

## **MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL**

**ESTABLECER EL EFECTO CAUSADO EN LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADO POR LA VARIACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LAS PROBETAS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA PARA SUELOS DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA “JULIO GARAVITO”**

**Juan David Trujillo Bolívar**

**Bogotá D.C Julio de 2016**

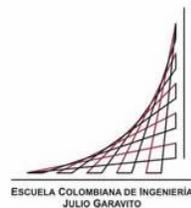


**ESTABLECER EL EFECTO CAUSADO EN LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADO POR LA VARIACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LAS PROBETAS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA PARA SUELOS DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA “JULIO GARAVITO”**

**Tesis para optar al título de magister en Ingeniería Civil, con énfasis en geotecnia**

**Ing. Diego Cobos Roa  
Director**

**Bogotá D.C Julio de 2016**



**NOTA DE ACEPTACION**

La tesis de maestría titulada **“ESTABLECER EL EFECTO CAUSADO EN LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADO POR LA VARIACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LAS PROBETAS EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA PARA SUELOS DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA “JULIO GARAVITO”** presentada por **Juan David Trujillo Bolívar** para optar al título de magister en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia, cumple con los requisitos y recibe nota aprobatoria.

**Director,**

---

**Ing. Diego Cobos Roa**

**Jurados:**

---

---

---

Bogotá D.C, Julio de 2016.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

DIOS por su presencia y amparo permanente, por la oportunidad de aprender y crecer profesionalmente en medio de las obligaciones laborales y los sacrificios realizados para poder culminar la Maestría.

Al Ing. Diego Cobos Roa por compartir sus conocimientos, por su disposición, orientación y paciencia como tutor; a los Ingenieros Manuel García, José Vicente Amórtegui y Sandra Campagnoli por creer en mi proyecto y compartir su tiempo y conocimientos.

A mis profesores y compañeros, por el aprendizaje y los gratos momentos compartidos, especialmente a Oxiris Quitian, Carlos Fernando Peña, Diego León, Federico Sarmiento y Wilson Vásquez

A mi familia, por su apoyo incondicional, mis Padres, Hermanos, Sobrinos, mi Suegra y mi Esposa, quien me animó a iniciar esta Maestría aun en medio de la incertidumbre, apoyándome sin restricciones, aun en medio de sus compromisos laborales.

***A Nidia Isabel por acompañarme y tener paciencia durante  
el tiempo dedicado a emprender este nuevo reto***

***A mi familia por el apoyo brindado***

## RESUMEN

El presente trabajo contiene los resultados y análisis de la investigación realizada acerca del comportamiento que experimenta la resistencia del suelo, en el ensayo de compresión inconfiada en muestras de suelos (INVIAS 152 - 1023 /2013), cuando se realiza una variación en las dimensiones de las muestras inalteradas, que se obtienen luego de la extracción en campo.

Resulta interesante apreciar la variación en la resistencia que ocurre gracias a las dimensiones bajo carga axial y deformación controlada. Cabe resaltar que el ensayo se puede realizar a muestras inalteradas, remoldeadas o compactadas de materiales que no expulsen agua durante la etapa de carga del ensayo, o suelos cohesivos (INVIAS, 2013).

La primera parte del trabajo presentado se enfoca en el proceso de extracción en campo y transporte de las muestras al laboratorio, así como el equipo y herramientas utilizados para este proceso. Se hace importante resaltar el proceso de muestreo ya que de este depende que se conserven algunas características fundamentales del estado del suelo.

Basados en la extracción de las muestras inalteradas para el estudio, se realiza a continuación la caracterización y clasificación del suelo y preparación de la muestra para la ejecución del ensayo INVIAS 152-13 Compresión Inconfiada en Muestras de Suelo.

Uno de los aspectos a tener en cuenta respecto al estado del arte sobre el tema propuesto, son los mínimos índices de estudios al respecto, razón por la cual el desarrollo del proyecto se llevó a cabo con una bibliografía limitada.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.</b>	<b>ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELO.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.</b>	<b>EFFECTOS DE ESCALA EN PROPIEDADES DE RESISTENCIA DE LA ROCA.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.1.</b>	<b>PRUEBA DE NÚCLEO .....</b>	<b>11</b>
<b>3.</b>	<b>PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....</b>	<b>23</b>
<b>4.</b>	<b>PROCEDIMIENTO ENSAYO INV – 152 -13.....</b>	<b>25</b>
	<b>PROCEDIMIENTO ENSAYO DE CORTE SOBRE SUELOS COHESIVOS EN EL TERRENO USANDO LA VELETA.....</b>	<b>27</b>
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE VALORES.....</b>	<b>33</b>
<b>6.</b>	<b>ASPECTOS LEGALES.....</b>	<b>40</b>
<b>7.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>41</b>
<b>7.1.</b>	<b>GENERAL.....</b>	<b>41</b>
<b>7.2.</b>	<b>ESPECIFICA.....</b>	<b>41</b>
<b>8.</b>	<b>PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y ENSAYOS DE LABORATORIO 50</b>	
<b>8.1.</b>	<b>Procedimiento del ensayo.....</b>	<b>51</b>
<b>9.</b>	<b>RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO .....</b>	<b>58</b>
<b>10.</b>	<b>COMPARACION Y ANALISIS DE RESULTADOS: .....</b>	<b>84</b>
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>96</b>
<b>12.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>98</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Prueba de compresión simple _____	6
<b>Figura 2</b> Resistencia a la Compresión no Confinada _____	7
<b>Figura 3</b> Arreglo de prueba basada en PC para determinar curvas tensión - deformación completa durante pruebas de resistencia a la compresión no confinadas. _____	11
<b>Figura 4</b> Prueba no confinado compresiva – muestra de núcleo con falla bajo compresión no confinada. Términos y abreviaturas. _____	12
<b>Figura 5</b> Prueba de resistencia a la compresión no confinado – curva esfuerzo - deformación completa y determinar el módulo de elasticidad (módulo E de Young) y el trabajo específico de la destrucción W (energía de tensión). _____	12
<b>Figura 6</b> Resistencia a la compresión no confinada de las muestras de piedra caliza en correlación con el diámetro del núcleo. _____	15
<b>Figura 7</b> Resistencia a la compresión no confinada de las muestras de granito en correlación con el diámetro del núcleo. _____	15
<b>Figura 8</b> Trabajo compresión inconfined de las muestras de piedra caliza en correlación con el diámetro del núcleo. _____	16
<b>Figura 9</b> Módulo de elasticidad de las muestras de piedra caliza en correlación con el diámetro del núcleo. _____	16
<b>Figura 10</b> Resistencia a tracción indirecta de las muestras de piedra caliza en correlación con el diámetro del núcleo. _____	17
<b>Figura 11</b> Forma de las curvas de corrección para la resistencia a la compresión no confinada UCS, destrucción trabajo W y módulo de elasticidad E. _____	19
<b>Figura 12</b> Explicación conceptual para la relación entre el efecto y la tensión medida de forma. _	20
<b>Figura 13</b> Recomendación para la medición de la tensión a lo largo de aproximadamente 2/3 de la longitud la longitud del espécimen durante la prueba de compresión no confinado _____	20
<b>Figura 14</b> Relación entre el tamaño de UCS y ejemplar trazado como valores adimensionales (después de Hoek y Brown 1980) _____	21
<b>Figura 15</b> Relación entre la UCS y ejemplar (núcleo) tamaño trazados como valores adimensionales (después de Hawking 1998) _____	22

<b>Figura 16</b> Tubería shelby utilizada para la extracción de muestras con diámetros de 1½", 2", 2 ½", 3" y 4"	45
<b>Figura 17</b> Ubicación del terreno para la extracción de muestras.	46
<b>Figura 18</b> Perfil del terreno de extracción de muestras	47
<b>Figura 19</b> Alistado de terreno para toma de muestras.	47
<b>Figura 20</b> Extracción de muestras con tubería Shelby con diferente diámetro.	48
<b>Figura 21</b> Identificación de muestras y preparación para transporte.	49
<b>Figura 22</b> Almacenamiento para evitar perdida de humedad y transporte de muestras.	49
<b>Figura 23</b> Tallado de muestras.	50
<b>Figura 24</b> Preparación de muestras para ensayo de compresión inconfiada.	50
<b>Figura 25</b> Caracterización de muestras identificando su altura promedio, diámetro promedio y peso	51
<b>Figura 26</b> Falla de muestras en el equipo de ensayo de compresión inconfiada.	52
<b>Figura 27</b> Toma de pesos para determinar la humedad de las muestras.	53
<b>Figura 28</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 1.5"	59
<b>Figura 29</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 2"	61
<b>Figura 30</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 2.5".	63
<b>Figura 31</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 3".	64
<b>Figura 32</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 4".	66
<b>Figura 33</b> Grafica Esfuerzo Vs Humedad	67
<b>Figura 34</b> Grafica Esfuerzo Vs Deformación en falla	68
<b>Figura 35</b> Grafica % Humedad vs % Deformación en la falla	69
<b>Figura 36</b> Grafica % Humedad Vs Diámetros	70
<b>Figura 37</b> Grafica Esfuerzo Vs Sensitividad	71
<b>Figura 38</b> Grafica Resistencia al corte C Vs Resistencia al corte SUV	72
<b>Figura 39</b> Grafica Esfuerzo Vs Modulo de Young	73
<b>Figura 40</b> Grafica Esfuerzo Vs Modulo de Young	74

<b>Figura 41</b> Grafica Esfuerzo Vs Diámetro	75
<b>Figura 42</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 1,50".	76
<b>Figura 43</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 2,0".	77
<b>Figura 44</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 2,50"	78
<b>Figura 45</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 3,0".	79
<b>Figura 46</b> Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 4,0".	81
<b>Figura 47</b> Grafica esfuerzo Vs % Humedad	82
<b>Figura 48</b> Grafica esfuerzo Vs % deformación en falla	83
<b>Figura 49</b> Esfuerzo Vs Muestras	85
<b>Figura 50</b> Esfuerzo Vs Muestras	86
<b>Figura 51</b> Esfuerzo Vs Muestras	87
<b>Figura 52</b> Esfuerzo Vs Muestras	88
<b>Figura 53</b> Esfuerzo Vs Muestras	89
<b>Figura 54</b> Esfuerzo Vs Diámetro	90

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Cálculo de puntaje Z para 1,50" -----	34
<b>Tabla 2</b> Datos Estadísticos para 1,50" -----	35
<b>Tabla 3</b> Calculo de puntaje Z para 2,0" -----	35
<b>Tabla 4</b> Datos estadísticos para 1,50 -----	36
<b>Tabla 5</b> Calculo de puntaje Z para 2,50" -----	36
<b>Tabla 6</b> Datos estadísticos para 2,50" -----	37
<b>Tabla 7</b> Calculo de puntaje Z para 3,0" -----	37
<b>Tabla 8</b> Datos estadísticos para 3,0" -----	38
<b>Tabla 9</b> Calculo de puntaje Z para 4,0 -----	38
<b>Tabla 10</b> Datos estadísticos para 4,0" -----	39
<b>Tabla 11</b> Tubos en muestras de uso geotécnico, muestra de tubos acero pared delgada conveniente. -----	42
<b>Tabla 12</b> Tolerancias dimensionales para tubos de pared delgada -----	43
<b>Tabla 13</b> Interpolación de datos para determinar el diámetro y espesor de tubería de pared delgada utilizados en la toma de muestras. -----	44
<b>Tabla 14</b> Resultados de Módulos de Young-----	54
<b>Tabla 15</b> Resultados de Módulos de Young-----	54
<b>Tabla 16</b> Resultados de Módulos de Young-----	55
<b>Tabla 17</b> Resultados de Módulos de Young-----	56
<b>Tabla 18</b> Resultados de Módulos de Young-----	56
<b>Tabla 19</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 1.5" -----	59
<b>Tabla 20</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 2,0" -----	60
<b>Tabla 21</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 2.5" -----	62
<b>Tabla 22</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 3"-----	64
<b>Tabla 23</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 4"-----	65

<b>Tabla 24</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 1.5" -----	76
<b>Tabla 25</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 2.0" -----	77
<b>Tabla 26</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 2.50"-----	78
<b>Tabla 27</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 3.0" -----	79
<b>Tabla 28</b> Valores máximos de esfuerzo para muestras de 4.0" -----	80
<b>Tabla 29</b> Resultados de Esfuerzo Vs Diámetro-----	90
<b>Tabla 30</b> Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 1.5" -----	91
<b>Tabla 31</b> Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 2.0" -----	92
<b>Tabla 32</b> Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 2.5" -----	93
<b>Tabla 33</b> Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 3,0" -----	94
<b>Tabla 34</b> Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 4,0" -----	95

## INDICE DE ANEXOS

- **ANEXO 1.** Resultados ensayo de compresión inconfiada y graficas de la aplicación del modelo hiperbólico de Duncan y Chan.
- **ANEXO 2.** Resultados ensayo de compresión inconfiada para las muestras tomadas en el sector de Fontibón
- **ANEXO 3.** Resultados del Limite Liquido, Limite Plástico, Índice Plástico e Índice Liquido de las muestras tomadas en la Escuela Colombiana de Ingeniera “Julio Garavito” y en el segmento escogido en la Localidad de Fontibón.
- **ANEXO 4.** Resultados de la veleta de campo SUV y su respectiva corrección por plasticidad y resultados provenientes de las veletas de laboratorio a las diferentes muestras.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos que se llevan a cabo en Colombia en términos de muestreo, ensayos y caracterización de suelos para distintos propósitos en el campo de la ingeniería, es importante resaltar que uno de los procedimientos más comunes es el ensayo de compresión inconfiada. Si bien es cierto que este ensayo proporciona valores que no son lo suficientemente cercanos a la realidad en términos del comportamiento del suelo, es el más usado en nuestro país.

Por tal motivo se considera pertinente realizar un trabajo investigativo, que pueda contribuir a minimizar al máximo la incertidumbre con respecto a los valores obtenidos mediante este ensayo en cuanto a muestras que tengan como variable las dimensiones, y su cambio en los valores de los parámetros de resistencia, con el fin de obtener una visión amplia acerca la influencia de este tipo de muestras en este ensayo y en el dimensionamiento de las diferentes estructuras.

De acuerdo con el título H de la Norma Sismo Resistente (NSR 10) para Colombia, luego de conocer los parámetros de resistencia de los suelos, se deben aplicar los factores de seguridad directos e indirectos, por lo cual se hace necesario evaluar que influencia tiene el cambio en las dimensiones de las muestras tomadas en campo, con el fin de revisar la variación de los factores de seguridad y por ende las dimensiones de los diseños.

Las especificaciones de muestreo para Colombia en la actualidad, se rigen por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), en su última edición publicada en el año 2013 y por las normas técnicas Colombianas Icontec 1527, para Compresión Inconfiada NTC – 1527 y INV-E-152-13. En esta norma se establecen los criterios y condiciones básicas que se deben tener en cuenta en proceso de muestreo y desarrollo de los ensayos pertinentes para conocer los parámetros esenciales dentro de un estudio geotécnico; de igual manera señala que la muestra mínima debe ser de 30mm de diámetro con una partícula no mayor a 1/10 del diámetro y con muestras igual a mayor

de 72mm con una partícula no mayor de  $1/6$  del diámetro (INVIAS 2013). Este proceso está sujeto a obtener resultados con un margen de error alto, lo cual inevitablemente repercutirá en una baja confiabilidad del ensayo.

De acuerdo con lo anterior, no hay claridad en cuanto a la geometría y la afectación que puede tener éste parámetro en la determinación de demás parámetros de resistencia de los suelos mediante el ensayo de compresión inconfiada, teniendo en cuenta que las características geométricas están relacionadas directamente con la rigidez de un elemento según Hibbeler (1998).

Según Sakamoto y Takaharu (2003), se evidencian problemas para hacer los ensayos de laboratorio debido a los tamaños (en términos de diámetro y altura) de las muestras, ya que al momento de preparar el ensayo se presentan fisuras y se evidencia heterogeneidad en la muestra. Estos autores, realizaron un estudio en Japón en donde se tomaron varias muestras de distintos lugares, incluido el Reino Unido y Japón por supuesto, donde encontraron que existían cambios para diferentes tipos de diámetros, relacionados con los índices de plasticidad de las muestras y trabajando diámetros aún menores a los mínimos que son comúnmente trabajados en la norma (35mm) justificado en menores inconvenientes en el procedimiento.

Otra referencia son los estudios realizados por Thuro y Plinninger (2001), en los cuales se realizaron ensayos de compresión inconfiada y ensayo de tracción indirecta en Brasil a rocas, teniendo en cuenta un número significativo de pruebas, evaluaron la variación en la resistencia debida a diferentes características geométricas. Los resultados principalmente se basaron en que el efecto de la forma tuvo un impacto importante en las propiedades de resistencia; de acuerdo con la razón de cambio entre la relación longitud/diámetro que varían de 1 a 3, la influencia sobre el esfuerzo, módulo de elasticidad y resistencia a la tracción es bastante significativa y en comparación, el efecto sobre la resistencia a la compresión no confinada es mucho menor.

Dentro de las consultas y la revisión bibliográfica no se encuentran documentos técnicos de apoyo sobre el tema desarrollados en Colombia y se encuentra muy poca información a nivel mundial. Cabe resaltar la importancia que tiene éste ensayo a nivel local ya que es el más común debido a su facilidad y economía, no obstante su baja confiabilidad.

Según la normatividad vigente en Colombia (INVIAS) se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones para la toma de las muestras:

- Diámetro mínimo: 30mm.
- Tamaño máximo de las partículas: menor que 1/10 de su diámetro.
- Relación altura-diámetro (L/D): debe ser lo suficientemente grande para evitar interferencias en los planos potenciales de falla a 45° y lo suficientemente corta para evitar que actúe como columna; para satisfacer ambos criterios, se recomienda una relación L/D comprendida entre 2 y 3.

## 1. OBJETIVOS

### Objetivo general:

Determinar la incidencia en la resistencia al corte no drenada medida a través del ensayo de compresión inconfiada (NTC – 1527 /INV-E-152-13) en los suelos cohesivos de la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” producida por la variación de las dimensiones en las muestras de ensayo.

### Objetivos específicos:

- Determinar la variación de la resistencia al corte en suelos blandos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito de la ciudad de Bogotá, mediante el ensayo de Compresión inconfiada (NTC – 1527 / INV-E-152-13), en muestras que tengan variación en sus dimensiones.
- Realizar exploración en campo y muestreo, con tubos Shelby de las siguientes dimensiones: 35mm (mínima según NTC – 1527 / INV-E-152-13), 2”, 2½”, 3” y 4”
- Caracterizar geotécnicamente en laboratorio el material extraído de la exploración en campo.
- Realizar ensayos de Compresión inconfiada (NTC – 1527 / INV-E-152-13) a muestras de suelo blandos, variando las dimensiones geométricas de las probetas, con el fin de comparar estadísticamente los datos con probetas de dimensiones estándar.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELO.**

Según la norma colombiana INVIAS 152-2013, con este ensayo se busca determinar la resistencia a la compresión confinada de suelos cohesivos, donde una carga axial es aplicada con control de deformación. Se hace la salvedad que este ensayo muestra un valor aproximado de la resistencia al corte que pueden experimentar suelos del tipo cohesivos.

De acuerdo con Arango (1985) las distorsiones desarrolladas por un elemento de suelos, están sujetas a las deformaciones internas y los desplazamientos relativos entre las partículas que componen el suelo. Al estudiar la característica, esfuerzo – deformación de los suelos, y dada la naturaleza mineral del mismo, se denota el que el comportamiento esfuerzo- deformación de un suelo es extremadamente complejo.

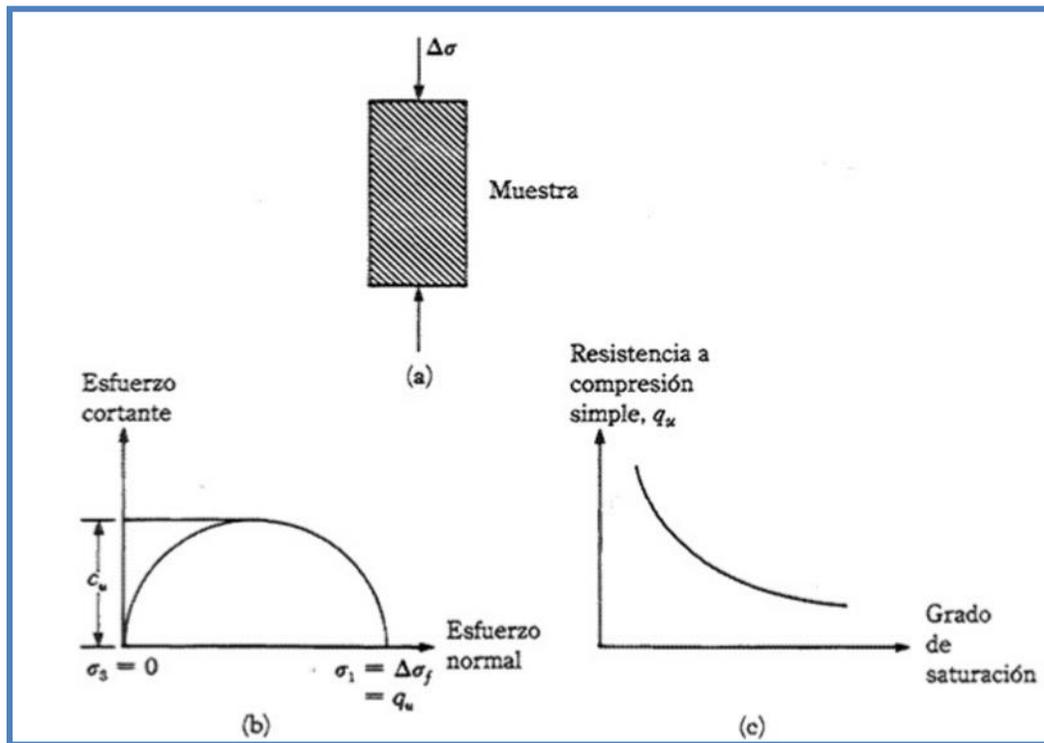
Resistencia a la compresión confinada equivale al mínimo esfuerzo de compresión al cual una muestra sin confinamiento de suelo falla. La máxima carga por unidad de área es considerada como la resistencia a la compresión confinada, o la carga equivalente cuando se alcanza el 15% de deformación axial. Dentro del ensayo se tiene que la resistencia al corte se expresa como 0.5 veces la resistencia a la compresión confinada (INVIAS, 2013).

Es importante entender que la resistencia a la compresión se puede determinar en suelos de consistencia media, que tienen la suficiente cohesión para ser ensayados bajo esta condición. Es aceptable establecer que tan sensible es una muestra de suelo, realizando ensayos a muestras alteradas e inalteradas, esto indica que la muestra de suelo inalterada es capaz de mantenerse lista para el ensayo, incluso después del proceso de remoldeo.

Según la norma INVIAS 153-2013, las muestras de suelo a las cuales se les quiere conocer la resistencia, deben tener un diámetro mínimo de 30 mm (1.3”) y la mayor partícula contenida en ellos debe ser menor que 1/10 del diámetro del espécimen. Si se

tienen muestras con diámetros de 72 mm (2,8") en adelante, el tamaño de la máxima partícula contenida en la muestra debe ser de 1/6 con respecto al diámetro de esta. De acuerdo con Braja (2012) la prueba de compresión simple es un tipo especial de prueba triaxial no drenada, donde la presión de confinamiento  $\delta_3 = 0$ ; en esta prueba, se aplica un esfuerzo axial  $\Delta\delta$  a la muestra para ocasionar su falla  $\Delta\delta = \Delta\delta_f$

**Figura 1** Prueba de compresión simple



**Fuente:** Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Braja M. Das.

Dónde:

El esfuerzo principal mayor  $= \Delta\delta_f = q_u$

El esfuerzo total principal menor  $= 0$

Al esfuerzo axial de falla,  $\Delta\delta_f = q_u$ , se le refiere por lo general como resistencia a la compresión simple. La resistencia cortante de las arcillas saturadas ante esta condición ( $\phi = 0$ ),

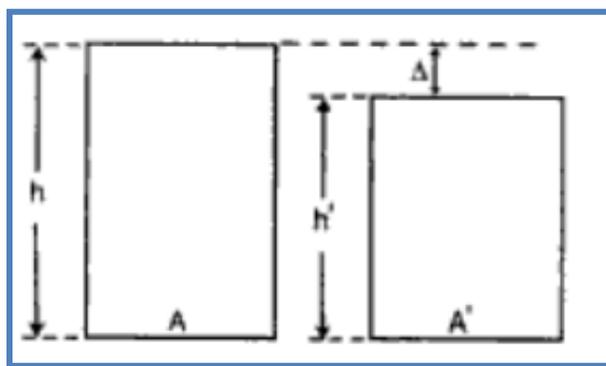
$$1. \quad s = Cu = \frac{qu}{2}$$

La resistencia a la compresión inconfiada se puede utilizar como un indicador de la consistencia de las arcillas (Braja, 2012).

Según Crespo (2008), la prueba de compresión axial no confinada es la base para determinar la resistencia al corte de las arcillas, donde la extracción de las muestras en campo se realiza por medio de tubos de muestra de pared delgada. Además de esto, Crespo hace una importante descripción de la preparación de las muestras para el ensayo:

- a. Los extremos de las muestras deben ser cortados de tal forma que la muestra que se pretende llevar a la falla, cumpla con una relación de esbeltez de 2 a 3.
- b. Luego de tener la muestra con las proporciones adecuadas el autor indica que el espécimen debe ser llevado a la máquina de compresión simple centrada en el respectivo plato y adecuada para que se pueda tomar la lectura de deformación vertical.
- c. Se indica también por parte del autor que, se debe aplicar una carga con una velocidad constante a razón de 0,5 a 1.0% de su altura por minuto.
- d. Si la muestra es una arcilla muy blanda y no se presenta una falla visible, entonces se considera la carga de falla como la carga que produce una deformación del 20% de la altura inicial.

**Figura 2** Resistencia a la Compresión no Confinada



**Fuente:** Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Crespo Villalaz.

Con los datos resultantes del ensayo de compresión simple se construye una gráfica de esfuerzos y deformaciones donde se puede determinar a grosso modo, la pendiente de la recta en el rango elástico y determinar el módulo de elasticidad del suelo (Crespo, 2011).

El ensayo de compresión simple tiene como finalidad, determinar la resistencia a la compresión no confinada ( $q_u$ ), de un cilindro de suelo cohesivo o semi-cohesivo, e indirectamente la resistencia al corte ( $c$ ), por la expresión:

$$c = q_u / 2 \text{ (kgs/cm}^2\text{)}$$

Este cálculo se basa en el hecho de que el esfuerzo principal menor es cero (ya que al suelo lo rodea sólo la presión atmosférica) y que el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) del suelo se supone cero.

Dicho ensayo es ampliamente utilizado, ya que constituye un método rápido y económico; consiste en un ensayo uniaxial, en donde la probeta no tiene soporte lateral ( $\sigma_3=0$ ), realizándolo en condiciones no drenadas. Este se podrá realizar de dos maneras, mediante un control de deformación o bien, mediante un control de esfuerzos.

El primero, es ampliamente utilizado, controlando la velocidad de avance de la plataforma del equipo. El segundo, requiere ir realizando incrementos de carga, lo que puede causar errores en las deformaciones unitarias al producirse una carga adicional de impacto al aumentar la carga, por lo que resulta prácticamente la no utilización. (Albatros, 2014)

## **2.2. EFECTOS DE ESCALA EN PROPIEDADES DE RESISTENCIA DE LA ROCA.**

De acuerdo con Lengua (2014), el efecto escala en las rocas es afectado directamente en sus propiedades y comportamiento mecánico; en su estudio encontró que al aumentar la proporción volumétrica de la roca, ésta disminuía la resistencia a la

compresión simple, llegando a la conclusión que el efecto es causado por la mayor probabilidad de encontrar estructuras y defectos en la roca.

Según Särkkä & Eloranta (2001), al realizar una serie de pruebas para evaluar el impacto de la forma y el tamaño de las propiedades comunes de roca, fueron encontrados algunos resultados interesantes al respecto; en primer lugar, el efecto de forma tuvo el mayor impacto en las propiedades de resistencia de roca. En el rango típico de la relación longitud/diámetro (esbeltez) varía de 1 a 3, la influencia en el módulo de elasticidad y resistencia a la tracción es bastante significativa y en comparación a lo anterior, el efecto sobre la resistencia a la compresión no confinada es mucho menor.

Dependiendo de la técnica de medición utilizada para el desplazamiento longitudinal a lo largo de la muestra del núcleo, el módulo de elasticidad aumenta. El tamaño a menudo se ha considerado que tiene una fuerza controlada, en contraste con la forma, sólo tuvo un efecto diferente dentro del intervalo de diámetro probado desde 50 a 110mm.(Särkkä & Eloranta, 2001)

De acuerdo con Ramírez y Alejano (2004), las rocas tienen grandes diferencias debido a su efecto escala, el cual reportan como el cambio o la respuesta debida a las cargas que soporta el macizo rocoso, y el volumen debido a la masa de suelo. Por lo tanto las propiedades de resistencia y deformación del macizo dependen de las discontinuidades que pueda tener y la magnitud de los proyectos.

En geología, ingeniería y mecánica de rocas, el confinado sin resistencia a la compresión y la prueba brasileña se consideran los métodos de propagación más amplia para obtener propiedades de resistencia de la roca. Bien conocido es el efecto escala relativo a la resistencia a la compresión no confinada, pero poca información ha sido publicada desde la década de 1980 (con la excepción de Hoek & Brown), e incluso menos cuando considerando otras propiedades importantes de roca.-(Hoek, 1980).

En la actualidad para las rocas se ha evidenciado un gran avance con respecto a los dispositivos y tecnología para llevar a cabo las pruebas necesarias desde modernos

dispositivos de prueba que hoy permiten un sofisticado servo- controlador de tensión llevado para obtener todos los datos de monitoreo. Ahora, los resultados de los métodos clásicos de prueba pueden ser actualizados así como la determinación de las propiedades aún no incluidos.

Según Schütz (1995), fuertes esfuerzos han conducido a un programa de investigación que estudia los principios de propiedades de resistencia de la roca en tipos de diferentes rocas tales como rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. En esta contribución se pone énfasis en los efectos de escala de:

- Resistencia a la compresión no confinada.
- Módulo de elasticidad (módulo de Young).
- Trabajo de destrucción (cepa energía; define como la integral de la curva esfuerzo deformación).
- Resistencia a la tracción.

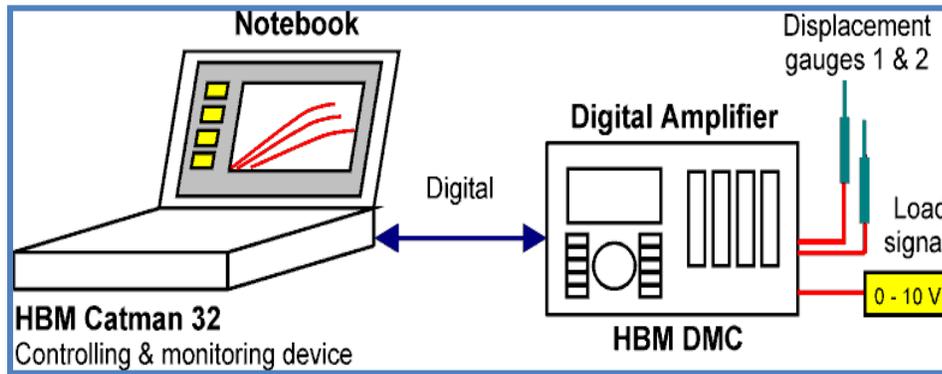
El autor anteriormente citado indica que las pruebas se realizaron con diámetros de núcleos entre 50 y 110mm ya que la mayoría de las muestras tomadas durante las investigaciones de sitio típico son de este tamaño. Por lo tanto, el llamado "efecto de escala" se divide en dos categorías; forma y tamaño

- El efecto forma describe el impacto de la variación de la relación longitud/diámetro de un espécimen cilíndrico ("base") en propiedades de resistencia de la roca.
- El efecto tamaño está definido por la influencia del tamaño absoluto (es decir, de diámetro) de la muestra del núcleo donde la relación longitud/diámetro queda constante.

## 2.2.1. PRUEBA DE NÚCLEO

### 2.2.1.1. Prueba resistencia a la compresión no confinada

**Figura 3** Arreglo de prueba basada en PC para determinar curvas tensión - deformación completa durante pruebas de resistencia a la compresión no confinadas.

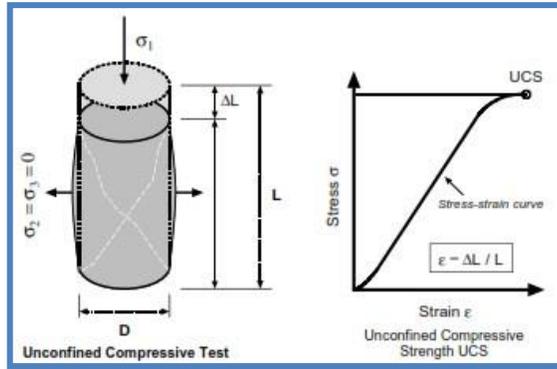


*Fuente: Eurock. 2001*

Las pruebas de resistencia a la compresión no confinadas se realizaron utilizando una máquina de prueba de servo-controlado con una estructura rígida y un dispositivo de monitoreo digital (Figura 3). La figura 4 muestra al espécimen del núcleo durante la carga, la tensión a lo largo de toda la longitud de la base de cálculo siguiendo el ISRM (1978a) sugirió métodos y los de Fairhurst & Hudson, 2013.

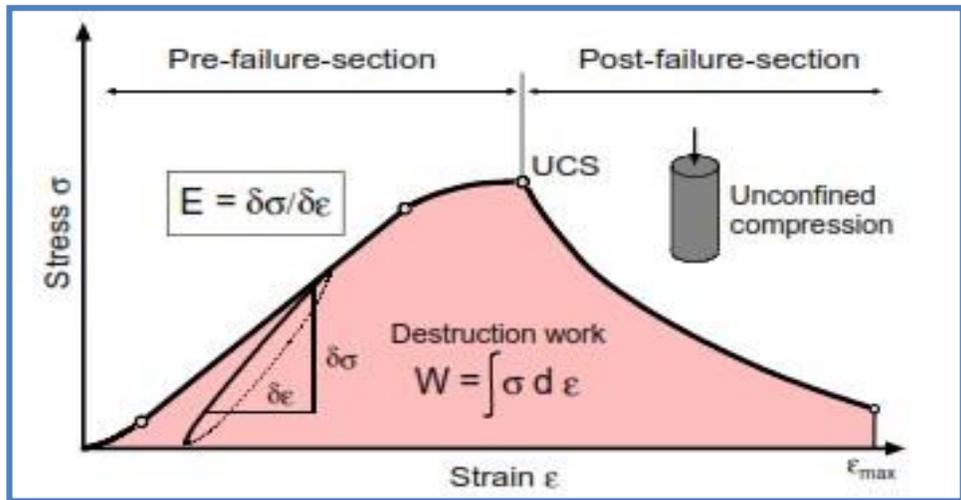
Además de los valores estándar de resistencia a la compresión no confinada (UCS) y módulo de elasticidad (Young's módulo; E, figura 5), se midió la curva del esfuerzo-deformación completa; es definida como la integral de la curva se calculó el valor, una denominada el "trabajo de destrucción específico"  $W$  [ $\text{kJ/m}^3$ ], en Resumen: trabajo de destrucción después de Thuro & Spaun 1996a, b, Thuro 1997, Figura 5. Este parámetro es descrito a veces también como "energía de tensión" por otros autores.

**Figura 4** Prueba no confinada compresiva – muestra de núcleo con falla bajo compresión no confinada. Términos y abreviaturas.



Fuente: Eurock. 2001

**Figura 5** Prueba de resistencia a la compresión no confinado – curva esfuerzo - deformación completa y determinar el módulo de elasticidad (módulo E de Young) y el trabajo específico de la destrucción W (energía de tensión).



Fuente: Eurock. 2001

Como puede observarse, la integral de la curva envolvente es una energía (o trabajo) relacionado con el volumen, necesario para la destrucción de la muestra de roca. Como producto de ambas tensiones, trabajo de destrucción representa el trabajo de deformación, incluyendo la sección posterior pico. Considerando que el módulo de

elasticidad somete el gradiente (derivación) de la sección lineal, la borde falla se estima fuera del área (integral) bajo el esfuerzo-deformación- envolvente.

El valor de la tensión máxima  $\epsilon$  máx tomado para determinar el trabajo de falla es el valor de un linaje que sigue asociado con el fracaso. La fuerza de una muestra de roca fracturada más o menos, que sólo reacciona a fricción con un aumento de la fuerza, se excluye en la determinación de la tarea de falla.

### **2.2.1.2. Pruebas de configuración**

Tres tipos de rocas que podrían obtenerse en alta calidad de las canteras, probaron lo que significa que se ha hecho hincapié en la homogeneidad y la isotropía de las muestras:

- a. Granito de grano grueso dos mica del bosque bávaro cerca de Passau, Alemania.
- b. Un grano fino, pyroxen y rico en anfíbol ker-santite del macizo de bohemio del sur cerca de Viena, Austria.
- c. Un grano fino de piedra caliza de los Alpes del norte cerca de Salzburgo, Austria.

Se realizó el siguiente programa de pruebas:

- Para el efecto de forma durante la compresión no confinada, se perforaron las proporciones de longitud diámetro común entre 1 y 3 en pasos de  $\frac{1}{4}$  de núcleos de 50 mm  $\emptyset$  y un valor promedio se calculó a partir de muestras de 3-5 para cada paso.
- Para el efecto de forma durante la prueba brasileña, las proporciones de longitud diámetro común entre 0,5 y 2 en pasos de  $\frac{1}{4}$  fueron cortadas de núcleos de 70 mm, calcular un valor promedio de 3 a 4 muestras para cada paso.
- Para el efecto de tamaño bajo compresión no confinada, el diámetro de los núcleos fue variado entre 45 y 80 mm con una excepción de 110 mm para el granito. Esto dio lugar a las proporciones de longitud diámetro constante con 2.0. Los valores medios calcularon en 3-5 muestras para cada diámetro. En nuestra

experiencia estos diámetros de núcleo representan una prueba técnica práctica.

- Para el efecto de tamaño durante la prueba brasileña, el diámetro de los núcleos se varió entre 45 y 80 mm dejando el longitud-diámetro constante con 1.0 y calcular un valor medio de 4 muestras para cada diámetro.

### **2.2.1.3. Efecto tamaño**

Resultados del programa de prueba realizado se pueden ver en las figuras 9 a 13. Los valores promedio de las propiedades de la roca se trazan contra el diámetro junto con animales máximo y mínimo. El punto interesante es la variación de los valores recibidos, se normaliza la escala derecha contra un  $D = 50$  mm (equivale a 1).

En cuanto a la forma, para todos los diagramas de una función logarítmica regresión ha sido elegida en la forma estándar

$$f(x) = a + b \text{LN}(x)$$

Donde  $x=D$

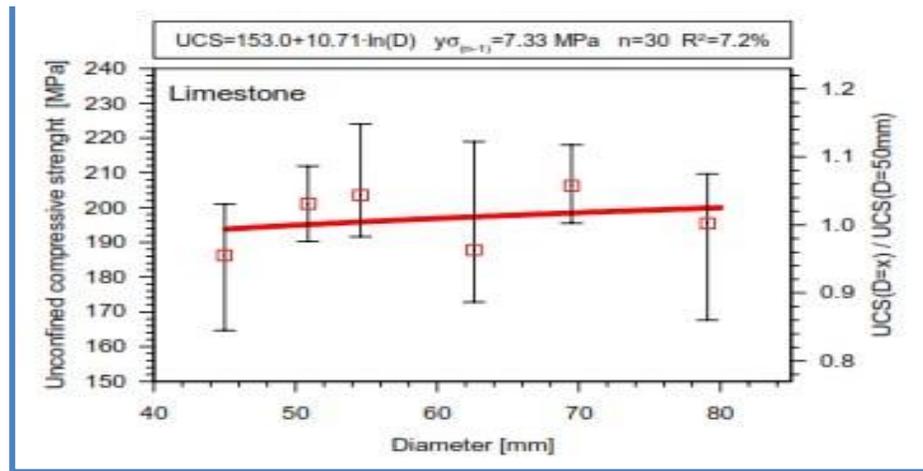
Las relaciones encontradas para todos los tres tipos de roca asemejan uno al otro, lo que sugiere una correlación geométrica.

El resultado interesante es que el tamaño, que normalmente se considera que tiene una influencia significativa en todas las propiedades de resistencia, en contraste con forma sólo tiene un efecto marginal en la gama del diámetro de prueba de la resistencia a la compresión no confinada (Figura 9 Figura 10, nota el buzamiento opuesto de las curvas), trabajo de destrucción (Figura 11), módulo de elasticidad (Figura 12) y la resistencia a tracción indirecta (Figura 13).

La variación normalizada (véase escala de mano derecha de figuras) de menos tan aprox. 5% casi siempre se mantiene dentro de la gama mín/máx del conjunto de datos.

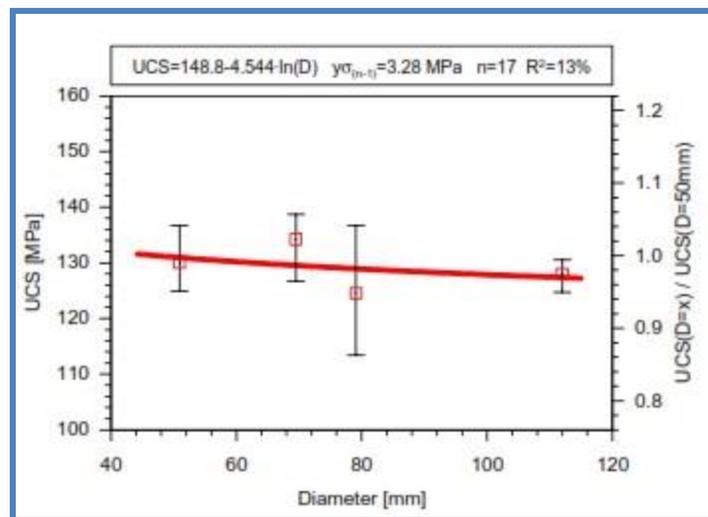
Como conclusión que se puede afirmar no hubo tamaño efecto observado en la gama del diámetro probado.

**Figura 6** Resistencia a la compresión no confinada de las muestras de piedra caliza en correlación con el diámetro del núcleo.



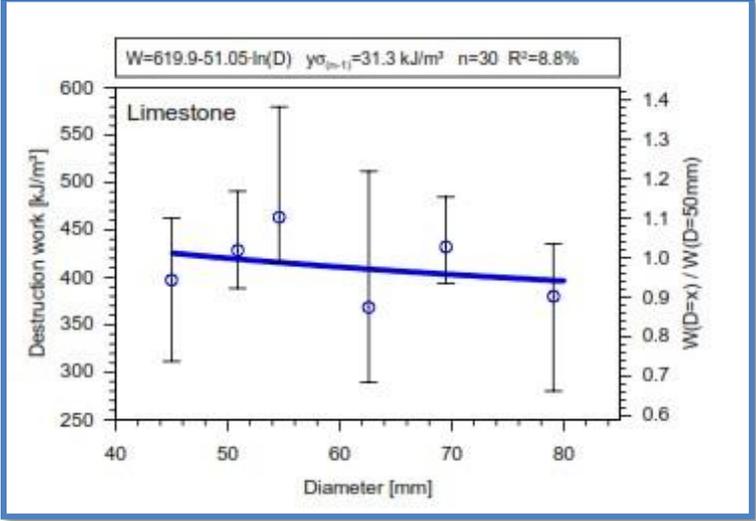
Fuente: Eurock. 2001

**Figura 7** Resistencia a la compresión no confinada de las muestras de granito en correlación con el diámetro del núcleo.



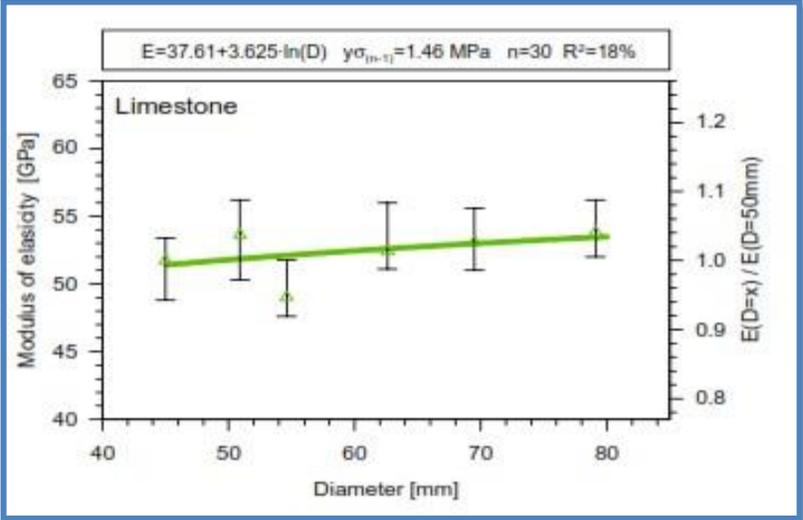
Fuente: Eurock. 2001

**Figura 8** Trabajo compresión inconfiada de las muestras de piedra caliza en correlación con el diámetro del núcleo.



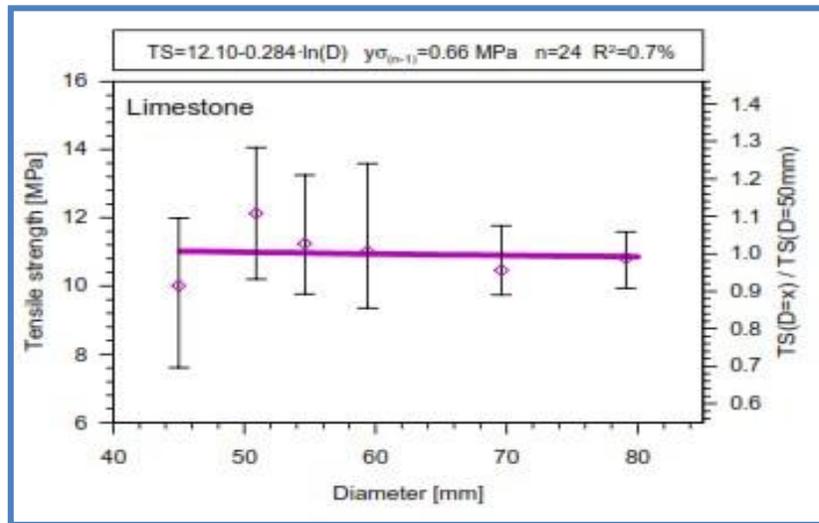
Fuente: Eurock. 2001

**Figura 9** Módulo de elasticidad de las muestras de piedra caliza en correlación con el diámetro del núcleo.



Fuente: Eurock. 2001

**Figura 10** Resistencia a tracción indirecta de las muestras de piedra caliza en correlación con el diámetro del núcleo.



Fuente: Eurock. 2001

#### 2.2.1.4. Efecto Forma

De acuerdo con ASTM 1986, la corrección de la forma de resistencia a la compresión no confinada es:

$$C = \frac{C_a}{0.88 + (0.24 \cdot D/L)} \quad (1)$$

Donde

C = fuerza compresiva calculado de un espécimen de longitud/diámetro equivalente 2:1;

Ca = resistencia a la compresión medido de la muestra analizada; D = diámetro de la base de prueba;

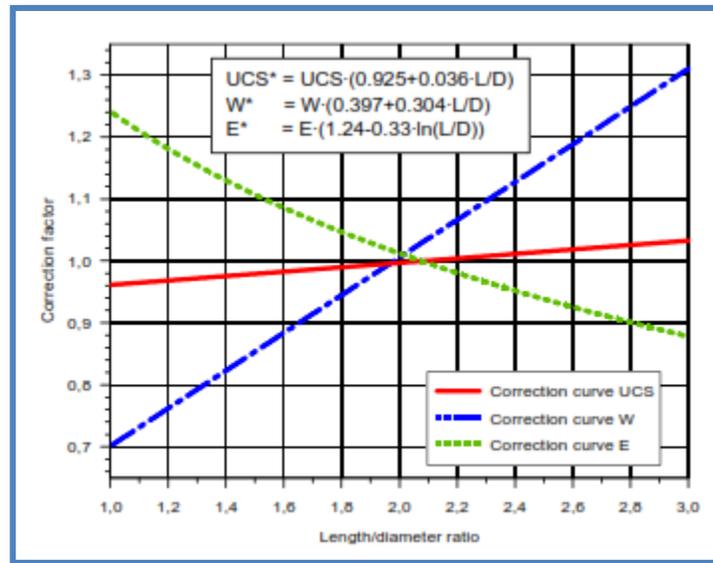
L = prueba base altura.

La variación de C para una relación longitud/diámetro entre 1 y 3 sería 0,89 a 1.04.

La variación de los datos presentados en esta contribución es 0,96 a 1.03 que es menos, pero muy cerca de ASTM. Además se proponen las curvas de corrección para el módulo de elasticidad y el trabajo de destrucción, se simplifican las funciones de las que presenta en el capítulo antes para mayor comodidad pero sin perder precisión. Obsérvese que la corrección E sólo es válida cuando se mide la tensión (o desplazamiento) entre los platos de carga.

Para obtener una curva de corrección para la resistencia a tracción indirecta, se puede tomar como una aproximación (Figura 8), pero más pruebas deben realizarse para validar los parámetros de función encontrados.

**Figura 11** Forma de las curvas de corrección para la resistencia a la compresión no confinada UCS, destrucción trabajo W y módulo de elasticidad E.

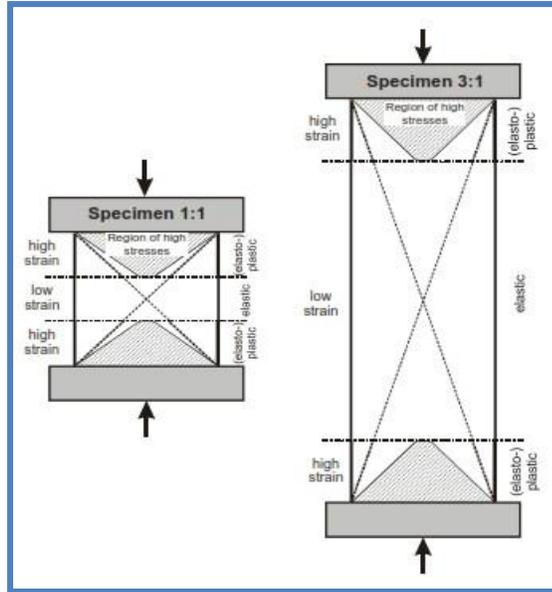


**Fuente:** Eurock. 2001

La última pregunta será respondida en razón del impacto significativo de la forma en la que se mida la tensión, esto puede visualizarse en la figura 15, donde se sugiere que altas tensiones por debajo de las bases de carga debido a la fricción, resulta una plastificación local y mayor tensión en esas regiones. Si esto ocurre se recomienda que la medición de la tensión (o desplazamiento) para determinar el módulo de elasticidad debe ser recogida solamente a lo largo de la central, 2/3 de la longitud total de la base (Figura 10).

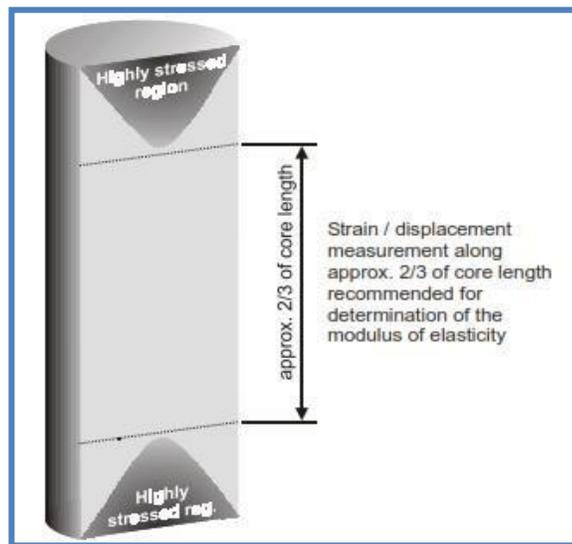
Luego debe minimizarse la influencia de la forma en el módulo de elasticidad y se tiene en cuenta que en el caso de determinar la acción de falla, debe realizarse la medición de la tensión entre los platos de carga (es decir, a lo largo de la base entera) para obtener un valor entero para la deformabilidad, por lo tanto, dichas pruebas se realizarán en las bases con una  $L/D > 2$ .

**Figura 12** Explicación conceptual para la relación entre el efecto y la tensión medida de forma.



**Fuente:** Eurock. 2001

**Figura 13** Recomendación para la medición de la tensión a lo largo de aproximadamente 2/3 de la longitud la longitud del espécimen durante la prueba de compresión no confinado

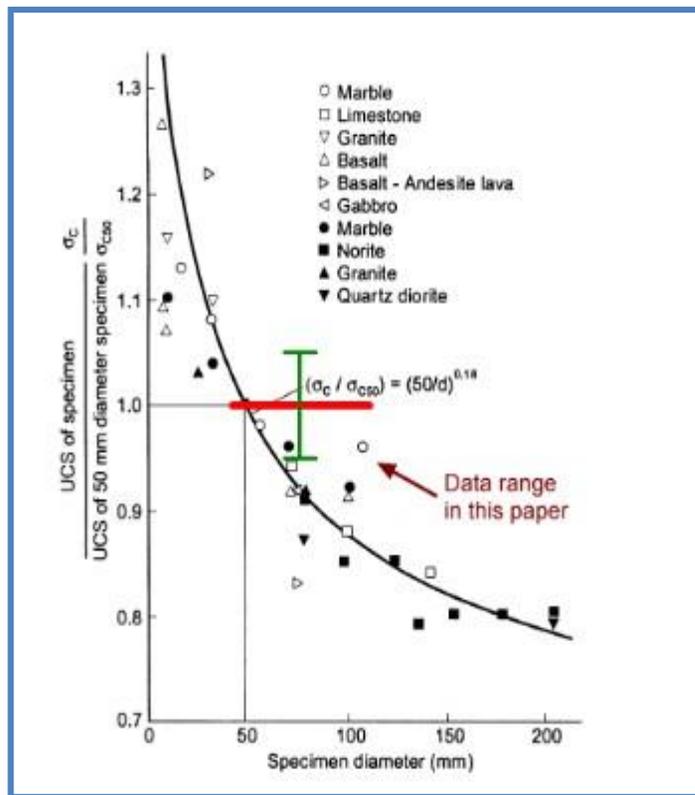


**Fuente:** Eurock. 2001

### 2.2.1.5. Efecto tamaño

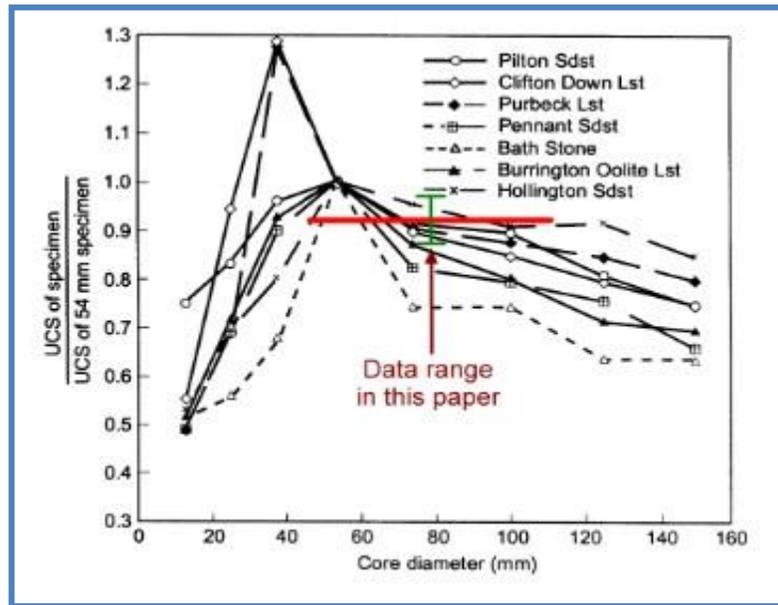
Para la comparación, el rango de datos obtenidos ha sido trazado en los diagramas publicados de Hoek & Brown 1980 (Figura 17) y Hawkins 1998 (Figura 18). Aunque el tamaño probado rango de este aporte no es tan amplio, en nuestra experiencia los diámetros de núcleo seleccionados representan tamaños núcleo típico para la prueba práctica de Geotécnica; así, dentro de nuestra gama de datos probados, ningún efecto tamaño podía probarse muy en contraste con los autores citados.

**Figura 14** Relación entre el tamaño de UCS y ejemplar trazado como valores adimensionales (después de Hoek y Brown 1980)



Fuente: Eurock. 2001

**Figura 15** Relación entre la UCS y ejemplar (núcleo) tamaño trazados como valores adimensionales (después de Hawking 1998)



**Fuente:** Eurock. 2001.

La información que será utilizada en este proyecto va estar basada en el impacto que tiene el tamaño de las muestras, específicamente en el diámetro para poder realizar un análisis en el cálculo de la resistencia al corte no drenado, donde la relación longitud/diámetro quedara constante.

Es importante realizar una descripción de los aspectos teóricos relacionados con la terminología utilizada para denominar ciertos procesos y características del proceso de ejecución del proyecto en mención.

### 3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

- a. **Dimensiones de la probeta:** Según INV 152-2013, la probeta debe ser de sección aproximadamente constante, circular o cuadrada, y eje perpendicular a dicha sección. Su diámetro o lado no debe ser inferior a 30 mm (1.3 in.) y en suelos que presentan discontinuidades se recomienda que sea de mayor tamaño. La mayor partícula contenida en su interior debe ser, como máximo, igual a 1/10 del diámetro o lado. Si, una vez terminado el ensayo, se encuentran partículas mayores que dicho tamaño, se hará constar esto, junto con los resultados. Para muestras con diámetro igual o mayor de 72 mm (2.8 in.), el tamaño de la partícula deberá ser menor a 1/6 del diámetro o lado.

La relación de la altura al diámetro o al lado de la base se debe encontrar entre 2 a 3.

El término probeta se aplica a la muestra ya tallada. Cuando la altura no cumpla con las dimensiones indicadas, se deberá anotar en el Informe.

La dimensión longitudinal de la probeta cortada debe coincidir con la dirección vertical de la muestra original.

- Probetas inalteradas – Si se trata de muestras de tubo, hay que manejarlas con gran cuidado para evitar su alteración, cambios en la sección transversal o la pérdida de humedad.
- Si se teme que el dispositivo de extracción pueda dañar la muestra, se puede hendir el tubo longitudinalmente o cortarlo en trozos más pequeños para facilitar la extracción de la muestra sin alterarla.
- Si se trata de arcilla no dura, se recomienda, cuando sea posible, tallar la

muestra para eliminar las zonas alteradas próximas a las paredes del tubo. En general, se deben desechar las partes alteradas de la muestra.

- En caso de disponerse de cámara húmeda, las operaciones de tallado se deben realizar en ella con el fin de que el suelo permanezca el menor tiempo posible expuesto a la pérdida de humedad. Se puede emplear un torno o tallador como el de la Figura 1, y para recortar los extremos la sierra de alambre y una caja de ingletes, para evitar el desarrollo de fuerzas capilares.

#### 4. PROCEDIMIENTO ENSAYO INV – 152 -13

- Medición de tres alturas de la probeta cada una separada 120 grados de la otra y tres diámetros en las tres líneas imaginarias centrales que resultan de dividir la probeta en cuartos, con una precisión de 0.1 mm mediante un calibrador con nonio o un objeto análogo. En probetas de gran tamaño puede adoptarse una precisión menor y proporcional al tamaño de la muestra.
- Determinar la masa de la muestra.
- Disposición de la probeta en la prensa de modo que quede perfectamente centrada, accionando el dispositivo de avance lo estrictamente necesario para que la probeta toque a la placa superior de la prensa. Se pone en cero el indicador de deformaciones y el ensayo se podrá hacer controlando la deformación o controlando la carga.
- Para el caso de la deformación controlada, se acciona la prensa de modo que la velocidad de deformación unitaria de la probeta esté comprendida entre  $\frac{1}{2}$  % y 2% por minuto. Se toman medidas de las deformaciones y de las cargas cada 30 segundos hasta que las cargas comiencen a disminuir o hasta llegar a una deformación axial del 15% (lo que antes suceda). Se escogerá una velocidad en que la rotura ocurra en un lapso entre 1 y 10 minutos. En el caso de materiales muy blandos que exhiben deformaciones mayores a la falla, deberán ensayarse a una rata mayor de deformación y lo inverso para los materiales duros o quebradizos.

Si se trata de una probeta de suelo muy duro, en la cual la deformación a la rotura sea muy pequeña, la curva esfuerzo- deformación no quedará debidamente representada en dicho gráfico. En ese caso, es posible despreciar el aumento de sección durante la carga. Cuando interesa hallar el módulo de deformación en probetas de suelo muy duro, es conveniente medir la

deformación mediante extensómetros o por otro procedimiento que elimine las deformaciones en la base.

- Cuando se empleen esfuerzos controlados, se aplicará la carga para que produzca una deformación axial a una tasa de 0.50% a 2% por minuto y se registrarán los esfuerzos y las deformaciones cada 30 segundos. La tasa de deformación se regulará en tal forma que la falla de probetas sin refrendar nunca sobrepase de 10 minutos. La carga se deberá proseguir hasta que decrezcan los valores de la carga con el aumento de sección que se produce en la probeta durante la rotura, lo cual se traduce en una disminución del esfuerzo aplicado.
- Se hace un esquema de la forma de rotura: si la rotura se produce a través de un plano inclinado, es conveniente medir el ángulo de inclinación de dicho plano.
- De la parte de la probeta en donde ocurrió la rotura, se toma una pequeña muestra en el recipiente y se determina su humedad. También se determina la humedad de toda probeta, anotando las masas y haciendo las operaciones que se indican en la hoja de cálculos.

## PROCEDIMIENTO ENSAYO DE CORTE SOBRE SUELOS COHESIVOS EN EL TERRENO USANDO LA VELETA

- El ensayo de corte con veleta consiste básicamente en colocar una veleta de cuatro hojas dentro del suelo inalterado, y en girarla desde la superficie para determinar la fuerza de torsión necesaria para lograr que una superficie cilíndrica sea cortada por la veleta; con esta fuerza de corte se halla, entonces, la resistencia unitaria de dicha superficie. Es de importancia básica que la fricción de la varilla de la veleta y la del aparato sean tenidas en cuenta porque de otra manera, la fricción sería inadecuadamente registrada como resistencia del suelo. Las medidas de fricción bajo condiciones que no implican carga, como cuando se emplea un vástago liso en lugar de la veleta, o una veleta que permita alguna rotación libre de la varilla antes de someterla a carga, son satisfactorias únicamente cuando el giro sea aplicado mediante un momento balanceado que no se traduzca en empuje lateral. A medida que las fuerzas de torsión se hagan más grandes durante un ensayo, un empuje lateral en el instrumento se traducirá en un incremento de fricción no considerado en las lecturas iniciales sin carga. No se recomiendan instrumentos que produzcan empuje lateral. La varilla de la veleta debe tener suficiente rigidez para que no sufra torsión bajo condiciones de carga plena, de lo contrario, se deberá hacer una corrección al dibujar las curvas de Momento vs. Rotación.
- Cuando se emplee revestimiento para la veleta, se deberá avanzar con ella hasta una profundidad no menor de cinco veces el diámetro del revestimiento, por encima de la profundidad deseada para la punta de la veleta. Cuando no se utilice revestimiento, se deberá suspender la perforación a una profundidad tal que la punta de la veleta pueda penetrar dentro del suelo inalterado, una profundidad de, por lo menos, cinco veces el diámetro de la perforación.
- Se deberá penetrar la veleta desde el fondo del agujero o de su revestimiento, mediante un empuje simple, hasta la profundidad a la cual se va a efectuar el

ensayo, cuidando que no se aplique torsión durante dicho empuje.

- Con la veleta en posición, se deberá aplicar el giro a una velocidad que no exceda de 0.1°/segundo. Generalmente se requieren para la falla, entre 2 y 5 minutos, excepto en arcillas muy blandas en las cuales el tiempo de falla puede elevarse a 10 ó 15 minutos. En materiales más duros, que alcanzan la falla con una deformación pequeña, se puede reducir la rata del desplazamiento angular de tal manera que se pueda obtener una determinación apreciable de las propiedades esfuerzo-deformación. Durante la rotación de la veleta, se deberá mantener ésta a una altura fija. Se deberá registrar el momento máximo. Con aparatos de transmisión, es aconsejable anotar los valores intermedios del momento obtenido en ese instante, a intervalos de 15 segundos o menores, si es requerido.
- Después de determinar el máximo momento, se rota rápidamente la veleta un mínimo de 10 revoluciones; inmediatamente después se determinará la resistencia remodelada, en todos los casos dentro del minuto siguiente al remodelado.
- En los casos en los cuales el suelo esté en contacto con la varilla de giro, se determina la fricción entre la varilla y el suelo por medio de ensayos de giro efectuados con varillas similares a profundidades equivalentes, sin la veleta colocada. Se debe efectuar el ensayo de fricción de la varilla por lo menos una vez en cada sitio.
- Para determinar la magnitud de la fricción de los cojinetes o guías, en aparatos en los cuales la varilla de giro esté completamente aislada del suelo, se deberá realizar un ensayo de fricción con una varilla lisa al menos una vez en cada sitio. En dispositivos de veleta que funcionen adecuadamente, esta fricción deberá ser despreciable. Nota 2 - En algunos casos no será necesario remover la veleta para el ensayo de fricción de cojinetes o guías. En tanto que la veleta no se halle en contacto con el suelo, por ejemplo, cuando se encuentre dentro

de un revestimiento, no resulta afectada por las medidas de fricción.

- Se deberán efectuar ensayos con veleta únicamente en suelos cohesivos, inalterados o remoldeados. No se deben realizar en ningún suelo que permita el drenaje o que se dilate durante el período del ensayo, como en arenas o limos o en suelos en los cuales la veleta encuentre piedras que puedan influir en los resultados. Se recomienda no hacer ensayos de veleta con espaciamientos menores de 0.76 m entre ellos. Este espaciamiento se podrá variar cuando sea requerido con la autorización y responsabilidad del especialista a cargo.
- Periódicamente se deberán comprobar las dimensiones de la veleta para asegurarse que no esté desgastada ni distorsionada.

## CÁLCULOS

La deformación unitaria,  $e$ , se calculará con la siguiente fórmula:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Dónde:

$e$  = deformación unitaria axial para la carga dada,

$\Delta L$  = cambio en longitud de la muestra, igual al cambio entre la lectura inicial y final del indicador de deformación

$L_0$  = longitud inicial de la muestra.

Se calcula la sección transversal promedio de la muestra,  $A$ , para una carga dada así:

$$A = \frac{A_0}{1 - e}$$

Dónde:

$e$  = deformación unitaria axial para la carga dada  
 $A_0$  = área inicial promedio de la probeta.

$$A_o = \frac{A_t + 2A_m + A_b}{4}$$

Dónde:

$A_t$  = área en la parte superior de la probeta  
 $A_m$  = área en la parte media de la probeta  
 $A_b$  = área de la parte inferior de la probeta.

El área  $A$ , se puede calcular alternativamente a partir de dimensiones obtenidas por medición directa, cuando se pueden medir las superficies de la probeta.

Es útil preparar un gráfico que dé para cada deformación, el área corregida correspondiente, de acuerdo con los diámetros iniciales de las muestras que se empleen en el ensayo, como se ilustra en la Figura 2.

Se calcula el esfuerzo,  $S_c$ :

$$s_c = \frac{P}{A}$$

Dónde:

$p$  = carga aplicada dada

$A$  = área de la sección promedio correspondiente.

Se prepara un gráfico que muestre la relación entre el esfuerzo (ordenada) y la deformación unitaria (en las abscisas). Se toma el valor mayor de la carga unitaria o el que corresponda al 20% de deformación, el que ocurra primero entre las dos, y se informa como resistencia a la compresión inconfiada.

## 5. ANÁLISIS DE VALORES.

Puntuación Z también conocido como puntuación estándar, es el método de cálculo de cuántas desviaciones estándar en un conjunto de datos está por encima o por debajo de la media. La distancia entre la media y una puntuación Z dada en cada distribución normal corta una proporción de la superficie total por debajo de la curva. Puntuaciones Z son particularmente informativos cuando la distribución a las que se refieren es normal. El estándar de calificación transformación es útil, en particular cuando tratando de comparar las posiciones relativas de elementos de distribuciones con diferentes medios o con diferentes desviaciones estándar.

Dadas las condiciones de los datos tomados de las muestras se procede a calcular el puntaje Z de las muestras, con el fin de determinar qué tan alejados está los datos tomados de la media muestral del presente estudio. Para calcular los valores Z se deben seguir los siguientes pasos:

1. Obtener las muestras de la variable de interés. Se debe tener en cuenta el tamaño seleccionado de la muestra para obtener valores representativos de Z, con el fin de establecer mejores conclusiones bajo análisis de datos.
2. Encontrar la media de la muestra. Es decir que se deben sumar todos los valores de la muestra seleccionada y se procede a dividirla por el número de datos totales usados para el análisis, así se obtiene el promedio o la media muestral.
3. Determinar la desviación estándar de la muestra. Este valor nos indica que tan cercanos están los datos en términos de desviación estándar con respecto a la media de los valores seleccionados para el análisis.
4. Calcular los puntajes Z. De acuerdo con lo anterior se procede a calcular el puntaje Z, este puntaje se obtiene bajo la siguiente expresión.

$$z = \frac{\text{valor a analizar} - \text{valor promedio}}{\text{valor de varianza}}$$

Basados en los resultados de los puntajes Z se pueden obtener los valores de probabilidad de ocurrencia de que un valor este en el rango de mis datos (-3 a 3). La probabilidad expresa qué tan posible es que un valor de observación sea una "posibilidad al azar", en lugar de que tenga una causa sistémica. Asumiendo que la población de datos sigue una curva "con forma de campana" normal, los estadísticos pueden mostrar una relación entre el puntaje Z y la probabilidad. El valor Z permite comparar la importancia de las desviaciones observadas en diferentes poblaciones.

**Tabla 1** Cálculo de puntaje Z para 1,50"

1,50"		
Muestras	Esfuerzo max (kN/m2)	Puntaje Z
Muestra 1	137,30	0,774
Muestra 2	133,32	0,086
Muestra 3	145,09	2,122
Muestra 4	131,95	-0,151
Muestra 5	126,41	-1,109
Muestra 6	132,47	-0,061
Muestra 7	128,64	-0,723
Muestra 8	127,80	-0,869
Muestra 9	127,87	-0,857
Muestra 10	137,38	0,789

**Tabla 2** Datos Estadísticos para 1,50"

<b>Datos Estadísticos</b>	
Media	132,82
Mediana	132,21
Desviación estándar	5,78
Varianza de la muestra	33,45
Coefficiente de asimetría	1,04
Mínimo	126,41
Máximo	145,09
Cuenta	10,00

**Tabla 3** Calculo de puntaje Z para 2,0"

<b>2,0"</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Esfuerzo max (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Puntaje Z</b>
Muestra 2	130,96	0,676
Muestra 3	124,63	0,225
Muestra 4	118,15	-0,237
Muestra 5	161,50	2,852
Muestra 6	119,19	-0,163
Muestra 7	122,26	0,056
Muestra 8	109,56	-0,849
Muestra 9	122,47	0,071
Muestra 10	102,00	-1,388
Muestra 11	120,65	-0,059
Muestra 12	117,81	-0,261
Muestra 13	118,53	-0,210
Muestra 14	111,49	-0,712

**Tabla 4** Datos estadísticos para 1,50

<b><i>Datos Estadísticos</i></b>	
Media	121,48
Mediana	119,19
Desviación estándar	14,04
Varianza de la muestra	196,99
Mínimo	102,00
Máximo	161,50
Coficiente de asimetría	1,95
Cuenta	13,00

**Tabla 5** Calculo de puntaje Z para 2,50"

<b>2,5"</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Esfuerzo max (kN/m2)</b>	<b>Puntaje Z</b>
Muestra 1	124,80	0,737
Muestra 2	136,11	1,398
Muestra 3	114,05	0,110
Muestra 4	126,03	0,809
Muestra 5	106,86	-0,311
Muestra 7	114,01	0,107
Muestra 8	134,54	1,306
Muestra 9	117,76	0,326
Muestra 10	117,36	0,303
Muestra 11	91,80	-1,190
Muestra 12	94,49	-1,033
Muestra 13	105,21	-0,407
Muestra 14	113,64	0,085
Muestra 15	103,31	-0,518
Muestra 16	69,27	-2,507
Muestra 17	125,58	0,783

**Tabla 6** Datos estadísticos para 2,50"

<b><i>Datos Estadísticos</i></b>	
Media	112,18
Mediana	114,03
Desviación estándar	17,12
Varianza de la muestra	293,00
Coficiente de asimetría	-0,94
Mínimo	69,27
Máximo	136,11
Cuenta	16,00

**Tabla 7** Calculo de puntaje Z para 3,0"

<b>3,0"</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Esfuerzo max (kN/m2)</b>	<b>Puntaje Z</b>
Muestra 2	111,35	-1,919
Muestra 3	119,80	-1,689
Muestra 4	104,32	-2,110
Muestra 5	105,01	-2,091
Muestra 6	103,61	-2,130
Muestra 7	114,38	-1,836
Muestra 8	129,38	-1,428
Muestra 9	111,51	-1,914
Muestra 10	103,17	-2,141

**Tabla 8** Datos estadísticos para 3,0"

<b><i>Datos Estadísticos</i></b>	
Media	118,60
Mediana	124,79
Desviación estándar	23,75
Varianza de la muestra	563,93
Coficiente de asimetría	-0,33
Mínimo	83,78
Máximo	151,52
Cuenta	9,00

**Tabla 9** Calculo de puntaje Z para 4,0

<b>4,0"</b>		
<b>Muestras</b>	<b>Esfuerzo max (kN/m2)</b>	<b>Puntaje Z</b>
Muestra 1	107,04	0,068
Muestra 2	103,74	-0,006
Muestra 3	110,76	0,151
Muestra 4	119,07	0,338
Muestra 5	56,38	-1,068
Muestra 6	59,01	-1,009
Muestra 7	109,92	0,132
Muestra 8	95,98	-0,180
Muestra 9	83,53	-0,459
Muestra 10	149,08	1,010
Muestra 11	100,48	-0,079
Muestra 12	72,53	-0,706

**Tabla 10** Datos estadísticos para 4,0”

<b><i>Datos Estadísticos</i></b>	
Media	104,01
Mediana	102,11
Desviación estándar	44,61
Varianza de la muestra	1990,26
Coficiente de asimetría	2,15
Mínimo	56,38
Máximo	229,69
Cuenta	12,00

## 6. ASPECTOS LEGALES

Reglamento colombiano para la realización de estudios geotécnicos

Para la ejecución de este proyecto de investigación es fundamental en primera instancia basarse en la información del Reglamento Colombiano de Normas Sismo Resistentes, desde su versión 1998 hasta la actualización 2010, y los decretos que han intervenido en el proceso, haciendo énfasis en el Título H – Estudios geotécnicos.

- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC-2121 – Suelos. Obtención de muestras para probetas de ensayo. Método para tubos de pared delgada. (ASTM D 1587).
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC-1504 – Suelos. Clasificación para propósitos de ingeniería. (ASTM D 2487).
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC-4630 – Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos.
- ASTM D 4643-00 - Método para determinar el contenido de humedad utilizando para ello el horno microondas.
- ASTM D 2166-06 – Suelos. Ensayo para determinar la resistencia a la compresión inconfiada.
- ASTM E 178. Manejo de valores atípicos.

## **7. METODOLOGÍA**

### **7.1. GENERAL**

La metodología del proyecto se basa en la extracción de las muestras en dos lugares (Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” y un segmento de 10m<sup>2</sup> en la Localidad de Fontibón) bajo condiciones diferentes en cuanto a su geometría y así proceder a realizar ensayos de laboratorio correspondientes a compresión inconfiada que permita realizar una observación en la variación de las características del ensayo debido a los cambios realizados.

### **7.2. ESPECIFICA**

- *Fabricación y uso de tubos de pared delgada (tubos Shelby)*

De acuerdo con la norma (ASTM D 1587) se establece el procedimiento para el uso de un tubo de metal de pared delgada, con el fin recuperar las muestras de suelo relativamente no perturbados, apto para pruebas de laboratorio de ingeniería en análisis de propiedades tales como densidad, compresibilidad, permeabilidad y resistencia. Esta norma está limitada a los suelos que pueden ser penetrados por el tubo de pared delgada, no se recomienda este método de muestreo para suelos con grava o partículas más grandes de tamaño del suelo cementadas o suelos muy duros. Otras muestras del suelo pueden utilizarse para el muestreo mediante perforación por dispositivos indicados en las normas (D1586, 3550 D y D6151)

**Tabla 11** Tubos en muestras de uso geotécnico, muestra de tubos acero pared delgada conveniente.

<b>DIÁMETRO EXTERIOR</b>			
In (Pulgadas)	2	3	5
mm (milímetros)	50,8	76,2	127
<b>GRUESO DE PARED</b>			
Bwg	18	16	11
In (Pulgadas)	0,04	0,065	0,12
mm (milímetros)	1,24	1,65	3,05
<b>LONGITUD DEL TUBO</b>			
In (Pulgadas)	36	36	54
M (metros)	0,91	0,91	1,45
Cociente del espacio interior %	< 1	< 1	< 1

**Fuente:** ASTM D 1587.

Los tres diámetros recomendados en la tabla 1 son los indicados para fines de estandarización, y no pretende indicar que muestreo tubos de intermedio o diámetros más grandes no son aceptables. Longitudes de tubos de muestra ilustrativa. Las Longitudes adecuadas deben determinarse dependiendo de las condiciones de campo.

**Tabla 12** Tolerancias dimensionales para tubos de pared delgada

<b>DIÁMETROS NOMINALES DE TUBOS TABLA 1. TOLERANCIAS</b>						
<b>Tamaño exterior</b>	2,00	50,80	3,00	76,20	5,00	127,00
<b>Diámetro</b>	in	mm	in	Mm	in	mm
<b>Diámetro exterior (Do)</b>	0,01	0,18	0,01	0,25	0,02	0,38
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Diámetro interior (Di)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	-0,01	-0,18	-0,01	-0,25	-0,02	-38,00
<b>Grueso de pared</b>	±0,007	±0,179	±0,01	±0,254	±0,015	±0,381
<b>Ovalización</b>	0,02	0,38	0,02	0,51	0,03	0,76
<b>Rectitud</b>	0,030/ft	2,50/m	0,030/ft	2,50/m	0,030/ft	2,50/m

**Fuente:** ASTM D 1587.

Los diámetros intermedios o mayores deben ser proporcionales; especificando sólo dos las primera tres tolerancias; es decir, hacer y Di, o hacer y pared de espesor, o D y pared gruesa.

Con base a la información obtenida de la norma ASTM D 1587 (procedimiento para el uso de un tubo de metal de pared delgada) se determinaron las longitudes y espesores de pared para la tubería usada en la extracción de muestras y se relaciona en la siguiente tabla:

**Tabla 13** Interpolación de datos para determinar el diámetro y espesor de tubería de pared delgada utilizados en la toma de muestras.

Diámetros descritos en norma astm D 1587				Interpolación de datos de norma astm D 1587 para determinación de las dimensiones en los diámetros a evaluar				
<b>Diámetro exterior</b>								
In	2	3	5	1 1/2	2	2 1/2	3	4
Mm	50,80	76,20	127,00	38,10	50,80	63,50	76,20	101,60
<b>Grueso de pared</b>								
In	0.049	0,065	0,12	0,041	0,049	0,057	0,065	0,081
Mm	1,24	1,65	3,05	1,04	1,24	1,45	1,65	2,06
<b>Longitud del tubo</b>								
In	36	36	54	23,11	23,11	23,11	23,11	23,11
M	0,91	0,91	1,45	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91

**Fuente:** ASTM D 1587.

Con base en los datos obtenidos mediante la interpolación para obtener las longitudes y espesores de pared para cada uno de los diámetros utilizados en el presente proyecto, se optó por realizar las paredes y longitudes de una misma dimensión utilizando para ellos la mayor dimensión alcanzada que para este caso es:

- Grueso de pared:  
2mm
- Longitud de la tubería:  
90cm

Para terminar con la construcción de la tubería de pared delgada, se realiza una reducción de la boca del tubo con el fin de reducir la fricción entre el tubo y el terreno de donde se obtendrán las muestras para que a la hora de recuperar la muestra del tubo no se vea afectado por algún tipo de presión y sea de fácil extracción.

**Figura 16** Tubería shelby utilizada para la extracción de muestras con diámetros de 1½”, 2”, 2 ½”, 3” y 4”



**Fuente:** Elaboración Propia.

- *Obtención de muestras, ejecución de ensayos y análisis de los resultados de laboratorio, con base en la variación de las dimensiones de las probetas.*

Se determinaron como sitios para la toma de muestras, la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito” y un segmento de 10m<sup>2</sup> en la Localidad de Fontibón.

**Figura 17** Ubicación del terreno para la extracción de muestras.



**Fuente:** Elaboración Propia.

Preparación del terreno para la extracción de las muestras, haciendo una excavación de 3,1 m. hasta encontrar el estrato de arcilla.

**Figura 18** Perfil del terreno de extracción de muestras



**Fuente:** Elaboración Propia.

Perforación el terreno haciendo una caja de 2,5 m x 2,0 m.

**Figura 19** Alistado de terreno para toma de muestras.



**Fuente:** Elaboración Propia.

Inicio del proceso para la toma de muestra con los tubos de diámetros establecidos, hincando la tubería en el terreno para realizar la extracción de la muestra.

**Figura 20** Extracción de muestras con tubería Shelby con diferente diámetro.



**Fuente:** Elaboración Propia.

Cuando se recupera la muestra del terreno se envuelve en papel parafinado y vinilpel para conservar la humedad natural del terreno y de esta manera no alterar las características del suelo y poder tener datos más confiables a la hora de realizar el respectivo ensayo.

**Figura 21** Identificación de muestras y preparación para transporte.



**Fuente:** Elaboración Propia.

Luego de envolver la muestra se realiza el transporte mediante cajas de icopor para controlar la pérdida de temperatura, evitando que las muestras queden expuestas a algún efecto que las pueda alterar.

**Figura 22** Almacenamiento para evitar pérdida de humedad y transporte de muestras.



**Fuente:** Elaboración Propia.

## 8. PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Inicio del proceso de tallaje de las muestras para realizar el ensayo.

**Figura 23** Tallado de muestras.



**Fuente:** Elaboración Propia.

Presentación las muestras para realizar el ensayo

**Figura 24** Preparación de muestras para ensayo de compresión confinada.

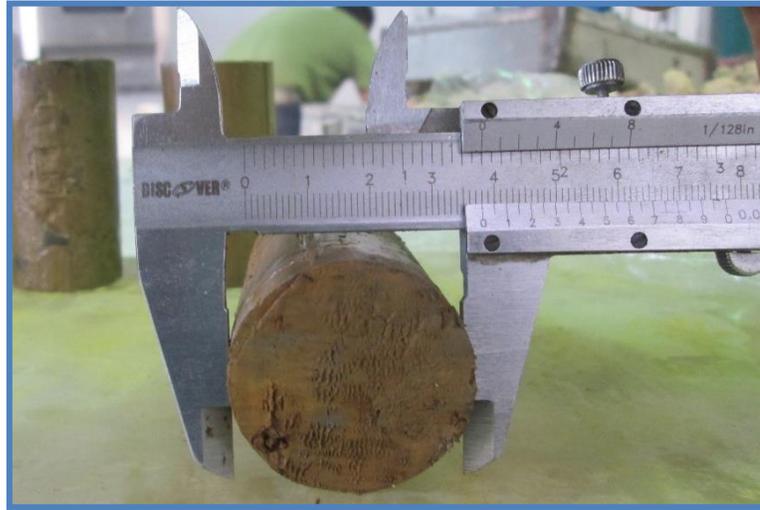


**Fuente:** Elaboración Propia.

## 8.1. Procedimiento del ensayo.

Medición de altura y diámetro de la probeta.

**Figura 25** Caracterización de muestras identificando su altura promedio, diámetro promedio y peso



**Fuente:** Elaboración Propia.

Se dispone la probeta en la prensa de modo que quede perfectamente centrada, accionando el dispositivo de avance lo estrictamente necesario para que la probeta toque la placa superior de la prensa. Así mismo se pone en cero el indicador de deformaciones.

El ensayo podrá hacerse controlando la deformación o controlando la carga.

**Figura 26** Falla de muestras en el equipo de ensayo de compresión inconfiada.



**Fuente:** Elaboración Propia.

Según la norma INVIAS 152 – 2013, cuando se empleen esfuerzos controlados se aplicara la carga para que produzca una deformación axial a una rata de  $\frac{1}{2}$  % a 2 % por minuto y se registran los esfuerzos y de formaciones cada 30 segundos. (La velocidad utilizada para realizar el ensayo fue con el 2% de la deformación.)

De la parte de la probeta en donde se produce la rotura, se toma una pequeña muestra en un recipiente y se determina su humedad.

**Figura 27** Toma de pesos para determinar la humedad de las muestras.



**Fuente:** Elaboración Propia.

Como prueba adicional para observar el comportamiento y elasticidad de los materiales según la dirección en la que aplique la fuerza, se utilizó el *Modulo de Young*<sup>1</sup> al 50% de la falla pasando por TAN como por SEC, en cada una de las gráficas de esfuerzo vs. Deformación unitaria, las cuales se encuentran en el Anexo No. 1

---

<sup>1</sup> Módulo de Young <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/permot3.html>

**Tabla 14** Resultados de Módulos de Young

1,5"	Muestra	Secante al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>	Tangente al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>
	1	9153,41	5882,35
	2	8888,08	6250,00
	3	9672,87	13333,33
	4	6872,44	10526,32
	5	6583,76	10526,32
	6	6899,42	10526,32
	7	7068,31	19047,62
	8	9128,28	6451,61
	9	19979,08	10000,00
	10	18076,96	10526,32

**Tabla 15** Resultados de Módulos de Young

2"	Muestra	Secante al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>	Tangente al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>
	2	12355,17	11764,71
	3	6559,71	10526,32
	4	6218,33	11764,71
	5	15833,47	11764,71
	6	7357,56	9523,81
	7	16980,10	21052,63
	8	6680,70	36363,64
	9	55668,30	6666,67
	10	5999,72	7407,41
	11	50270,79	9302,33
	12	6200,51	11428,57
	13	53878,70	5714,29
	14	5993,85	5714,29

**Tabla 16** Resultados de Módulos de Young

	Muestra	Secante al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>	Tangente al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>
2"	1	10229,58	9756,10
	2	12373,31	10526,32
	3	6336,32	6666,67
	4	8752,09	9756,10
	5	10476,36	10810,81
	7	5816,99	5816,99
	8	46393,13	5714,29
	9	6400,21	16000,00
	10	53345,55	5333,33
	11	5099,99	5333,33
	12	4821,10	11428,57
	13	40466,78	5714,29
	14	5981,02	5714,29
	15	46958,66	8695,65
	16	30118,65	5000,00
	17	15697,88	6451,61

**Tabla 17** Resultados de Módulos de Young

3"	Muestra	Secante al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>	Tangente al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>
	2	37117,93	18181,82
	3	9215,35788	4878,05
	4	10227,5465	12500,00
	5	21001,28	5714,29
	6	32377,09	9523,81
	7	9375,40	9090,91
	8	7268,31	4444,44
	9	17985,90	15384,62
	10	7265,60	9523,81

**Tabla 18** Resultados de Módulos de Young

4"	Muestra	Secante al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>	Tangente al 50% Ei kN/m <sup>2</sup>
	1	44599,83	8000,00
	2	28039,13	9523,81
	3	5829,56	6451,61
	4	54121,40	10810,81
	6	5900,59	6250,00
	7	6106,62	10000,00
	8	25941,66	6666,67
	9	4913,51	10526,32
	10	11125,47	6250,00
	11	38646,81	7407,41
	12	3626,42	16666,67

De igual manera, se tomó como referencia el *modelo hiperbólico de Duncan y Char*<sup>2</sup> utilizado con éxito en suelos arenosos, arcillosos y loamosos, que permite predecir con exactitud la relación esfuerzo/ deformación del suelo cuando presenta una falla plástica, fue aplicado en las gráficas de Esfuerzo vs Deformación unitaria de cada una de las muestras en los diferentes diámetros, con el fin de establecer si la curva de resultados se asimilaba a dicho modelo. (Ver graficas Anexo 1)

Finalmente, como un instrumento de análisis complementario, se realizó el ensayo con veleta de campo, el cual se utiliza para determinar el parámetro de resistencia al corte no drenado de un suelo en campo; se recurrió a este ensayo con el fin de establecer una comparación en cuanto a los datos de resistencia al corte tanto del ensayo de compresión inconfiada así como del ensayo con veleta de campo.

---

<sup>2</sup> “Estudio de la exactitud del modelo hiperbólico de Duncan y Chan en la predicción de la relación esfuerzo deformación de tres suelos arcillosos cubanos”  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93215932005>

## 9. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO

Fueron realizados ensayos de compresión inconfiada no drenado para las muestras establecidas, tomando los resultados del software *HUMBOLDT MATERIAL TESTING* utilizado para la falla de cada una de las muestras, cuyos datos y los cálculos de esfuerzos se encuentran en el anexo No 1.

En las figuras 28 a la 32 así como en las tablas 19 a la 23 se presenta el resumen de estos resultados provenientes de las muestras tomadas en los suelos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, cuyos diámetros fueron de 1.50", 2.0" 1,5", 2.0", 2,5", 3,0" y 4.0"

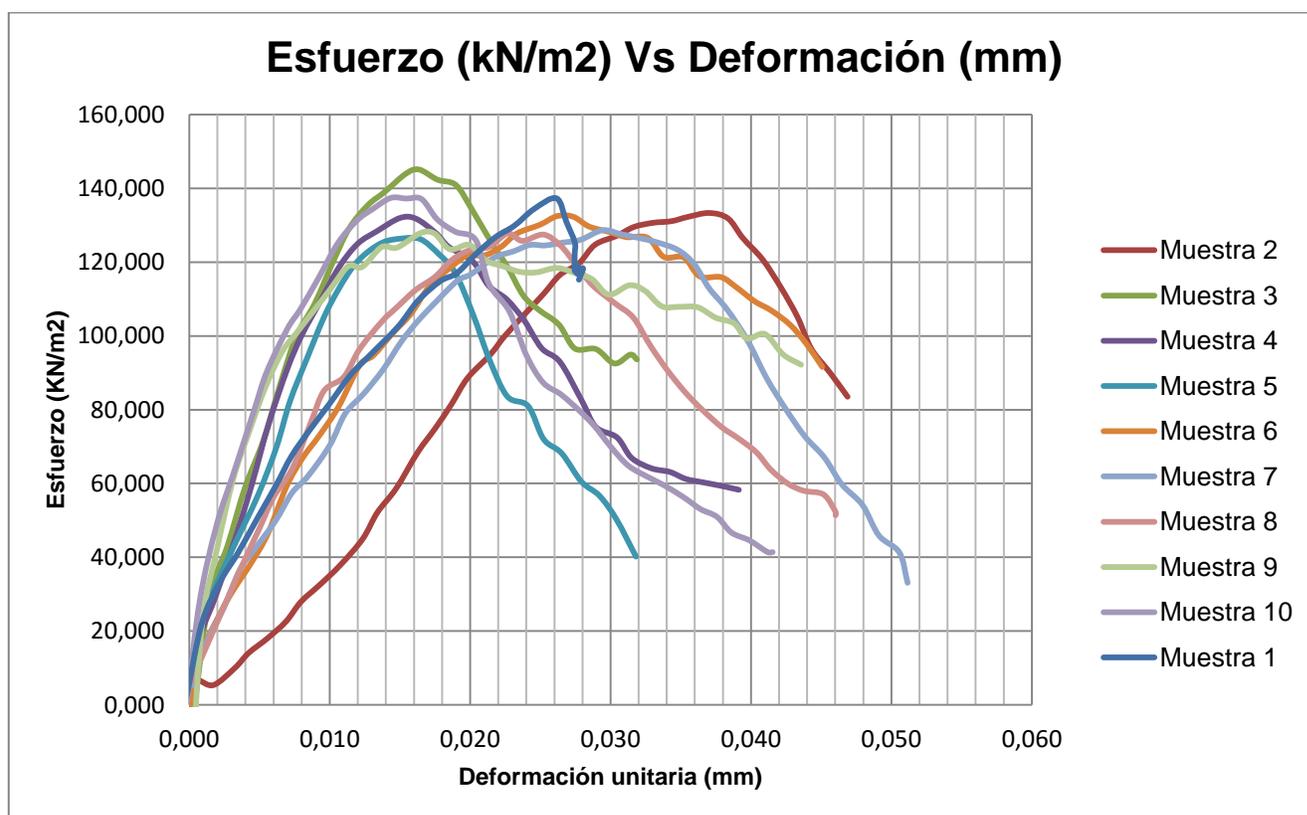
Con el fin de revisar otros comportamientos de las muestras señaladas, a continuación se encuentran las gráficas correspondientes a las siguientes variables:

- Esfuerzo vs. humedad
- Esfuerzo vs. % deformación en falla
- % humedad vs. % deformación en falla
- % humedad vs. Diámetro
- Esfuerzo vs. Diámetro
- Esfuerzo vs. Sensitividad
- C vs. SUV
- Esfuerzo vs. Módulo de Young
- % humedad vs. Módulo de Young
- En el anexo No 2 se detallan los resultados de Esfuerzo Vs Deformación para las muestras de suelo tomadas en el sector de Fontibón
- En el anexo No 3 se detalla los resultados del Limite Liquido, Limite Plástico, Índice Plástico e Índice Liquido.
- En el anexo No 4 se detallan los resultados de la veleta de campo SUV y su respectiva corrección por plasticidad, de igual forma las veletas de laboratorio.

**Tabla 19** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 1.5"

Muestra	Esfuerzo máx. (kN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (kN)	% Humedad natural
Muestra 1	137,30	2,6	0,15	84,56
Muestra 2	133,32	3,7	0,15	82,89
Muestra 3	145,09	1,6	0,15	70,67
Muestra 4	131,95	1,5	0,15	66,9
Muestra 5	126,41	1,5	0,14	68,61
Muestra 6	132,47	2,6	0,15	78,81
Muestra 7	128,64	2,9	0,15	72,53
Muestra 8	127,80	2,3	0,15	67,16
Muestra 9	127,87	1,6	0,14	88,38
Muestra 10	137,38	1,4	0,15	83,85

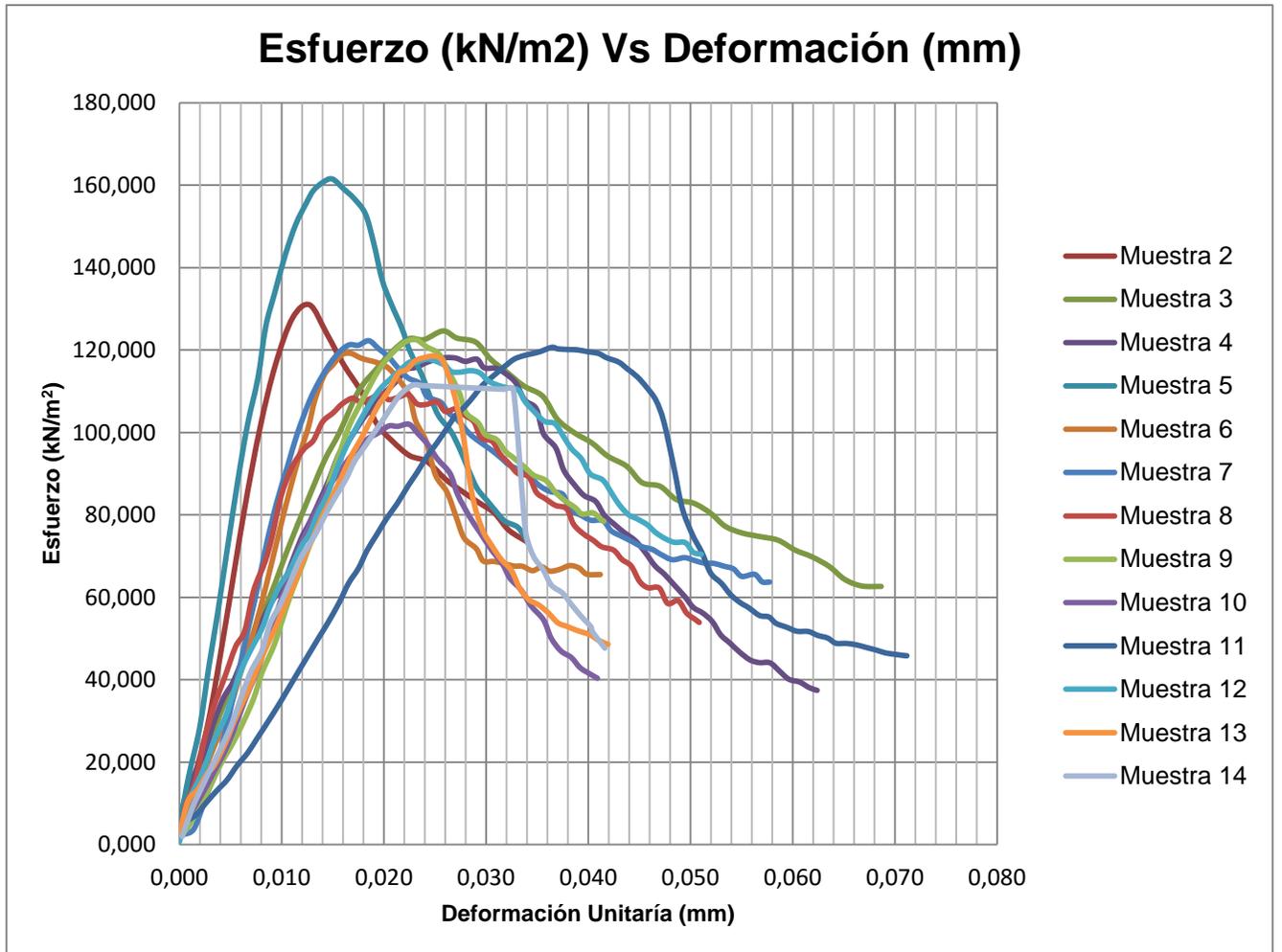
**Figura 28** Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 1.5"



**Tabla 20** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 2,0"

Muestra	Esfuerzo máx. (kN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (kN)	% Humedad natural
Muestra 2	130,96	1,3	0,29	69,45
Muestra 3	124,63	2,9	0,29	66,07
Muestra 4	118,15	2,6	0,27	74,4
Muestra 5	161,50	1,5	0,37	87,62
Muestra 6	119,19	1,7	0,27	90,12
Muestra 7	122,26	1,9	0,29	74,93
Muestra 8	109,56	2	0,25	79,1
Muestra 9	122,47	2,3	0,29	84,23
Muestra 10	102,00	2,2	0,23	89,75
Muestra 11	120,65	3,6	0,28	80,34
Muestra 12	117,81	2,4	0,28	84,62
Muestra 13	118,53	2,5	0,28	83,69
Muestra 14	111,49	2,3	0,26	82,64

Figura 29 Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 2"

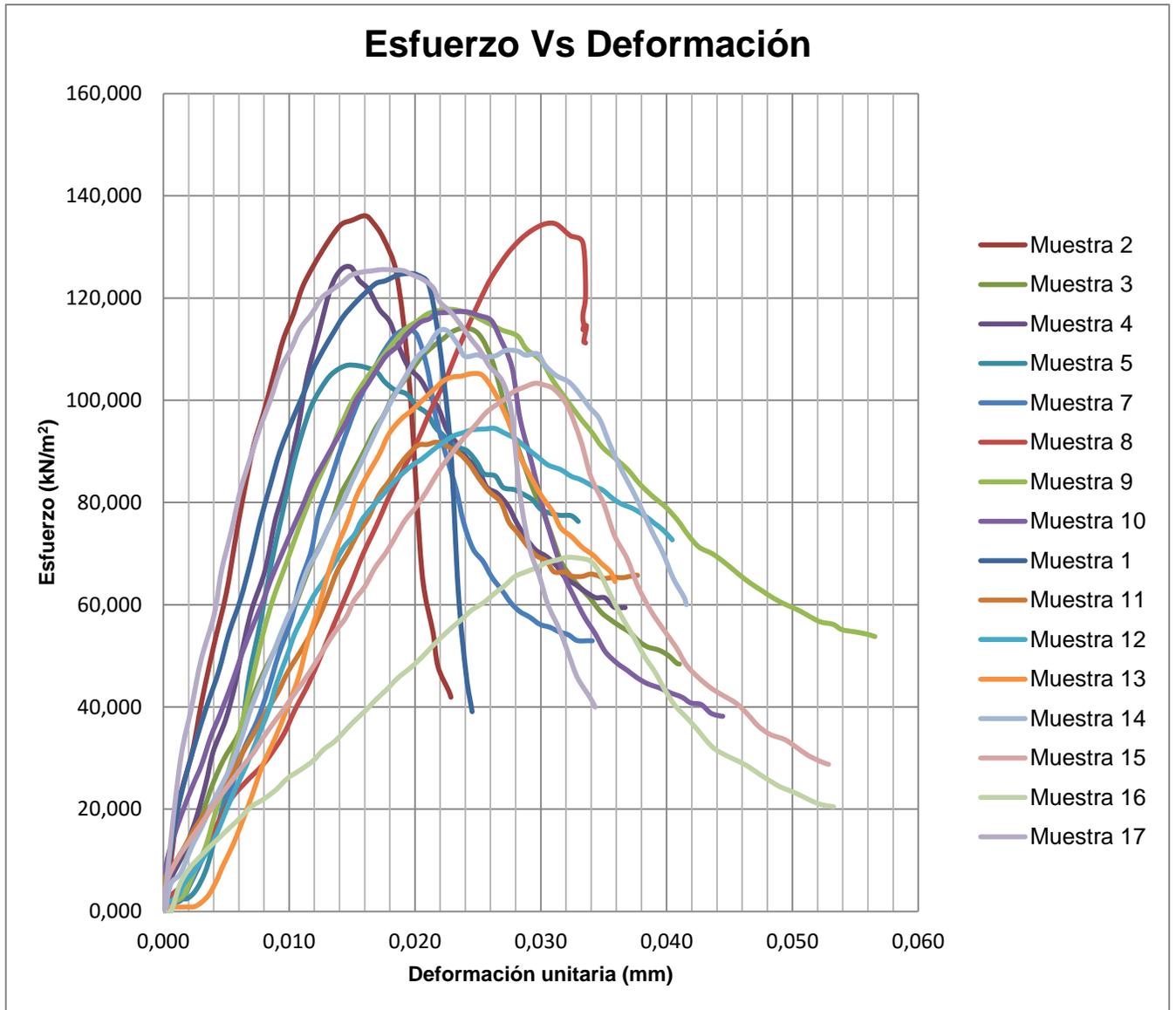


Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 21** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 2.5"

Muestra	Esfuerzo máx. (kN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (kN)	% Humedad natural
Muestra 1	124,80	2	0,15	84,56
Muestra 2	136,11	1,6	0,47	80,39
Muestra 3	114,05	2,4	0,4	82,01
Muestra 4	126,03	1,5	0,45	72,93
Muestra 5	106,86	1,5	0,35	72,99
Muestra 7	114,01	1,9	0,39	81,28
Muestra 8	134,54	3	0,47	85,99
Muestra 9	117,76	2,3	0,41	82,25
Muestra 10	117,36	2,3	0,4	69,99
Muestra 11	91,80	2,2	0,32	71,05
Muestra 12	94,49	2,6	0,33	73,8
Muestra 13	105,21	2,5	0,37	85,71
Muestra 14	113,64	2,3	0,4	83,31
Muestra 15	103,31	3	0,37	88,2
Muestra 16	69,27	2,6	0,24	70,54
Muestra 17	125,58	1,7	0,43	79,06

**Figura 30** Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 2.5".

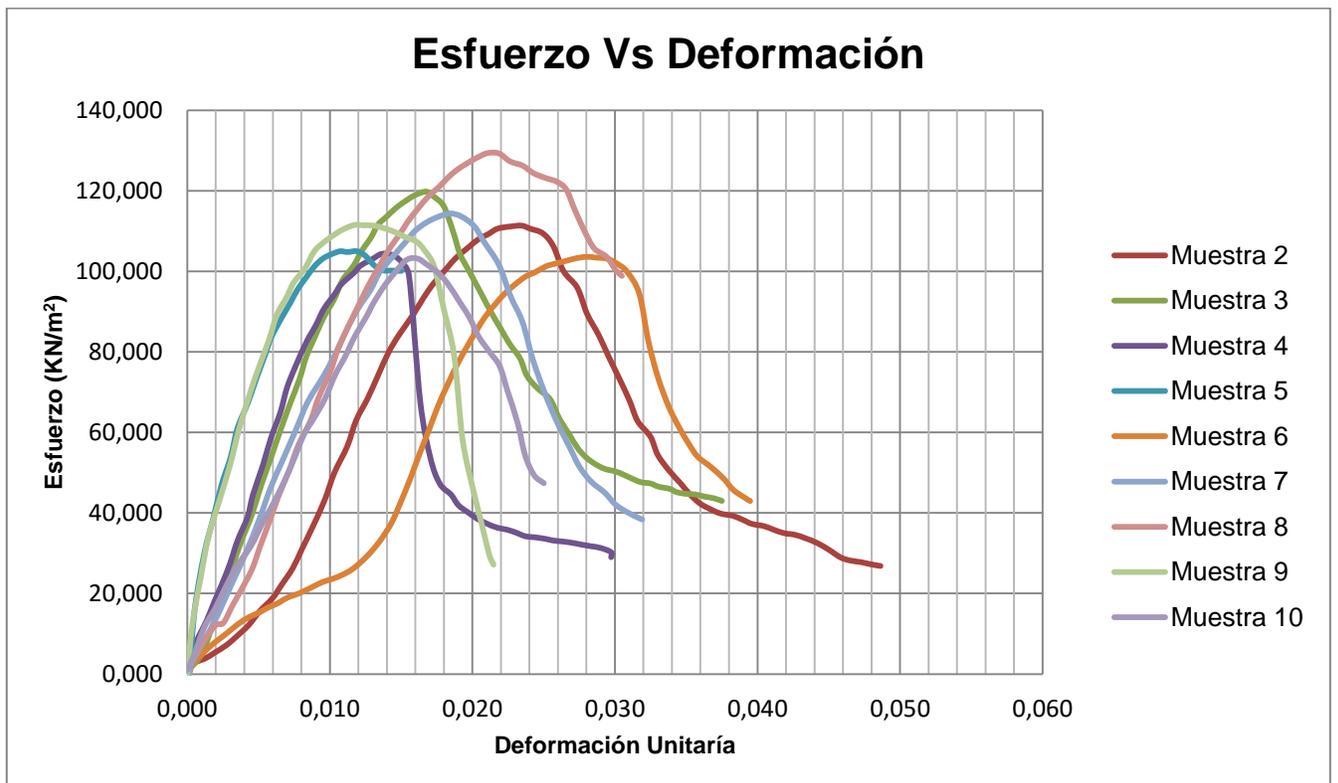


**Fuente:** Elaboración Propia.

**Tabla 22** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 3"

Muestra	Esfuerzo máx. (KN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (KN)	Humedad natural
Muestra 2	111,35	2,3	0,6	82,26
Muestra 3	119,80	1,7	0,66	83,67
Muestra 4	104,32	1,4	0,77	83,87
Muestra 5	105,01	1,1	0,55	81,97
Muestra 6	103,61	2,8	0,72	83,74
Muestra 7	114,38	1,8	0,73	73,15
Muestra 8	129,38	2,1	0,66	80,03
Muestra 9	111,51	1,2	0,45	86,2
Muestra 10	103,17	1,6	0,45	83,18

**Figura 31** Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 3".

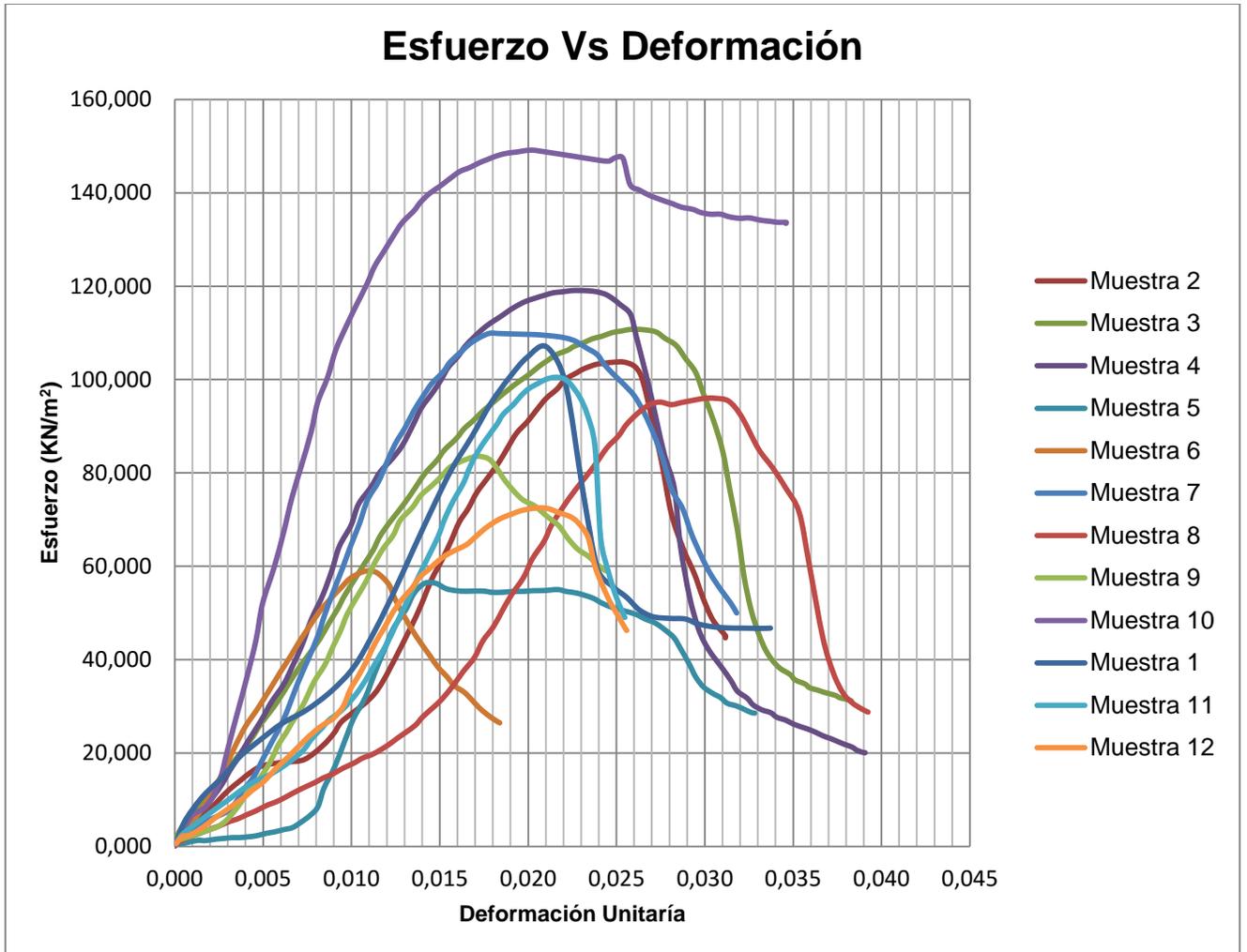


**Fuente:** Elaboración Propia.

**Tabla 23** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 4"

Muestra	Esfuerzo máx. (KN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (KN)	Humedad natural
Muestra 1	107,04	2,1	0,93	84,72
Muestra 2	103,74	2,5	0,91	88,15
Muestra 3	110,76	2,6	1,01	85,12
Muestra 4	119,07	2,3	1,07	78,39
Muestra 5	56,38	1,5	0,5	75,39
Muestra 6	59,01	1,1	0,52	75,25
Muestra 7	109,92	1,8	0,97	85,52
Muestra 8	95,98	3	0,87	82,52
Muestra 9	83,53	1,7	0,71	83,28
Muestra 10	149,08	2	1,31	79,24
Muestra 11	100,48	2,1	0,9	87,74
Muestra 12	72,53	2,1	0,65	84,61

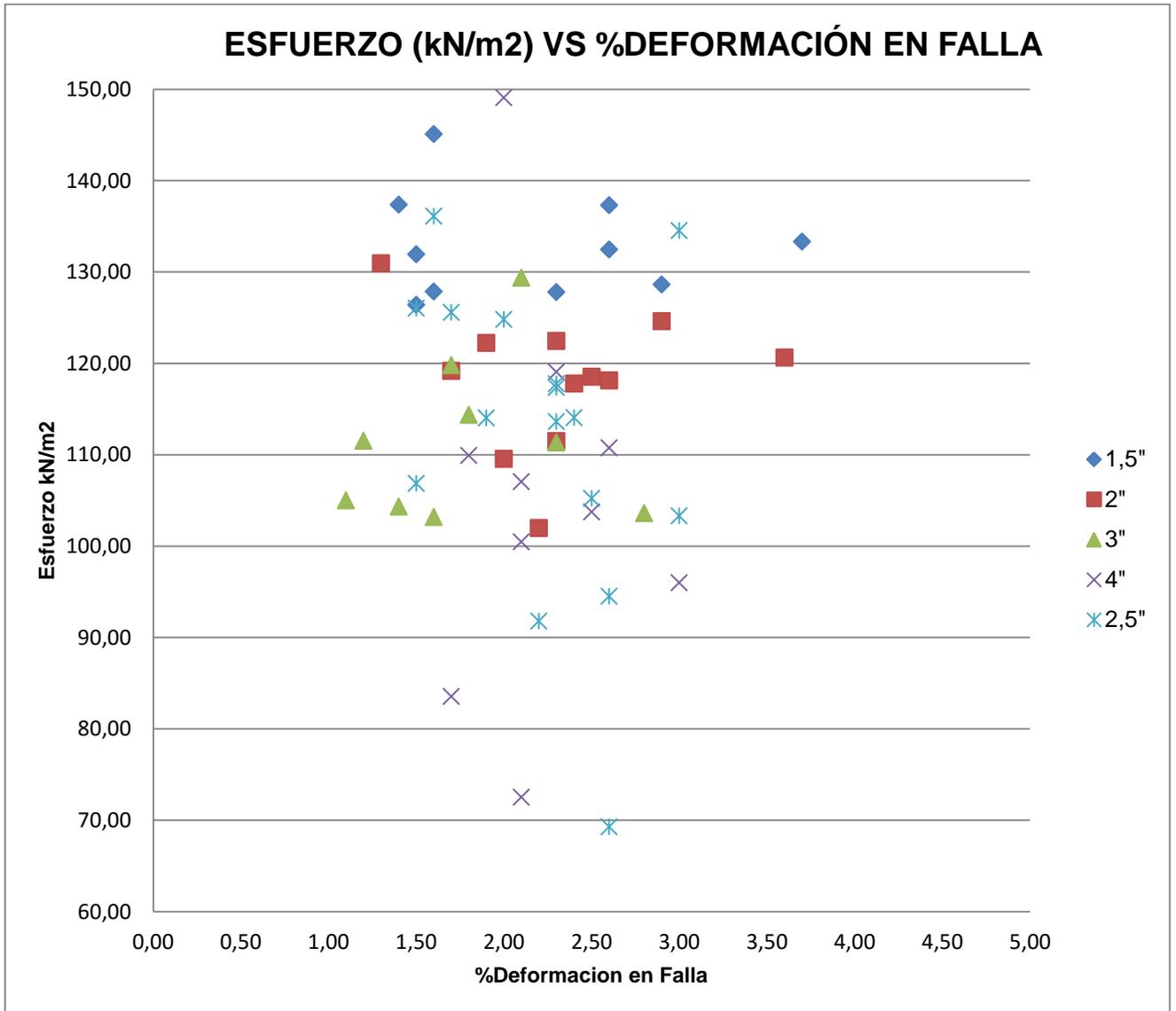
**Figura 32** Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 4”.



**Fuente:** Elaboración Propia.



Figura 34 Grafica Esfuerzo Vs Deformación en falla



**Figura 35** Grafica % Humedad vs % Deformación en la falla

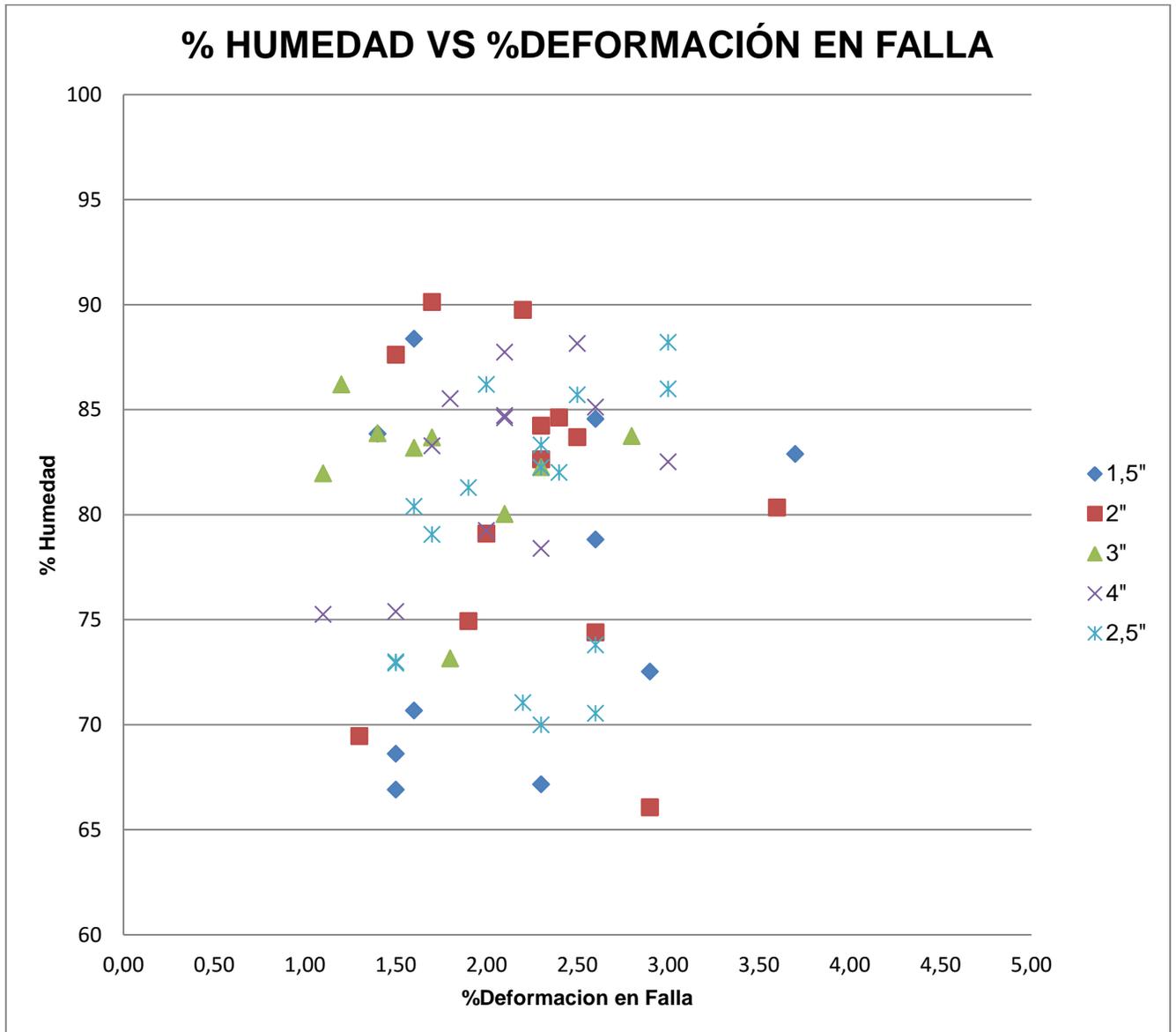


Figura 36 Grafica % Humedad Vs Diámetros

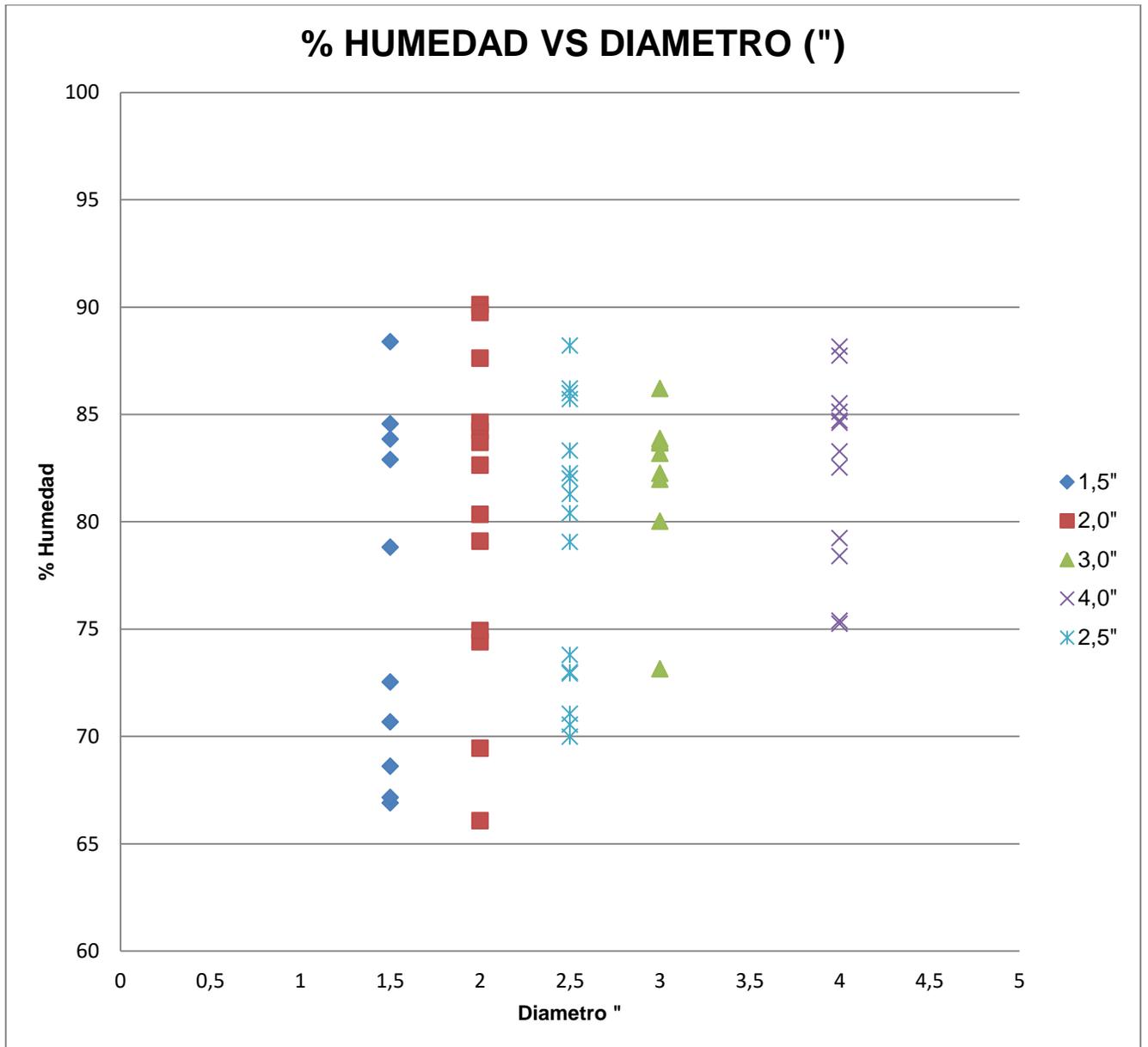
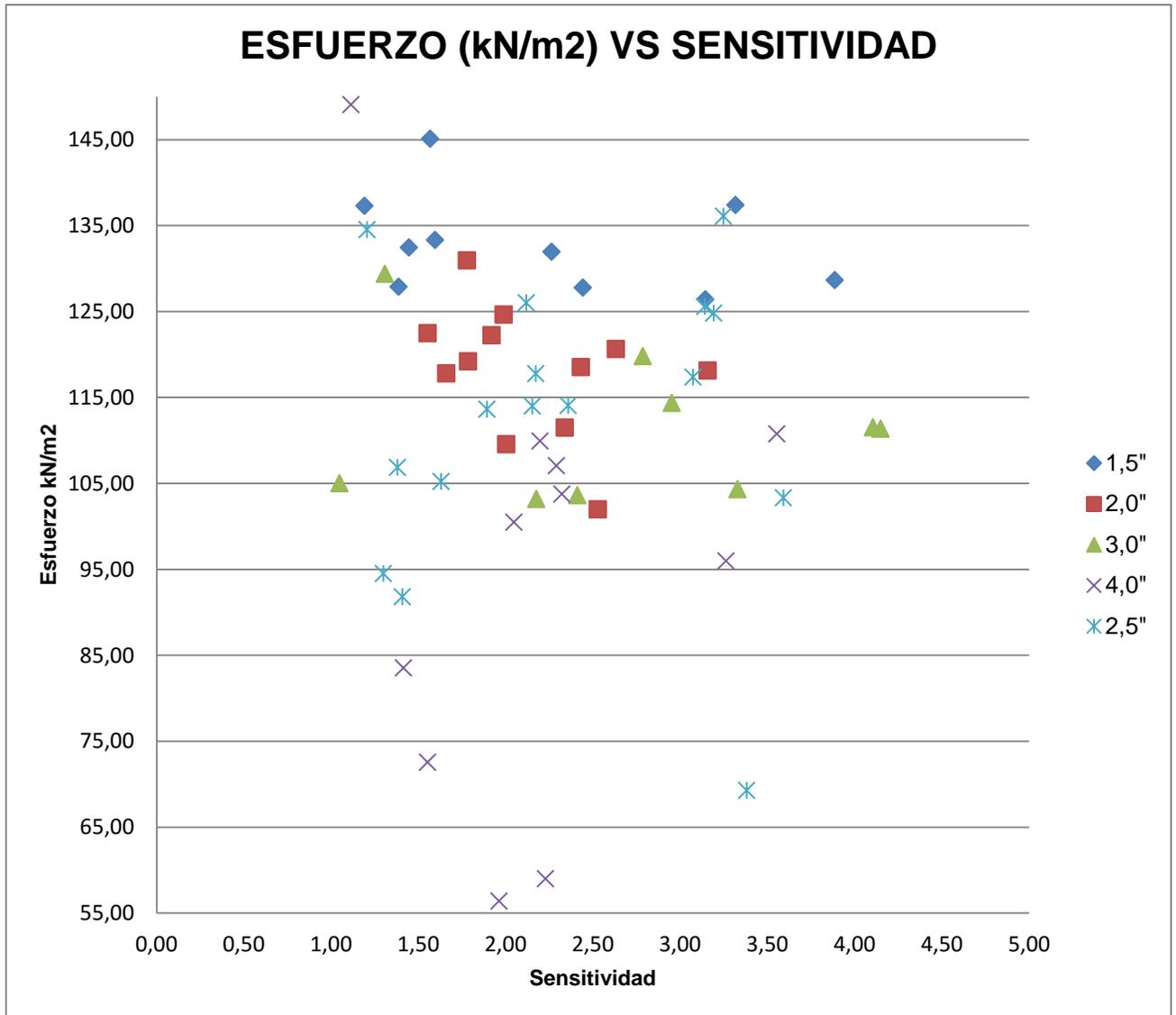


Figura 37 Grafica Esfuerzo Vs Sensitividad



**Figura 38** Grafica Resistencia al corte C Vs Resistencia al corte SUV

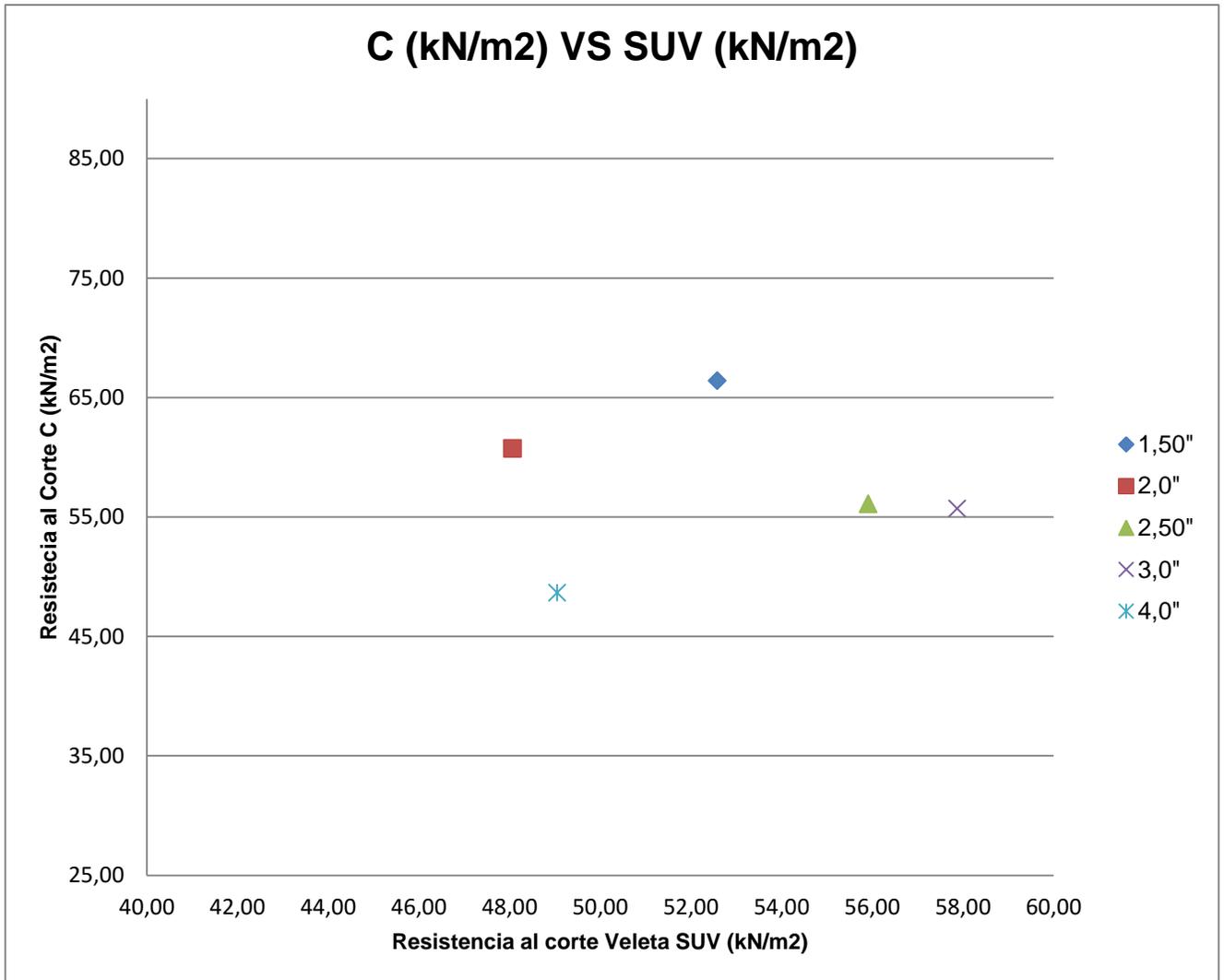


Figura 39 Grafica Esfuerzo Vs Modulo de Young

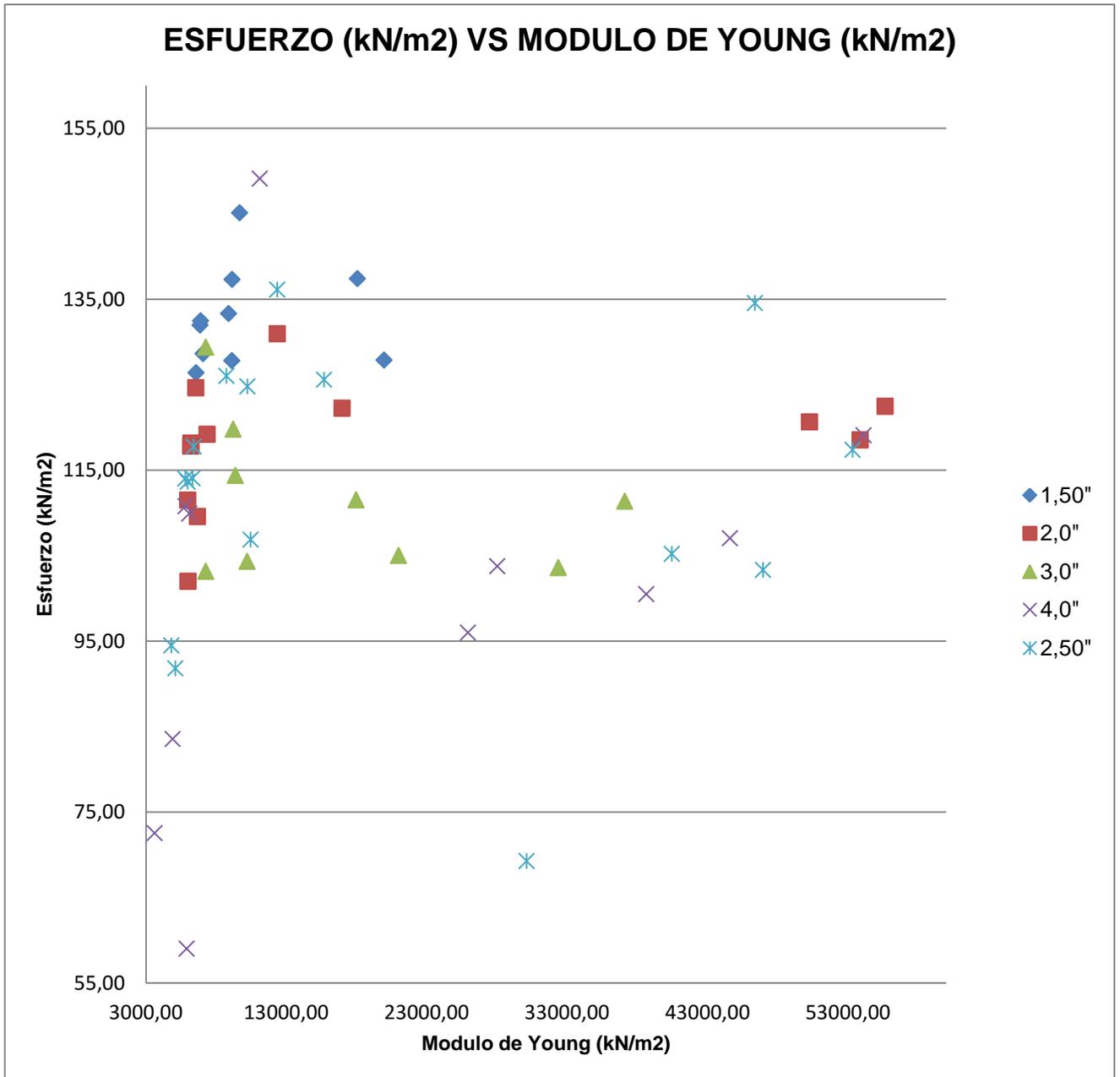
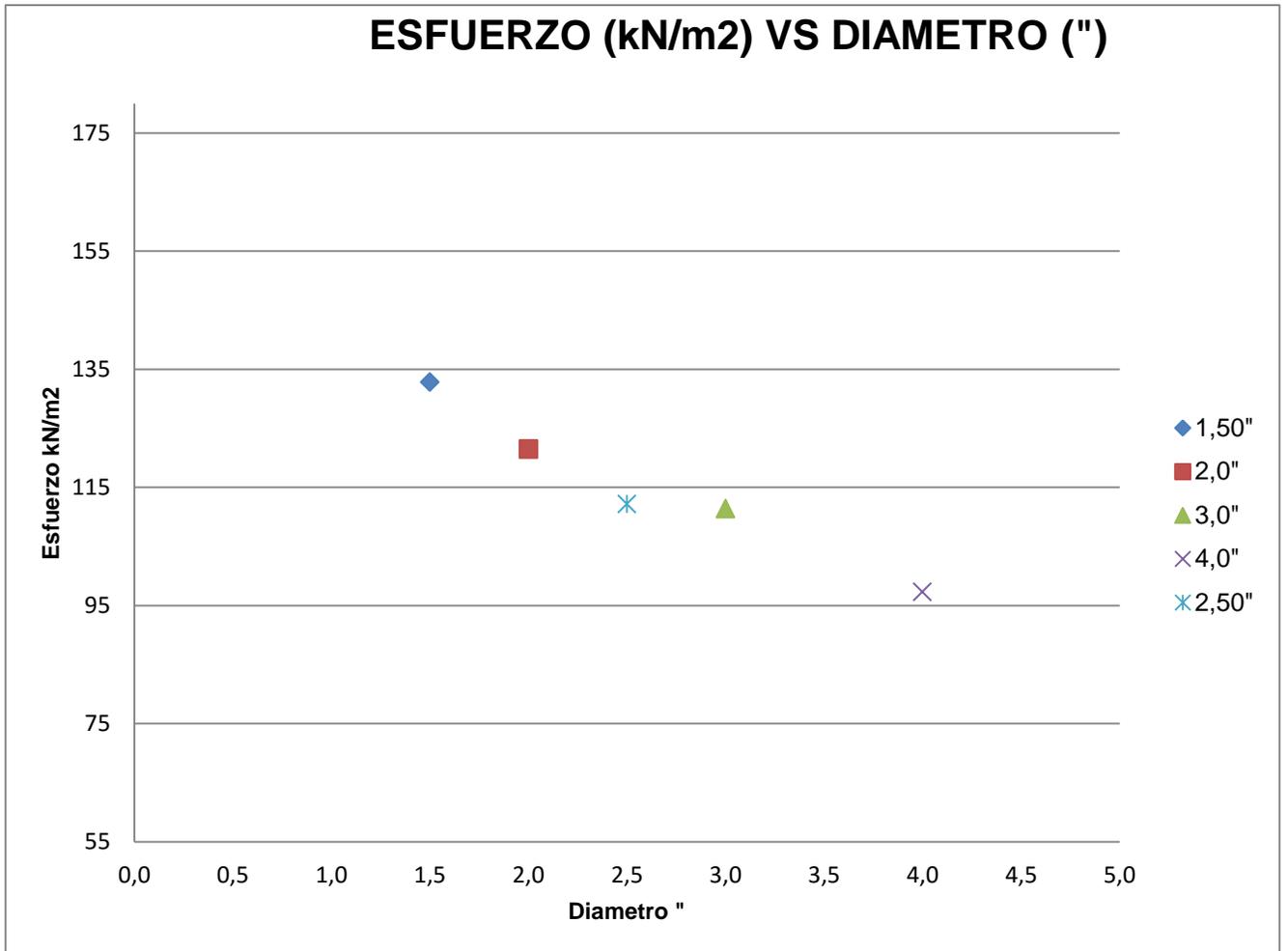




Figura 41 Grafica Esfuerzo Vs Diámetro

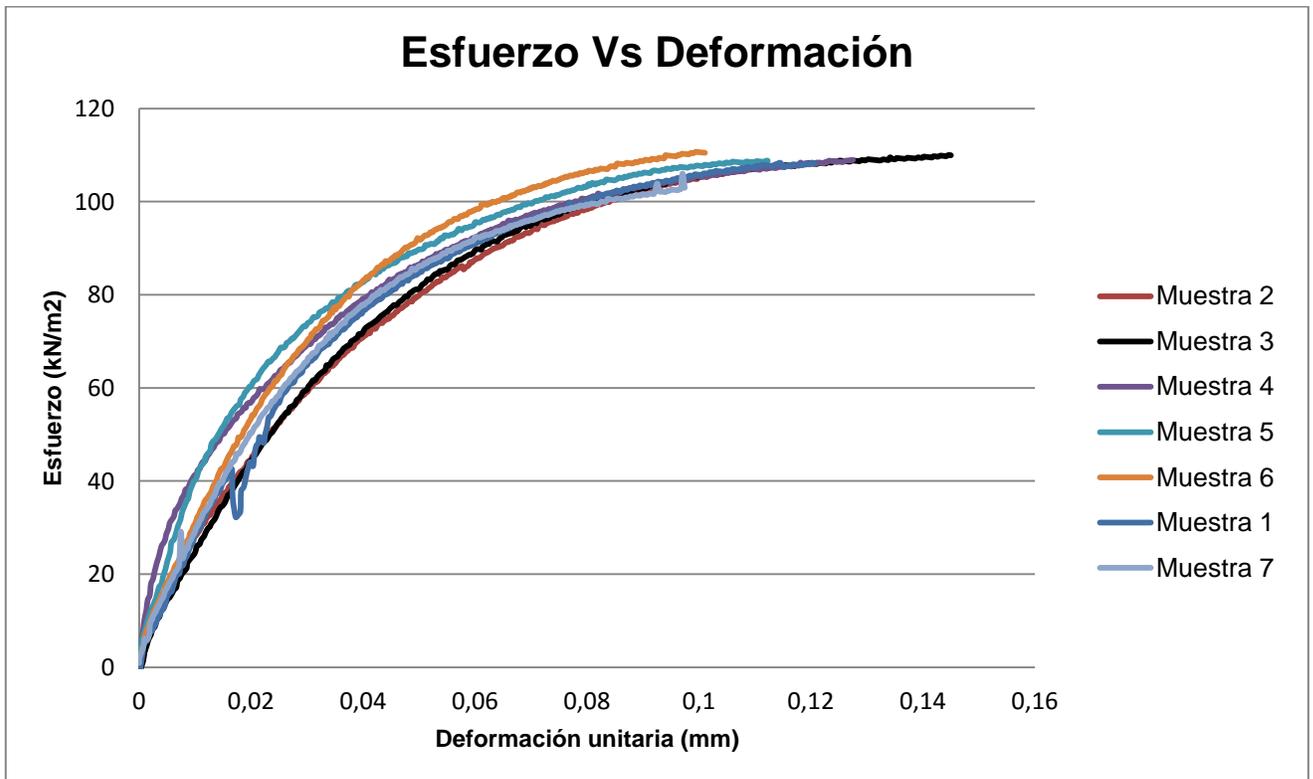


En las siguientes tablas se muestran los resultados de esfuerzo Vs deformación, obtenidos de las muestras en los diferentes diámetros (1,50", 2,0", 2,50", 3,0" y 4,0") tomadas en los suelos del sector de Fontibón

**Tabla 24** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 1.5"

Muestra	Esfuerzo máx. (kN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (kN)	% Humedad natural
Muestra 1	108,38	12,00	0,14	30,66
Muestra 2	107,45	11,00	0,14	31,71
Muestra 3	110,02	14,00	0,14	32,83
Muestra 4	108,95	13,00	0,14	29,15
Muestra 5	108,82	11,00	0,14	29,17
Muestra 6	110,71	10,00	0,13	31,78
Muestra 7	106,06	10,00	0,13	30,65

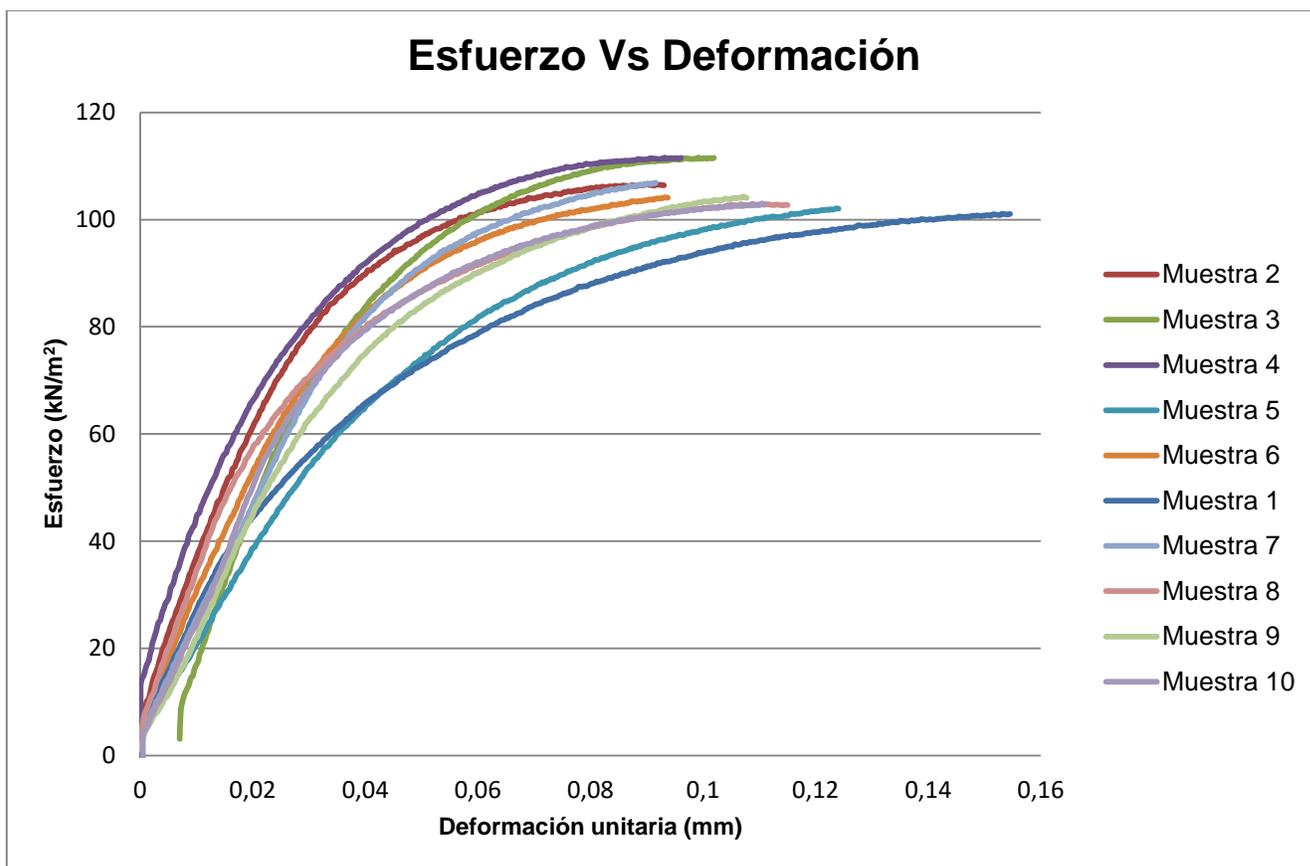
**Figura 42** Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 1,50".



**Tabla 25** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 2.0"

Muestra	Esfuerzo máx. (kN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (kN)	% Humedad natural
Muestra 1	101,09	15,00	0,28	31,41
Muestra 2	106,59	9,00	0,27	33,40
Muestra 3	104,33	10,00	0,29	34,29
Muestra 4	105,71	10,00	0,28	31,51
Muestra 5	102,08	12,00	0,29	31,08
Muestra 6	104,17	9,00	0,28	31,08
Muestra 7	106,90	9,00	0,28	40,80
Muestra 8	102,90	11,00	0,27	37,33
Muestra 9	111,59	11,00	0,29	31,57
Muestra 10	103,01	11,00	0,26	39,23

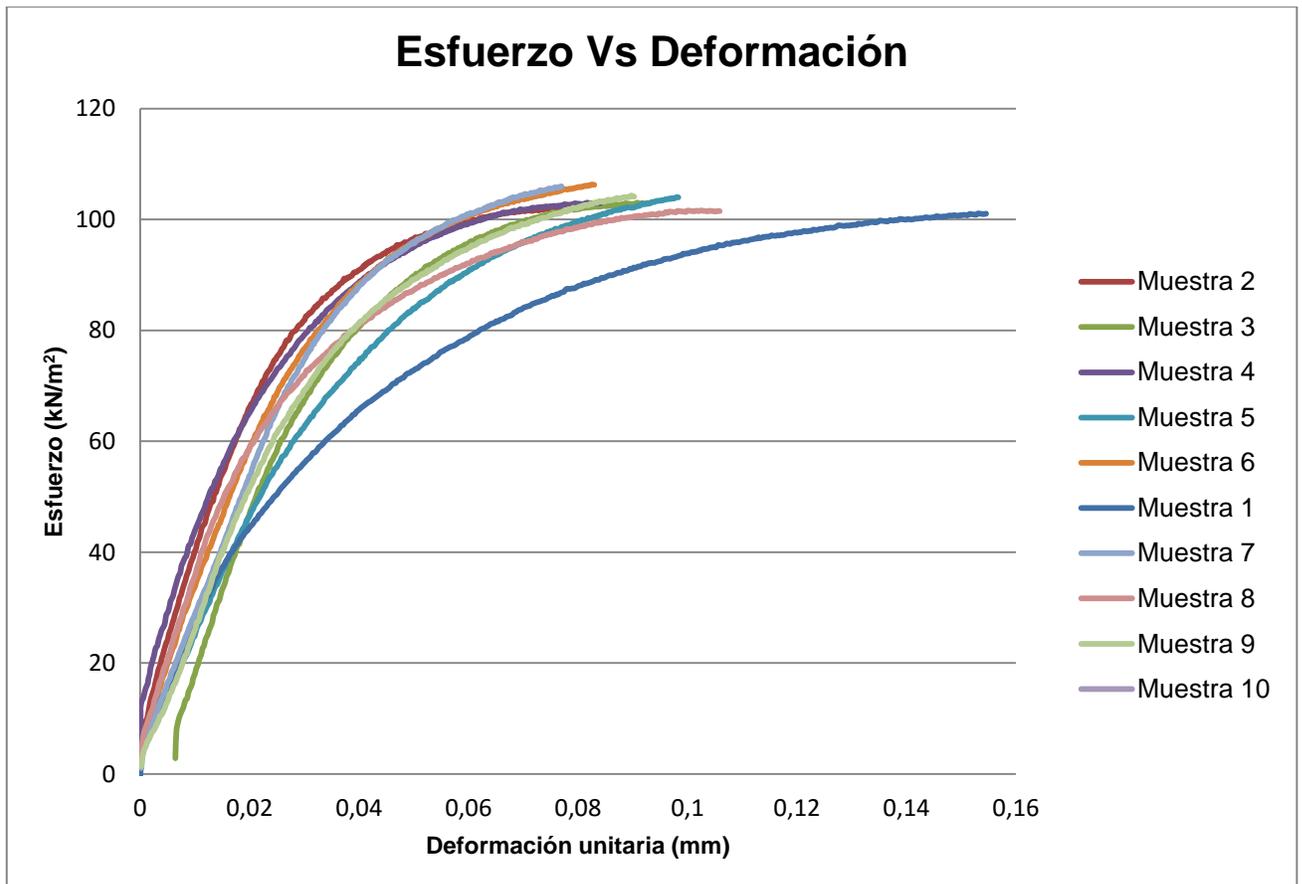
**Figura 43** Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 2,0".



**Tabla 26** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 2.50"

Muestra	Esfuerzo máx. (kN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (kN)	% Humedad natural
Muestra 1	101,09	15,00	0,28	31,41
Muestra 2	101,96	8,00	0,36	35,23
Muestra 3	104,34	9,00	0,37	31,18
Muestra 4	102,45	9,00	0,37	40,40
Muestra 5	104,03	10,00	0,37	38,95
Muestra 6	106,31	8,00	0,38	31,08
Muestra 7	105,99	8,00	0,38	29,73
Muestra 8	101,62	10,00	0,38	35,98
Muestra 9	103,05	9,00	0,36	37,35

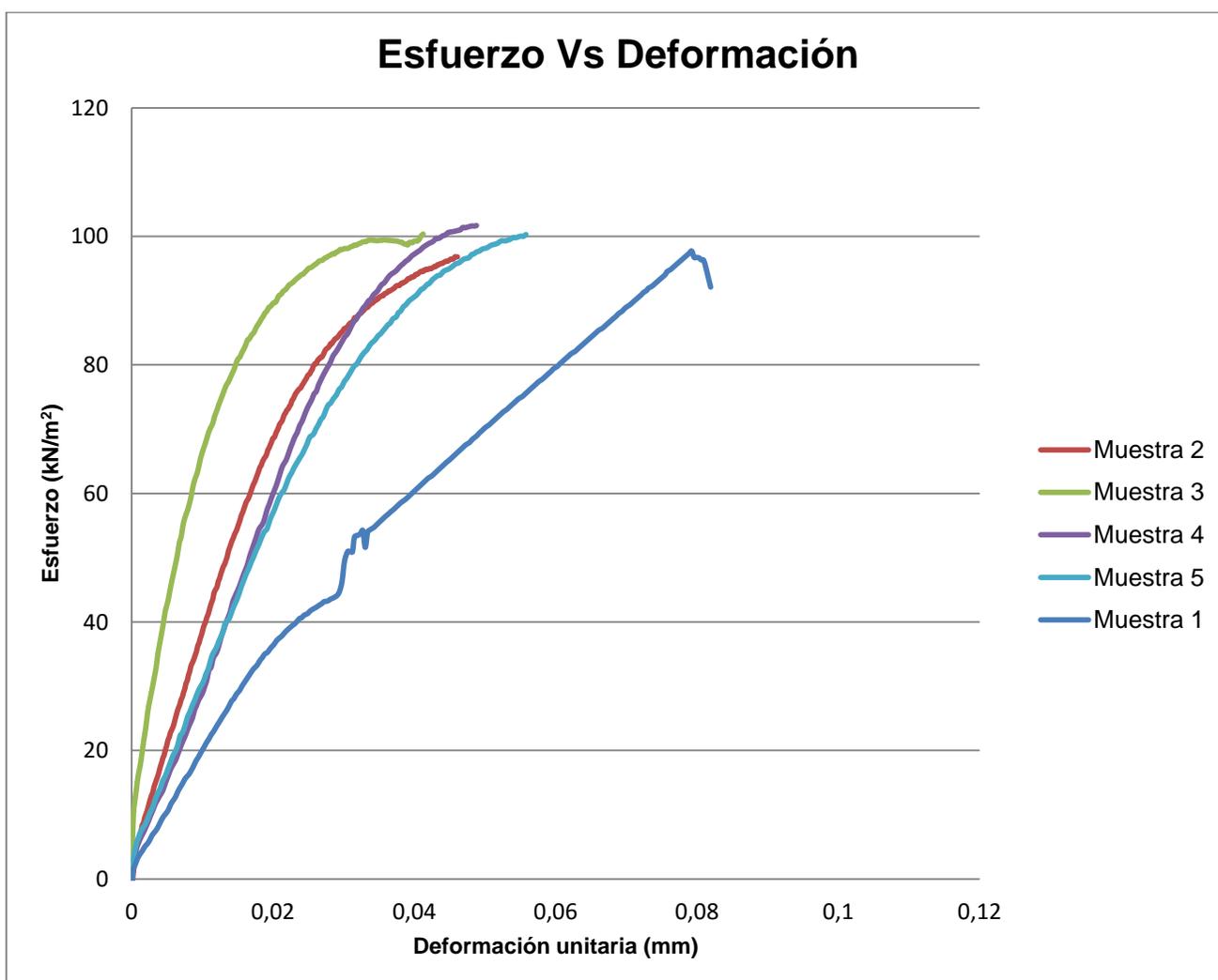
**Figura 44** Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 2,50"



**Tabla 27** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 3.0"

Muestra	Esfuerzo máx. (kN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (kN)	% Humedad natural
Muestra 1	97,72	7,90	0,57	40,49
Muestra 2	96,84	4,50	1,71	30,00
Muestra 3	100,37	4,10	0,53	28,76
Muestra 4	101,69	4,80	0,55	35,49
Muestra 5	100,29	5,50	1,20	28,07

**Figura 45** Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 3,0".



**Tabla 28** Valores máximos de esfuerzo para muestras de 4.0"

Muestra	Esfuerzo máx. (kN/m <sup>2</sup> )	% Deformación en falla	Q Máxima (kN)	% Humedad natural
Muestra 1	90,47	5,00	0,85	31,98
Muestra 2	95,69	4,00	0,90	43,37
Muestra 3	96,31	4,00	0,88	29,64
Muestra 4	96,07	6,00	0,89	29,80
Muestra 5	106,54	7,00	1,03	33,73
Muestra 6	79,45	5,00	0,74	48,33
Muestra 7	91,40	6,00	0,85	39,61
Muestra 8	86,79	3,00	0,81	32,15
Muestra 9	91,45	6,00	0,87	29,88

Figura 46 Grafica esfuerzo vs deformación para diámetro 4,0".

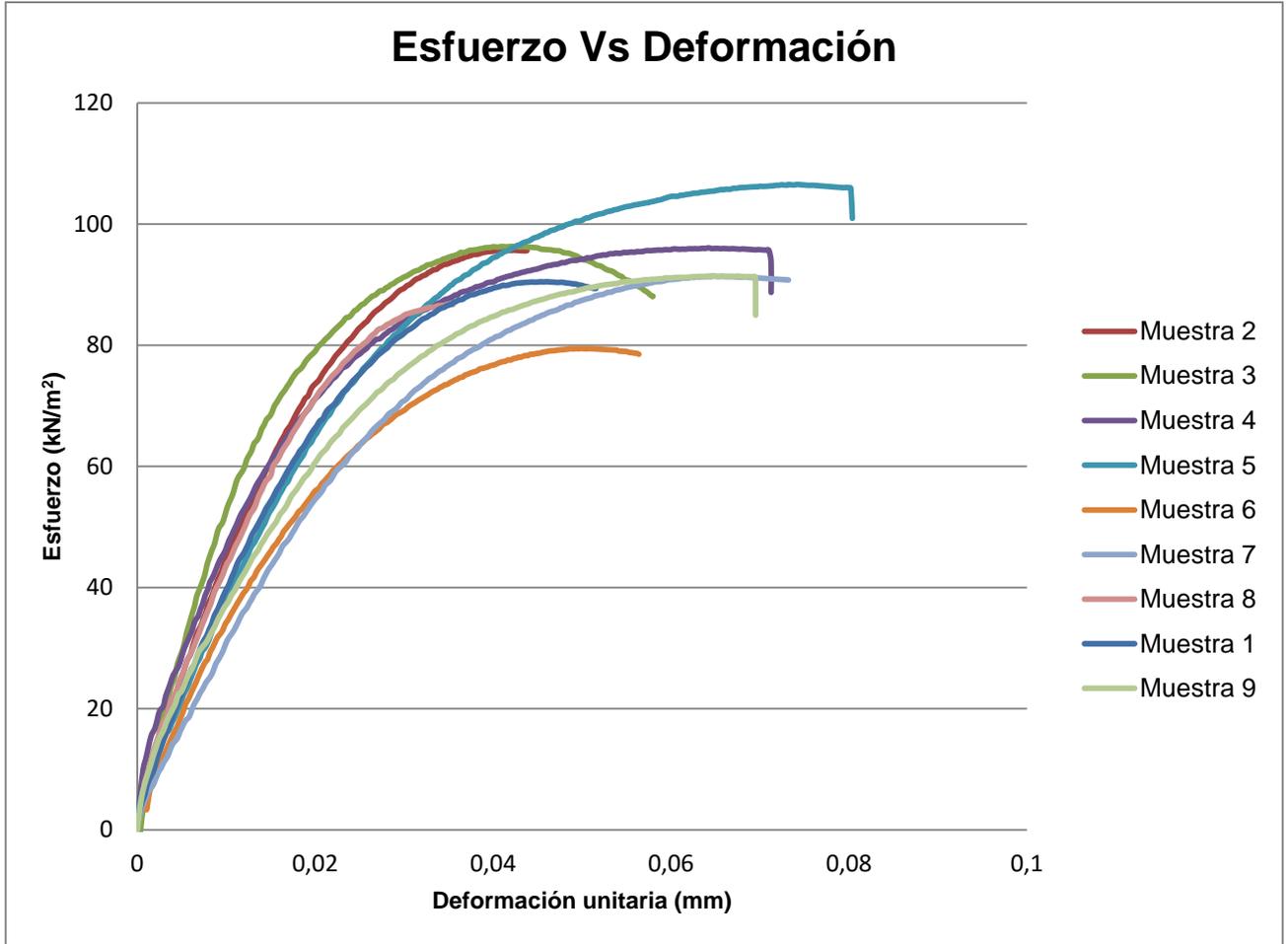


Figura 47 Grafica esfuerzo Vs % Humedad

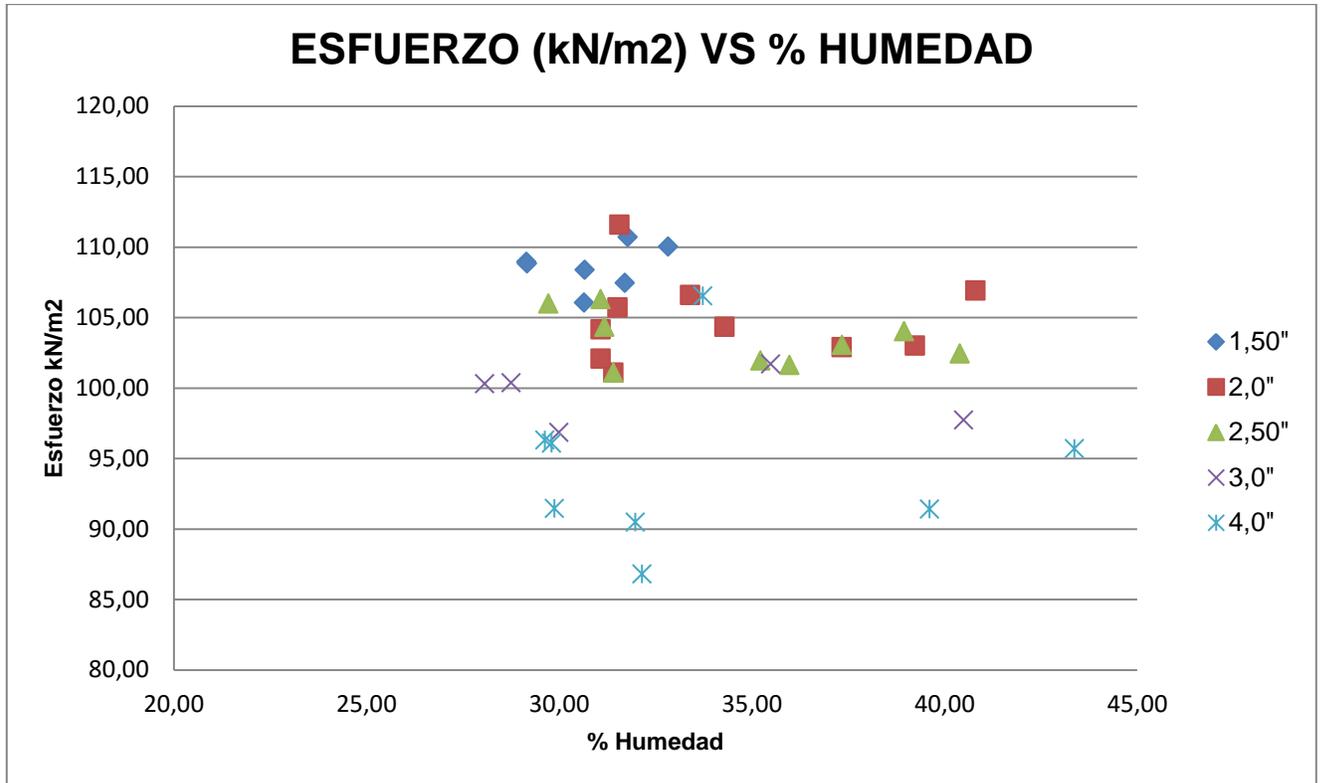
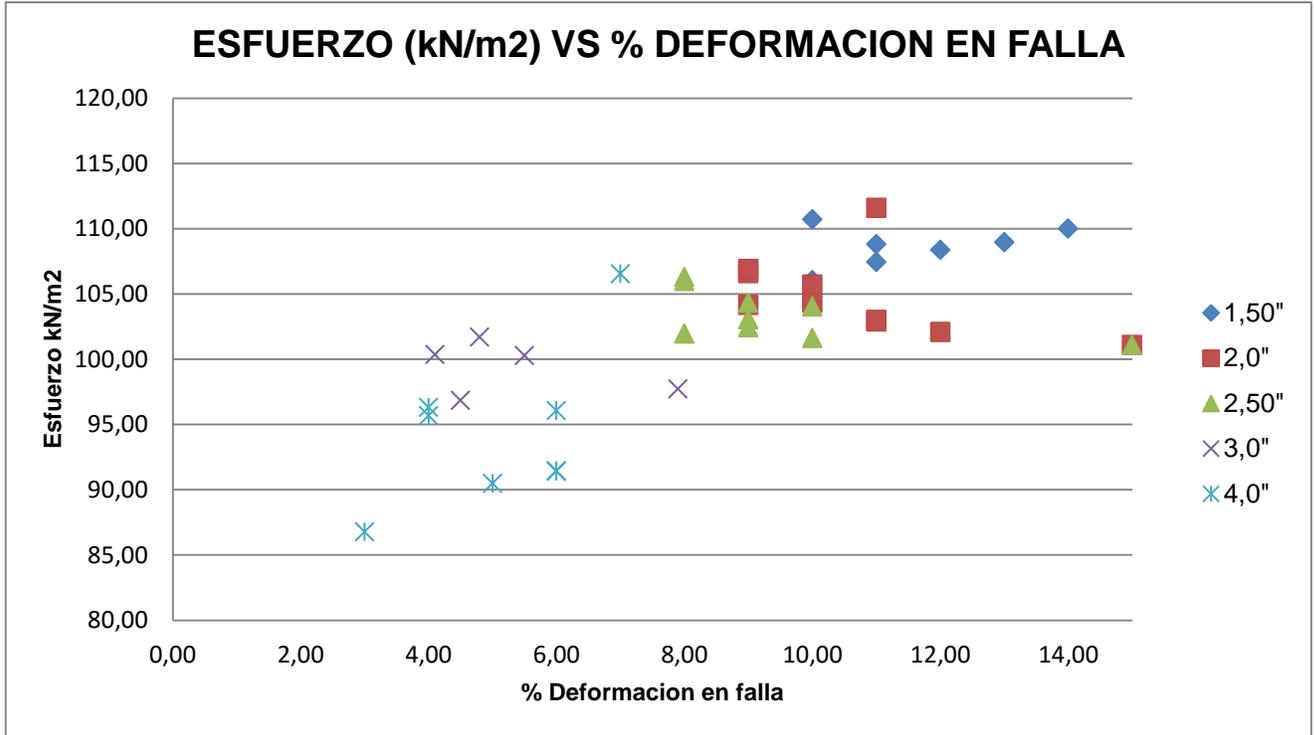


Figura 48 Grafica esfuerzo Vs % deformación en falla



## 10.COMPARACION Y ANALISIS DE RESULTADOS:

En las figuras 28, 29, 30, 31 y 32 se presenta el resumen de los resultados obtenidos provenientes de las muestras tomadas en los suelos de la ECI, en donde se evidencia que a medida que el diámetro aumenta, hay una disminución en el esfuerzo.

En cuanto a las gráficas de Esfuerzo vs. Humedad se puede analizar que el esfuerzo presenta una disminución a medida que aumentan los diámetros y respecto a la humedad, esta se mantuvo constante entre 66% a 90% en los diferentes diámetros establecidos. En cuanto al % de deformación en Falla Vs Esfuerzo, se pudo observar una tendencia a la baja a medida que el diámetro aumentaba.

De igual forma en el grafico Humedad Vs % Deformación en falla, no se evidencia una tendencia, pues estas presentan comportamientos muy variables dentro de un rango establecido. En cuanto a los resultados obtenidos en la gráfica de Esfuerzo Vs Sensitividad, (Definiendo esta propiedad como la menor resistencia a la compresión simple, cuando los suelos son probados después de ser remoldeados sin ningún cambio en el contenido de humedad<sup>3</sup>) se evidencia un comportamiento lineal, puesto que a mayor diámetro menor esfuerzo y la sensitividad se mantienen dentro de un rango el cual es variable en los diferentes diámetros.

En la figura No 38 se encuentra Resistencia al corte C Vs Resistencia al corte SUV (ensayo con veleta de campo), en donde se evidencia que los resultados obtenidos mediante SUV son variables dependiendo de los diámetros. Adicionalmente se observa que los resultados obtenidos entre las dos técnicas son muy similares en cuanto a resistencia, presentando una variación mínima.

En la figura 41 donde se grafica Esfuerzo Vs Diámetro, se puede observar un comportamiento inverso debido a que a mayor diámetro menor es el esfuerzo. De igual forma se observó un comportamiento similar en los suelos de la localidad de Fontibón en las figuras 47 y 48, esfuerzo Vs % humedad y esfuerzo Vs % deformación en falla.

---

<sup>3</sup> <http://ingenieriaciviltips.blogspot.com.co/2011/05/sensitividad-suelos-arcillosos.html>

A continuación se detalla la comparación de los resultados obtenidos entre las muestras tomadas tanto en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la localidad de Fontibón. Esta comparación se realiza con el fin de evidenciar las variaciones del esfuerzo según los diferentes diámetros en los 2 sectores estudiados.

**Figura 49** Esfuerzo Vs Muestras

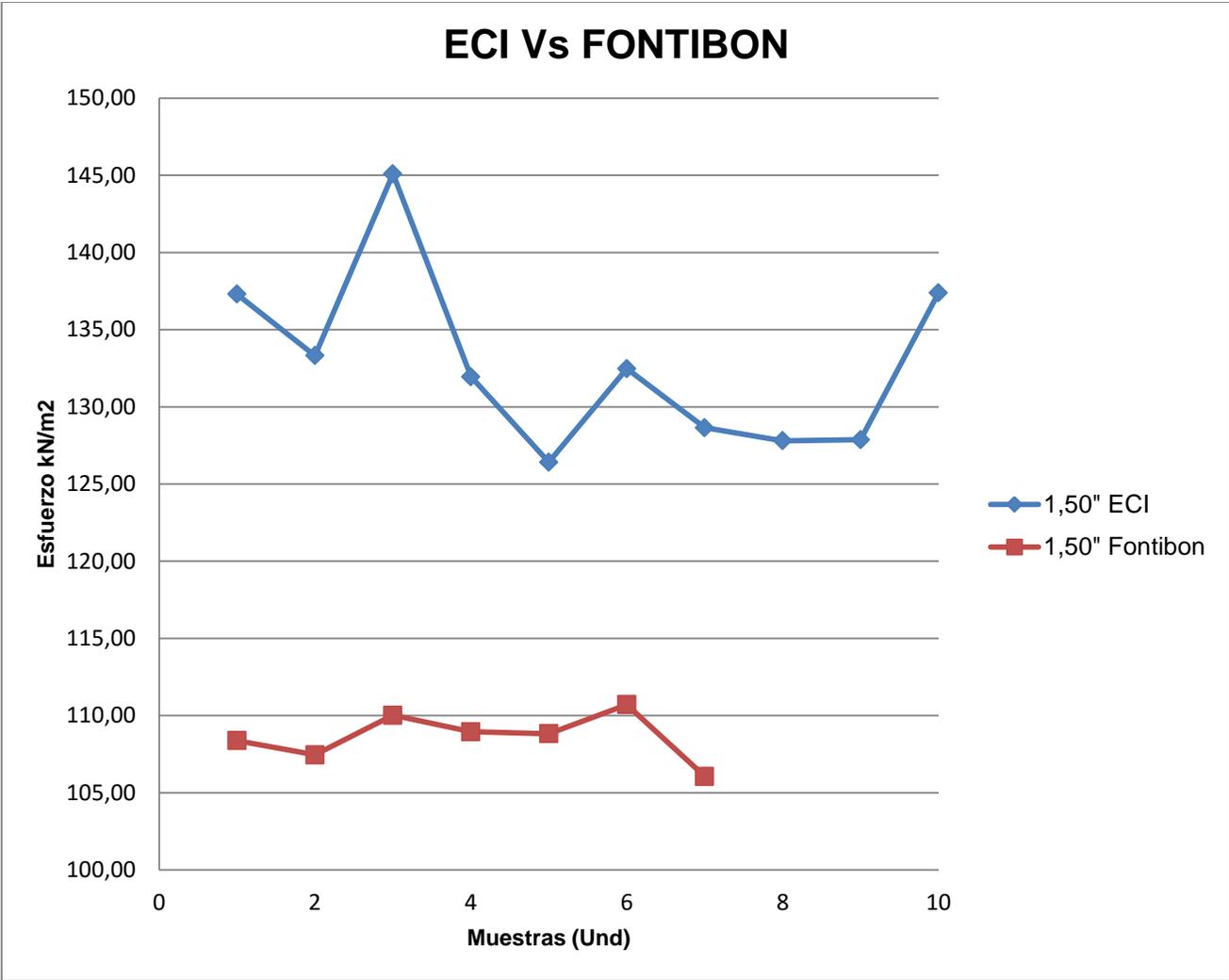


Figura 50 Esfuerzo Vs Muestras

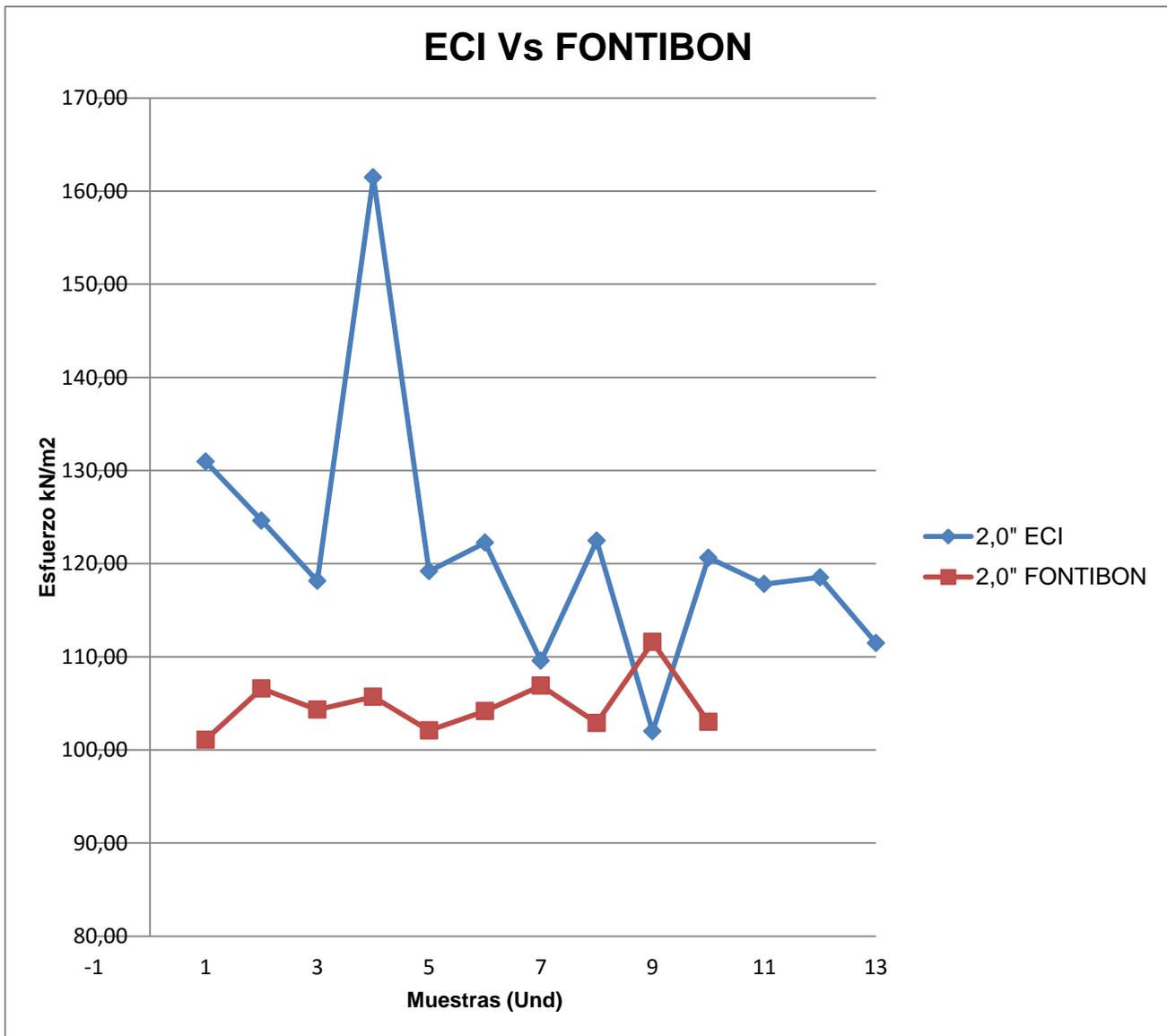


Figura 51 Esfuerzo Vs Muestras

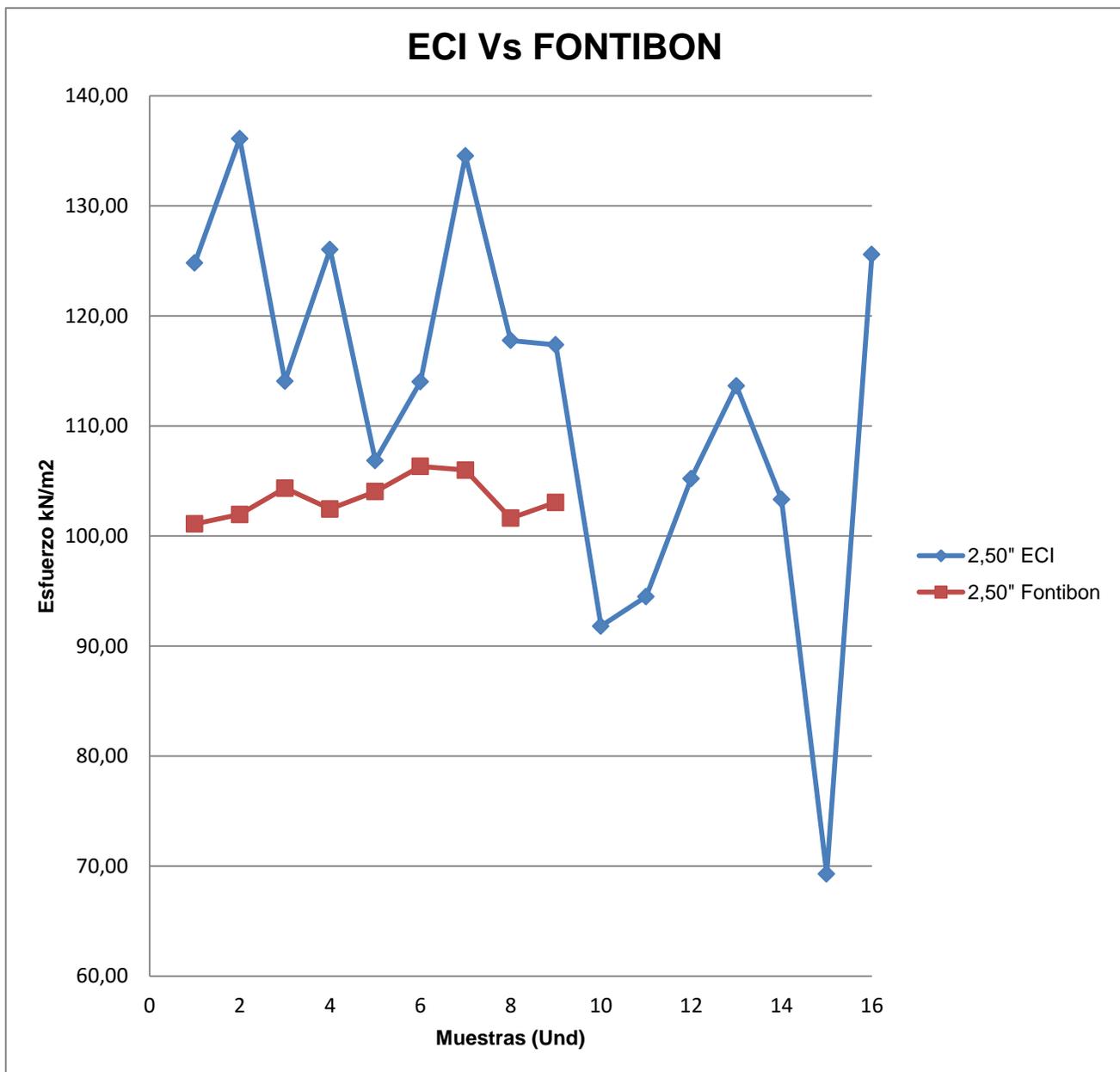


Figura 52 Esfuerzo Vs Muestras

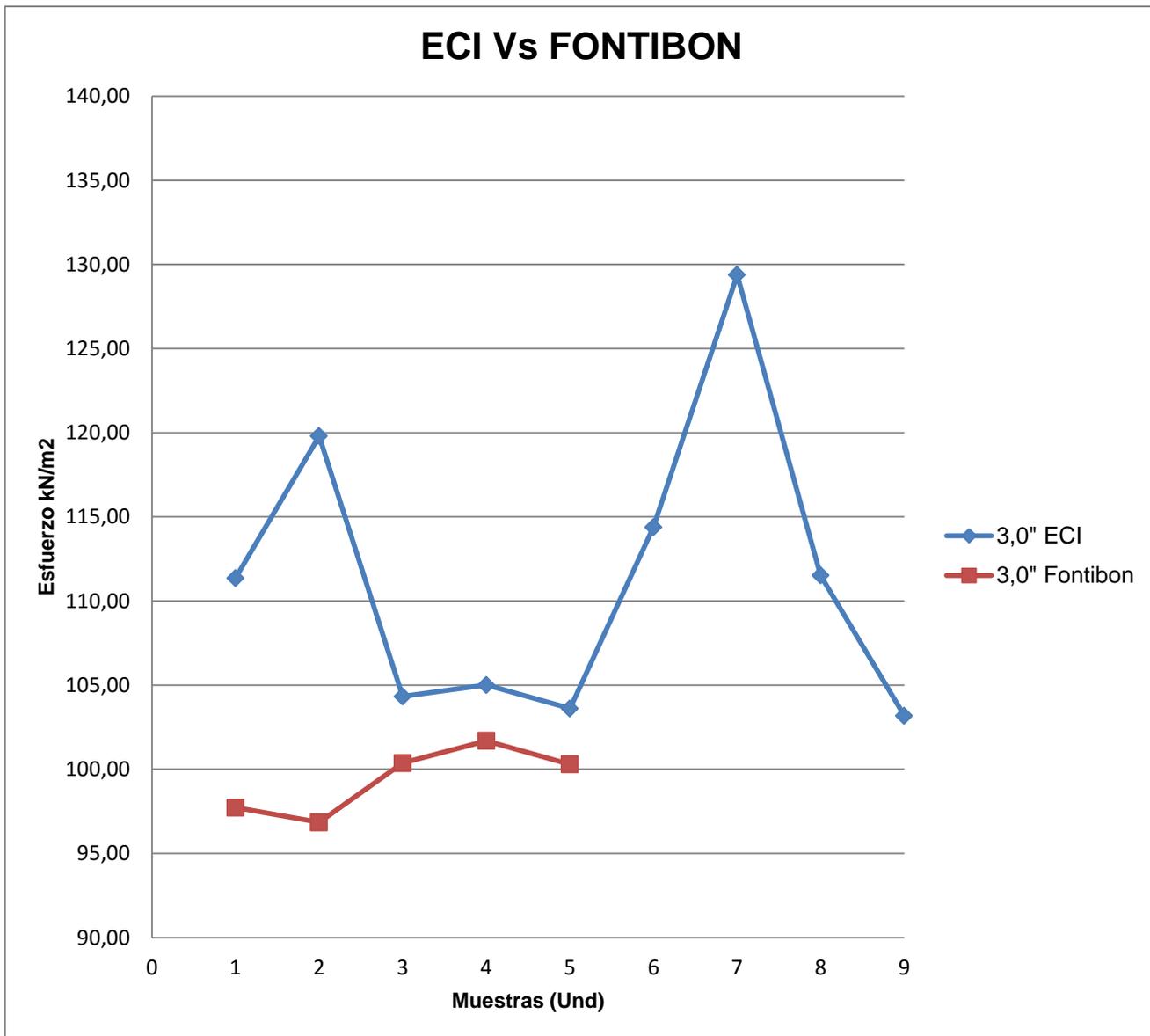
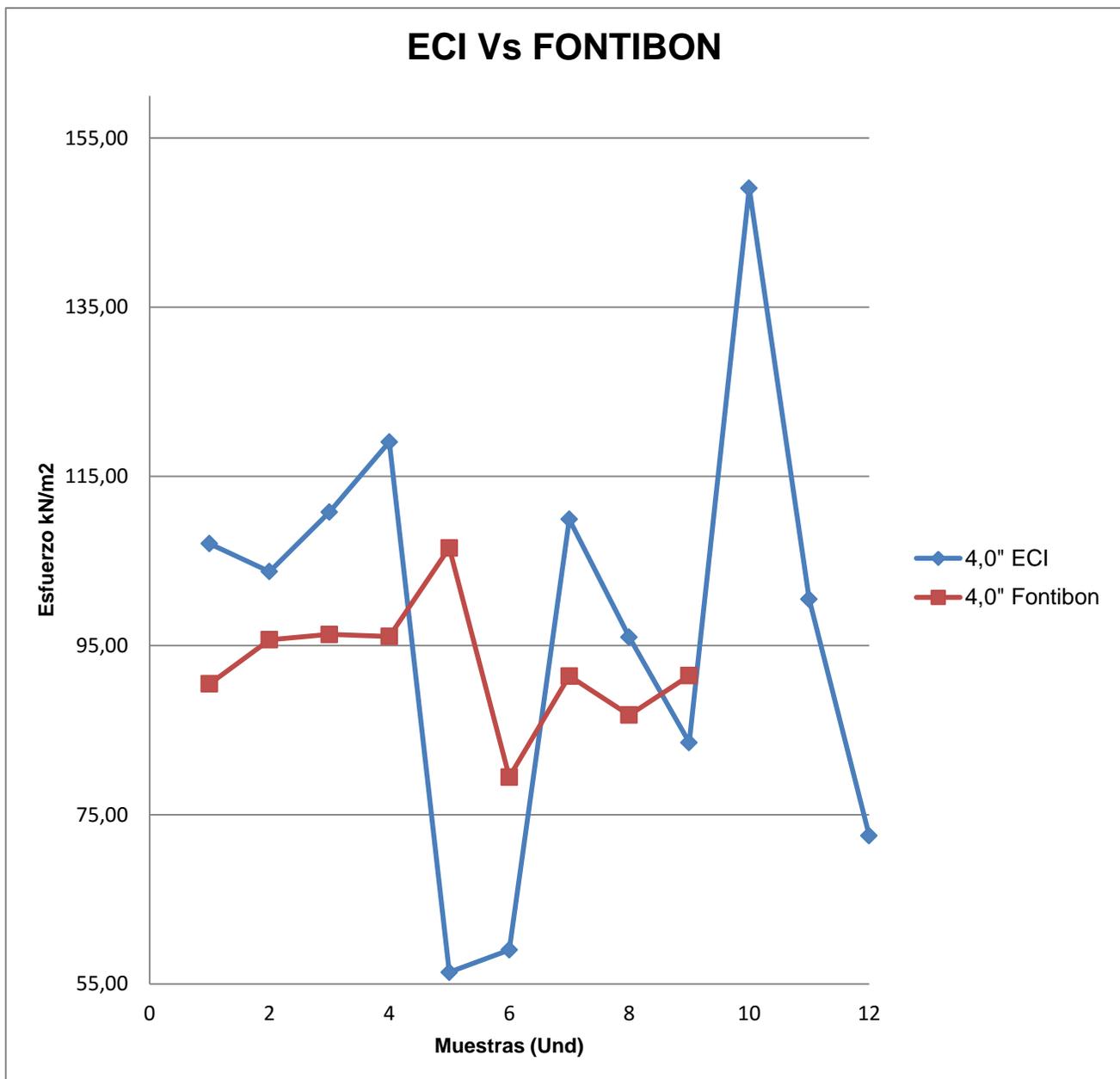


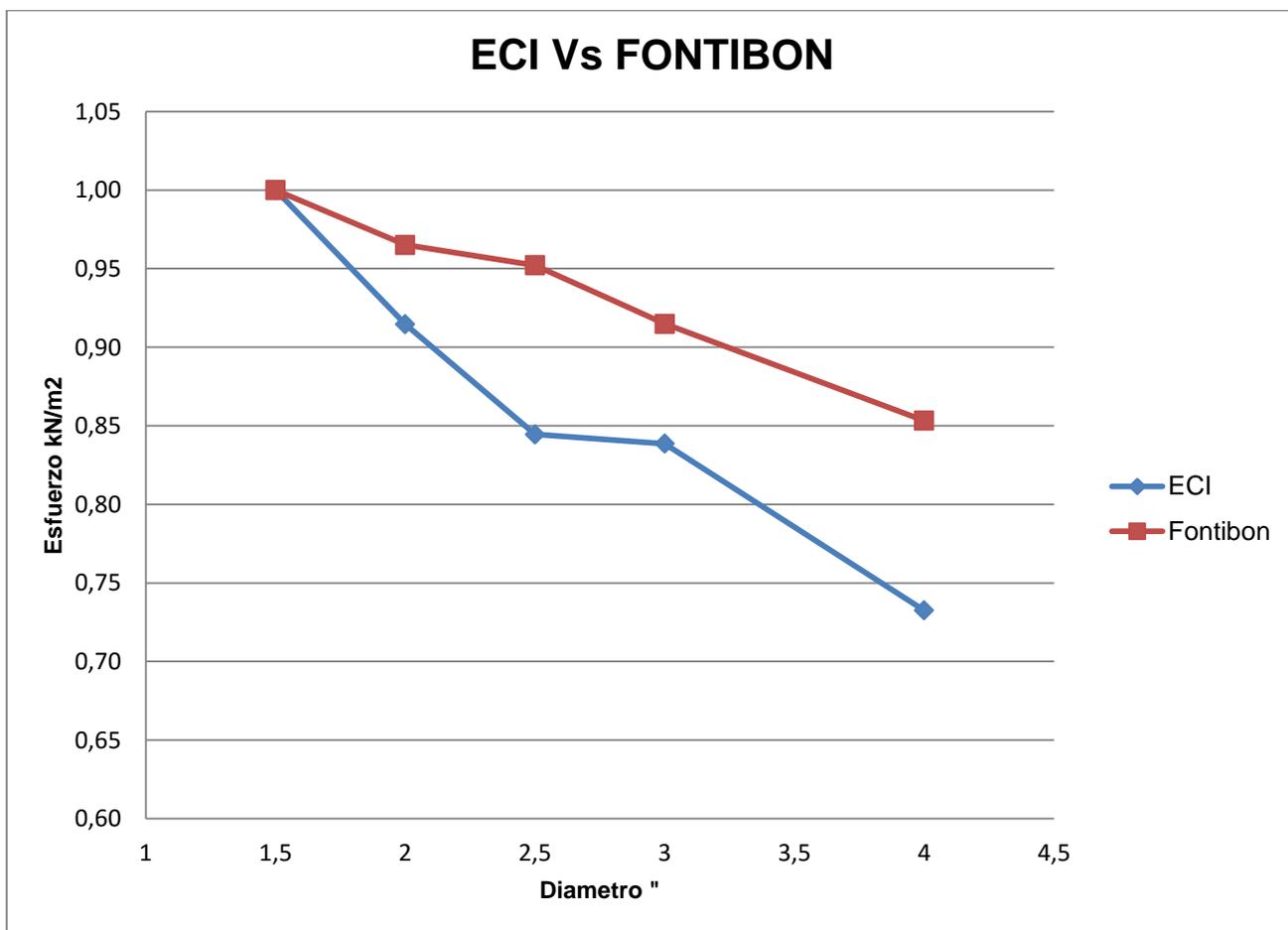
Figura 53 Esfuerzo Vs Muestras



**Tabla 29** Resultados de Esfuerzo Vs Diámetro

ECI		FONTIBON	
DIAMETRO	ESFUERZO kN/m <sup>2</sup>	DIAMETRO	ESFUERZO kN/m <sup>2</sup>
1,5	132,82	1,5	108,63
2,0	121,48	2,0	104,84
2,5	112,18	2,5	103,43
3,0	111,39	3,0	99,38
4,0	97,29	4,0	92,68

**Figura 54** Esfuerzo Vs Diámetro



Análisis del esfuerzo en relación al plano de falla de las muestras:

Es importante realizar un análisis de las diferentes formas de falla que presentan las muestras, identificando su comportamiento y si este efecto causa variación en los cálculos realizados.

**Tabla 30** Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 1.5"

	FALLA FRAGIL	FALLA PARCIAL AL CORTE	FALLA DE FLEXIBILIDAD PLASTICA O DE BARRIL
<b>1.5 PULGADAS</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Esfuerzo Max (KN/m2)</b>		
1		137,30	
2		133,32	
3		145,09	
4		131,95	
5		126,41	
6		132,47	
7		128,64	
8		127,80	
9		127,87	
10		137,38	

**Tabla 31** Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 2.0"

	FALLA FRAGIL	FALLA PARCIAL AL CORTE	FALLA DE FLEXIBILIDAD PLASTICA O DE BARRIL
<b>2.0 PULGADAS</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Esfuerzo Max (KN/m2)</b>		
1		130,96	
2		124,63	
3		118,15	
4		161,50	
5		119,19	
6		122,26	
7		109,56	
8		122,47	
9		102,00	
10		120,65	
11		117,81	
12		118,53	
13		111,49	

**Tabla 32** Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 2.5"

	FALLA FRAGIL	FALLA PARCIAL AL CORTE	FALLA DE FLEXIBILIDAD PLASTICA O DE BARRIL
<b>2.5 PULGADAS</b>			
Muestra	Esfuerzo Max (KN/m2)		
1		124,80	
2		136,11	
3		114,05	
4		126,03	
5		106,86	
6		114,01	
7			134,54
8			117,76
9			117,36
10		91,80	
11		94,49	
12		105,21	
13		113,64	
14		103,31	
15		69,27	
16		125,58	

**Tabla 33** Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 3,0"

	FALLA FRAGIL	FALLA PARCIAL AL CORTE	FALLA DE FLEXIBILIDAD PLASTICA O DE BARRIL
<b>3.0 PULGADAS</b>			
Muestra	Esfuerzo Max (KN/m2)		
1		111,35	
2		119,80	
3		104,32	
4		105,01	
5		103,61	
6		114,38	
7		129,38	
8		111,51	
9		103,17	

**Tabla 34** Relación de esfuerzo máximo y plano de falla de muestras diámetros 4,0”

	FALLA FRAGIL	FALLA PARCIAL AL CORTE	FALLA DE FLEXIBILIDAD PLASTICA O DE BARRIL
<b>4.0 PULGADAS</b>			
Muestra	Esfuerzo Max (KN/m2)		
1			107,04
2			103,74
3			110,76
4			119,07
5		56,38	
6		59,01	
7		109,92	
8		95,98	
9		83,53	
10		149,08	
11			100,48
12			72,53

Como se puede observar en las tablas 30 a la 34, la relación entre el modo de la falla y el esfuerzo no afecta de manera directa el resultado de los cálculos realizados, puesto que los valores mayores no corresponden a un valor mayor o a un valor menor del esfuerzo, la forma de la falla se puede dar para valores de esfuerzo elevados, valores promedio o valores bajos o pueden fallar de la misma manera para las mismas muestras.

## 11. CONCLUSIONES

- Buscando establecer las posibles variables que influyen en el cambio en la resistencia a la compresión inconfina da de muestras ensayadas se establecen las siguientes variables: diámetro de la probeta y contenido de humedad de la muestra. En el análisis de la gráfica que correlaciona el cambio en la humedad y el diámetro de la probeta con la resistencia a la compresión, se evidencia una influencia directa de estas dos variables mencionadas.
- La variabilidad de los resultados puede ser producto de las condiciones del terreno (Humedades, tipología, origen geológico, microfisuración y fisuración) al momento de realizar la extracción y posterior falla.
- Debido a que el estudio se realizó en arcillas naturales, éstas tienden a presentar fisuras, lo cual afecta directamente los resultados.
- Se puede concluir que el ensayo no se debe excluir para el estudio de suelos puesto que los resultados son afectados directamente por factores externos como fisuras y humedad del suelo
- Del análisis realizado a la gráfica de deformación en falla Vs diámetro de la muestra se prueba que este último no incide considerablemente en la deformación de falla.
- Es probable que la variación en la resistencia a la compresión inconfina da esté dada tanto por el cambio geométrico, como por la variación en el contenido de humedad.
- Según revisión realizada al modelo hiperbólico de Duncan y Chan se pudo determinar que este no se ajustó a los resultados obtenidos en las gráficas de Esfuerzo Vs Deformación Unitaria. De igual forma se puede concluir que la exactitud en las predicciones del modelo no está relacionada con el contenido de arcilla y humedad de los mismos, sino con la forma de la curva esfuerzo-deformación.

- Se observa según la comparación realizada entre los resultados de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y los obtenidos en la localidad de Fontibón una disminución en cuanto al esfuerzo a medida que se disminuye el diámetro. Esto nos confirma que para poder excluir el ensayo se debe analizar el suelo en diferentes sitios de la ciudad.

## 12. RECOMENDACIONES

- Se recomienda en lo posible realizar mayor número de exploraciones en diferentes partes de la ciudad, lo cual genere certeza en los datos y así tener los suficientes argumentos que incidan en un cambio en las condiciones del ensayo planteadas en la normatividad colombiana vigente.
- Realizar un análisis en diámetros inferiores según los expuestos en la normatividad vigente, con el fin que se realizar un análisis en cuanto al comportamiento del mismo.
- Controlar los factores externos que en este caso fueron fisuras, humedades y origen geológico para conocer como impactan en los resultados finales.
- Efectuar otros ensayos, que permitan establecer la resistencia al corte, generando puntos de comparación que sirvan para establecer la resistencia al corte más cercano a la realidad, garantizando un óptimo diseño de las estructuras de cimentación en el desarrollo de nuevos proyectos de ingeniería.

## BIBLIOGRAFÍA

- [Http://albatros.uis.edu.co/eisi/archivosprofesores/u9186/compresion.pdf](http://albatros.uis.edu.co/eisi/archivosprofesores/u9186/compresion.pdf) [En línea]. - 30 de octubre de 2014.
- ASTM Dealing With Outlying Observations [En línea] // ASTM. - 23 de 05 de 2015. - <http://library.sut.ac.th:8080/astm/cd14022005/PDF/E178.pdf>.
- ASTM.ORG [www.astm.org](http://www.astm.org)[En línea]. - 24 de 05 de 2015. - [http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND08/datapoints\\_spnd08.html](http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPND08/datapoints_spnd08.html).
- BOWLES Joseph E Propiedades geofísicas de los suelos [Libro]. - Colombia: McGraw-Hill, 1982. - Vol. 1 ed.
- Brook Hoek. E & Undergroud excavations in rock inst. min metall [Libro]. - London: Chapman & Hall, 1980.
- IGLESIAS Celso Mecánica de suelos [Libro]. - Madrid: Síntesis, 2006. - Vol. 1 ed. Das B. M. Fundamentos de Ingeniería geotécnica [Libro]. - California state university sacramento: Thomson p 3, 2001.
- FAIRHURST C. &. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in [Libro]. - Int. J Rock Mech. Min. Sci 36: [s.n.], 1999.
- FAO.org <ftp.fao.org> [En línea]. 24 de 05 de 2015.

- INVIAS Norma INV E 152-07 determinación de la compresión inconfiada en suelos cohesivos [Informe]. - 2004.
- JIMENEZ SALAS J.A Geotecnia y cimientos I (propiedades de los suelos y de las rocas) [Libro]. - España: Rueda, 1975. - Vol. 2 ed.
- SARKKA & ELORANTA, Rock mechanics a challenge for society [Conferencia] // symposium I.R. - Espoo, Finland: 2001.
- SCHUTZ Felsmechanische Untersuchungen an Gesteinen aus dem Tunnelprojekt "Königshainer Berge" (Autobahn Bautzen – Görlitz) unter besonderer Berücksichtigung des Massstabeffekts beim einaxialen Druckversuch [Libro]. - Technical University of Munich: Diploma Thesis, Department of General, Applied and Engineering Geology, 1995.
- UNITEC WORDPRESS mecanicadesuelos1unitec.wordpress.com [En línea]. - 23 de 05 de 2015. - <https://mecanicadesuelos1unitec.wordpress.com/ensayo-compresion-simple/>.