento relativas, observándose las deformaciones verticales, se introduce un esfuerzo horizontal, y se van dibujando en un diagrama las deformaciones horizontales en abscisas y las tensiones



horizontales de corte en ordenadas (Head, 1994; Holtz & Kovacs, 1981; Jimenez & de Justo, 1975; Juárez & Rico, 2010).

Según la forma el esfuerzo horizontal, la prueba de corte puede ser de esfuerzo controlado o deformación controlada. En las pruebas de esfuerzo controlado, se aplica un determinado esfuerzo horizontal y se va midiendo las deformaciones en este sentido, en incrementos iguales hasta que la muestra falla y ésta ocurre a lo largo del plano de división de la caja de corte. En las pruebas de deformación controlada, por medio de un motor que actúa a través de engranajes se aplica una velocidad constante de desplazamiento de corte a una mitad de la caja y se va midiendo los esfuerzos horizontales (Das, 2013; Jimenez & de Justo, 1975).

En este ensayo se miden directamente el esfuerzo normal como el esfuerzo cortante en el plano de falla que origina el aparato, donde se obtendrán parámetros drenados ya que se permite el drenaje durante el ensayo y es posible mantener un esfuerzo normal constante durante toda la prueba. Por varios años esta prueba directa de resistencia fue la única usada para obtener los parámetros de resistencia, posteriormente ha perdido aplicabilidad y han sido sustituidas en muchos casos por el ensayo de compresión triaxial, hoy, por cuestiones de simplicidad, economía, facilidad en la interpretación y últimamente con la mejoría al implementar las cajas cuadradas, el ensayo se mantiene vigente.

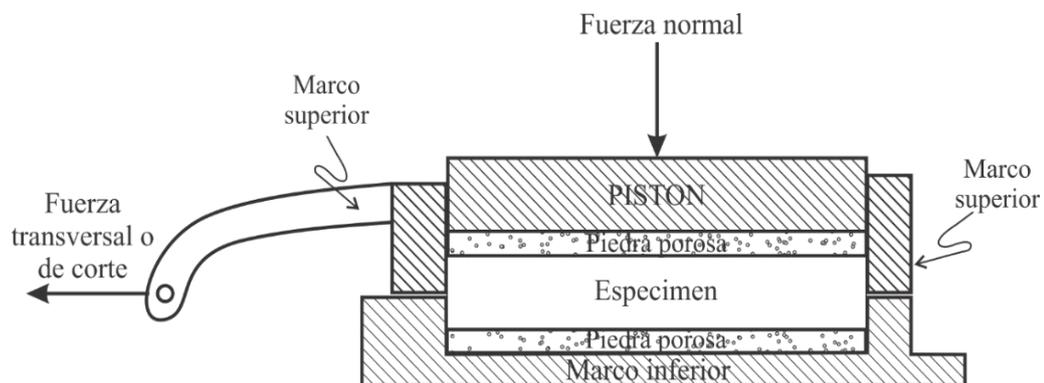
Uno de los inconvenientes más importantes de la prueba de resistencia al esfuerzo cortante directa es que su uso debe restringirse a los suelos de falla plástica, debiendo no efectuarse en suelos frágiles (Juárez & Rico, 2010).

La evaluación de la resistencia al esfuerzo normal y cortante del suelo, permite cuantificar parámetros necesarios para solucionar problemas relacionados con la

resistencia del terreno, que nos permite analizar problemas de la estabilidad de suelos tales como: el estudio de estabilidad de taludes para carreteras, la determinación de la capacidad de soporte en cimentaciones, la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras.

### Figura 3

*Esquema del aparato de corte directo*



*Nota.* Tomado de (ASTM-D3080)

El aparato de corte directo consta de las siguientes partes:

#### 2.3.1.1 Dispositivo de corte

Es un dispositivo para sujetar la muestra de suelo de forma segura entre dos placas porosas de tal manera que no se presenten movimientos de torsión sobre la muestra de suelo. Este dispositivo debe permitir aplicar una fuerza normal, cambio del espesor de la muestra, drenaje de agua y sumergir la muestra en agua. También, debe permitir aplicar una fuerza de corte a la muestra a lo largo de un determinado plano de corte (ASTM D3080).

#### 2.3.1.2 Caja de corte

Es una caja de corte circular o cuadrada, hechas de acero inoxidable o aluminio, la caja utilizada en este trabajo es de forma rectangular de 60 mm de lado.



La caja de corte está dividida por un plano horizontal en dos mitades de igual espesor, estas dos partes están unidas con tornillo alineados. La caja de corte debe disponer de dos tornillos separadores, que controlen la separación entre las mitades superior e inferior (ASTM-D3080, 2011).

#### **2.3.1.3 Carro deslizante**

La caja de corte se coloca en el interior de un carro deslizante que sirve como recipiente para el agua del ensayo que permite sumergir la muestra de suelo, la parte inferior de la caja de corte queda rígidamente bloqueada. El carro deslizante es colocado sobre cojinetes que permiten de desplazamiento en la dirección de corte (ASTM-D3080, 2011).

#### **2.3.1.4 Placas porosas**

La función principal de las placas porosas es permitir el drenaje del agua desde el espécimen durante el ensayo. Deben ser rígidamente para que puedan soportar la fuerza normal aplicada durante el ensayo (ASTM-D3080, 2011).

#### **2.3.1.5 Dispositivos de carga**

El dispositivo para la aplicación de una fuerza normal es aplicado por una palanca de yugo de carga, cual es activada por pesos muertos, para la aplicación a la probeta de una carga vertical, el dispositivo debe ser capaz de mantener una fuerza dentro de  $\pm 1\%$  de la fuerza indicada (ASTM-D3080, 2011).



### **2.3.1.6 Dispositivo para el corte del espécimen**

Es un dispositivo motorizado capaz de mantener una velocidad constante de desplazamiento y cortar la muestra de suelo, con una serie de velocidades y deberá permitir ajustar de forma apropiada para el ensayo (ASTM-D3080, 2011).

### **2.3.1.7 Medidor de la fuerza de corte**

Un anillo de carga o una celda de carga con una precisión de 2,5 N (0,5 lb) o de uno por ciento (1%) de la fuerza de corte en la falla, cualquiera que sea mayor. La capacidad depende más que todo del tipo de control: con control de deformaciones o con control de esfuerzos (ASTM-D3080, 2011).

### **2.3.1.8 Medidor de desplazamiento horizontal**

Un dial medidor o transductor de desplazamiento capaz de medir el desplazamiento horizontal entre las dos mitades de la muestra de suelo. Debe tener una precisión de 0.01mm y un recorrido mínimo de 10mm (ASTM-D3080, 2011; Bowles, 1981; Head, 1994).

### **2.3.1.9 Medidor de desplazamiento vertical**

Un dial medidor o transductor de desplazamiento capaz de medir la deformación vertical de la muestra de suelo en el dispositivo de corte durante el ensayo con una precisión de 0,001mm (ASTM-D3080, 2011; Bowles, 1981; Head, 1994).

## **2.3.2 Procedimiento en laboratorio**

Se ensambla la caja de corte para una muestra inalterada se coloca las placas porosas húmedas en las superficies expuestas a la muestra de suelo, posteriormente se



corta una muestra de suelos de forma rectangular de 60 x 60 x 20 mm con el extractor de muestra, luego esta es colocada en el muestreador y este a su vez en la caja de corte con las piedras porosas colocadas por encima y por debajo (ASTM-D3080, 2011; Bowles, 1981).

Situar correctamente la posición de los dispositivos de medición de desplazamiento horizontal utilizado para medir el desplazamiento de corte. Se ensambla el yugo para aplicación de la fuerza normal. Se fija el medidor de deformaciones verticales, comprobando que tiene para un desplazamiento suficiente en los dos sentidos. Dependiendo de las condiciones del suelo, se llena con agua el carro deslizante hasta el nivel superior de la muestra de suelo y se mantiene así durante la ejecución del ensayo.

### **2.3.2.1 Consolidación**

La carga normal de consolidación puede ser aplicado en un incremento o en varios incrementos de carga. La fuerza normal aplicada dependerá de los datos que se necesite obtener. En los suelos cohesivos se deben tomar la lectura de deformación vertical versus tiempo transcurrido durante la consolidación. Después que se alcanzó la consolidación primaria, retirar los tornillos de alineamiento de la caja de corte (ASTM-D3080, 2011; Head, 1994).

### **2.3.2.2 Determinación de la velocidad de corte**

Gibson y Henkel (1954, como se citó en Hassan, 2016) afirma que en el ensayo de corte directo con deformación controlada, la elección de la velocidad de corte depende del coeficiente de consolidación,  $C_v$ , relaciona el tiempo total estimado hasta la falla,  $t_f$ , que corresponde al tiempo de rotura hasta la falla,  $U_f$ , de una muestra de arcilla normalmente consolidada con una distancia de drenaje:



$$U_f = 1 - \frac{H_s^2}{2 \cdot C_v \cdot t_f}$$

Donde

$t_f$  = tiempo total estimado hasta la falla

$H_s$  = altura drenada durante el corte; mitad de la altura de la muestra

$U_f$  = grado de consolidación

$C_v$  = coeficiente de consolidación

$$t_f = \frac{H_s^2}{2 \cdot C_v \cdot (1 - U_f)}$$

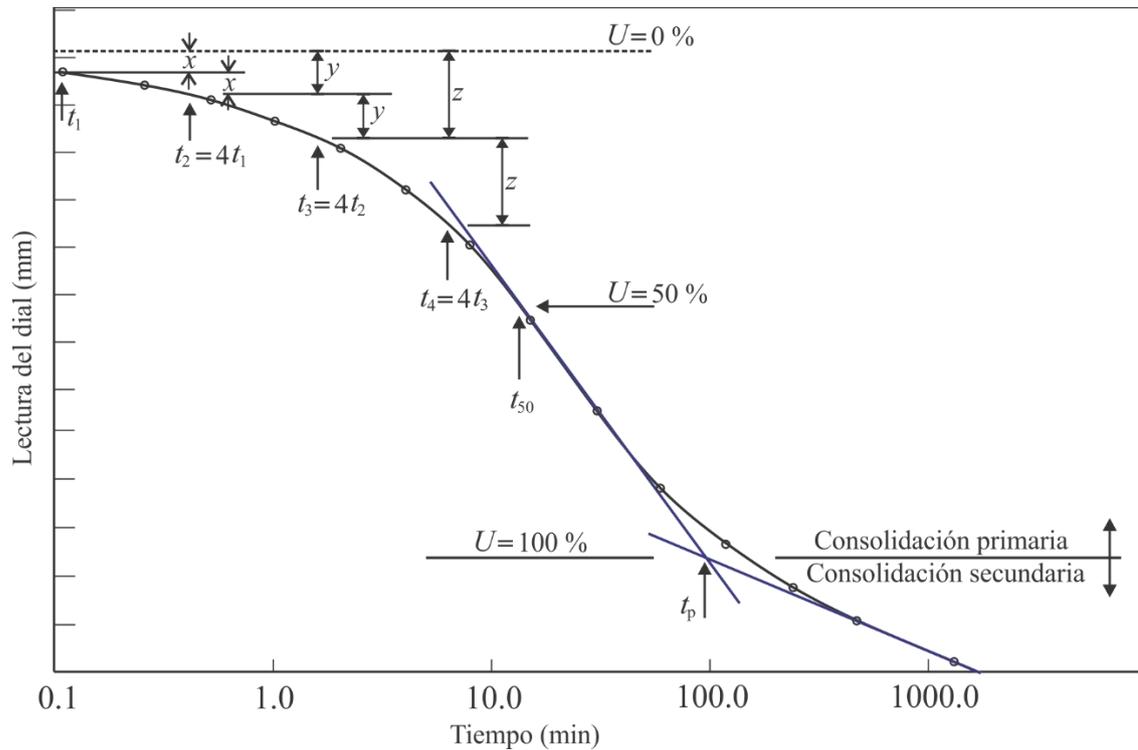
Para seleccionar la velocidad de corte apropiada, se puede seguir uno de los procedimientos que se indican a continuación:

#### 2.3.2.2.1 Método de Casagrande

De la etapa de consolidación, se toman las lecturas de deformación vertical y el tiempo transcurrido durante la consolidación, con intervalos de tiempo que permitan representar en un gráfico, la deformación vertical versus el logaritmo del tiempo.

**Figura 4**

*Método del logaritmo de tiempo para determinar el coeficiente de consolidación*



Nota. Determinación de  $t_{50}$  por el método de Casagrande a partir de datos de consolidación en laboratorio. Tomado de (Holtz & Kovacs, 1981).

Para determinar la velocidad de corte requiere una estimación del tiempo del tiempo requerido para la disipación de la presión de poro y la deformación necesaria para llegar a la falla. El coeficiente de consolidación,  $C_v$ , propuesto por Casagrande, se determina para un 50% de consolidación

$$C_v = \frac{T_{50} H_s^2}{t_{50}} = \frac{0.197 \cdot H_s^2}{t_{50}}$$

Donde  $H_s$  es la distancia de drenaje durante la etapa de consolidación, y  $t_{50}$  es el tiempo correspondiente al 50% de la consolidación primaria (Budhu, 2011; Holtz & Kovacs, 1981; Jimenez & de Justo, 1975; Whitlow, 1998).



$$t_f = \frac{H_s^2}{2 \cdot 0.197 \cdot H_s^2 (1 - U_f)} \cdot t_{50}$$

Asumiendo que  $U_f = 0.95$ , el tiempo de falla se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t_f = 50t_{50}$$

Donde:

$t_f$  = tiempo total estimado, transcurrido hasta alcanzar la falla, minutos.

$t_{50}$  = tiempo requerido para el que el espécimen alcance el 50% de la consolidación, bajo el esfuerzo normal especificado, minutos.

El tiempo  $t_{50}$  corresponde al 50% de la consolidación primaria, se determina directamente del gráfico deformación vertical versus logaritmo del tiempo.

#### 2.3.2.2.2 Método de Taylor o de la raíz cuadrada del tiempo

Para aplicar este método se presenta en la ordenada la lectura de la deformación vertical versus la raíz cuadrada del tiempo. El principio de la curva teórica es parabólico, con esta representación queda convertido en una línea recta (Budhu, 2011; Jimenez & de Justo, 1975; Lambe & Whitman, 1969; Whitlow, 1998).

El coeficiente de consolidación,  $C_v$ , corresponde al 90% de la consolidación primaria



$$C_v = \frac{T_{90} H_s^2}{t_{90}} = \frac{0.848 \cdot H_s^2}{t_{90}}$$

Donde  $H_s$  es la distancia de drenaje durante la etapa de consolidación, y  $t_{50}$  es el tiempo correspondiente al 50% de la consolidación primaria (Budhu, 2011; Holtz & Kovacs, 1981; Jimenez & de Justo, 1975; Nicholson, 2015; Whitlow, 1998).

Con este método, el tiempo de falla se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t_f = 11.6 t_{90}$$

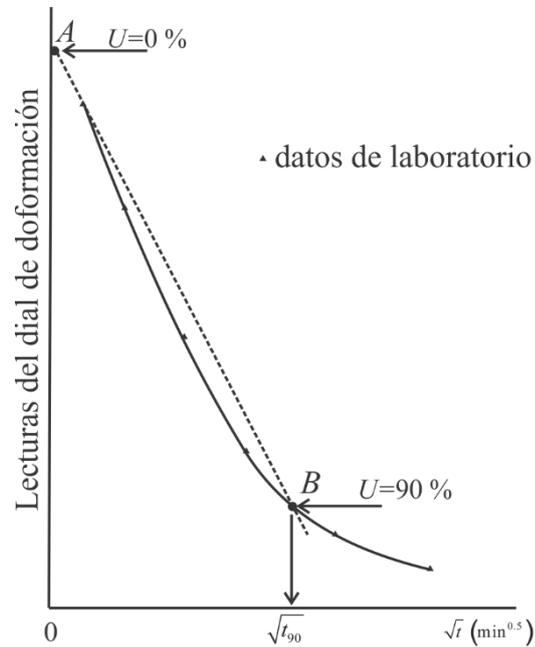
Donde:

$t_f$  = tiempo total estimado, transcurrido hasta alcanzar la falla, minutos.

$t_{90}$  = tiempo requerido para el que el espécimen alcance el 90% de la consolidación, bajo el esfuerzo normal especificado, minutos.

## Figura 5

### Método de la raíz cuadrada del tiempo de Taylor



*Nota.* Método para calcular  $C_v$  a partir de datos de consolidación en laboratorio. Tomado de (Coduto et al., 2016).

Para determinar la velocidad de desplazamiento se calcula dividiendo el desplazamiento relativo entre el tiempo transcurrido.

$$v_f = \frac{d_f}{t_f}$$

Donde:

$v_f$  = velocidad de desplazamiento, minutos.

$d_f$  = desplazamiento lateral relativo, mm.

Para determinar el desplazamiento lateral relativo, dependerá de muchos factores, incluyendo el tipo de material y la historia de esfuerzos. Si estos datos no se tuvieran,

para suelos finos normalmente consolidados o ligeramente sobreconsolidados se considera 10 mm.

### **2.3.2.3 Rotura de la muestra de suelos**

La muestra de suelo es sometida al corte mediante la acción de una fuerza horizontal aplicada a una velocidad constante. Se toman lecturas de deformación horizontal, deformación vertical y lecturas de la deformación del anillo de carga durante el ensayo (ASTM-D3080, 2011; Head, 1994). Después que la falla es alcanzada, se debe detener el dispositivo de ensayo, este desplazamiento puede extenderse desde el 10 al 20 por ciento de la longitud del espécimen original (Whitlow, 1998).

## **2.4 PARÁMETROS FUNDAMENTALES**

### **2.4.1 Cohesión**

La cohesión se desarrolla debido a la adherencia que existe entre las partículas de suelo, generadas por la atracción que ejercen unas con otras a causa de las fuerzas moleculares (Crespo Villalaz, 2004; Rajapakse, 2016). En la mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas, mientras que en la física, este término se utiliza para representar la resistencia a la tensión (Lambe & Whitman, 1969; Nicholson, 2015; Suárez, 1998).

### **2.4.2 Ángulo de fricción**

La resistencia del suelo generada debido a la fricción está representada por el ángulo de fricción que es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física (Rajapakse, 2016; Suárez, 1998).



El ángulo de fricción depende del tipo de material constitutivo de las partículas, tamaño de los granos o partículas, forma de los granos o partículas, distribución de los tamaños de granos o partículas, fábrica o microestructura (organización de las partículas) densidad, permeabilidad (facilidad de drenaje), presión normal de confinamiento, presión de preconsolidación (Raj, 2013; Suárez, 1998).

## **2.5 VELOCIDAD DE CORTE**

Todos los materiales viscosos y todos los materiales plásticos tienen una resistencia a la deformación al corte que varía con la velocidad a la cual dicha deformación al corte ocurre (Taylor, 1961).

La resistencia plástica a cualquier velocidad de corte conocida y en un suelo cohesivo y a varias densidades es aproximadamente proporcional a la presión intergranular (Taylor, 1961).

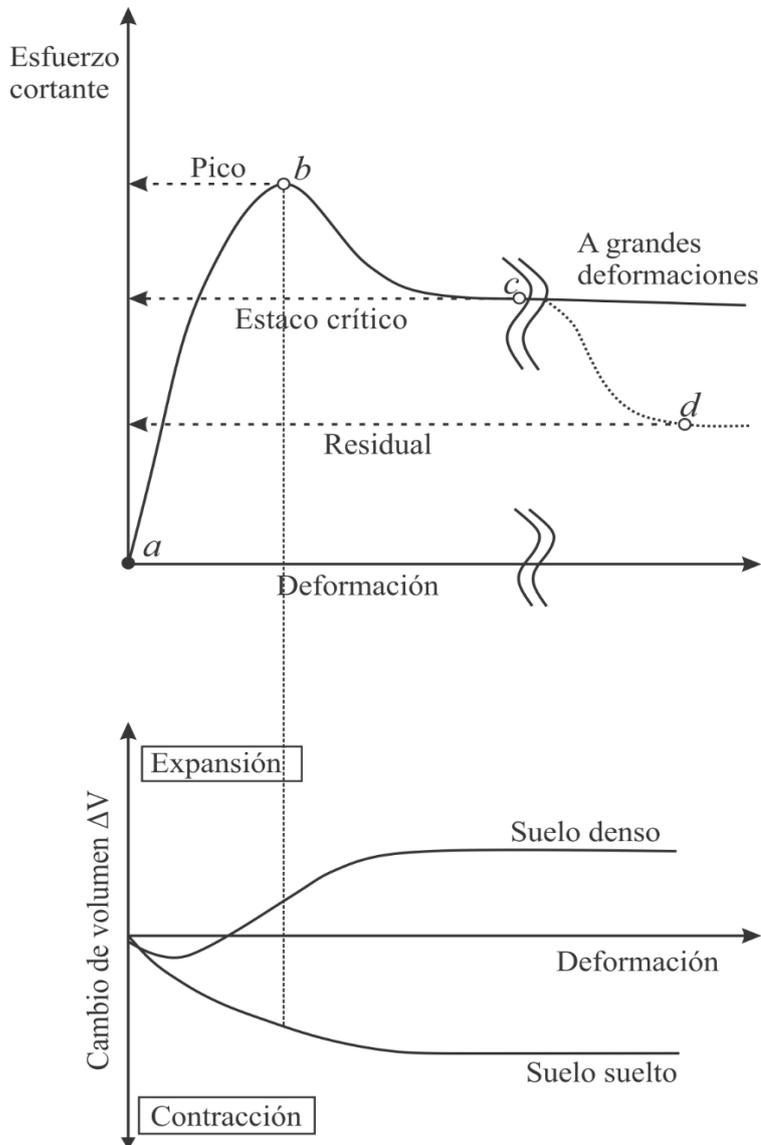
El efecto de la velocidad de corte sobre la resistencia se cree que es causado por las características de viscosidad o de plasticidad del material en las zonas de absorción vecinas a los puntos de contacto o casi contacto de las partículas de suelo cohesivo (Taylor, 1961). Este efecto es importante como para que amerite ser tratado en una discusión detallada. La velocidad de aplicación de la carga, depende de las características de consolidación del suelo (Taylor, 1961).

## **2.6 CARACTERÍSTICAS DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN**

Hvorslev (1960, como se citó en Raj 2013) afirma que conocer el esfuerzo cortante en y después de la falla y la forma de las curvas esfuerzo-deformación son de suma importancia en los estudios de problemas de estabilidad y, más particularmente, en materiales que experimentan fallas progresivas.

**Figura 6**

*Comportamiento del esfuerzo cortante en los suelos*



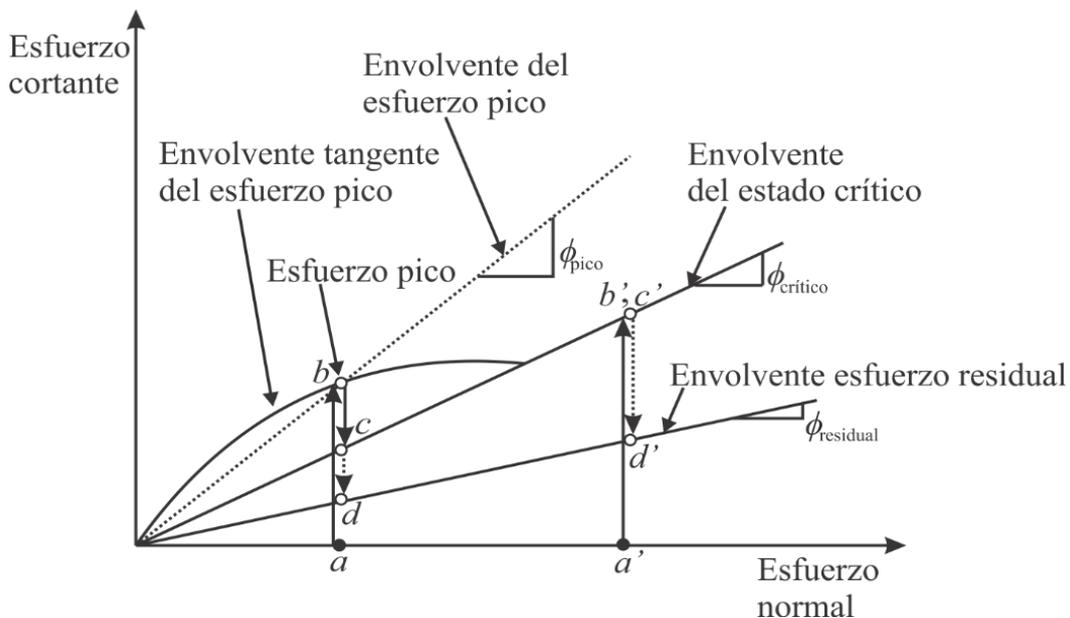
*Nota.* Resistencia máxima, crítica, y residual a partir de ensayos en laboratorio y curva de cambio de volumen obtenida del ensayo de corte directo. Tomado de (Ishibashi & Hazarika, 2015; Mitchell & Soga, 2005; Whitlow, 1998).

La curva esfuerzo-deformación de una prueba de corte es típicamente de la forma que se muestra en la Figura 6. La resistencia máxima de un suelo (punto b) puede ser mayor que la resistencia del estado crítico, en el que el suelo se deforma bajo una carga sometida a volumen constante (punto c). Para algunos suelos, las partículas se alinean a lo largo de un plano de falla localizado después de una gran deformación por corte, y la resistencia disminuye aún más hasta la resistencia residual (punto d). Las tres envolventes

de falla correspondientes se pueden definir como se muestra en la Figura 7, con ángulos de fricción máxima, crítica y residual.

**Figura 7**

*Envolventes de falla del suelo*



*Nota.* Resistencia máxima, crítica, y residual y ángulo de fricción asociado. Tomado de (Mitchell & Soga, 2005).

La determinación de la envolvente se realiza mediante el trazado de la recta que mejor se ajuste a los puntos correspondientes a los esfuerzos de corte determinados experimentalmente en laboratorio. Las envolventes de falla correspondientes se pueden definir como se muestra en la Figura 7, con ángulos de fricción máxima, crítica y residual como se indica (Mitchell & Soga, 2005).

El esfuerzo ultimo representa la resistencia ultima del suelo, este valor último se alcanza a deformaciones unitarias de entre 10 a 20 por ciento (Whitlow, 1998).

El suelo puede contraerse o dilatarse durante el corte, como se ve en la Figura 6, donde las relaciones esfuerzo cortante - deformación y sus características de cambio de



volumen durante el corte están influenciadas en gran medida por la densidad inicial de las muestras (Budhu, 2011; Ishibashi & Hazarika, 2015; Mitchell & Soga, 2005).

## **2.7 CAPACIDAD DE CARGA**

Una cimentación es la parte de la estructura que está en contacto directo con el suelo y transmite la carga de la estructura al suelo, el comportamiento de la estructura depende de la naturaleza del suelo y el comportamiento del suelo depende de la forma y tamaño del cimiento, las cargas al ser aplicadas inducen esfuerzos de compresión como de corte en el suelo (Budhu, 2011; Coduto et al., 2016; Nicholson, 2015; Raj, 2013).

Una de las propiedades de ingeniería más importantes para el diseño y desempeño de estructuras construidas sobre o dentro del suelo es la resistencia, esto se refiere a la resistencia al corte, se requiere los parámetros de resistencia al corte para hacer estimaciones de la capacidad de carga de los suelos y la estabilidad de las estructuras geotécnicas, y para analizar las características de esfuerzo - deformación de los suelos. (Coduto et al., 2016; Gunaratne, 2014; Nicholson, 2015; Raj, 2013).

La capacidad de carga puede ser definido como la máxima presión que puede soportar la cimentación al ser aplicada por una estructura o un miembro estructural al suelo que la soporta sin causar asentamientos excesivos o el peligro de falla del suelo al corte (Coduto et al., 2016; Fang & Daniels, 2006; Gunaratne, 2014; Raj, 2013; Taylor, 1961; Wesley, 2010). La capacidad de carga última de un suelo bajo una carga de cimentación depende principalmente de la resistencia al corte, la capacidad permisible o de trabajo para diseño tomará en consideración la resistencia al corte y las características de deformación (Bowles, 1996; Fang & Daniels, 2006; Gunaratne, 2014; Nicholson, 2015; Wesley, 2010).



Muchos ingenieros utilizan las ecuaciones de capacidad de carga desarrolladas por Terzaghi, Hansen, Meyerhoff y Vesic para encontrar la capacidad de carga, donde definieron una ecuación de capacidad de carga de tres términos mediante la superposición de los efectos de la cohesión del suelo, la sobrecarga del suelo y el peso del suelo, respectivamente (Motra et al., 2016; Rajapakse, 2016; Reese et al., 2007).

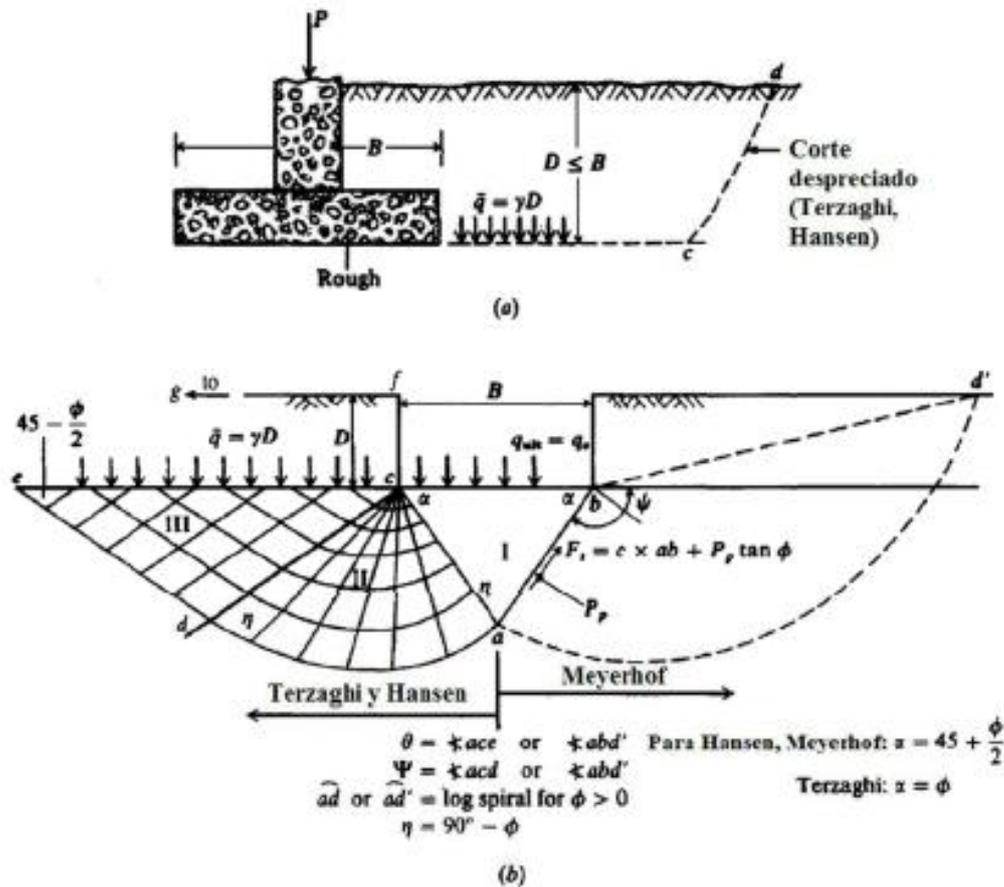
Para diseñar un tamaño de zapata poco profunda y la forma de una estructura, los ingenieros deben conocer la capacidad de carga máxima del suelo.

Meyerhoff (1951-1963) propuso una ecuación de capacidad de carga similar a la de Terzaghi, pero la principal característica de la ecuación de Meyerhoff es la inclusión del factor de forma, factores de profundidad y además los factores de inclinación, también asume que la superficie de falla se extiende hasta la superficie del terreno (Baban, 2016; Bowles, 1996; Budhu, 2011; Fang & Daniels, 2006; Gunaratne, 2014; Laura, 2016; Motra et al., 2016; Powrie, 2004).

La diferencia entre las ecuaciones propuestas por Terzaghi y Meyerhof es que en la ecuación de Meyerhof toma en cuenta la resistencia al corte del suelo por encima de la base de la zapata, es decir que la superficie de falla se extiende hasta la superficie del terreno (Laura, 2016).

## Figura 8

Método de Meyerhof.



Nota. a) Cimentación superficial con base rugosa. Las ecuaciones de Terzaghi y Hansen desprecian el corte a lo largo de cd; b) Interacción suelo-cimiento para las ecuaciones de capacidad portante para cimientos corridos – lado izquierdo para Terzaghi (1943), Hansen (1970), y lado derecho para; Meyerhof (1950). Tomado de Bowles (1996, como se citó en Laura, 2016).

La ecuación de Meyerhof puede ser aplicada a cimentaciones tanto superficiales como cimentaciones profundas. Estas adiciones producen una ecuación de la forma general como:

$$q_u = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma$$

Los factores utilizados por este autor, se presentan a continuación:

Factores de capacidad portante



$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \cdot \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \cdot \tan (1.4 \phi)$$

### Factores de forma

Para  $\phi = 0^\circ$

$$s_c = 1 + 0.2 \cdot \left( \frac{B}{L} \right) \cdot \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$s_q = s_\gamma = 1$$

Para  $\phi > 10^\circ$

$$s_c = 1 + 0.2 \cdot \left( \frac{B}{L} \right) \cdot \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$s_q = s_\gamma = 1 + 0.1 \cdot \left( \frac{B}{L} \right) \cdot \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

### Factores de profundidad

Para  $\phi = 0^\circ$

$$d_c = 1 + 0.2 \frac{D_f}{B} \sqrt{\tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)}$$

$$d_q = d_\gamma = 1$$

Para  $\phi > 10^\circ$

$$d_c = 1 + 0.2 \frac{D_f}{B} \sqrt{\tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)}$$

$$d_q = d_\gamma = 1 + 0.1 \frac{D_f}{B} \sqrt{\tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)}$$

### Factores de inclinación

$$i_c = i_q = \left( 1 - \frac{\theta}{90^\circ} \right)^2$$

$$i_\gamma = \left( 1 - \frac{\theta}{\phi} \right)^2$$



Donde  $\theta$  = ángulo de inclinación de la carga respecto a la vertical.

## **2.8 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.8.1 Hipótesis general**

El incremento de la velocidad de corte en el ensayo de corte directo influye en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno.

### **2.8.2 Hipótesis específicas**

- El incremento de la velocidad de corte influye sobre el parámetro de resistencia cohesión con el ensayo de corte directo en un suelo de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno.
- El incremento de la velocidad de corte influye sobre el parámetro de resistencia ángulo de fricción con el ensayo de corte directo en un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno.

## **2.9 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

De acuerdo con el tipo de investigación planteado, las variables que se consideraron para esta investigación corresponden a una variable independiente y otra variable dependiente, las cuales serán indicados y definidos a continuación:

### **2.9.1. Variable independiente**

Velocidad de corte, debido a que ésta será la variable que será manipulada para observar su influencia en los resultados de la variable dependiente. El estudio del presente trabajo busca estudiar la influencia de la velocidad de corte sobre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante mediante el ensayo de corte directo.

### 2.9.2. Variable dependiente

Resistencia al esfuerzo cortante, debido a que éste es el parámetro cuya variabilidad es necesario estudiar, con fines de su aplicación en los cálculos y diseños de obras de ingeniería correspondientes.

**Tabla 1**

*Matriz de operacionalización de variables*

<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
Velocidad de corte	Velocidad de desplazamiento en ensayo de corte directo.	mm/min
Resistencia al esfuerzo cortante	Ángulo de fricción en Ensayo de Corte Directo	Equipo de corte directo
	Cohesión en Ensayo de Corte Directo	Equipo de corte directo
Propiedades básicas del suelo	Características	Contenido de humedad Peso unitario Granulometría Límite líquido – límite plástico Gravedad específica (Gs)

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En esta sección se realiza una descripción y reconocimiento de la zona de estudio, donde se ha realizado la presente investigación. Esta comprende la ubicación geográfica, extensión superficial, topografía y condición climática de la zona de estudio.

##### 3.1.1 Ubicación geográfica

La presente investigación prioriza la influencia de la velocidad de corte en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de un suelo fino. Geográficamente el área de estudio en esta investigación se encuentra ubicado en el Distrito de Puno, Provincia de Puno, Región Puno, en la zona norte de la bahía interior del lago Titicaca a un costado de la vía férrea frente a la Escuela de Posgrado de la UNA Puno.

La Bahía Interior de Puno, pertenece al Lago Titicaca, en cuyas orillas se encuentra poblado la ciudad de Puno, tiene una extensión de 17.5 Km<sup>2</sup> (17 500 000 m<sup>2</sup>). Geográficamente la ubicación del estudio se encuentra en la coordenada, latitud sur 15° 52' 19.92", longitud Oeste 70° 0'3.35" y 3822 msnm Para el logro de los objetivos de esta investigación se ha recopilado información mediante calicatas. (391478.00 m E, 8249820.00 m S)

## Figura 9

### *Ubicación geográfica de la zona de estudio*



*Nota.* Fotografía satelital de la zona de estudio. Fuente: Tomado de Google Earth.

### **3.1.2 Descripción de la zona de estudio**

La zona de estudio de la presente investigación se encuentra ubicada en la parte norte de la ciudad de Puno. Esta zona tiene una topografía relativamente plana. El terreno



de la zona de estudio está ubicado por el Norte, con la con la línea férrea Puno Juliaca, por el Sur con el Lago Titicaca, por el este con la estación meteorológica automática del SENAMHI Puno y por el oeste por el ingreso al malecón ecoturístico de la bahía interior de puno del Lago Titicaca, frente a la UNA Puno.

El estudio se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, la presente investigación está referida a un suelo fino, que se encuentra en la Ciudad de Puno.

### **3.1.3 Condición climática**

La región de puno se encuentra ubicada en el Sur Este del Perú. La temperatura promedio es de 8° centígrados alcanzado un máximo de 10° centígrados, con temperaturas de oscilan entre 4 y 18 grados centígrados durante los meses de noviembre a marzo, con temperaturas menores a 0° de junio a octubre, con precipitaciones pluviales de 703 mm promedios anuales. Cabe mencionar que las direcciones del viento predominantes en la zona de estudio son de Este a Oeste.

## **3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA**

### **3.2.1 Población**

La población de estudio en esta investigación está constituida por material obtenido de la bahía interior del Lago Titicaca. Para la extracción de las muestras de suelo se ubica el lugar de interés (suelo fino) para obtener una muestra representativa del suelo. Das (2013) da a conocer que los depósitos de suelo aluvial se generan por la acción de los arroyos y ríos, y se caracteriza por tener una estratificación muy irregular, además de



esta constitución de distintos tamaños de partículas, como son las arcillas, limos y gravas. Los limos y arcillas generalmente se depositan en las planicies de inundación.

### **3.2.2 Muestra**

La muestra de suelo considerado en este estudio está constituida por un suelo fino, que se obtuvo de la bahía interior del Lago Titicaca. La muestra de suelo es un suelo fino donde se busca determinar los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante para diferentes velocidades de corte.

### **3.2.3 Muestreo**

Para llegar a resultados confiables en laboratorio es indispensable cubrir en forma adecuada en la etapa previa. Las muestras de suelo pueden obtenerse en dos estados que corresponden a muestras alteradas e inalteradas.

El estado de muestra a obtener dependerá del tipo de estudio que se llevará a cabo. Para fines de esta investigación el tipo de muestra a obtener es muestras inalteradas; son muestras en las cuales se trata de mantener su estructura interna y textura se conserven al momento de su extracción y posterior traslado a laboratorio, cabe precisar que estas muestras de suelo sufrirán algún tipo de alteración debido al cambio de presiones, pero gran parte de sus propiedades físicas y mecánicas se conservan. Las extracciones de estas muestras inalteradas pueden ser obtenidas a partir del tallado de cubos de suelo in situ de un pozo a cielo abierto y protegiéndose adecuadamente una vez extraída. Las muestras inalteradas también se pueden obtener mediante el uso de tubos de pared delgada.

Para la extracción de la muestra de suelo se ha determinado por la técnica de muestreo No probabilístico a criterio del investigador, por la proximidad y accesibilidad al punto de investigación. Para Hernández (2019) “el muestreo no probabilístico también



denominadas muestras dirigida, suponen un procedimiento de selección orientado por las características y contexto de la investigación, más por un criterio estadístico de generalización”.

### **3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Según Hernández (2019) recolectar datos significa aplicar uno o varios instrumentos de medición para recabar la información pertinente de las variables de estudio en la muestra o casos seleccionados. En esta investigación la metodología seguida se realiza según sus objetivos, los cuales están referidos a las causas que originan la manipulación de la velocidad de corte en el equipo de corte directo y su influencia en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

El procedimiento de recolección de datos se desarrolló de la siguiente manera:

Revisión bibliográfica: se realizó la revisión bibliográfica con un análisis de información relacionado al tema de investigación

Salida de campo: Se exploró el lugar de estudio para obtener las características del suelo con las propiedades que debe tener y definir la zona para la extracción de la muestra de suelo.

Toma de muestras: Se obtuvo la muestra de suelo a una profundidad de 2.8 m, realizando calicatas. en situ se determinaron los valores de peso unitario y contenido de humedad natural del suelo.

Determinación de propiedades: en situ se determinaron los valores de peso unitario y humedad natural del suelo. En laboratorio se realizaron ensayo con como:



límites de consistencia (límite líquido y límite plástico), gravedad específica y granulometría por lavado.

Determinación de la velocidad de corte en el equipo de corte directo: la velocidad de corte apropiada en el ensayo de corte directo se determina de la etapa de consolidación, en esta investigación el método utilizado para obtener el tiempo de falla es el Método de Taylor, este valor se obtiene de la gráfica lectura de deformación vertical versus tiempo transcurrido durante la consolidación.

Determinación de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo: los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo son determinados en laboratorio mediante el ensayo de corte directo. Estos parámetros son calculados con las velocidades calculadas para cada esfuerzo normal.

Variación de la velocidad de corte: después de haber realizado un grupo de ensayos con las velocidades calculadas, se ejecutan otro grupo de ensayos variando las velocidades de corte a 4, 5, 10 y 20 veces velocidad calculada obteniendo sus respectivos parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. También se realiza ensayos rápidos, donde la velocidad utilizada para este grupo de ensayos es el promedio de las velocidades calculadas.

Presentación de datos: Los datos obtenidos de laboratorio son sistematizados en hojas de cálculo de Microsoft Excel, luego organizados en tablas y figuras, para visualizar la influencia de la variable independiente sobre la variable dependiente.

Codificación de los ensayos de corte directo: se asigna una codificación a cada uno de los ensayos de corte directo de acuerdo a la velocidad ensaya en el equipo de corte

directo, que permitirá identificar cada uno de los ensayos realizados en la presente investigación, esta codificación se adopta de la siguiente manera:

**Tabla 2**

*Codificación de los ensayos de corte directo.*

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
1V-n	Ensayo de corte directo a 1 x velocidad calculada y n el número de ensayo.
4V-n	Ensayo de corte directo a 4 x velocidad calculada y n el número de ensayo.
5V-n	Ensayo de corte directo a 5 x velocidad calculada y n el número de ensayo.
10V-n	Ensayo de corte directo a 10 x velocidad calculada y n el número de ensayo.
20V-n	Ensayo de corte directo a 20 x velocidad calculada y n el número de ensayo.
NC-1VP	Ensayo rápido: Ensayo de corte directo a 1 x velocidad promedio.
NC-3VP	Ensayo rápido: Ensayo de corte directo a 3 x velocidad promedio.
NC-10VP	Ensayo rápido: Ensayo de corte directo a 10 x velocidad promedio.
VC-0.5	Ensayo de corte directo con velocidad de 0.5 mm/min.

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

### **3.4 CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS**

La caracterización de los suelos está relacionada con la con la identificación de las características físicas del suelo las cuales se puede mencionar; textura, color, plasticidad, humedad, tamaño de las partículas, presencia de materia orgánica. La identificación de estas características son determinadas in situ y en laboratorio, la

identificación de estas permitirá clasificar al suelo dentro de los grupos definidos por el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

### 3.4.1 Análisis granulométrico (ASTM D422)

El análisis granulométrico tiene por objetivo determinar la distribución cuantitativa del tamaño de las partículas del suelo. Esta distribución es expresada en términos de porcentaje para cada tamaño de partícula de suelo.

El análisis granulométrico por tamizado consiste pasar la muestra de suelo en estado seco mediante un procedimiento de vibración, a través de un conjunto de tamices. Concluida la vibración se procede a pesar las muestras retenidas en cada uno de los tamices con el fin de determinar los porcentajes retenidos en cada una de ellas.

**Tabla 3**

*Distribución granulométrica del suelo*

Tamiz	% Que pasa
N° 20	99.99
N° 40	99.94
N° 80	99.50
N° 100	99.30
N° 200	98.28

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

El ensayo de análisis granulométrico por tamizado permite clasificar hasta partículas de dimensiones de 0.075mm, este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D-422. Luego de tamizar por la serie de tamices, se obtiene el siguiente resultado.



### 3.4.2 Determinación de límites de consistencia (ASTM D4318)

La determinación de los límites de consistencia parte del concepto de que el suelo se encuentra en diferentes estados, el cual dependerá de la humedad que está presente, la presencia de minerales de arcilla en un suelo fino, este permite ser moldeado en presencia de alguna humedad sin desmoronarse, esta naturaleza cohesiva es debida al agua absorbida que rodea las partículas de suelo fino. Un suelo según su naturaleza y la cantidad de agua que tenga se clasifica en cuatro estados denominados sólido, semisólido, plástico y líquido. El límite del estado líquido es tomado arbitrariamente al contenido de agua en donde la resistencia al esfuerzo cortante ya puede ser medido, aunque sea muy pequeño; este punto se denomina límite líquido. Si la muestra de suelo llega a una disminución del contenido de agua llegará a un punto en el cual, cuando se trate de enrollar en forma de hilo, se empezará a desmoronar en lugar de distorsionarse plásticamente. Este contenido de agua es llamado el límite plástico.

La variación del contenido de agua entre el límite líquido y plástico es un método, muy importante, para medir el comportamiento plástico del suelo, esto se conoce como el índice de plasticidad.

En esta investigación, el suelo estudiado, es un suelo fino. Una de las propiedades físicas de los suelos finos son sus límites de consistencia, los cuales dependen mucho del contenido de agua, la plasticidad proporciona una orientación de las propiedades del suelo, en el desarrollo de esta investigación se determinó el límite líquido, límite plástico y el índice de plásticas del suelo, el valor del índice plasticidad (IP) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. En la Tabla 5 se muestra los valores de los límites de consistencia del suelo sin secado.

El límite plástico representa el punto en el cual es suelo empieza a perder su cohesión por falta de humedad. La prueba es simple y se lleva a cabo enrollando repentinamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo, este ensayo se realiza con la fracción de suelo que pasa por el tamiz número 40. La plasticidad que es una de las propiedades más importantes en suelos finos, es definida como la habilidad de sufrir cambios de forma sin romperse.

**Tabla 4**

*Límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad e índice de fluidez del suelo estudiado en la investigación*

DESCRIPCIÓN	CONDICIÓN	
	Secado	No secado
Límite líquido, $w_L$	60.1 %	75.1 %
Límite plástico, $w_P$	40.4 %	42.7 %
Índice de plasticidad, $I_P$	19.7 %	32.4 %
Índice de fluidez, $I_L$	2.3	1.3

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la Tabla 4 se presenta el resultado obtenido del límite líquido en la condición secado. El secado en una estufa produce la disminución apreciable del límite líquido en suelos orgánicos y algunos inorgánicos.

El secado previo en estufa o al aire también puede cambiar el límite plástico de un suelo con materia orgánica, pero este cambio suele ser poco importante. Este cambio se aprecia comparando los valores de los límites plásticos.



### **3.4.3 Humedad natural**

La humedad natural nos permite determinar la cantidad de agua que contiene la muestra de suelo, es determinado eligiendo una muestra representativa en la calicata, obteniendo los pesos húmedos en el lugar, luego es llevado al horno para obtener el peso seco. Los resultados de los estratos encontrados se muestran en la siguiente tabla, la humedad natural que corresponde al suelo ensayado en esta investigación es el estrato 4.

### **3.4.4 Clasificación del suelo**

Una vez realizada los ensayos de granulometría y límites de consistencia, con los resultados mostrados en la Tabla 4, la muestra presenta una plasticidad alta. Según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), si pasa más del 50 % por el tamiz N° 200, el límite líquido es más del 50 % y según la carta de plasticidad para la clasificación SUCS, la relación entre el límite líquido secado y líquido no secado es 0.80 (mayor a 0.75) se trata de un MH (limo inorgánico de alta plasticidad).

### **3.4.5 Densidad natural**

La densidad del suelo en su condición natural suelo se determinó utilizando un molde de 5.1cm de diámetro y 2.3cm de altura, el procedimiento seguido para obtener el valor de la densidad es tallando la muestra de suelos inalterado a las dimensiones del molde utilizado, luego se obtienen los pesos en una balanza y finalmente llevados al horno para obtener el peso seco de la muestra de suelo.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados y el análisis de los datos obtenidos del suelo. De acuerdo a los objetivos planteados en esta investigación es un suelo fino de alta plasticidad (MH). Las muestras inalteradas que se obtuvieron se realizaron siguiendo procedimientos normativos, la extracción de estas muestras se obtuvieron mediante la excavación de calicatas lo que permite realizar ensayos in situ y laboratorio. En este capítulo se realiza un análisis e interpretación de los resultados obtenidos durante el proceso de investigación. Esta etapa permitirá validar o rechazar las hipótesis planteadas en la presente investigación por lo que es considerado de mucha importancia.

#### 4.1 VELOCIDAD DE CORTE

Para determinar los parámetros de resistencia del suelo al esfuerzo cortante se han realizado ensayos de corte directo para esfuerzos normales de 27.5 kPa, 54.9 kPa, 81.4 kPa y 108.9 kPa, con cada uno de estos esfuerzos sobre el suelo en la caja de corte del ensayo de corte directo, se determinó los tiempos de falla para cada muestra de suelo y con este valor la velocidad de corte.

Los valores de las velocidades corte determinados para los diferentes ensayos de corte directo se muestran en la Tabla 5. Los ensayos 1VC-1, 1VC-2 y 1VC-3 corresponden a ensayos de corte directo ejecutadas con las velocidades calculadas y los demás ensayos fueron ejecutados con velocidades incrementadas intencionalmente, multiplicando la velocidad calculada por 4, 5, 10 y 20 respectivamente, para evaluar la influencia de esta variable en los parámetros de resistencia del suelo estudiado. Los factores multiplicadores fueron determinados con el criterio de apreciar una gran

variación entre las velocidades de corte, y por tanto apreciar mejor las diferencias en la resistencia del suelo.

**Tabla 5**

*Velocidades calculadas para los ensayos de corte directo*

<b>Velocidades de corte calculadas, en mm/min, para cada esfuerzo normal aplicado.</b>				
<b>Ensayo</b>	<b>27.5 kPa</b>	<b>54.9 kPa</b>	<b>81.4 kPa</b>	<b>108.9 kPa</b>
1VC-1	0.220	0.180	0.150	0.070
1VC-2	0.230	0.200	0.180	0.080
1VC-3	0.310	0.270	0.220	0.100
4VC-1	0.140	0.090	0.080	0.060
5VC-1	0.300	0.230	0.100	0.080
10VC-1	0.200	0.130	0.100	0.090
10VC-2	0.180	0.140	0.100	0.080
20VC-1	0.130	0.110	0.070	0.040
Promedio	0.214	0.169	0.125	0.075
Desviación estándar	0.066	0.062	0.053	0.019

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

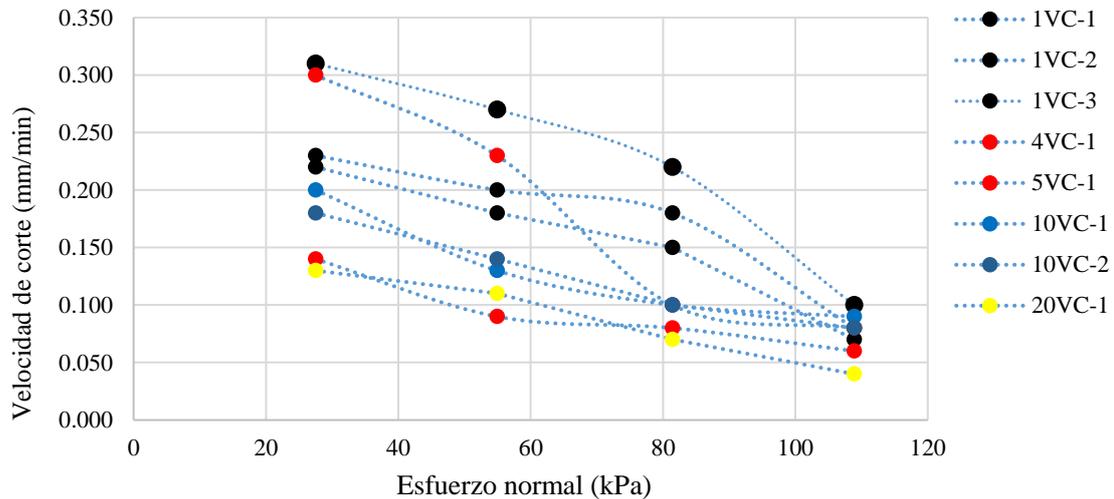
Con estos datos obtenidos en laboratorio se observa que para mayores valores de esfuerzos normales se obtiene menores valores de la velocidad de corte en el ensayo de corte directo, como se puede apreciar en la Tabla 5 y en la Figura 10.

Estos resultados indican que las velocidades de corte calculadas se reducen conforme se incrementa el esfuerzo normal aplicado. Así se tiene que, en relación al primer esfuerzo normal aplicado, las velocidades se reducen al 79 % para el esfuerzo

normal de 54.9 kPa, al 58 % para el esfuerzo normal de 81.4 kPa, y al 35 % para el esfuerzo normal de 108.9 kPa.

**Figura 10**

*Velocidad de corte-esfuerzo normal*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la Tabla 6 se muestran los valores de las velocidades de corte incrementados intencionalmente, por el factor multiplicador, con que fueron realizados cada uno de los ensayos de corte directo en el laboratorio.

Se realizó también ensayos de corte directos sin consolidar y sin calcular la velocidad de corte, que se refiere a ensayos No Consolidados (NC) y con Velocidad de corte Promedio (VP), estos ensayos fueron codificados como NC-#VP, a esta velocidad promedio se ha multiplicado por un factor que permitió evaluar la influencia de la velocidad de corte en la resistencia del suelo.

Para realizar esta serie de ensayos rápidos, las velocidades consideradas fueron el promedio de las velocidades determinadas en laboratorio, el primer ensayo no consolidado (NC-1VP) se realizó con la velocidad promedio con diferentes esfuerzos normales, luego se multiplicaron por 3 a la velocidad promedio para realizar el ensayo

NC-3VP y por 10 a la velocidad promedio para realizar el ensayo NC-10VP, el resultado de la multiplicación por 3 a la velocidad promedio, resultan cercano a la velocidad de 0.5mm/min.

**Tabla 6**

*Velocidades de corte ejecutados*

<b>Velocidades corte ejecutados en el ensayo en mm/min</b>				
	<b>27.5 kPa</b>	<b>54.9 kPa</b>	<b>81.4 kPa</b>	<b>108.9 kPa</b>
1V-1	0.220	0.180	0.150	0.070
1V-2	0.230	0.200	0.180	0.080
1V-3	0.310	0.270	0.220	0.100
4V-1	0.560	0.360	0.320	0.240
5V-1	1.500	1.150	0.500	0.400
10V-1	2.000	1.300	1.000	0.900
10V-2	1.800	1.400	1.000	0.800
20V-1	2.600	2.200	1.400	0.800

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En la Tabla 7 se muestra los valores de las velocidades de corte con que fueron realizados los ensayos rápidos, con factores de incremento de 1, 3 y 10 respectivamente.

**Tabla 7**

*Velocidades para ensayos rápidos con respecto al promedio de velocidades calculadas*

<b>Velocidades corte para ensayos rápidos en mm/min</b>				
<b>Velocidades promedio</b>	<b>27.5 kPa</b>	<b>54.9 kPa</b>	<b>81.4 kPa</b>	<b>108.9 kPa</b>
NC-1VP	0.214	0.169	0.125	0.075
NC-3VP	0.641	0.506	0.375	0.225
NC-10VP	2.138	1.688	1.250	0.750

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

## **4.2 RESPUESTA DEL SUELO AL ESFUERZO CORTANTE**

En esta sección se presenta los resultados obtenidos de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante. También se esquematiza el comportamiento esfuerzo-deformación y la variación de la deformación vertical – deformación horizontal del suelo utilizado en esta investigación. Más adelante se observará los efectos y la forma que se considera para un completo drenaje y se discutirá el caso de drenaje parcial durante la ejecución del ensayo de corte directo.

### **4.2.1 Para el esfuerzo normal de 27.5 kPa**

Las pruebas realizadas en esta investigación son con muestras inalteradas para que su estado natural sea interpretado correctamente y que conserve su resistencia estructural. La hipótesis considerada de que la velocidad de corte tiene influencia en la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo fino, es vista en cada una de las figuras mostradas para cada esfuerzo normal.

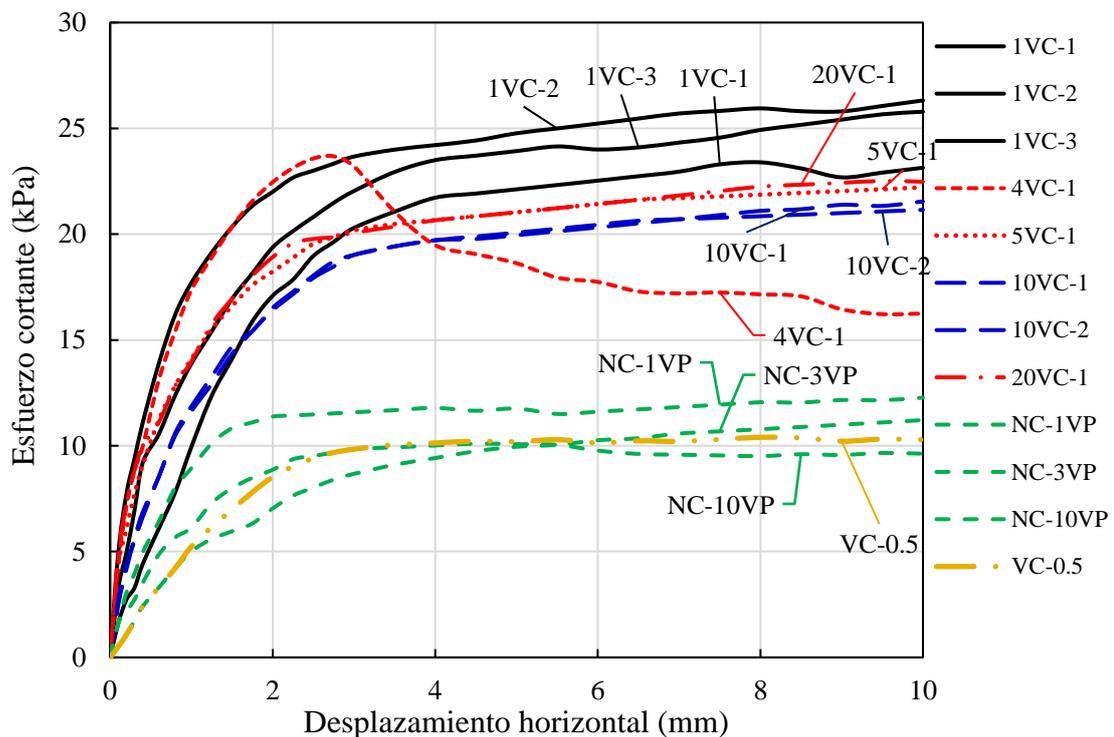
Después de obtener las velocidades de corte para el esfuerzo normal de 27.5 kPa se procedió a cortar el suelo registrando los valores obtenidos por los diales de carga, deformación horizontal y deformación vertical. En la Figura 11 se muestra los resultados de las curvas esfuerzo – deformación para el esfuerzo normal de 27.5kPa de todos los ensayos de corte directo ejecutados.

Como se observa en la Figura 11 las curvas esfuerzo-deformación, de acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo, para los ensayos con velocidades de corte calculada (1VC-1, 1VC-2 y 1VC-3), existe cierta similitud, en estas curvas se observa que el esfuerzo de corte se incrementa con el aumento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores constantes. En los ensayos 1VC-1 y 1VC-3 en la curva

de variación de deformación vertical respecto a la deformación horizontal para el esfuerzo normal de 27.5 kPa el suelo se comprime conforme aumenta la deformación horizontal, y, en el ensayo 1VC-2 la muestra de suelo presenta una ligera compresión inicial y luego procede a incrementar la deformación vertical.

### Figura 11

*Curvas esfuerzos - deformación para el esfuerzo normal de 27.5 kPa*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En el ensayo 4VC-1 el esfuerzo de corte crece rápidamente hasta alcanzar un esfuerzo pico, luego decrece hasta alcanzar un valor constante, esta curva es candidata a ser descartada para obtener los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante, en la curva de variación de deformación vertical respecto a la deformación horizontal para el esfuerzo normal de 27.5 kPa el suelo se expande rápidamente y luego se comprime ligeramente. En las curvas esfuerzo deformación de los ensayos 5VC-1, 10VC-1, 10VC-2 y 20VC-1 presenta un incremento gradual del esfuerzo corte hasta alcanzar valores que tienden a mantenerse constante. En la curva deformación vertical respecto a la deformación

horizontal para el ensayo 5VC-1, 10VC-1, 10VC-2 la muestra presenta una ligera expansión y luego se comprime hasta alcanzar una deformación vertical constante, para el ensayo 20VC-1 la muestra se comprime hasta el final del ensayo.

La curva NC-1VP, presenta valores de esfuerzo cortante mayores que NC-3VP y NC-10VP respectivamente, en la Figura 11 muestra que el incremento de la velocidad de corte, resulta en una disminución del esfuerzo cortante, es decir que cuando se incrementa la velocidad de corte en el ensayo de corte directo se tiene menores valores del esfuerzos de corte, durante la ejecución del ensayo. En las curvas de variación de deformación vertical respecto a la deformación horizontal en estos ensayos, el suelo se comprime hasta el final del ensayo.

#### **4.2.2 Para el esfuerzo normal de 54.9 kPa**

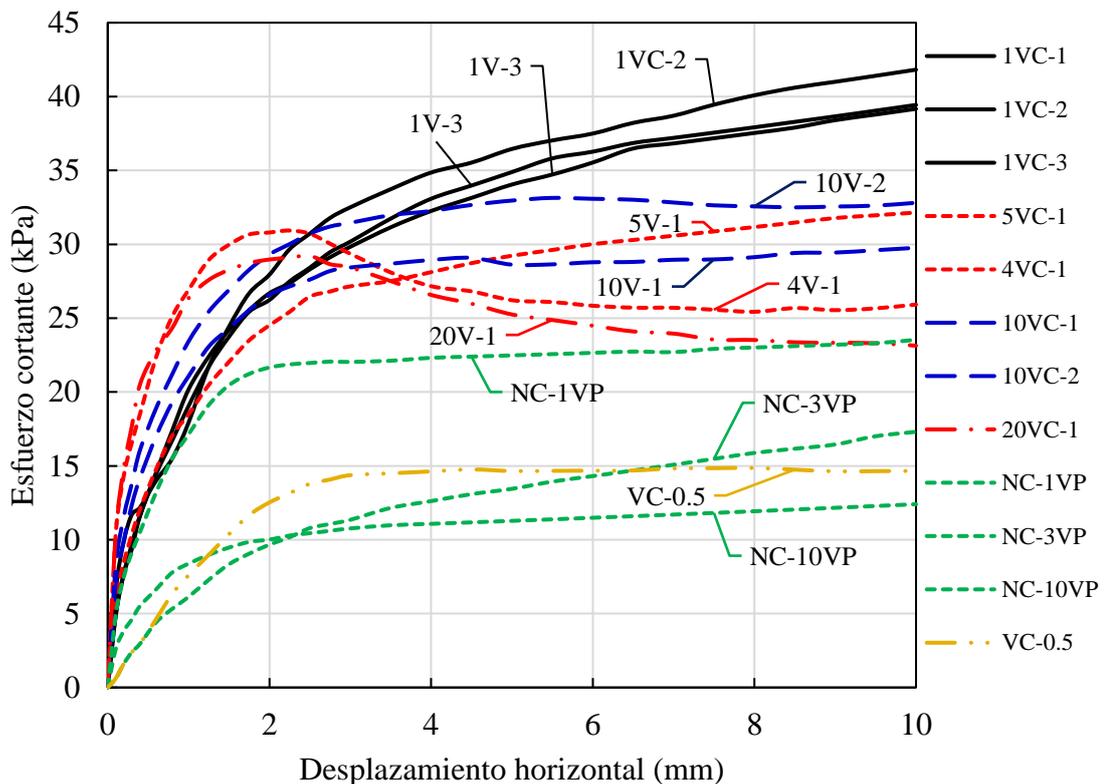
En la Figura 12 se muestra las curvas esfuerzo – deformación para el esfuerzo normal de 54.9 kPa, considerando todos los resultados de ensayos de corte directo realizados en laboratorio.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se obtuvo que para los ensayos de corte directo con velocidad calculada (1VC-1, 1VC-2 y 1VC-3), la gráfica esfuerzo-deformación muestra similitud, considerando como referencia estas curvas, en los ensayos con velocidad incrementada se observa que en las curvas esfuerzo deformación horizontal de 4VC-1 y 20VC-1 el esfuerzo de corte crece rápidamente hasta alcanzar un valor de resistencia pico, luego decrece hasta un valor casi constante durante el ensayo, estas muestras de suelo para el esfuerzo normal de 54.9 kPa, durante el ensayo de corte directo se comprimen conforme aumenta la deformación horizontal. En las curvas 5V-1, 10V-1 y 10V-2 se observa un incremento gradual en el esfuerzo de corte con el aumento de la deformación horizontal hasta un valor que tiende a mantenerse constante. En las

curvas deformación vertical respecto a la deformación horizontal el suelo se comprime hasta el final del ensayo.

### Figura 12

Curvas esfuerzo-deformación para esfuerzo normal de 54.9kPa



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En las curvas del ensayo 10V-2 se observó que el esfuerzo cortante se incrementa rápidamente hasta alcanzar valores por encima de los esfuerzos obtenidos para el esfuerzo normal de 81.4 kPa y 108.9 kPa, su curva de deformación vertical respecto a la deformación horizontal presentó una expansión inicial y luego de 4 mm el suelo se comprime rápidamente hasta el final del ensayo y 20V-1 se observó que el esfuerzo cortante se incrementa rápidamente hasta alcanzar valores por encima de los esfuerzos obtenidos para el esfuerzo normal de 81.4 kPa, con el aumento de la deformación horizontal luego de ese incremento el esfuerzo decrece hasta mantenerse constante. En

las curvas deformación vertical respecto a la deformación horizontal el suelo se comprime hasta el final del ensayo.

En la serie de ensayos no consolidados realizado con velocidad promedio como son NC-1VP, NC-3VP y NC-10VP, las curvas esfuerzo-deformación presentaron también un incremento del esfuerzo de corte con el aumento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores que tienden a mantenerse constante. La curva NC-1VP presenta mayores valores de esfuerzo de corte que la curva NC-3VP, y la curva NC-10VP, en las curvas deformación vertical respecto a la deformación horizontal el suelo se comprime hasta el final del ensayo.

#### **4.2.3 Para el esfuerzo normal de 81.4 kPa**

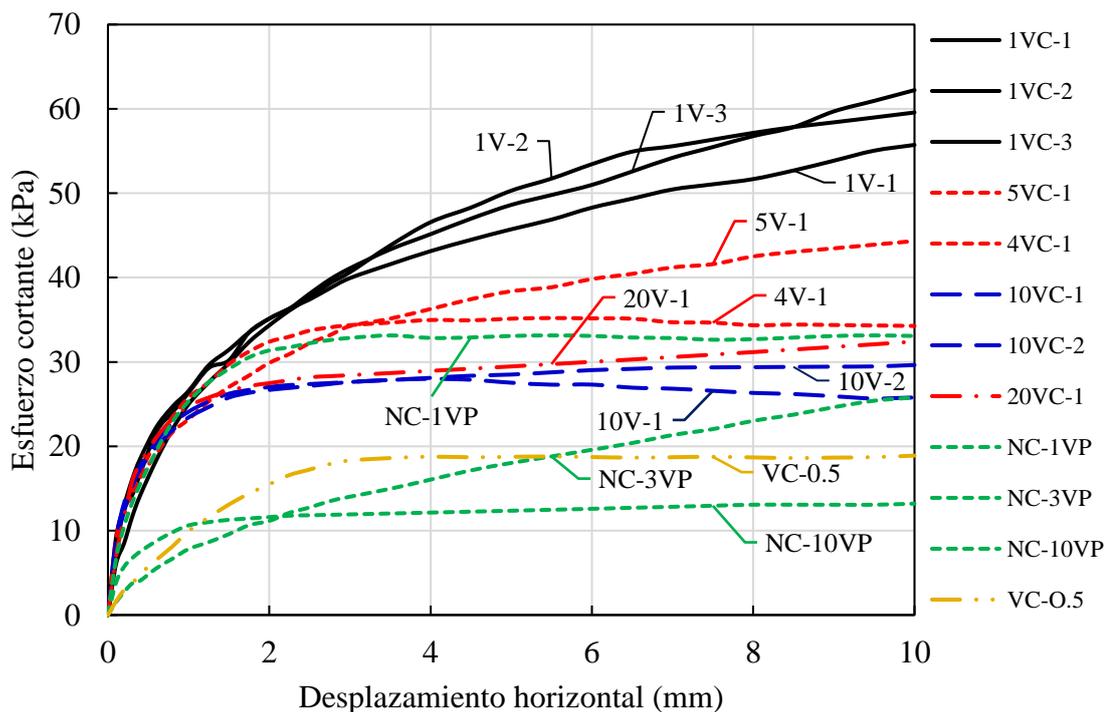
En la Figura 13 se observa que las curvas esfuerzo deformación, en el grupo de ensayo de corte directo con velocidad calculada 1VC-1, 1VC-2 y 1VC-3, el esfuerzo de corte se incrementa con el aumento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores que tienden a mantenerse constantes, estas tres curvas presentan una similitud y se van alejando del resto de curvas, y van obteniendo adquiriendo mayor resistencia al esfuerzo cortante a medida que se incrementa la deformación horizontal. En las curvas deformación vertical respecto a la deformación horizontal se observa que el suelo se comprime hasta el final del ensayo, en el ensayo 1VC-2 el suelo presenta una deformación vertical mayor que para el esfuerzo normal de 108.9 kPa a medida que se incrementa la deformación horizontal. De acuerdo a Budhu (2011) está curva debe estar entre las curvas del esfuerzo normal de 54.9 kPa y 108.9 kPa, por lo que no fue considerada para obtener la envolvente de falla.

Las curvas 4VC-1, 5VC-1, 10VC-1, 10VC-2, 20VC-1 se observa que el esfuerzo cortante se incrementa con el aumento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores

constantes, de estas curvas se aprecia que al incrementar la velocidad de corte hay una disminución del esfuerzo de cortante para un mismo esfuerzo normal, en las curvas deformación vertical respecto a la deformación horizontal el suelo se comprime hasta el final del ensayo.

**Figura 13**

*Curva esfuerzo deformación para esfuerzo normal de 81.4 kPa*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Para el grupo de ensayos no consolidados realizados con velocidad promedio, la curva NC-1VP experimenta un aumento del esfuerzo cortante con el incremento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores que tienden a mantenerse constante al igual que las curvas NC-3VP y NC-10VP, para la velocidad menor con el que fue realizado NC-1VP adquiere mayores esfuerzos de corte con el aumento de la deformación horizontal que los ensayos NC-3VP y NC-10VP para un mismo esfuerzo normal de 81.4 kPa, esto se puede observar en la Figura 13. en las curvas deformación vertical respecto a la deformación horizontal el suelo se comprime hasta el final del ensayo.

#### 4.2.4 Para el esfuerzo normal de 108.9 kPa

De igual forma, en los ensayos 1VC-1, 1VC-2 y 1VC-3 se observa en las curvas esfuerzo – deformación para el esfuerzo normal de 108.9 kPa tienen el mismo comportamiento que los esfuerzos normales indicados anteriormente, donde el esfuerzo de corte también presenta un incremento gradual con el aumento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores que tienden a mantenerse constante, como se observa en la Figura 14. En las curvas deformación vertical respecto a la deformación horizontal se observa que el suelo se comprime hasta el final del ensayo, en el ensayo 1VC-2 el suelo presenta valores de deformación vertical menores que el esfuerzo normal de 81.4 kPa a medida que se incrementa la deformación horizontal, de acuerdo a Budhu (2011) esta curva debe estar por debajo del esfuerzo normal de 81.4 kPa, por lo que no fue considerada para obtener la envolvente de falla.

Para el caso de las curvas 4VC-1, 5VC-1, 10VC-1 y 20VC-1 que fueron experimentadas con velocidades incrementadas se observa que el esfuerzo cortante se incrementa con el aumento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores constantes, de estas curvas se aprecia que al incrementar la velocidad de corte hay una disminución del esfuerzo de cortante para un mismo esfuerzo normal. Sin embargo, en el ensayo 10VC-2 el esfuerzo cortante aumenta con la deformación horizontal hasta alcanzar un valor pico, luego decrece hasta alcanzar valores casi constantes.

En el ensayo 5VC-1 en la curva deformación vertical respecto a la deformación horizontal el suelo se comprime hasta el final del ensayo, sin embargo, esta curva se encuentra por encima de las curvas obtenidas para los esfuerzos normales menores que 108.9 kPa, de acuerdo a Budhu (2011) esta curva debe estar por debajo del esfuerzo normal de 81.4 kPa, por lo que no fue considerada para obtener la envolvente de falla.

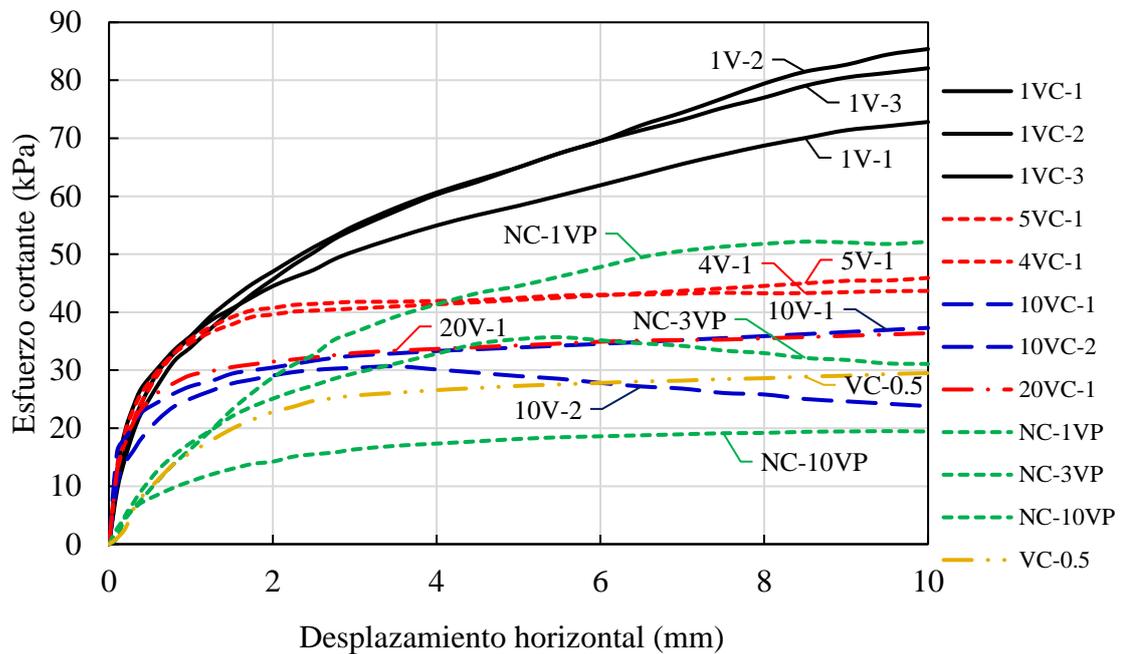


En el ensayo 10VC-2 inicialmente adquiere rápidamente valores próximos que los obtenidos para los esfuerzos normales de 54.9 kPa y 81.4 kPa con el incremento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores constantes por encima de los obtenidos para los esfuerzos menores a 108.9 kPa. En la curva deformación vertical respecto a la deformación horizontal el suelo no presenta expansión ni compresión a medida que se incrementa la deformación horizontal hasta el final del ensayo.

Para los ensayos rápidos, en las curvas esfuerzo-deformación se observa un incremento del esfuerzo de corte con el aumento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores que tienden a mantenerse constante. En la curva NC-1VP el esfuerzo cortante inicialmente presentó valores de menores que la curva NC-3VP, con el aumento de la deformación horizontal esta logra alcanzar valores de esfuerzo cortante mayores que NC-3VP y NC-10VP. La curva NC-1VP con respecto a los esfuerzos normales de 54.9 kPa y 108.9 kPa inicialmente presenta valores por debajo de estas, luego aumenta con el incremento de la deformación horizontal hasta alcanzar valores constantes y la curva deformación vertical respecto a la deformación horizontal el suelo se comprime hasta el final del ensayo y obteniendo valores de deformación vertical muy por debajo de las otras curvas para esfuerzos normales menores a 108.9 kPa, por lo que no fue considerado para la interpretación de los resultados y obtención de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

**Figura 14**

*Curva esfuerzo deformación para esfuerzo normal de 108.9 kPa*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

La curva NC-3VP inicialmente adquiere rápidamente valores mayores que los esfuerzos normales menores a 108.9 kPa con el incremento de la deformación horizontal hasta alcanzar un valor pico, por consiguiente, a medida que la deformación horizontal continua el esfuerzo cortante decrece y finalmente se nivela en un valor constante, sin embargo, en la curva deformación vertical respecto a la deformación horizontal el suelo se comprime obteniendo valores similares que para el esfuerzo normal de 81.4 kPa y luego de alcanzar una deformación horizontal de 4.5 mm el suelo obtiene valores de deformación vertical constante hasta el final del ensayo. En el ensayo NC-10VP el suelo se comprime hasta alcanzar una deformación horizontal de 4 mm, luego el suelo obtiene valores de deformación vertical constante hasta el final del ensayo.

De las curvas esfuerzo-deformación se observa que el aumento del esfuerzo efectivo normal produce un incremento en el valor del estado de esfuerzo de corte, es decir que para mayor esfuerzo normal se tiene mayor esfuerzo cortante, también se



muestra que el incremento del esfuerzo normal, resulta en un aumento en la compresión del suelo. Estos valores de esfuerzo cortante están influenciados por la velocidad de corte, cuando en el ensayo de corte directo para un mismo esfuerzo normal se aumenta su velocidad de corte, los valores de esfuerzo cortante disminuyen con el aumento de la deformación horizontal.

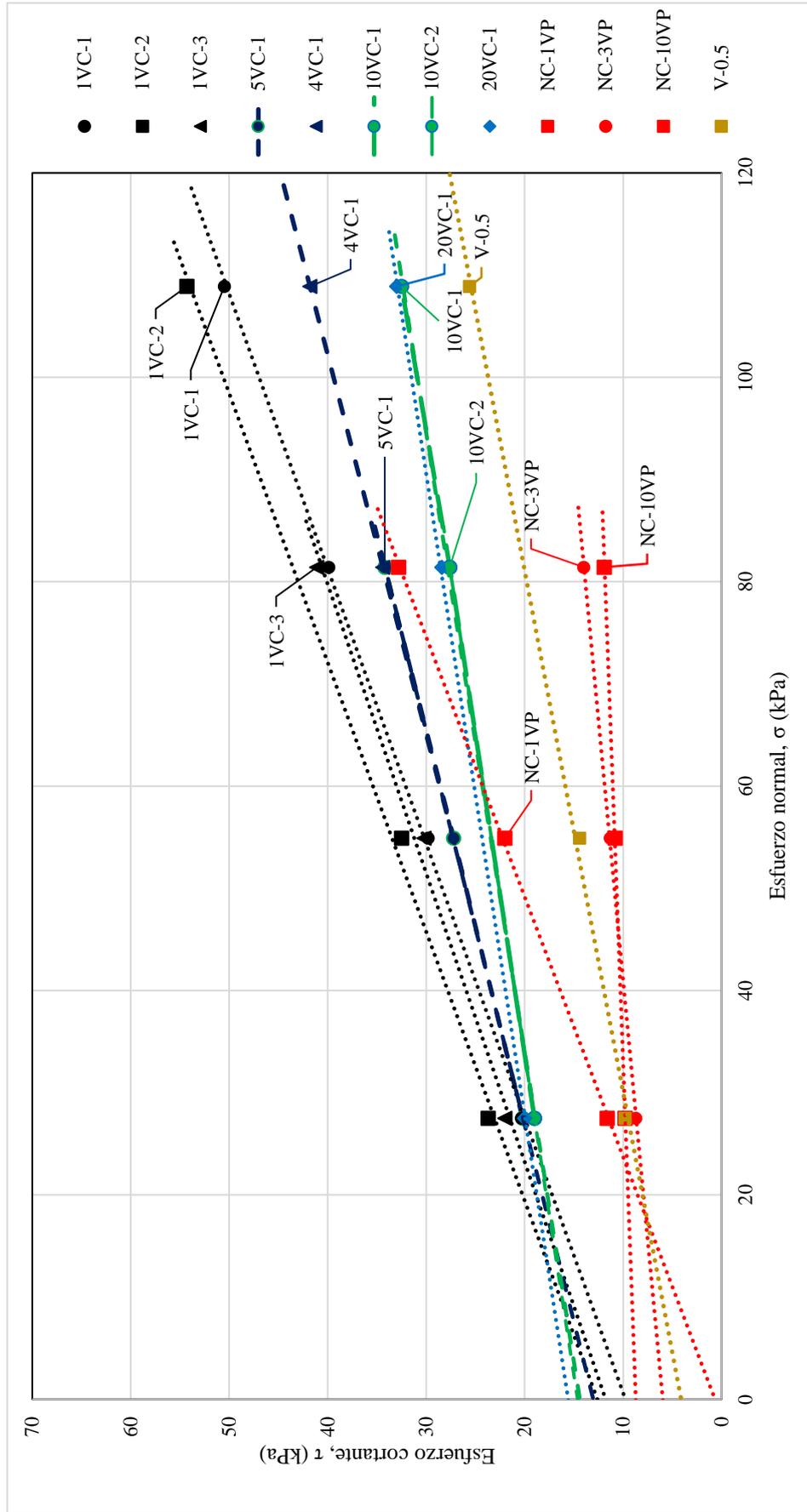
#### **4.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE**

El dispositivo de corte directo nos permite medir directamente la resistencia al esfuerzo cortante, para esta prueba las muestras ensayadas son de dimensiones de 60 mm por 60 mm. Al restringir la mitad de la caja para moverse con respecto a la otra, la muestra de suelo se corta en un plano horizontal.

En la Figura 15 se observa las envolventes de falla para los diferentes ensayos de corte directo realizados, los puntos aceptados para graficar las envolventes han sido seleccionados de un total de cuatro puntos. Para obtener las envolventes de falla en los diferentes ensayos de corte directo, las curvas que no presentan un comportamiento así como lo indica Budhu (2011) que el aumento del esfuerzo normal produce un incremento en el valor de los esfuerzos cortantes, fueron excluidos analizando el comportamiento de cada uno de las curvas esfuerzo cortante – deformación horizontal y las curvas de deformación vertical – deformación horizontal.

**Figura 15**

*Envoltantes de falla, para los diferentes ensayos de corte directo*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En el ensayo de corte directo la muestra de suelo es cortado a un esfuerzo normal constante ( $\sigma$ ), el esfuerzo cortante aumenta rápidamente mientras la deformación horizontal aumenta lentamente, como se muestra en las curvas esfuerzo-deformación. En el ensayo de corte directo no fue posible medir la presión de poros, por lo que no se pudo conocer los esfuerzos efectivos en las muestras de suelo, los resultados obtenidos en la Figura 16 son resultados en función de sus esfuerzos totales.

**Tabla 8**

*Valores del ángulo de fricción y cohesión para los diferentes ensayos*

<b>Descripción</b>	<b>Ángulo de fricción (grados)</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>
1V-1	20.4	9.8
1V-2	20.8	12.6
1V-3	19.5	11.8
4V-1	15.1	12.5
5V-1	14.6	13.0
10V-1	9.4	14.4
10V-2	9.1	14.6
20V-1	9.0	14.2
NC-1VP	21.5	0.7
NC-3VP	5.6	6.0
NC-10VP	2.2	8.7

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Las curvas obtenidas como se muestran en la Figura 15 son para todos los ensayos ejecutados con velocidades corte lentas y velocidades de corte rápidos, los esfuerzos cortantes considerados para obtener estas curvas son para un esfuerzo último, el cual es

considerado para un 15 por ciento de la deformación unitaria. En la Tabla 12 se muestra los valores del ángulo de fricción y cohesión del suelo para las diferentes velocidades de corte.

#### 4.3.1 Ángulo de fricción

Para determinar las envolventes fue mediante el trazado de una recta que mejor se ajuste a los puntos obtenidos para el esfuerzo último determinado experimentalmente con el ensayo de corte directo, considerado a un 15 por ciento de la deformación unitaria. Los valores del ángulo de fricción se muestran en la Tabla 9 para las diferentes velocidades ensayadas.

**Tabla 9**

*Valores del ángulo de fricción para diferentes velocidades(calculadas)*

Descripción	Ángulo de fricción (grados)	Variación (%)
1VC	20.2	-
4VC	15.1	25
5VC	14.6	28
10VC	9.3	54
20VC	9.0	56

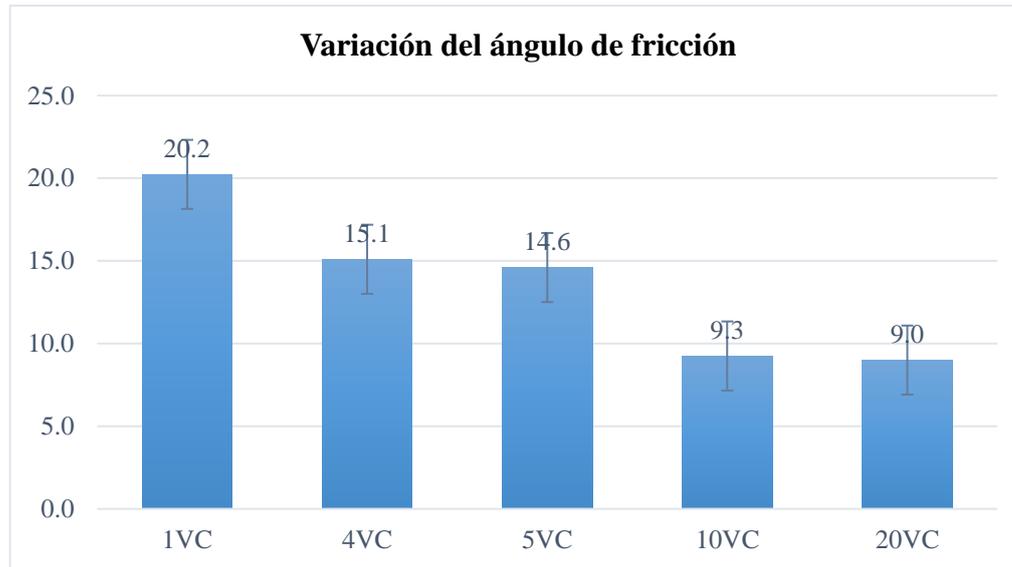
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De la serie de ensayos con velocidad de corte calculadas, el valor del ángulo de fricción es  $20.2^{\circ} \pm 0.67^{\circ}$  y para 10 diez veces la velocidad calculada se tiene un ángulo de fricción de  $9.3^{\circ} \pm 0.21^{\circ}$ . También de la Tabla 13 y Figura 16 se puede observar que el ángulo de fricción se reduce en un 25 % en el ensayo ejecutado con cuatro veces la velocidad calculada, en un 28 % en el ensayo con cinco veces la velocidad calculada, en un 54 % en el ensayo con diez veces la velocidad calculada y 56 % en el ensayo con

veinte veces la velocidad calculada con respecto del valor del ángulo de fricción con velocidad calculada.

**Figura 16**

*Variación del ángulo de fricción*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Los resultados obtenidos en la serie de ensayos rápidos se presentan en la Tabla 10 que fueron realizados con velocidades de corte promedio.

**Tabla 10**

*Ángulo de fricción para velocidades promedio*

Descripción	Ángulo de fricción (grados)	Variación (%)
NC-1VP	21.5	0.0
NC-3VP	5.6	74.0
NC-10VP	2.2	89.8

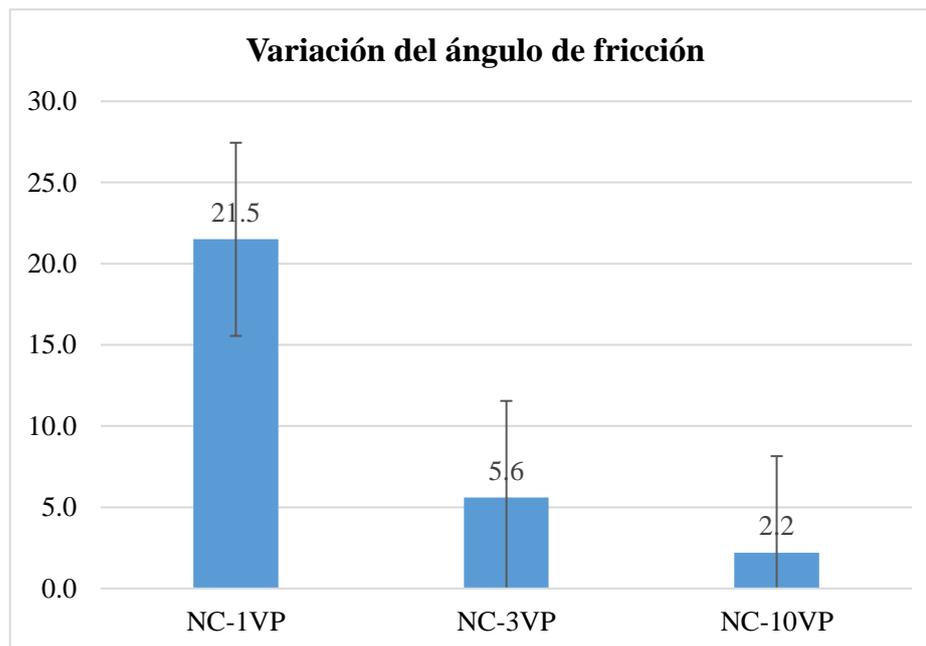
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De acuerdo a los datos de la Tabla 10, en la Figura 17, se muestra que con el incremento de la velocidad corte promedio los valores de ángulo de fricción también disminuyen con respecto al valor obtenido con velocidad promedio. Cuando se

incrementa tres veces la velocidad de corte promedio el valor del ángulo de fricción es  $5.6^\circ$ , la reducción en porcentaje representa un 74% y cuando se incrementa la velocidad de corte promedio el ángulo de fricción es  $2.2^\circ$  esta reducción con respecto al valor con velocidad de corte promedio representa una reducción del 89.8%.

**Figura 17**

*Variación del ángulo de fricción para ensayos rápidos*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

#### 4.3.2 Cohesión

Para la obtención del valor de la cohesión que en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al corte producido por la adherencia entre las partículas del suelo, el esfuerzo considerado de las curvas esfuerzo deformación es el esfuerzo último, el cual se encuentra entre el 10 y 20 por ciento de la deformación unitaria, en esta investigación este esfuerzo es considerado a un 15%, con estos valores de resistencia se dibuja la envolvente de falla para obtener gráficamente el valor de la cohesión y ángulo de fricción.

**Tabla 11**

*Valores de la cohesión para ensayo con velocidad calculada.*

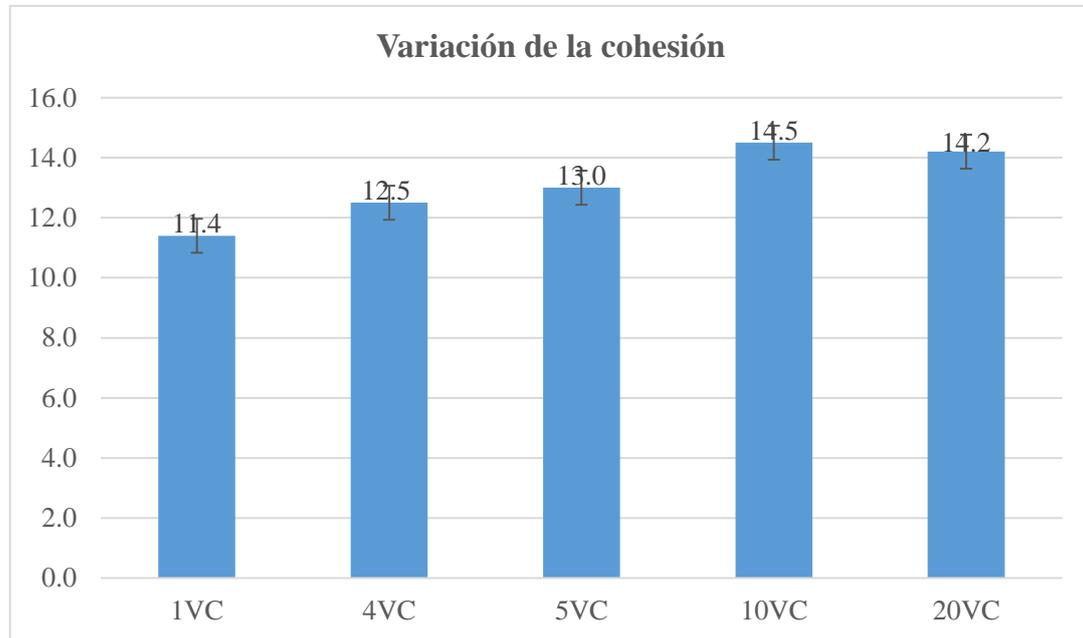
<b>Descripción</b>	<b>Cohesión</b>	<b>Variación</b>
	<b>(kPa)</b>	<b>(%)</b>
1VC	11.4	100.0
4VC	12.5	9.6
5VC	13.0	14.0
10VC	14.5	27.2
20VC	14.2	24.6

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En los ensayos 1VC-1, 1VC-2 y 1VC-3 realizados con velocidad de corte calculadas, el valor de la cohesión es  $11.4 \pm 1.44^\circ$  y para 10 diez veces la velocidad calculada se tiene un de cohesión de  $14.5 \pm 0.14$ . También de la Tabla 11 se observar que la cohesión se reduce en un 9.6 % en el ensayo ejecutado con cuatro veces la velocidad calculada, en un 14 % en el ensayo con cinco veces la velocidad calculada, en un 27.2 % en el ensayo con diez veces la velocidad calculada y 24.6 % en el ensayo con veinte veces la velocidad calculada con respecto del valor de la cohesión de la serie de ensayo realizados sin aumentar la velocidad de corte.

**Figura 18**

*Variación de la cohesión*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Para la serie de ensayos rápidos realizados con velocidad promedio, se observa que, al incrementar las velocidades de corte, el valor de la cohesión aumenta con respecto al ensayo realizado con velocidad de corte promedio de las velocidades calculadas.

**Tabla 12**

*Cohesión para velocidades promedio*

Descripción	Cohesión (kPa)	Variación (%)
NC-1VP	0.7	0.0
NC-3VP	6.0	757.1
NC-10VP	8.7	1142.9

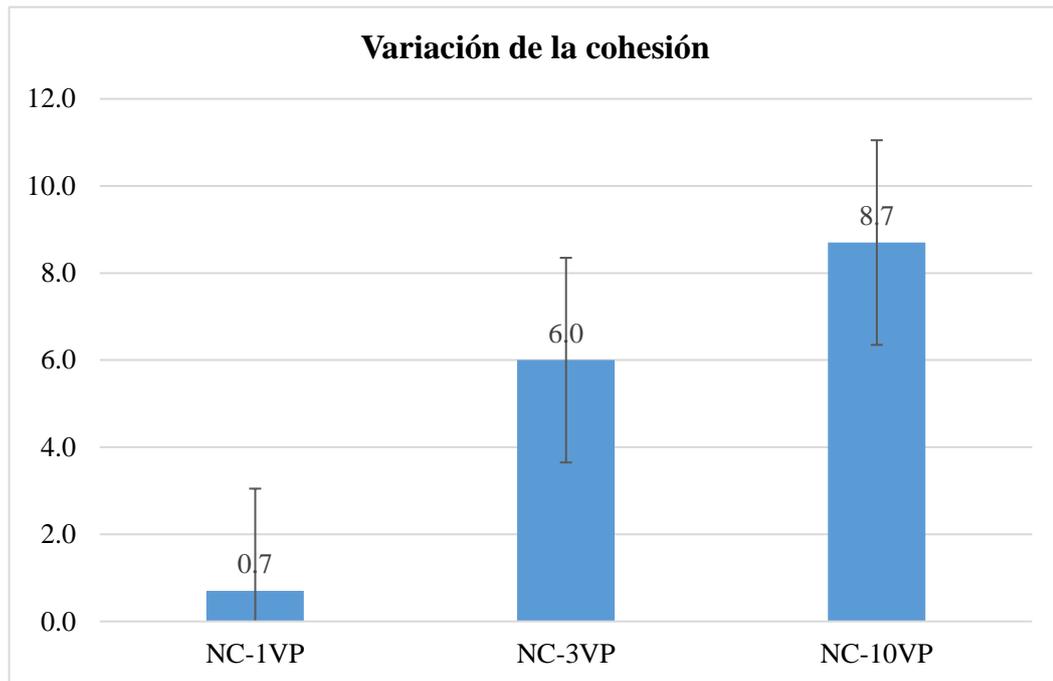
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

De la Tabla 12 y Figura 19, se observa un aumento significativo de la cohesión cuando la velocidad es incrementada a 3 veces la velocidad de corte promedio, este incremento en porcentaje es de 757.1% respecto al valor obtenido con velocidad

promedio y cuando el ensayo es ejecutado con una velocidad de 10 veces la velocidad corte promedio, la cohesión aumenta aún más, este incremento en porcentaje es de 1142.9%.

**Figura 19**

*Variación de la cohesión en ensayos rápidos*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

#### **4.4 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE**

A la capacidad de carga última se le denomina, a la carga por área unitaria de la cimentación a la que ocurre la falla por corte de un suelo. Además, un incremento en la carga sobre la cimentación también se acompañará por un incremento en el asentamiento. Sin embargo, la superficie de falla en el suelo se extenderá gradualmente hacia fuera desde la cimentación (Das, 2013).

Para comparar la variación de los parámetros de resistencia del suelo con la capacidad de carga se usa la fórmula sugerida por Meyerhof (1963) que es aplicable también para cimentaciones rectangulares.

Para determinar la capacidad portante, se utilizaron los valores de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante determinados en laboratorio para las diferentes velocidades, los valores mostrados en la Tabla 13 son determinados para un ancho de zapata (B) que varían desde 1m hasta 5m.

**Tabla 13**

*Capacidad de carga última para los diferentes valores de ángulo de fricción y cohesión.*

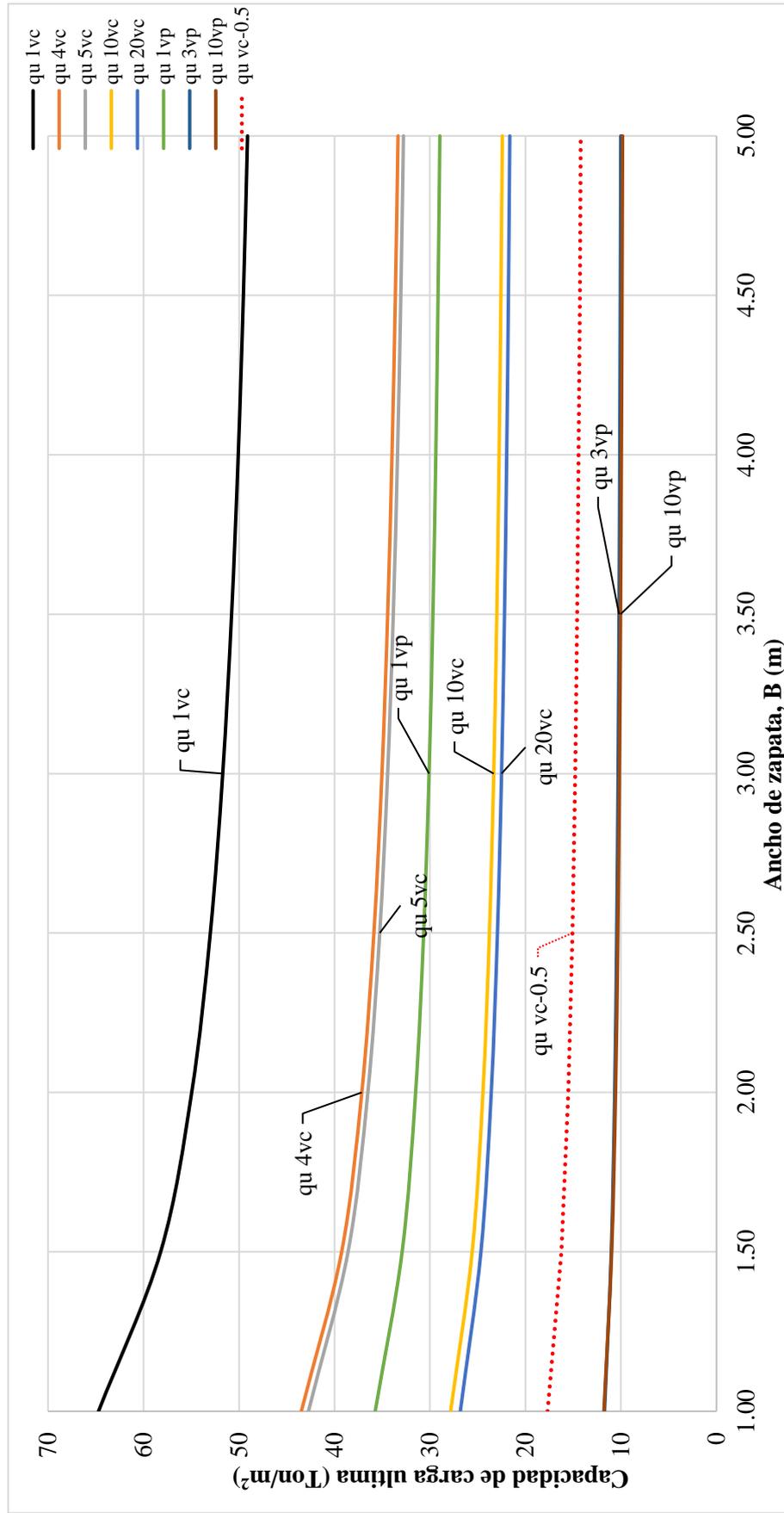
B (m)	$q_u$ 1vc (Ton/m <sup>2</sup> )	$q_u$ 4vc (Ton/m <sup>2</sup> )	$q_u$ 5vc (Ton/m <sup>2</sup> )	$q_u$ 10vc (Ton/m <sup>2</sup> )	$q_u$ 20vc (Ton/m <sup>2</sup> )	$q_u$ 1vp (Ton/m <sup>2</sup> )	$q_u$ 3vp (Ton/m <sup>2</sup> )	$q_u$ 10vp (Ton/m <sup>2</sup> )	$q_u$ vc- 0.5 (Ton/m <sup>2</sup> )
1.00	64.7	43.5	42.7	27.8	26.8	35.7	11.7	11.8	17.7
1.50	58.2	39.3	38.6	25.6	24.7	32.9	11.0	11.0	16.2
2.00	55.0	37.1	36.5	24.5	23.6	31.5	10.7	10.6	15.5
2.50	53.0	35.9	35.3	23.8	22.9	30.7	10.4	10.3	15.1
3.00	51.7	35.0	34.4	23.3	22.5	30.1	10.3	10.2	14.8
3.50	50.8	34.4	33.8	23.0	22.2	29.7	10.2	10.0	14.6
4.00	50.1	34.0	33.4	22.8	22.0	29.4	10.1	10.0	14.4
4.50	49.5	33.6	33.1	22.6	21.8	29.2	10.1	9.9	14.3
5.00	49.1	33.3	32.8	22.4	21.6	29.0	10.0	9.8	14.2

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Los resultados mostrados en la Tabla 13 para la capacidad de carga admisible, son determinados para una relación entre el B y L, esta relación está dada por  $\alpha=B/L$  considerando que para el diseño se espera que las dimensiones de la zapata están en la misma relación que las dimensiones de su columna. Para ver la influencia de la velocidad de corte sobre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante y por ende sobre la capacidad de carga ultima con factor de seguridad de FS=3.

**Figura 20**

*Variación de la capacidad de carga última con el ancho de la cimentación*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En los resultados obtenidos en la Tabla 13 se observa que existe una variación de los valores de la capacidad portante a medida que aumenta el valor de B, en la Figura 20, de acuerdo con lo realizado por Laura (2016), la disminución no debe entenderse como tal, debido que en la práctica lo que interesa es determinar la capacidad máxima admisible que puede soportar una cimentación, para mayor detalle de la variación de la capacidad de carga última se muestra la siguiente figura.

En las curvas mostradas en la Figura 21 se observa una disminución de la capacidad portante a medida que aumenta el valor de B, esta disminución no debe ser considerado alarmante pues la capacidad de carga última es un esfuerzo que se aplica al suelo mediante una cimentación.

En la Tabla 14 se muestran las cargas admisibles para los diferentes valores B y parámetros de resistencia del suelo al esfuerzo cortante, estas cargas admisibles son las cargas que soporta el suelo, se obtiene multiplicando la capacidad de carga admisible por el área de la cimentación, donde la cimentación es parte de una estructura que permite la transmisión de las cargas que actúan sobre él, hacia el suelo.

En la Tabla 14, se observa que la carga admisible que incrementa cuando la dimensión de B aumenta, estos valores para  $Q_s$  fueron determinados con la formula

$$Q_s = \frac{q_u \times B \times L}{FS}$$
$$Q_s = \frac{q_u \times B^2}{\alpha \times FS}$$

**Tabla 14***Carga admisible para los diferentes parámetros de resistencia.*

<b>B</b>	<b>Q<sub>s</sub> 1vc</b>	<b>Q<sub>s</sub> 4vc</b>	<b>Q<sub>s</sub> 5vc</b>	<b>Q<sub>s</sub> 10vc</b>	<b>Q<sub>s</sub> 20vc</b>	<b>Q<sub>s</sub> 1vp</b>	<b>Q<sub>s</sub> 3vp</b>	<b>Q<sub>s</sub> 10vp</b>	<b>Q<sub>s</sub> vc-0.5</b>
<b>(m)</b>	<b>(Ton)</b>	<b>(Ton)</b>	<b>(Ton)</b>	<b>(Ton)</b>	<b>(Ton)</b>	<b>(Ton)</b>	<b>(Ton)</b>	<b>(Ton)</b>	<b>(Ton)</b>
1.00	28.76	19.32	18.99	12.37	11.92	15.88	5.21	5.24	7.86
1.50	58.21	39.25	38.58	25.58	24.67	32.92	11.01	10.97	16.24
2.00	97.70	66.03	64.91	43.48	41.93	56.01	18.95	18.79	27.59
2.50	147.24	99.66	97.96	66.05	63.72	85.17	29.02	28.68	41.90
3.00	206.82	140.14	137.74	93.31	90.03	120.38	41.22	40.65	59.17
3.50	276.45	187.46	184.26	125.25	120.86	161.66	55.55	54.70	79.42
4.00	356.12	241.63	237.51	161.88	156.22	209.00	72.01	70.82	102.63
4.50	445.84	302.65	297.49	203.19	196.09	262.39	90.61	89.03	128.80
5.00	545.60	370.51	364.19	249.18	240.49	321.85	111.33	109.31	157.94

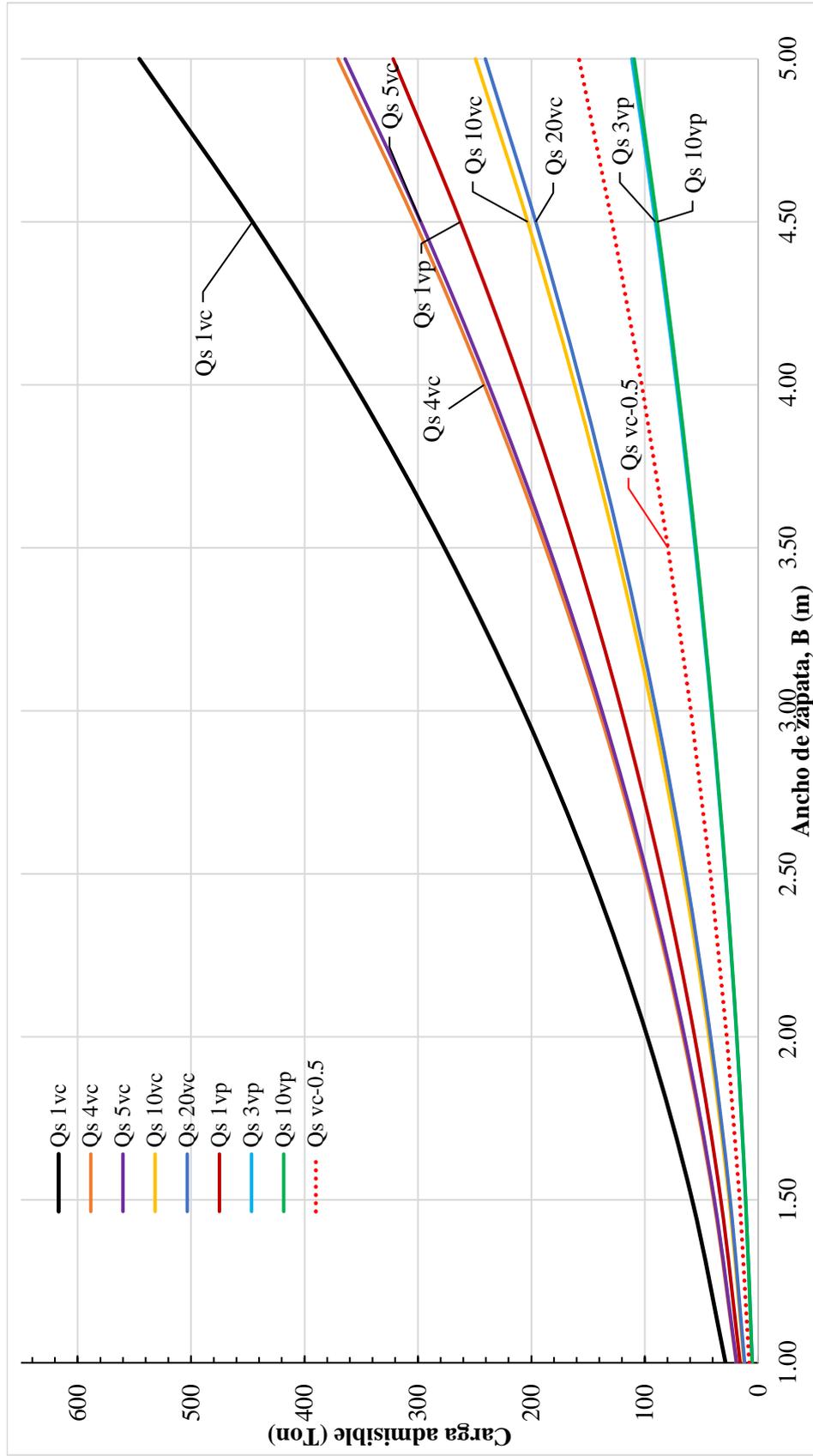
Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Para observar con claridad los incrementos de la carga admisible para los diferentes valores de B, se muestra la siguiente figura.

De la Tabla 14 y la Figura 21 se observa que existe diferencias entre las diferentes curvas obtenidas para la carga admisible en función del ancho de la cimentación, en estas curvas se puede apreciar que la carga admisible aumenta cuando el ancho de la zapata aumenta. La diferencia que existe entre las curvas obtenidas, se debe a que cada uno tiene diferentes factores de corrección para obtener el valor de capacidad de carga admisible, así mismo se observa que la capacidad de carga está en función del ancho de la cimentación.

**Figura 21**

*Carga admisible para los diferentes valores de B*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.



#### 4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan las velocidades de corte en función del esfuerzo normal, los resultados de las velocidades de corte para el esfuerzo normal de 27.5 kPa se obtuvieron desde 0.13mm/min hasta 0.31mm/min de donde se tiene un promedio de 0.214mm/min con una desviación estándar de 0.066, para el esfuerzo normal de 54.9kPa se obtuvieron velocidades desde 0.09mm/min hasta valores de 0.27mm/min de donde se tiene un promedio de 0.169mm/min con una desviación estándar 0.062, para el esfuerzo normal de 81.4kPa se obtuvieron velocidades desde 0.07mm/min hasta 0.22mm/min de donde se tiene un promedio de 0.125mm/min y para el esfuerzo normal de 108kPa se obtuvieron velocidades de corte que varían desde 0.04mm/min hasta 0.1mm/min con un promedio de 0,075mm/min y una desviación estándar de 0.019mm/min. Se presenta la Figura 10 donde se observa que a medida que aumenta el esfuerzo normal la velocidad de corte disminuye. Según DIN 18137-3(2002, como se citó en Thermann et al., 2006) recomienda que la velocidad de corte máxima para suelos cohesivos es 0.5mm/min como valor apropiado, debido a esto se tiene que las velocidades encontradas en la presente investigación se encuentran dentro de esta recomendación. Sin embargo, para evaluar la influencia de la velocidad de corte los ensayos se realizaron con velocidades que van desde 0.22 a 2.6mm/min para el esfuerzo normal de 27.5kPa, para el esfuerzo normal de 54.9kPa con velocidades de 0.18 a 2.2mm/min, para el esfuerzo normal de 81.4kPa con valores desde 0.15 a 1.4 mm/min y para el esfuerzo normal de 108.9kPa con valores desde 0.07 a 0.9mm/min, según Builes (2014) realizó sus ensayos con velocidades de 0.5, 1.0 y 2.0 mm/min y según Eid et al. (1999) desarrollaron sus ensayos con velocidades que van desde 0.015mm/min a 36.5mm/min.

**Tabla 15**

*Resultados de ángulo de fricción y cohesión con velocidades calculadas.*

<b>Ensayo</b>	<b>Ángulo de fricción (grados)</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>
1VC-1	20.4	9.8
1VC-2	20.8	12.6
1VC-3	19.5	11.8
Promedio	20.2	11.4
Desv. Est.	0.67	1.44

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

Para evaluar la influencia de la velocidad de corte sobre los ángulos de fricción, primero se realizaron tres ensayos con las velocidades determinadas de la etapa de consolidación, en la Tabla 15 se presenta los resultados de los parámetros de resistencia para este grupo de ensayos donde el valor promedio del ángulo de fricción es 20.2 grados con una desviación estándar de 0.67 grados y un valor de la cohesión promedio de 11.4kPa con una desviación de 1.44kPa, de acuerdo a Look (2014) para el suelo utilizado en esta investigación, los valores del ángulo de fricción están entre 15 grados a 25 grados, según Simons & Menzies (2000) el valor del ángulo de fricción depende del tamaño de las partículas del suelo el cual puede tomar valores hasta 23 grados y según Li (2020) el resultado de este valor depende del contenido de agua y la densidad del suelo, y el valor de la cohesión entre 10kPa a 20kPa, por lo que los valores determinados en esta investigación se encuentran dentro de estos intervalos.

De acuerdo a los datos de la Tabla 12 en la Figura 15 se muestra los valores de los ángulos de fricción obtenidos del ensayo de corte directo sometidas a corte con velocidades incrementadas donde se observa que los resultados disminuyen comparando



con los valores obtenidos con velocidad calculada, conforme se incrementa la velocidad de corte. La mayor parte de los estudios descritos en la literatura reflejan que la variación del ángulo de fricción con relación a la velocidad de corte, presentan un leve incremento en el ángulo de fricción a medida que se aumenta la velocidad de corte (Builes, 2014; Eid et al., 1999; Huat et al., 2006).

Por otra parte, en la Figura 21 correspondiente a la serie de ensayos consolidados se muestra que los valores de la cohesión obtenidos del ensayo de corte directo son velocidades de corte incrementada se observa que los resultados aumentan a medida que se incrementa la velocidad de corte comparando con los resultados de los ensayos realizados con velocidad obtenidos de la etapa de consolidación. En los estudios descrito en la literatura indican que la variación de la cohesión con relación a la velocidad de corte, presentan un incremento a medida que se aumenta la velocidad de corte (Builes, 2014; Eid et al., 1999; Huat et al., 2006; Thermann et al., 2006).

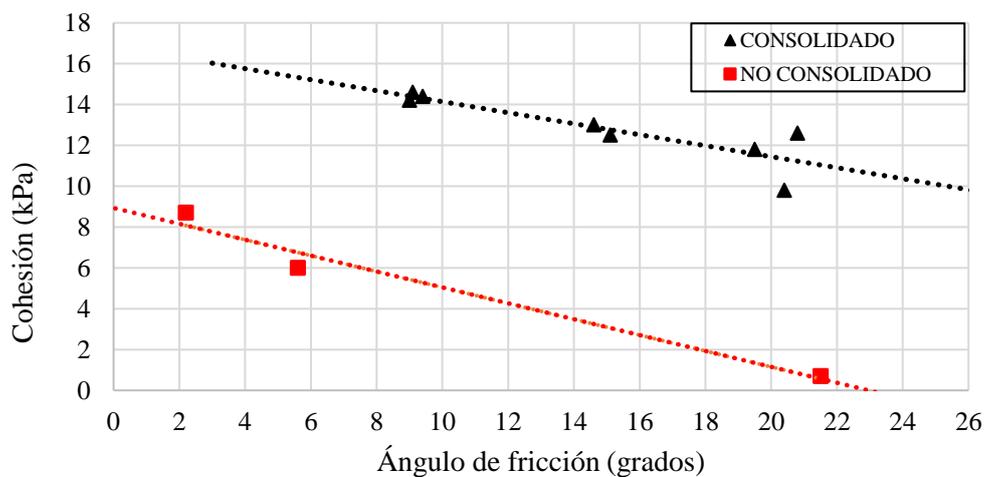
En los ensayos no consolidados, al incrementar la velocidad de corte con respecto al promedio para la serie de ensayos rápidos se observa que los valores del ángulo de fricción disminuyen considerablemente y los valores de la cohesión aumentan, obteniéndose un valor del ángulo de fricción 2.2 grados y un valor de cohesión de 8.7 kPa en el ensayo NC-10VP, “al cortar la muestra rápidamente, se simula la condición del ensayo no drenado cuando las velocidades de corte son rápidas, es decir no hay cambio de humedad y, por lo tanto, no hay cambio de volumen” (Jimenez & de Justo, 1975; Simons & Menzies, 2000), esta prueba no drenada en el ensayo de corte directo proporciona una medida directa de la resistencia al corte.

Las pruebas con velocidades de corte rápidas simulan la condición no drenada del suelo como se había mencionado en el párrafo anterior, sin embargo, los ensayos de corte

directo con velocidades bajas permiten el drenaje del agua en el suelo, el cambio de la estructura del suelo en la zona de corte produce pequeños excesos de presión de poro en el agua, esto significa que un ligero aumento en la presión de poro produce que el agua puede disiparse del suelo, esto permite que la estructura del suelo en la prueba de drenaje será diferente al de la prueba con velocidades rápidas, dando una resistencia diferente. Por lo tanto, el ensayo de corte directo con velocidades rápidas simula la resistencia al corte sin drenaje pues la estabilidad crítica en suelos finos es a corto plazo y, para ensayos con velocidades corte lentas el ensayo se ejecuta a condiciones drenadas pues la resistencia del suelo aumenta con la consolidación a largo plazo.

**Figura 22**

*Variación del ángulo de fricción y cohesión con la velocidad.*



Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo.

En el suelo considerado para esta investigación, si se transmite una carga rápidamente, en corto plazo el suelo queda sin drenaje debido a las fuerzas viscosas que no permite el flujo del agua dentro del suelo, el exceso de presión de poro generado por la aplicación de una carga se disipa por drenaje o por consolidación durante un tiempo, que para el suelo fino puede extenderse considerablemente. En la construcción de una obra civil, la resistencia más baja con condiciones de estabilidad crítica se presenta al

final de la construcción cuando se completa la carga, por lo tanto, la resistencia crítica es, la resistencia al corte sin drenar antes de la consolidación (Peck et al., 2002; Powrie, 2004; Simons & Menzies, 2000), “el criterio de falla por resistencia al corte no drenado solo es aplicable a un suelo de baja permeabilidad” (Powrie, 2004), para obtener los parámetros de resistencia se realiza el ensayo de corte directo con velocidades altas, el cual evita a que no de tiempo al drenaje.

#### 4.6 PRUEBA DE HIPÓTESIS

Para el proceso de contratación de hipótesis se aplicó la prueba paramétrica t-student, es un método estadístico que permite aceptar o rechazar una determinada afirmación, en este caso el contraste de hipótesis se realizó sobre la media determinando la desviación estándar.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

Donde:

$\mu_0$  : valor de la resistencia patrón (promedio considerado por la hipótesis nula).

$\bar{x}$  : media de la muestra tomada.

s: desviación estándar de los resultados.

n: número de datos de la muestra.

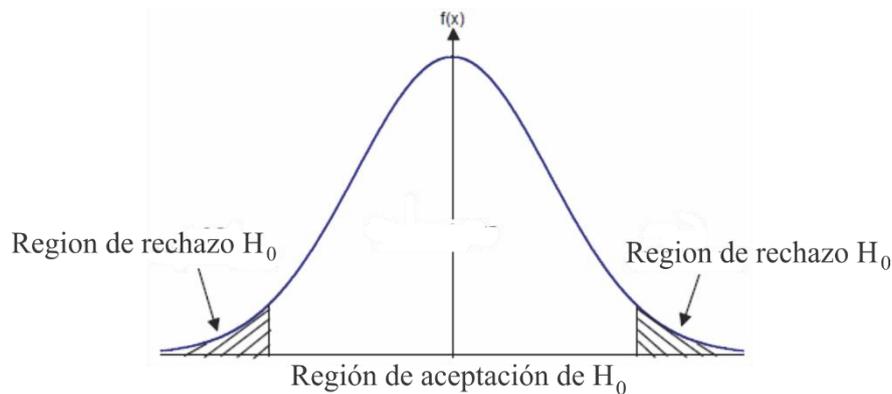
La contrastación de la hipótesis se realiza comparando con el promedio de los valores obtenidos de los ensayos realizados con velocidad calculada, considerado este promedio como el valor de contraste para su evaluación estadística.

### Prueba de hipótesis para la cohesión.

“El incremento de la velocidad de corte influye sobre el parámetro de resistencia cohesión con el ensayo de corte directo en un suelo fino de la ciudad de Puno”

H<sub>0</sub>: El incremento de la velocidad de corte no influye sobre el parámetro de resistencia cohesión con el ensayo de corte directo en un suelo fino de la ciudad de Puno.

H<sub>0</sub>: El incremento de la velocidad de corte influye sobre el parámetro de resistencia cohesión con el ensayo de corte directo en un suelo fino de la ciudad de Puno.



Nivel de significancia para el estudio " $\alpha$ "

$$\alpha = 0.05$$

Nivel de confianza "t"

$$t = 1.729$$

Intervalo de validez

$$[-1.729; 1.729]$$

Promedio considerado por la hipótesis nula  $\mu = 11.4$

Media de la muestra tomada  $\bar{x} = 13.74$

Desviación estándar de la muestra  $s = 0.93$

Número de elementos muestreados  $n = 5$

Valor de t tipificado  $t = 5.62$

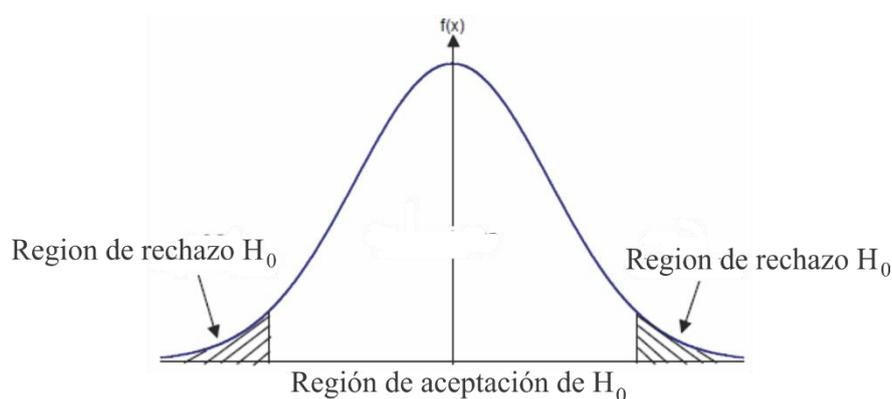
El estadístico de prueba cae fuera de la región de aceptación, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Prueba de hipótesis para el ángulo de fricción.

“El incremento de la velocidad de corte influye sobre el parámetro de resistencia ángulo de fricción con el ensayo de corte directo en un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno”

H<sub>0</sub>: El incremento de la velocidad de corte no influye sobre el parámetro de resistencia ángulo de fricción con el ensayo de corte directo en un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno.

H<sub>0</sub>: El incremento de la velocidad de corte influye sobre el parámetro de resistencia ángulo de fricción con el ensayo de corte directo en un suelo fino de la zona norte en la bahía interior de la ciudad de Puno.





Nivel de significancia para el estudio " $\alpha$ "

$$\alpha = 0.05$$

Nivel de confianza "t"

$$t = 1.729$$

Intervalo de validez

$$[-1.729; 1.729]$$

Promedio considerado por la hipótesis nula  $\mu = 20.2$

Media de la muestra tomada  $\bar{x} = 11.44$

Desviación estándar de la muestra  $s = 3.12$

Número de elementos muestreados  $n = 5$

Valor de t tipificado  $t = 6.28$

El estadístico de prueba cae fuera de la región de aceptación, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.



## V. CONCLUSIONES

Al evaluar los resultados encontrados en laboratorio obtenemos que la velocidad de corte en el ensayo de corte directo tiene influencia en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante. En la obtención de los parámetros de resistencia la velocidad de corte es muy importante para conocer la respuesta del suelo al esfuerzo cortante cuando la velocidad de corte aumenta. La determinación correcta de estos parámetros de resistencia es fundamental para la estabilidad de las estructuras.

Por otro lado, obtener los parámetros adecuados para un suelo fino es muy importante, ya que esto está involucrado con problemas de estabilidad en las construcciones. El incremento de las velocidades calculadas en el equipo de corte directo influye significativamente disminuyendo el parámetro de resistencia ángulo de fricción y aumenta los valores de la cohesión. Sin embargo, en los ensayos no consolidados, cuando se incrementa la velocidad a diez veces la velocidad promedio se evidencia que el ángulo de fricción disminuye considerablemente y la cohesión aumenta, en estos ensayos el suelo queda sin drenaje.



## VI. RECOMENDACIONES

Para la realización de los ensayos de corte directo en laboratorio se recomienda automatizar el equipo de corte directo, debido a que con velocidades muy bajas el tiempo de realización de la prueba se incrementa considerablemente.

Se recomienda ampliar esta investigación para suelos de diferentes características al que fue considerado en esta investigación.

La manipulación, en el transporte y cuidado de la humedad de las muestras inalteradas se recomienda tomar las consideraciones que establece la norma, debido a que la variación de la humedad puede alterar los resultados esperados en laboratorio.



## VII. REFERENCIAS

- Ahmed Mir, B. (2021). *Manual of geotechnical laboratory soil testing* (Primera). Taylor & Francis Group.
- Almonte, R. N. (2014). *Fricción residual de juntas. Efecto de la velocidad de corte*. Universidad Politecnica de Cataluña.
- ASTM-D3080. (2011). *Ensayo de corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas drenadas*.
- Baban, T. M. (2016). *Shallow Foundations Discussions and Problem Solving*. John Wiley & Sons.
- Bardet, J. P. (1997). *Experimental Soil Mechanics*. Prentice Hall.
- Berry, P. L., & Reid, D. (1993). *Mecanica de suelos*. McGRAW-HILL.
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingenieria Civil*. McGraw-Hill.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (Quinta). McGraw-Hill.
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (Tercera). John Wiley & Sons.
- Builes, M. A. (2014). Incidence of Shear Strength Rate for Residual Soils From Amphibolite At the San Nicolas Valley in Antioquia State, Colombia. *Revista EIA*, 21, 89–97.
- Coduto, D. P., Kitch, W. A., & Yeung, M. R. (2016). *Foundation design Principles and Practices* (Tercera). Pearson Education.



- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (quinta). Limusa.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (cuarta). Cengage Learning.
- Eid, H. T., Stark, T. D., & Doerfler, C. K. (1999). Effect of shear displacement rate on internal shear strength of a reinforced geosynthetic clay liner. *Geosynthetics International*, 219-239.
- Fang, H., & Daniels, J. L. (2006). *Introductory Geotechnical Engineering*. Taylor & Francis.
- Gunaratne, M. (2014). *The Foundation Engineering Handbook* (Segunda). Taylor & Francis.
- Hassan, K. (2016). *Drained Residual Shear Strength of Fine-Grained Soils and Soil-Solid Interfaces at Low Normal Stresses : Analysis and Applications* (Issue February).
- Head, K. H. (1994). *Manual of Soil Laboratory Testing - Vol 2; Permeability, Shear Strength and Compressibility* (Segunda). John Wiley & Sons.
- Hernández, R. (2019). *Metodología de la investigación*. McGRAW - HILL.
- Holtz, R., & Kovacs, W. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall.
- Huat, B. B. K., Ali, F. H., & Choong, F. H. (2006). Effect of loading rate on the volume change behavior of unsaturated residual soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1527–1544.
- Ishibashi, I., & Hazarika, H. (2015). Soil mechanics fundamentals and applications, second edition. In *Soil Mechanics Fundamentals and Applications, Second Edition*.



Taylor & Francis.

Jácome, J. R. (2006). *Velocidad de deformación y estado crítico en suelos blandos*.

Universidad de los Andes.

Jimenez, J. A., & de Justo, J. L. (1975). *Geotecnia y cimientos I* (Segunda). Editorial

Rueda.

Juárez, E., & Rico, A. (2010). *Mecánica de suelos*. Limusa.

Kalinski, M. (2011). *Soil mechanics lab manual* (Segunda). John Wiley & Sons.

Kothari, C. R. (2004). *Research Methodology Methods and Techniques*. New Age

International.

Lambe, T., & Whitman, R. (1969). *Mecánica de suelos* (John Wiley).

Laura, S. (2016). *Evaluación de la capacidad predictiva de los métodos de estimación del comportamiento mecánico de los suelos lacustres de la bahía de Puno, para cimentaciones superficiales*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.

Li, Y. (2020). *Handbook of Geotechnical Testing*. Taylor & Francis.

Look, B. G. (2014). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables* (Segunda). Taylor & Francis.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (Tercera). John Wiley & Sons.

Motra, H. B., Stutz, H., & Wuttke, F. (2016). Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations. *Soils and Foundations*, 56(2), 265–276.



- Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa, cualitativa y redacción de la tesis* (Cuarta).
- Nicholson, P. G. (2015). *Soil Improvement and Ground Modification Methods*.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (2002). *Ingeniería de Cimentaciones*.  
Limusa.
- Powrie, W. (2004). *Soil Mechanics Concepts and Applications*. Taylor & Francis.
- Raj, P. P. (2013). *Soil mechanics and Foundation engineering*. Dorling Kindersley Pvt  
Ltd.
- Rajapakse, R. (2016). *Geotechnical Engineering Calculations and Rules of Thumb*  
(Segunda). Elsevier.
- Reese, L., Isenhower, W., & Wang, S. T. (2007). Analysis and Design of Shallow and  
Deep Foundations. In *Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations*. John  
Wiley & Sons.
- Rico, H., & Del Castillo, R. (1988). *La Ingeniería de Suelos*. Limusa.
- Simons, N., & Menzies, B. (2000). *A Short Course in Foundation Engineering* (Segunda).  
Tomas Telford Publishing.
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Ingeniería  
de Suelos Ltda.
- Taylor, D. W. (1961). *Principios Fundamentales de Mecánica de Suelos*. Continental S.  
A.
- Thermann, K., Gau, C., & Tiedemann, J. (2006). *Shear strength parameters from direct*



*shear tests - influencing factors and their significance. 484, 1–12.*

Wesley, L. (2010). *Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils.*

John Wiley & Sons.

Whitlow, R. (1998). *Fundamentos de mecánica de suelos (Segunda).* Continental S. A.

Zeevaert, L. (1983). *Foundation engineering for difficult subsoil conditions.*



## ANEXOS