

## **Maestría en Ingeniería Civil**

**Dispositivo para el ensayo de penetración estática de cono, utilizando en el cono sensores de presión hidráulica.**

**Wilson Andrés Vásquez Romero**

**Bogotá D.C., 20 de diciembre de 2021**



**Dispositivo para el ensayo de penetración estática de cono, utilizando  
en el cono sensores de presión hidráulica.**

**Tesis para optar el título de magister en ingeniería civil con énfasis en  
geotecnia**

**Guillermo Pabón Gutiérrez  
Ingeniero Civil, Ph.D.**

**Bogotá D.C., 20 de diciembre de 2021**



La tesis de maestría titulada “Dispositivo para el ensayo de penetración estática de cono, utilizando en el cono sensores de presión hidráulica”, presentada por Wilson Andrés Vásquez Romero, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.



---

**GUILLERMO PABÓN  
GUTIÉRREZ**  
Ingeniero Civil, Ph.D.  
Director

---

**EDGAR EDUARDO  
RODRÍGUEZ GRANADOS**  
Ingeniero Civil, M.Sc.  
Jurado

---

**JOSÉ FRANCISCO SALAZAR  
FERRO**  
Ingeniero Civil, M.Sc.  
Jurado

Bogotá, D.C., 20 de diciembre de 2021.

## **Resumen**

En el presente proyecto se fabricó un cono instrumentado haciendo uso de sensores de presión hidráulica, el cual cuenta con un sistema de adquisición de datos y una máquina para hincar el mismo. El cono propuesto, que registra la fuerza en la punta y la fricción en el fuste, corresponde a una alternativa desarrollada en Colombia.

Se establecieron dos sitios de Investigación; el primer sitio está en el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, y el segundo, en la localidad de Fontibón. En ambos sitios de Investigación se realizan sondeos por los métodos convencionales, con el objeto de caracterizar geotécnicamente el subsuelo, también, en ambos sitios se realizó el hincado del cono propuesto, registrando la presión en la punta y la fricción en el fuste. Una vez obtenida la información con el cono instrumentado, se determinó el parámetro del cono "Nkt" a partir de la resistencia al corte no drenada, obtenida mediante ensayos de compresión confinada, triaxial no consolidado no drenado, veleta de campo; también se obtuvo el parámetro del cono a partir de la relación de fricción "Fr", y el límite líquido.

Se compara la presión en la punta y la fricción en el fuste obtenidas mediante el cono propuesto, y los datos obtenidos mediante un ensayo CPTu convencional realizado por la empresa IGR S.A.S en el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería para el desarrollo de la investigación titulada "Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el Sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería (SEGECI)" que llevaron a cabo los ingenieros Sarmiento & León (2016).

## **Abstract**

In this project, an instrumented cone was manufactured using hydraulic pressure sensors, which has a data acquisition system and a machine to drive it. The proposed cone, which registers the force in the tip and the friction in the shaft, corresponds to an alternative developed in Colombia.

Two research sites were established; the first site is in the campus of the Julio Garavito Colombian School of Engineering, and the second, in the town of Fontibón. In both research sites, boreholes were carried out by conventional methods, in order to characterize the subsoil geotechnically, also, in both sites the proposed cone driving was carried out, recording the pressure at the tip and the friction in the shaft. Once the information was obtained with the instrumented cone, the cone constant "Nkt" was determined from the undrained shear strength, obtained by unconfined compression, unconsolidated undrained triaxial, and field vane tests; the constant "Nkt" was obtained also from the cone friction ratio "Fr", and the liquid limit.

The pressure at the tip and the friction in the shaft obtained using the proposed cone are compared with the data obtained through a CPTu test carried out at the ECI campus for the development of the research entitled "Static and dynamic geomechanical characterization from direct and indirect exploration and laboratory tests at the geotechnical experimentation site at the Colombian School of Engineering (SEGECI)" carried out by engineers Sarmiento & León (2016).

## Índice general

Introducción .....	19
Objetivos .....	23
Alcance.....	24
<b>Capítulo I .....</b>	<b>25</b>
<b>Metodología de la Investigación.....</b>	<b>25</b>
1.1. Recopilación de la Información Existente y Revisión de las Referencias Bibliográficas .	25
1.2. Diseño y Fabricación de la Máquina Hidráulica, el Cono y la Adquisición de Datos .....	25
1.3. Exploración Geotécnica Convencional en los Sitios de Investigación .....	26
1.4. Hincado del Cono Propuesto y el Piezocono Convencional en los Sitios de Investigación .....	26
1.5. Procesamiento y Análisis de la Información Geotécnica .....	26
<b>Capítulo II.....</b>	<b>28</b>
<b>Marco Conceptual.....</b>	<b>28</b>
2.1. Exploración Convencional del Subsuelo.....	28
2.2. Exploración con nuevas tecnologías.....	33
2.2.1. Ensayo de reflexión sísmica, Down Hole, Up Hole, Cross Hole.....	33
2.2.2. Dilatómetro de Marchetti. ....	35
2.2.3. Presurómetro de Menard.....	37
2.2.4. Ensayo de piezocono sísmico SCPTu.....	38
2.2.4.1. Parámetros registrados con el CPTu.....	44
2.2.4.2. Parámetros geotécnicos obtenidos a partir del SCPTu. ....	48
2.2.4.3. Tipo de comportamiento del suelo SBT. ....	49
2.2.4.4. Aproximación No Normalizada (SBT).....	50

2.2.4.5.	Aproximación Normalizada (SBTN).....	51
2.2.4.6.	Peso unitario. ....	54
2.2.4.7.	Resistencia al corte no drenado (Su).....	55
2.2.4.8.	Sensitividad.....	59
2.2.4.9.	Ángulo de fricción interna. ....	59
2.2.5.10.	Densidad relativa (Dr). ....	60
2.2.5.11.	Disipación de la presión de poros.....	61
2.2.5.12.	Ensayos de penetración con cono miniatura en cámaras de calibración. ....	65
2.3.	Historia del Piezocono.....	69
2.3.1.	Cono mecánico. ....	69
2.3.2.	Cono eléctrico.....	72
2.3.3.	El piezocono. ....	73
2.3.4.	Historia del ensayo en Colombia. ....	74
2.4.	Funcionamiento de los Sensores en el Piezocono .....	75
2.4.1.	Funcionamiento de celdas de carga basado en galgas extensométricas. ....	76
2.5.	Tipos de sensores de presión. ....	79
2.5.1.	Sensores de presión resistivos.....	80
2.5.1.1.	Puente de Wheatstone.....	81
2.5.1.2.	Compensación de temperatura.....	82
2.5.2.	Sensores de presión piezoresistivos.....	86
2.5.3.	Sensores de presión capacitivos.....	86
2.5.4.	Sensores de presión piezoeléctricos.....	87
2.6.	Incertidumbre en la Medición.....	87
2.6.1.	Precisión. ....	88
2.6.2.	Exactitud.....	88
2.6.3.	Resolución. ....	88

2.6.4.	Sensibilidad. ....	88
2.6.5.	Linealidad. ....	89
2.6.6.	Histéresis. ....	89
2.6.7.	Ruido. ....	90
<b>Capítulo III .....</b>		<b>91</b>
<b>Investigaciones Desarrolladas con el Piezocono en Colombia.....</b>		<b>91</b>
<b>Capítulo IV.....</b>		<b>95</b>
<b>Diseño .....</b>		<b>95</b>
4.1.	Diseño de la Máquina Hidráulica para Penetrar el Cono .....	95
4.1.1.	Análisis de esfuerzos y deformaciones.....	99
4.1.2.	Selección de la unidad hidráulica. ....	100
4.2.	Diseño del Cono con Sensores Hidráulicos.....	102
4.2.1.	Especificaciones ASTM D5778. ....	103
4.2.2.	Sistema de adquisición de datos. ....	107
<b>Capítulo V .....</b>		<b>112</b>
<b>Fabricación y Calibración .....</b>		<b>112</b>
5.1.	Fabricación de la Máquina Hidráulica para Hincar el Cono Instrumentado .....	112
5.2.	Fabricación del Cono Instrumentado.....	115
5.2.1.	Sistema de adquisición de datos. ....	117
5.2.2.	Calibración del cono.....	119
<b>Capítulo VI.....</b>		<b>131</b>
<b>Descripción y Caracterización Geotécnica de los Sitios de Investigación .....</b>		<b>131</b>
6.1.	Sitio de Investigación 1. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.....	131
6.1.1.	Localización. ....	131
6.1.2.	Geología. ....	133
6.1.3.	Exploración del subsuelo.....	134

6.1.4. Ensayos de campo y laboratorio.....	137
6.1.5. Penetración con el cono convencional.....	150
6.2. Sitio de Investigación 2. (Fontibón – La Cabaña).....	153
6.2.1. Localización. ....	153
6.2.2. Geología. ....	154
6.2.3. Exploración del subsuelo.....	155
6.2.4. Ensayos de campo y laboratorio.....	157
<b>Capítulo VII.....</b>	<b>171</b>
<b>Hincado del Cono Propuesto.....</b>	<b>171</b>
7.1. Hincado del Cono Propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI) .....	171
7.1.1. Análisis y conclusiones de la presión en la punta y la fricción en el fuste obtenidos con el cono propuesto y el cono tradicional en el Sitio de Investigación 1 (ECI). ....	175
7.2. Hincado del Cono Propuesto en el Sitio de Investigación 2. (Fontibón) .....	179
7.2.2. Análisis y conclusiones de la presión en la punta y la fricción en el fuste obtenidos con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). ....	182
<b>Capítulo VIII .....</b>	<b>187</b>
<b>Procesamiento y Análisis de la Información.....</b>	<b>187</b>
8.1. Determinación $N_{kt}$ en el Sitio de Investigación 1 (ECI).....	189
8.1.1. $N_{kt}$ a partir del ensayo de compresión inconfiada.....	193
8.1.2. $N_{kt}$ a partir del ensayo triaxial UU.....	195
8.1.3. $N_{kt}$ a partir del ensayo de corte con veleta de campo. ....	198
8.1.4. $N_{kt}$ a partir de la relación de fricción “Fr”. ....	200
8.1.5. $N_{kt}$ a partir del ensayo del límite líquido. ....	203
8.1.6. Comparación y análisis de los parámetros del cono “ $N_{kt}$ ” obtenidos en el Sitio de Investigación 1 (ECI). ....	206
8.1.7. Ecuación de correlación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir del Límite Líquido en el Sitio de Investigación 1 (ECI). ....	210

8.1.8. Ecuación de correlación del parámetro del cono “N <sub>kt</sub> ” a partir del Índice de Plasticidad en el Sitio de Investigación 1 (ECI).....	214
8.2. Determinación N <sub>kt</sub> en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).....	219
8.2.1. N <sub>kt</sub> a partir del ensayo de compresión inconfiada. ....	223
8.2.2. N <sub>kt</sub> a partir del ensayo triaxial UU.....	225
8.2.3. N <sub>kt</sub> a partir del ensayo de corte con veleta de campo. ....	228
8.2.4. N <sub>kt</sub> a partir de la relación de fricción “Fr”.....	231
8.2.5. N <sub>kt</sub> a partir del ensayo de límite líquido. ....	234
8.2.6. Comparación y análisis de los parámetros del cono “N <sub>kt</sub> ” obtenidos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). ....	237
8.2.7. Ecuación de correlación del parámetro del cono “N <sub>kt</sub> ” a partir del Límite Líquido en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). ....	241
8.2.8. Ecuación de correlación del parámetro del cono “N <sub>kt</sub> ” a partir del Índice de Plasticidad en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).....	245
<b>Capítulo IX.....</b>	<b>250</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>250</b>
9.1. Información Relacionada con el Piezocono en Colombia .....	250
9.2. Caracterización Geotécnica del Sitio de Investigación 1 (ECI) y del Sitio de Investigación 2 (Fontibón).....	250
9.3. Diseño y Fabricación de la Máquina que Aplica la Carga para Penetrar el Cono Propuesto	252
9.4. Diseño y Fabricación del Cono Propuesto .....	253
9.5. Penetración del Cono Propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI) y en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) .....	256
9.6. Determinación del Parámetro del Cono “N <sub>kt</sub> ” con el Cono Propuesto para el Sitio de Investigación 1 (ECI), y el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) .....	258
<b>Capítulo X .....</b>	<b>262</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>262</b>

## Índice de tablas

Tabla 2-1. Clasificación de las unidades de construcción por categorías. ....	29
Tabla 2-2. Número mínimo de sondeos y profundidad.....	29
Tabla 2-3. Tipos de prueba de penetración con cono. ....	39
Tabla 2-4. Aplicabilidad percibida de SCPTu para obtener los parámetros geotécnicos del suelo. ....	49
Tabla 2-5. Tipo de Comportamiento del Suelo (SBT), para un Cono Dinámico CPT.....	51
Tabla 2-6. Tipo de Comportamiento del Suelo Normalizado (SBTN).....	52
Tabla 2-7. Tipo de Comportamiento del Suelo Normalizados (SBTN) Qt-Fr y Qt-Bq. ....	53
Tabla 2-8. Resumen de resultados de disipación de presión de poros posición u1 CPTU.....	63
Tabla 2-9. Lista de sitios investigados con referencias asociadas. ....	64
Tabla 2-10. Dimensiones de cámaras de calibración y conos miniatura desarrollados.....	67
Tabla 3-1. Investigaciones desarrolladas en Colombia con uso del piezocono.....	92
Tabla 3-2. Valor de “Nkt” utilizado en las investigaciones con el piezocono en Colombia. ....	94
Tabla 4-1. Parámetros de diseño. ....	95
Tabla 4-2. Piezas modeladas. ....	97
Tabla 4-3. Selección del diámetro del vástago.....	98
Tabla 4-4. Selección del caudal de la bomba. ....	100
Tabla 4-5. Selección de la presión de la bomba. ....	101
Tabla 4-6. Potencia del motor. ....	101
Tabla 4-7. Especificaciones para la selección de la unidad hidráulica.....	102
Tabla 4-8. Presión en la punta. ....	103
Tabla 4-9. Rangos de diámetro y área de piezocono.....	104
Tabla 4-10. Piezas modeladas en el software inventor.....	106

Tabla 5-1. Especificaciones unidad hidráulica seleccionada.....	112
Tabla 5-2. Marco de carga, bases de anclaje, viga de anclaje, barreno.....	114
Tabla 5- 3. Piezas fabricadas para el cono instrumentado.....	115
Tabla 5-4. Elementos del sistema de adquisición de datos.....	117
Tabla 5-5. Elementos del sistema de adquisición de datos.....	118
Tabla 5-6. Parámetros de las ecuaciones de calibración del sensor en la punta (S1). ....	123
Tabla 5-7. Parámetros de las ecuaciones de calibración del sensor en el fuste (S2). ....	124
Tabla 5-8. Análisis estadístico de “b” en la ecuación de calibración del sensor en la punta (S1).....	124
Tabla 5-9. Análisis estadístico de “b” en la ecuación de calibración del sensor en el fuste (S2).....	125
Tabla 5-10. Precisión y exactitud promedio para el sensor en la punta (S1) .....	129
Tabla 5-11. Precisión y exactitud promedio del sensor en la punta (S1), y sensor en el fuste (S2). ....	130
Tabla 6-1. Descripción de las zonas de respuesta sísmica. ....	132
Tabla 6-2. Ubicación de los sondeos convencionales ECI.....	135
Tabla 6-3. Ensayos de laboratorio y campo realizados para la caracterización geotécnica del Sitio de Investigación 1 (ECI). ....	137
Tabla 6-4. Resumen de propiedades de los estratos de suelo en los sondeos S1 y S2. (ECI). ....	139
Tabla 6-5. Peso unitario y cohesión del Sondeo S1 en la ECI. ....	142
Tabla 6-6. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión confinada en el Sitio de Investigación 1 (ECI). ....	143
Tabla 6-7. Resumen del ensayo triaxial UU del Sondeo S2 (Sitio de Investigación 1, ECI).....	144
Tabla 6-8. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en el Sitio de Investigación 1 (ECI). ....	144
Tabla 6-9. Resistencia al corte mediante veleta de campo en el Sondeo 2 (ECI). ....	145
Tabla 6-10. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de corte con veleta de campo en el Sitio de Investigación 1 (ECI). ....	146
Tabla 6-11. Parámetros estadísticos del peso unitario en el Sitio de Investigación 1 (ECI). ....	148

Tabla 6-12. Gravedad específica de los sondeos S1 y S2 del Sitio de Investigación 1 (ECI).....	149
Tabla 6-13. Parámetros estadísticos de la gravedad específica en el Sitio de Investigación 1 (ECI)...	149
Tabla 6-14. Localización del ensayo piezono realizado por IGR SAS en la ECI. ....	151
Tabla 6-15. Descripción de las zonas de respuesta sísmica del Sitio de Investigación 2 (Fontibón)...	153
Tabla 6-16. Ubicación de los sondeos convencionales en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). ....	157
Tabla 6- 17. Ensayos de campo y laboratorio realizados para la caracterización geotécnica del sitio de investigación 2 (Fontibón).....	158
Tabla 6-18. Resumen de las propiedades de los estratos de suelo de los sondeos S1, S2 y S3. (Fontibón). .....	159
Tabla 6-19. Pesos unitarios y resistencias al corte no drenada obtenidos mediante el ensayo compresión inconfinaada del Sondeo S1 (Sitio de Investigación 2, Fontibón). ....	163
Tabla 6-20. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfinaada en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). ....	163
Tabla 6-21. Resumen de resultados del ensayo triaxial UU de los sondeo S2 y S3 (Sitio de Investigación 2, Fontibón). ....	164
Tabla 6-22. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). ....	164
Tabla 6-23. Resistencia al corte mediante veleta de campo en los sondeos S2 y S3 (Sitio de Investigación 2, Fontibón). ....	165
Tabla 6-24. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de corte con veleta de campo en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).....	165
Tabla 6-25. Parámetros estadísticos del peso unitario en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). ....	168
Tabla 6-26. Gravedad específica de los sondeos S1, S2 y S3 del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	168
Tabla 6-27. Parámetros estadísticos de la gravedad específica en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	169
Tabla 7-1. Ubicación de las exploraciones con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). .....	172
Tabla 7-2. Presión en la punta máxima promedio y mínima promedio para el sector 1 y 2 obtenida con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). ....	178

Tabla 7-3. Fricción en el fuste máximo y mínimo promedio para el sector 1 y 2 obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI).....	179
Tabla 7-4. Ubicación de las exploraciones con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).....	180
Tabla 7-5. Presión en la punta máxima promedio y mínima promedio para el sector 1 y 2 obtenida con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).....	185
Tabla 7-6. Fricción en el fuste máximo y mínimo promedio para el sector 1 y 2 obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI).....	186
Tabla 8-1. Resumen de los parámetros a evaluar.....	187
Tabla 8-2. Esfuerzo en la punta y en el fuste con el cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3 en el Sitio de Investigación 1.....	190
Tabla 8-3. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión confinada en el sondeo S1, en el Sitio de Investigación 1 (ECI).....	193
Tabla 8-4. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de compresión confinada en el sondeo S1 en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).....	194
Tabla 8-5. Parámetros estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de compresión confinada en el sondeo S1 en el sitio de Investigación 1 (ECI)).	194
Tabla 8-6. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”, a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU, en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI). .....	195
Tabla 8-7. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo triaxial UU en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).....	196
Tabla 8-8. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo triaxial UU en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).....	197
Tabla 8-9. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”, a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI). .....	198
Tabla 8-10. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de corte con veleta de campo en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).....	199
Tabla 8-11. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).....	199
Tabla 8-12. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 1 (ECI). .....	201

Tabla 8-13. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (obtenido a partir de la relación de fricción “Fr”, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).	202
Tabla 8-14. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).	202
Tabla 8-15. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir del límite líquido en los sondeos S1 y S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI).	204
Tabla 8-16. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (obtenido a partir del límite líquido en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).	205
Tabla 8-17. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (obtenido a partir del límite líquido en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).	205
Tabla 8-18. Resumen del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” obtenido por diferentes métodos en el Sitio de Investigación 1 (ECI).	208
Tabla 8-19. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” para los métodos A, B, C y D, en el Sitio de Investigación 1 (ECI).	208
Tabla 8-20. Diferencia entre el $N_{kt \text{ promedio}}$ con respecto al $N_{kt}$ determinado por cada método en el Sitio de Investigación 1 (ECI).	209
Tabla 8-21. Ecuaciones de correlación entre el parámetro del cono $N_{kt}$ y el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI).	212
Tabla 8-22. $N_{kt}$ obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del límite líquido y el cono propuesto del Sitio de Investigación 1 (ECI).	213
Tabla 8-23. Ecuaciones de correlación entre el parámetro del cono $N_{kt}$ y el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI).	217
Tabla 8-24. Parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del Índice de Plasticidad y el cono propuesto del Sitio de Investigación 1 (ECI).	218
Tabla 8-25. Esfuerzo en la punta y en el fuste con el cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).	220
Tabla 8-26. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”, a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfina en el sondeo S1, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).	223
Tabla 8-27. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de compresión inconfina en el sondeo S1 del Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).	224
Tabla 8-28. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de compresión inconfina en el sondeo S1 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).	224

Tabla 8-29. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”, a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial en los sondeos S2 y S3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	226
Tabla 8-30. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” (Su obtenida del ensayo triaxial UU en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).....	227
Tabla 8- 31. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo triaxial UU en los sondeos S2 y S3). .....	227
Tabla 8-32. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	229
Tabla 8-33. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de corte con veleta de campo en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). .....	230
Tabla 8-34. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). .....	230
Tabla 8-35. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	232
Tabla 8-36. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).....	233
Tabla 8-37. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). .....	233
Tabla 8-38. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir del límite líquido en el sondeo S1, S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	235
Tabla 8-39. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” (Obtenido a partir del límite líquido en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). .....	236
Tabla 8-40. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Obtenido a partir del límite líquido en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). .....	236
Tabla 8-41. Resumen del parámetro del cono obtenido por diferentes métodos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	239
Tabla 8-42. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” para los métodos A, B, C y D, del Sitio de Investigación 2. .....	239
Tabla 8-43. Diferencia entre el $N_{kt \text{ promedio}}$ con respecto al $N_{kt}$ determinado por cada método para el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	240
Tabla 8-44. Ecuaciones de correlación entre el parámetro del cono $N_{kt}$ y el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI). .....	243

Tabla 8-45. Nkt obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del límite líquido y el cono propuesto del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	244
Tabla 8-46. Ecuaciones de correlación entre el parámetro del cono Nkt y el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI). .....	248
Tabla 8- 47. Nkt obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del Índice de Plasticidad y el cono propuesto del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	249
Tabla 9-1. Resumen de la resistencia al corte no drenada obtenida en el Sitio de Investigación 1 (ECI). .....	251
Tabla 9-2. Resumen de la resistencia al corte no drenada obtenida en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	251
Tabla 9-3. Presión en la punta máxima promedio y mínima promedio para el sector 1 y 2 obtenida con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	257
Tabla 9-4. Fricción en el fuste máximo y mínimo promedio para el sector 1 y 2 obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). .....	257

### **Índice de figuras**

Figura 1-1. Exploraciones realizadas con técnicas avanzadas en Colombia. Fuente: Rodriguez (2015). .....	20
Figura 1-2. Exploraciones realizadas con técnicas avanzadas en Bogotá. Fuente: Rodriguez (2015)..	20
Figura 2-1. Diagrama de un arreglo de prueba de corte directo. Fuente: Das (2013). .....	31
Figura 2-2. Diagrama de un equipo de prueba triaxial. Fuente: Das (2013). .....	32
Figura 2-3. Componentes del ensayo Dow Hole. Fuente: CEDEX (2000). .....	34
Figura 2-4. Componentes del ensayo cross hole. Fuente: CEDEX (2000). .....	35
Figura 2-5. Dilatómetro de Marchetti. Fuente: Devincenzi & Frank (2004). .....	36
Figura 2-6. Montaje del presurómetro de Menard. Fuente: Devincenzi & Frank (2004). .....	37
Figura 2-7. Curva presión vs volumen. Fuente: Sánchez (2010). .....	38
Figura 2-8. Gama de cono (de izquierda a derecha: 2cm <sup>2</sup> , 10cm <sup>2</sup> , 15 cm <sup>2</sup> y 40cm <sup>2</sup> ). Fuente: Robertson & Cabal (2010). .....	40
Figura 2-9. Máquina de empuje hidráulico anclado. Fuente: Robertson & Cabal (2010). .....	41

Figura 2-10. Diseño de conos. (a) Celdas de carga en punta y manguito de fricción en compresión (b) Celda de carga en punta en compresión y celda de carga del manguito de fricción en tensión (c) diseño de celda de carga en serie por sustracción. Fuente: Robertson & Cabal (2010). .....	42
Figura 2-11. Localización de sensores de presión en un Piezocono. Fuente: Robertson & Cabal (2010). .....	43
Figura 2-12. Área desigual de la punta del cono y los extremos del manguito de fricción. Fuente: Jamiolkowski M. L. (1985). .....	45
Figura 2-13. Resultados de calibración de un cono en una cámara triaxial para determinar la relación del área neta. Fuente: Mayne (2007). .....	46
Figura 2-14. Tipo de Comportamiento del Suelo (SBT), para un Cono Dinámico CPT. Fuente: Robertson & Cabal (2010). .....	50
Figura 2-15. Tipo de Comportamiento del Suelo Normalizado (SBTN). Fuente: Robertson & Cabal (2010). .....	52
Figura 2-16. Tipo de Comportamiento del Suelo Normalizados (SBTN) $Q_t-F_r$ y $Q_t-B_q$ . Fuente: Robertson & Cabal (2010). .....	53
Figura 2-17. Peso Unitario adimensional $\gamma/\gamma_w$ , basado en el ensayo CPT. Fuente: Robertson (2010)..	55
Figura 2-18. Estimación de la Resistencia al corte no drenado. Fuente: Konkol & Balachowski (2017). .....	58
Figura 2-19. Relación entre la densidad relativa (ID) y la presión en la punta normalizada ( $q_t$ ). Fuente: Bolton M. & Gui M.W.(1993). .....	61
Figura 2-20. Ensayo de disipación de presión de poros. Fuente: P. K. Robertson y Gregg Drilling & Testing (2010). .....	62
Figura 2-21. Configuración de una cámara de calibración. Fuente: Sepideh Damavandinejad Monfared (2014). .....	65
Figura 2- 22. Esquema de un cono miniatura. Fuente: Sepideh Damavandinejad Monfared (2014).....	66
Figura 2-23. Montaje de la placa superior con mini cono. Fuente: Sepideh Damavandinejad Monfared (2014). .....	68
Figura 2-24. Esquemas de la cámara triaxial grande utilizada como cámara de calibración. (a: placa superior, b: celda acrílica, c: placa inferior, d: conexión de medición presión de poros, e: drenaje de la muestra, f: líneas de drenaje de muestras conectadas a la atmósfera, g: tapa inferior, h: tapa superior de la muestra, i: muestra, j: buje. Fuente: Sepideh Damavandinejad Monfared (2014). .....	68
Figura 2-25. Cono Holandés antiguo. Fuente: Robertson & Cabal (2010). .....	69

Figura 2-26. Cono Holandés, sistema mecánico usado en 1940. Fuente: Robertson & Cabal (2010)...	70
Figura 2-27. (a) Registro de la resistencia en la punta y fricción total, (b) Con registro de la fricción en el fuste. Fuente: Lunne, Robertson, & Powell (1992).....	71
Figura 2-28. Cono eléctrico de Fugro. Fuente: Ruiter (1971).....	72
Figura 2-29. Piezómetro de Wissa. Fuente: Wissa (1974).....	74
Figura 2-30. Tipos de diseño de conos de penetración: (a) Celdas de carga por punta y fricción trabajando a compresión. (b) celda de carga por punta trabajando a compresión y celda de carga de fricción trabajando a tensión. (c) celdas de carga en serie por sustracción. Fuente: Robertson & Cabal (2010).75	
Figura 2-31. Celda de carga de compresión (izquierda), celda de carga de flexión de viga (centro), celda de carga tipo S a compresión o tracción (derecha). Fuente: Hottinger Bruel Kjaer (2017). .....	76
Figura 2-32. Galga extensométricas. Fuente: Hottinger Bruel Kjaer (2017). .....	77
Figura 2-33. Variación de la resistencia en una galga extensométrica. Fuente: Hottinger Bruel Kjaer (2017). .....	77
Figura 2-34. Galgas extensométricas dispuestas en puente de Wheatstone. Fuente: Nolla (2019).....	78
Figura 2-35. Corte de piezocono con visualización de galgas extensométricas. Fuente: Robertson P. k. (2015). .....	78
Figura 2-36. Galgas extensométricas y sensor de presión de poros en el cono de penetración. Fuente: Briaud (2013). .....	79
Figura 2-37. Sensor de presión. Fuente: Nolla (2019). .....	80
Figura 2-38. Cintas extensométricas en membrana. Fuente: Rojas (2008). .....	81
Figura 2-39. Puente de Wheatstone. Fuente: Dunncliff (1988).....	81
Figura 2-40. Galgas activa y pasiva. Fuente: Velasco (2000). .....	82
Figura 2-41. Compensación completa puente de Wheatstone (a) galgas inactivas, (b) todas las galgas activas a 90°, (c) todas las galgas activas, dos a compresión, dos a tensión. Fuente: Dunncliff (1988). .....	84
Figura 2-42. Ubicación de galgas extensométricas en sensor presión hidráulico resistivo. Velasco (2000). .....	85
Figura 2-43. Configuración condensador. Fuente: Rojas (2008). .....	86
Figura 2-44. Sensor piezoeléctrico. Fuente: Rojas (2008). .....	87
Figura 2-45. Exactitud y precisión. Fuente: Dunncliff (1988). .....	88

Figura 2-46. Linealidad. Fuente: Dunnycliff (1988).	89
Figura 2-47. Histéresis. Fuente: Dunnycliff (1988).	90
Tabla 3-1. Investigaciones desarrolladas en Colombia con uso del piezocono.	92
Tabla 3-2. Valor de “Nkt” utilizado en las investigaciones con el piezocono en Colombia.	94
Tabla 4-1. Parámetros de diseño.	95
Tabla 4-2. Piezas modeladas.	97
Tabla 4-3. Selección del diámetro del vástago.	98
Tabla 4-4. Selección del caudal de la bomba.	100
Tabla 4-5. Selección de la presión de la bomba.	101
Tabla 4-6. Potencia del motor.	101
Tabla 4-7. Especificaciones para la selección de la unidad hidráulica.	102
Tabla 4-8. Presión en la punta.	103
Tabla 4-9. Rangos de diámetro y área de piezocono.	104
Tabla 4-10. Piezas modeladas en el software inventor.	106
Figura 5-1. Unidad hidráulica. Fuente: propia.	112
Figura 5-2. Fabricación cilindro hidráulico. Fuente: propia.	113
Figura 5-3. Maquina hidráulica para penetrar el sensor. Fuente: propia.	113
Figura 5-4. Sensores de presión en la punta y fricción en el fuste. Fuente: propia.	117
Figura 5-5. Calibración del cono instrumentado (Laboratorio Universidad Distrital). Fuente: propia.	119
Figura 5-6. Formato de registro para calibración de los sensores del cono instrumentado. Fuente: propia.	120
Figura 5-7. Calibración 3 del sensor S1(punta) del cono instrumentado. Fuente: propia.	121
Figura 5-8. Calibración 3 del sensor S2(fuste) del cono instrumentado. Fuente: propia.	121

Figura 5-9. Evaluación del factor de área neta “a” y error de fricción “Rc” durante el proceso de calibración de un piezocono convencional. Fuente: Mulabac, Eskilson, & Larsson (1990). .....	122
Figura 5-10. Cámara de calibración para piezocono. Fuente: Mulabac, Eskilson, & Larsson (1990)..	123
Figura 5-11. Formato de registro para determinar precisión y exactitud (hoja 1). (ver en el Anexo 3). Fuente: propia.....	127
Figura 5-12. Graficas de calibración para determinar precisión y exactitud (hoja 1). (ver en el Anexo 3). Fuente: propia.....	128
Figura 5-13. Comportamiento de la fuerza para una carga de referencia de 1 kN sensor en la punta (S1). Fuente: propia.....	129
Figura 6-1. Sitio de Investigación 1, Campus de la ECI. Fuente: Google Maps (2018). .....	131
Figura 6-2. Zona de respuesta sísmica 2010: Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: IDIGER. ....	132
Figura 6-3. Localización del Sitio de Investigación 1 (ECI) en el mapa geológico de Bogotá (Formación Q1sa). Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2005). .....	134
Figura 6-4. Ubicación del Sitio de Investigación 1 en el campus de la ECI. Fuente: propia. ....	135
Figura 6-5. Distribución de los sondeos en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia. ....	136
Figura 6-6. Exploración en la ECI por el método convencional (muestras tipo Shelby). Fuente: propia. ....	137
Figura 6-7. Límite líquido, límite plástico y contenido de humedad en el sondeo S1 (ECI). Fuente: propia. ....	140
Figura 6-8. Límite líquido, límite plástico y contenido de humedad en el sondeo S2 (ECI). Fuente: propia. ....	140
Figura 6-9. Perfil estratigráfico del Sondeo S1 (ECI). Fuente: propia. ....	141
Figura 6-10. Compresión inconfiada, (Laboratorio de ingeniería Civil de la Universidad Distrital). Fuente: propia.....	142
Figura 6-11. Ensayo triaxial UU (Laboratorio de ingeniería Civil de la Universidad Distrital). Fuente: propia.....	143
Figura 6-12. Corte con veleta de campo, Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.....	145
Figura 6-13. Resistencia al corte no drenada en los sondeos S1 y S2 mediante ensayos de compresión inconfiada, triaxial UU, y veleta de campo en la ECI. Fuente: propia. ....	147

Figura 6-14. Peso unitario en los sondeos S1 y S2 del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia. .....	148
Figura 6-15. Prueba de campo SCPTu (IGR SAS). Fuente: Sarmiento & León (2016). .....	150
Figura 6-16. Esfuerzo en la punta “qc” con el piezocono convencional. Fuente: Sarmiento & León (2016). .....	151
Figura 6-17. Esfuerzo en el fuste “fs” con el piezocono convencional. Fuente: Sarmiento & León (2016). .....	152
Figura 6-18. Sitio de Investigación 2 (La Cabaña - Fontibón). Fuente: Google Maps. ....	153
Figura 6-19. Zona de respuesta sísmica 2010 (Lacustre 500): Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: IDIGER. ....	154
Figura 6-20. Localización del Sitio de Investigación 2 (Fontibó) en el mapa geológico de Bogotá, (Formación Q1sa). Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2005). .....	155
Figura 6-21. Ubicación del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	156
Figura 6-22. Distribución de los sondeos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. .	156
Figura 6-23. Exploración método convencional en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. .....	157
Figura 6-24. Límite líquido, límite plástico y humedad del sondeo S1. (Fontibón). Fuente propia.....	160
Figura 6-25. Límite líquido, límite plástico y humedad del sondeo S2. (Fontibón). Fuente: propia. ..	160
Figura 6-26. Límite líquido, límite plástico y humedad del sondeo S3. (Fontibón). Fuente: propia. ..	161
Figura 6-27. Perfil estratigráfico del Sondeo S1, Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. .....	162
Figura 6-28. Resistencia al corte en S2 y S3 mediante compresión inconfiada, triaxial UU, y veleta de campo en Fontibón. Fuente: propia. ....	166
Figura 6- 29. Peso unitario en los sondeos S1 y S2 del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. .....	167
Figura 6-30. Variación de la gravedad específica en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.....	170
Figura 7-1. Penetración con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia..	171

Figura 7-2. Ubicación de las exploraciones con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.....	172
Figura 7-3. Formato de registro de datos para la penetración con el cono propuesto. Fuente: propia: 173	
Figura 7-4. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.....	174
Figura 7-5. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1. (ECI). Fuente: propia.....	174
Figura 7-6. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto y con el cono convencional en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia. ....	175
Figura 7-7. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto y con el cono convencional en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia. ....	176
Figura 7-8. Sector 1 y 2 de la presión en la punta promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia. ....	177
Figura 7-9. Sector 1 y 2 de la fricción en el fuste promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia. ....	178
Figura 7-10. Exploración con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	179
Figura 7-11. Ubicación de las penetraciones con el cono propuesto CPTp1, CPTp2 y CPTp3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	180
Figura 7-12. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.....	181
Figura 7-13. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2. (Fontibón). Fuente: propia.....	182
Figura 7-14. Esfuerzo en la punta promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.....	183
Figura 7-15. Esfuerzo en el fuste promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.....	184
Figura 7-16. Sector 1 y 2 de la presión en la punta promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	185
Figura 7-17. Sector 1 y 2 de la fricción en el fuste promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	186

Figura 8-1. Efecto del área final desigual en el cono y el mango de fricción. Fuente: Robertson & Cabal (2010).	188
Figura 8-2. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.	190
Figura 8-3. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.	191
Figura 8-4. Formato de cálculo para el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” para el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.	192
Figura 8-5. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de compresión inconfina da en el sondeo S1 en el sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	193
Figura 8-6. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de compresión inconfina da en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	195
Figura 8-7. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo triaxial UU en el sondeo S2 en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	196
Figura 8-8. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo triaxial UU, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	197
Figura 8-9. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	198
Figura 8-10. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	200
Figura 8-11. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (obtenido a partir de la relación de fricción Fr en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	201
Figura 8-12. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	203
Figura 8-13. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (obtenido a partir del límite líquido de los sondeos S1 y S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	204
Figura 8-14. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (obtenido a partir del límite líquido de los sondeos S1 y S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.	206
Figura 8- 15. Parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” obtenido por los métodos A, B, C, D y E, en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.	209
Figura 8-16. Parámetro del cono $N_{kt}$ determinado a partir del Su del ensayo de compresión inconfina da vs el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.	210

Figura 8-17. Parámetro del cono $N_{kt}$ determinado a partir del $S_u$ del ensayo triaxial UU vs el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.....	211
Figura 8-18. Parámetro del cono $N_{kt}$ determinado a partir del $S_u$ del ensayo de veleta de campo vs el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia. ....	211
Figura 8-19. Parámetro del cono $N_{kt}$ determinado a partir de la relación de fricción “Fr” vs el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.....	212
Figura 8-20. Límite Líquido vs $N_{kt}$ obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del límite líquido y el cono propuesto del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia. ....	214
Figura 8-21. Parámetro del cono $N_{kt}$ versus el Índice de Plasticidad. Fuente: Lunne & Eide (1976).	215
Figura 8-22. Parámetro del cono $N_{kt}$ determinado a partir del $S_u$ del ensayo de compresión inconfiada versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.....	215
Figura 8-23. Parámetro del cono $N_{kt}$ determinado a partir del $S_u$ del ensayo triaxial UU versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.....	216
Figura 8-24. Parámetro del cono $N_{kt}$ determinado a partir del $S_u$ del ensayo de veleta de campo versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia. ....	216
Figura 8-25. Parámetro del cono $N_{kt}$ determinado a partir de la relación de fricción “Fr” versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.....	217
Figura 8-26. Índice de Plasticidad versus parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del Índice de Plasticidad y el cono propuesto del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.....	219
Figura 8-27. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.....	220
Figura 8-28. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.....	221
Figura 8-29. Formato de cálculo para el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”, para el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) Fuente: propia.....	222
Figura 8-30. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad ( $S_u$ , obtenida del ensayo de compresión inconfiada en el sondeo S1 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia. .	223
Figura 8-31. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad ( $S_u$ obtenida del ensayo de compresión inconfiada en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.....	225
Figura 8-32. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad ( $S_u$ obtenida del ensayo triaxial UU en los sondeos S2 y S3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia. ....	226

Figura 8-33. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo triaxial UU en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia. ....	228
Figura 8-34. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia. ....	229
Figura 8-35. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en el Sitio de Investigación 2). Fuente: propia. ....	231
Figura 8-36. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia. ....	232
Figura 8-37. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (Obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia. ....	234
Figura 8-38. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Obtenido a partir del límite líquido de los sondeos S1, S2 y S3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia. ....	235
Figura 8-39. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (Obtenido a partir del límite líquido de los sondeos S1, S2 y S3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia. ....	237
Figura 8-40. Parámetros del cono “Nkt” obtenidos por los métodos A, B, C, D y E, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	240
Figura 8-41. Parámetro del cono “Nkt determinado a partir del Su del ensayo de compresión inconfínada vs el límite líquido del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	241
Figura 8-42. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo triaxial UU vs el límite líquido del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	242
Figura 8-43. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo de veleta de campo vs el límite líquido del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	242
Figura 8-44. Parámetro del cono Nkt determinado a partir de la relación de fricción “Fr” vs el límite líquido del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	243
Figura 8-45. Límite Líquido vs Nkt obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del límite líquido y el cono propuesto del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	245
Figura 8-46. Parámetro del cono “Nkt determinado a partir del Su del ensayo de compresión inconfínada versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	246
Figura 8-47. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo triaxial UU versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	246
Figura 8-48. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo de veleta de campo versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia. ....	247

Figura 8-49. Parámetro del cono Nkt determinado a partir de la relación de fricción “Fr” versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia..... 247

Figura 8-50. Índice de Plasticidad versus Nkt obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del Índice de Plasticidad y el cono propuesto del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia..... 249

### **Índice de anexos**

Anexo 1. Ensayos de campo y laboratorio

Anexo 2. Diseño de la máquina hidráulica y el cono instrumentado

Anexo 3. Calibración del cono instrumentado

Anexo 4. Formatos de penetración del cono propuesto y el cono convencional.

Anexo 5. Formatos determinación parámetro del cono “Nkt”

Anexo 6. Costos

## Introducción

En la actualidad, la exploración del subsuelo en Colombia se realiza en gran parte mediante los métodos convencionales, mediante perforación mecánica o perforación manual, donde, para materiales cohesivos se ejecuta el ensayo de resistencia al corte con veleta o se extraen muestras mediante tubo de pared delgada para ensayos de laboratorio, y para materiales granulares se ejecuta el ensayo de penetración estándar (SPT).

En la ejecución del ensayo de corte con veleta en la mayoría de los casos no se cumple con la velocidad de corte, y en las muestras obtenidas con el tubo de pared delgada se genera alteración de la misma en diversos aspectos como son en el hincado del tubo, extracción de la muestra, conservación de la humedad natural, transporte, almacenamiento y tallado de la muestra. También, en el ensayo de penetración estándar se presenta alteración de los resultados del ángulo de fricción del suelo granular, debido a deficiencias en el peso de la masa, el número de golpes, y en la altura de la caída libre de la masa.

Dichas alteraciones generan cambios en los parámetros de resistencia al corte drenada del suelo, como son el ángulo de fricción y la cohesión efectiva ( $\phi'$ ,  $C'$ ), y no drenada ( $C_u$ ), parámetros que se utilizan para el análisis del comportamiento del suelo para diferentes campos de la geotecnia.

La exploración mediante técnicas avanzadas como son, Down Hole, ReMi, MASW, y refracción sísmica; y ensayos como el dilatómetro, dilatómetro sísmico SDMT, presiómetro de Menard PMT, piezocono CPTu, y piezocono sísmico SCPTu generan una alteración mínima en los suelos, lo que permite obtener parámetros de resistencia del suelo más confiables, una evaluación de propiedades más continua y detallada del suelo; sin embargo, se recomienda realizar exploraciones por métodos convencionales con el objeto de obtener una caracterización detallada, complementando la evaluación de propiedades de campo con los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio a muestras alteradas e “inalteradas”.

En la actualidad, en Colombia la aplicación de técnicas avanzadas de exploración es limitada; en la Figura 1-1 se observan las exploraciones realizadas con técnicas avanzadas en Colombia, y en la Figura 1-2 se encuentran los ensayos CPTu, DMT y presiómetro ejecutados para el diseño del metro en la ciudad de Bogotá.



Figura 1-1. Exploraciones realizadas con técnicas avanzadas en Colombia. Fuente: Rodriguez (2015).



Figura 1-2. Exploraciones realizadas con técnicas avanzadas en Bogotá. Fuente: Rodriguez (2015).

Las exploraciones con técnicas avanzadas se ven limitadas por el alto costo de los equipos; las empresas fabricantes de los equipos son extranjeras y tienen poca representación en el país, además del alto costo de los mantenimientos correctivos del equipo.

Sin embargo, es importante que en el país se aumente el uso de estos métodos de exploración, dado que el crecimiento de la infraestructura del país con obras de gran inversión, necesita parámetros del suelo más confiables, que conlleven a diseños eficientes.

Una de las técnicas avanzadas de exploración es el ensayo de penetración estática de cono (CPT), el cual consiste en penetrar en el suelo de manera controlada una punta cónica, junto con un fuste (cuerpo cilíndrico), los cuales se encuentran instrumentados, obteniendo la presión en la punta, la fricción en el fuste, y la presión de poros.

A partir de la presión en la punta, la fricción en el fuste y la presión de poros, se puede obtener la resistencia al corte no drenada, el ángulo de fricción, y con el uso de correlaciones se determina el coeficiente de consolidación, la densidad relativa, la permeabilidad, el módulo de Young, módulo de corte, la relación de sobreconsolidación, la compresibilidad y sensibilidad de los suelos.

El equipo es penetrado por una máquina hidráulica a una velocidad constante de  $20 \pm 5$  mm/s, registrando mediante un sistema de adquisición de datos, la resistencia en la punta, la fricción en el fuste y la presión de poros cada 5 cm de penetración.

El ensayo de piezocono "CPTu" tiene la ventaja de obtener perfiles rápidos y continuos, así como datos confiables y repetibles dado que no depende de errores de operadores; sin embargo, tiene sus desventajas como lo son su alta inversión, requiere de personal calificado para su operación, no obtiene muestras durante la ejecución, y la penetración se ve restringida en gravas o materiales altamente cementados.

En el presente documento se propone para el ensayo de penetración estática de cono, registrar la presión en la punta y la fricción en el fuste mediante un sistema hidráulico con transductores hidráulicos, lo que conlleva a tener un equipo de menor costo, de fácil acceso a espacios limitados, ya que la máquina que aplica la carga se diseñó con unas dimensiones de 1.60 m de longitud por 1.0 m de ancho y 2.2 m de altura, de fabricación Colombiana, con un costo de mantenimiento más bajo, dado que la mayoría de sus partes son de fabricación nacional, disminuyendo costo de importación.

Se diseña y fabrica un cono instrumentado con transductores hidráulicos, con el objeto de registrar la presión en la punta y fricción en el fuste en arcillas de consistencia blanda, siendo necesario diseñar y configurar un sistema de adquisición de datos, acompañado de un software para el procesamiento y almacenamiento de la información.

Dichos conos se penetran en el subsuelo por medio una maquina hidráulica a una velocidad de  $20 \pm 5$  mm/s, la cual es anclada en el terreno mediante tornillos helicoidales; en el presente documento se describe el diseño y la fabricación de dicha máquina.

Se establecen dos sitios de Investigación, el primer sitio corresponde al campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería, y el segundo se encuentra ubicado en la localidad de Fontibón, en la carrera 104 A Bis No 23D-12. En Fontibón, se realizó el ensamble y puesta en funcionamiento de la máquina para hincar los sensores, así como el ensamble del cono. Una vez ensamblado el cono, se procede a realizar la calibración de los sensores, haciendo uso de una celda de carga calibrada, labor que se realizó en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

En cada uno de los sitios de Investigación, se ejecutaron tres penetraciones con el cono propuesto, registrando la presión en la punta y la fricción en el fuste, hasta una profundidad de 15 m.

En el sitio de la Escuela Colombiana de Ingeniería se llevó a cabo la penetración del piezocono convencional durante el desarrollo del proyecto titulado “Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el Sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería (SEGECI)” investigación realizada por los ingenieros Sarmiento & León (2016).

Una vez obtenida la presión en la punta y la fricción en el fuste con el cono propuesto en ambos sitios de Investigación, se procedió a comparar dichos resultados con los reportados por el piezocono convencional, para luego determinar el parámetro del cono “Nkt”, la cual se recomienda determinar localmente.

## Objetivos

### Objetivo general

Diseño, fabricación e implementación de un dispositivo para el ensayo de penetración estática de cono, utilizando sensores de presión hidráulica.

### Objetivos específicos

- Reunir información de ensayos de penetración estática de cono realizados en Bogotá.
- Describir y caracterizar geotécnicamente dos sitios de Investigación.
- Diseñar y fabricar la máquina de aplicación de carga estática con una velocidad de aplicación de carga de  $20 \pm 5$  mm/s.
- Diseñar y fabricar un cono instrumentado para registrar la presión en la punta, y fricción en el fuste.
- Hincar el cono instrumentado en los sitios de Investigación para el registro de la fuerza en la punta y fricción en el fuste.
- Determinar el parámetro del cono “Nkt” a partir del registro de la presión en la punta y la fricción en el fuste con el cono propuesto, junto con la resistencia al corte no drenada determinada mediante ensayos de laboratorio como son; compresión inconfiada, triaxial no consolidado no drenado, límite líquido, y ensayo de campo de resistencia al corte con veleta.
- Comparar y analizar la información adquirida por medio de los sensores de presión hidráulica, con los resultados obtenidos en la exploración CPT ejecutada en el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito durante la investigación titulada “Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el Sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería (SEGECI)”, realizada por los ingenieros Sarmiento & León (2016).

## **Alcance**

El presente proyecto de grado tiene como alcance:

- Diseñar y fabricar un cono instrumentado con su respectivo sistema de adquisición de datos, registrando la fuerza en la punta y la fricción en el fuste.
- Diseñar y fabricar la máquina para hincar el cono instrumentado, teniendo en cuenta una velocidad de aplicación de carga de  $20\pm 5$  mm/s, una fuerza de hincado de 5 toneladas y un sistema de anclaje al terreno.
- Establecer dos sitios de Investigación, el primer sitio corresponde a un lote ubicado en la localidad de Fontibón, el segundo, en el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. En Fontibón se ensambla, ajusta y pone en funcionamiento la máquina para hincar el cono instrumentado.
- Realizar sondeos por los métodos convencionales en los dos sitios de Investigación con el objeto de caracterizar geotécnicamente la estratigrafía, además, en ambos puntos se realiza el hincado del cono que registra la presión en la punta y fricción en el fuste.
- Comparar la presión en la punta y la fricción en el fuste obtenidos con el cono instrumentado, con los resultados registrados mediante el ensayo CPTu convencional ejecutado en el campus de la ECI.

## **Capítulo I**

### **Metodología de la Investigación**

Para dar cumplimiento al objeto del proyecto se desarrollaron las siguientes etapas:

1. Recopilar la información existente y revisión de referencias bibliográficas del ensayo CPT.
2. Diseño y fabricación de la máquina que aplica la carga, el cono instrumentado y el sistema de adquisición de datos.
3. Exploración geotécnica convencional en los sitios de Investigación.
4. Hincado del cono propuesto y el piezocono convencional en los campos de Investigación.
5. Procesamiento y análisis de la información geotécnica.

#### **1.1. Recopilación de la Información Existente y Revisión de las Referencias**

##### **Bibliográficas**

En el Capítulo II, se presentan los fundamentos teóricos del ensayo CPT, indicando los parámetros geotécnicos del suelo que se obtienen mediante este método de exploración, así como, el funcionamiento de los sensores en el piezocono. En el Capítulo III se encuentra una revisión bibliográfica de las investigaciones desarrolladas con el piezocono en Colombia, identificando que investigadores han determinado localmente el parámetro del cono “Nkt”.

#### **1.2. Diseño y Fabricación de la Máquina Hidráulica, el Cono y la Adquisición de Datos**

En el Capítulo IV, se describe el diseño mecánico e hidráulico de la máquina que aplica la carga estática, con una capacidad de 5 toneladas aproximadamente, para un cono de 60 mm de diámetro y una velocidad de aplicación de la carga de  $20 \pm 5$  mm/s. En el mismo capítulo se indica el diseño del cono instrumentado a partir de las dimensiones de los sensores de presión, y los vástagos y cilindros hidráulicos, así como el diseño del sistema de adquisición de datos, el cual registra cada segundo, la presión en la punta, y la fricción en el fuste, durante la penetración del cono instrumentado en el subsuelo.

Una vez diseñada la máquina que aplica la carga, el cono instrumentado y el sistema de adquisición de datos, se procede a su fabricación, proceso que se describe en el Capítulo V.

### **1.3. Exploración Geotécnica Convencional en los Sitios de Investigación**

Se establecen dos sitios de Investigación, el primero es el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ubicada en la carrera 45 N 205-59, y el segundo, en Fontibón, en la carrera 104 A Bis No 23D-12. En el Capítulo VI, se presenta la caracterización geotécnica, indicando la ubicación de los sondeos, su profundidad, los ensayos de campo y laboratorio ejecutados.

En cada uno de los sitios de Investigación se realizaron perforaciones de 15 m de profundidad mediante exploración convencional, realizando el ensayo de corte con veleta de campo y tomando muestras alteradas e inalteradas.

Las muestras inalteradas se tomaron mediante tubo de pared delgada tipo shelby, a las cuales se les determinó el peso unitario y la resistencia al corte no drenada mediante los ensayos de compresión confinada, triaxial en condición no consolidada no drenada. A las muestras alteradas se les determinó el contenido de humedad natural, el límite líquido, y el límite plástico.

### **1.4. Hincado del Cono Propuesto y el Piezocono Convencional en los Sitios de Investigación**

Una vez ensamblado, ajustado y calibrado el cono instrumentado, se procede a su hincado en los dos campos de Investigación, procedimiento que se describe en el Capítulo VII.

En cada uno de los sitios de Investigación se realizan tres penetraciones con el cono propuesto hasta una profundidad de 15 m, registrando la resistencia en la punta y la fricción en el fuste; los sitios de ensayos con el cono propuesto se ubicaron en cercanías a las perforaciones convencionales, y a las penetraciones realizadas con el piezocono convencional.

Para esta Investigación, se tuvieron en cuenta los datos registrados en la penetración del piezocono convencional, realizada en el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, durante el proyecto titulado “Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el Sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería (SEGECI)” realizada por los ingenieros Sarmiento & León (2016).

### **1.5. Procesamiento y Análisis de la Información Geotécnica**

Como parámetro geotécnico a analizar, se determina el parámetro del cono “Nkt”, mediante cuatro metodologías, las cuales se pueden consultar en el Capítulo VIII.

El parámetro del cono “Nkt” hace parte de la ecuación (1), con la cual se determina la resistencia al corte no drenada, a partir de la presión en la punta, que es registrada por el piezocono, y el esfuerzo vertical total.

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}} \quad (1)$$

Roberson P.K & Campanella R.G, (1984), recomiendan que el parámetro del cono sea determinada localmente, procedimiento que se realiza en los campos de Investigación a partir de las penetraciones con el cono propuesto.

## Capítulo II

### Marco Conceptual

#### 2.1. Exploración Convencional del Subsuelo

En una exploración geotécnica se identifican los estratos de depósitos donde se apoya una estructura propuesta, con el objeto de obtener la información necesaria para el ingeniero geotecnista, permitiéndole realizar las siguientes actividades.

- Identificar el estrato y profundidad de la cimentación
- Seleccionar el tipo de cimentación y su capacidad portante
- Determinar el nivel freático.
- Determinar posibles problemas con la cimentación como por ejemplo suelos expansivos, licuefacción, etc.)
- Recomendar procedimientos constructivos de la cimentación
- Calcular la presión lateral de tierras.

Es necesario que el ingeniero geotecnista realice una visita de campo con el objeto de obtener las siguientes características.

- Tipo de construcciones aledañas.
- Registro del nivel freático mediante Inspección de pozos, sumideros.
- Vegetación del sitio.
- La topografía, identificando surcos de agua, empozamientos de agua, materiales superpuestos en laderas, rellenos, flujos plásticos en laderas, etc.
- Estratificación del suelo en cortes para la construcción de vías.

La Investigación del sitio consiste en hacer una perforación manual o mecánica recolectando muestras de suelo a intervalos deseados para luego ejecutar ensayos de laboratorio que permitan caracterizar las propiedades físicas y mecánicas.

La profundidad de la perforación depende de la categoría de la vivienda según Tabla H.3.1-1 (NSR-10), la cual se determina según los niveles de la construcción y las cargas máximas en columnas (ver la Tabla 2-1 y la Tabla 2-2).

Tabla 2-1. Clasificación de las unidades de construcción por categorías.

<b>Categoría de la unidad de construcción</b>	<b>Según los niveles de construcción</b>	<b>Según las cargas máximas de servicio en columnas (kN)</b>
Baja	Hasta 3 niveles	Menores de 800 kN
Media	Entre 4 y 10 niveles	Entre 801 y 4000 kN
Alta	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4001 y 8000 kN
Especial	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8000 kN

Fuente: Título H, NSR-2010.

Tabla 2-2. Número mínimo de sondeos y profundidad.

Categoría Baja	Categoría Media	Categoría Alta	Categoría Baja	Categoría Especial
Profundidad mínima de sondeos: 6 m	Profundidad mínima de sondeos: 15 m	Profundidad mínima de sondeos: 25 m	Profundidad mínima de sondeos: 6 m	Profundidad mínima de sondeos: 30 m
Número mínimo de sondeos: 3	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 3	Número mínimo de sondeos: 5

Fuente: Título H, NSR-2010.

### ***Perforación de exploración***

La perforación de exploración se puede realizar con barreno (tornillo helicoidal), por percusión y lavado o por rotación.

La perforación con barreno es la más sencilla de realizar, llegando a máximo 6 m de profundidad en suelos blandos, donde se obtienen muestras alteradas. En suelos no cohesivos o de muy baja consistencia es necesario poner un tubo para evitar que la perforación se derrumbe.

La perforación por lavado consiste en inyectar agua a través de la tubería de perforación, la cual sale a alta presión y velocidad por el trepano disgregando el suelo. El agua y las partículas desmenuzadas se elevan por el hueco perforado y fluyen a la superficie por una conexión en T.

El sondeo por percusión se lleva a cabo en suelos duros, un trepano pesado se sube y baja mediante un guinche el cual corta el suelo; las partículas de suelo y agua inyectada suben a la superficie por la circulación del agua.

### ***Muestreo del suelo***

Durante la exploración se obtienen dos tipos de muestras de suelos, las alteradas y las “inalteradas”.

Las muestras “inalteradas” son útiles para:

- Contenido de humedad.
- Determinar límite líquido, límite plástico y límite contracción en suelos cohesivos.
- Densidad de los sólidos del suelo.
- Contenido de material orgánica.
- Clasificación del suelo.

Las muestras “inalteradas” son útiles para:

- Resistencia al corte
- Permeabilidad
- Consolidación

Durante la ejecución de los sondeos se identifican y describen visualmente los diferentes estratos. Recuperando muestras “inalteradas” en los suelos finos de consistencia blanda a media, mediante el tubo de pared delgada tipo Shelby.

### ***Ensayos de Laboratorio***

Las muestras que se obtienen son identificadas visualmente en el laboratorio y sobre un número representativo de los diferentes materiales encontrados, se ejecutan ensayos tendientes a conocer su comportamiento geomecánico. Las pruebas de laboratorio son:

- *Clasificación:*

Se emplean para identificar y clasificar los tipos de suelo en cada sitio explorado, desarrollando correlaciones entre propiedades de los mismos y parámetros de resistencia mecánica y deformación.

Entre los ensayos realizados se encuentran los límites de Atterberg y la composición granulométrica.

- *Ensayos físicos.*

Permiten establecer las condiciones geoestáticas del suelo natural, usualmente se determina la humedad natural y el peso unitario.

Estas pruebas junto con las de clasificación, permiten establecer una primera aproximación al comportamiento mecánico de los materiales encontrados, a partir de correlaciones establecidas por

diferentes autores.

- *Resistencia al Corte*

Es la relación entre la fuerza actuante con respecto al área paralela a la línea de acción de la fuerza que la masa de suelo opone a la falla.

La resistencia al corte se determina en el laboratorio usualmente por medio de dos tipos de ensayos: el ensayo de corte directo y el ensayo triaxial.

- *Corte directo*

En la Figura 2-1 se puede observar el montaje del equipo de ensayo de corte directo. El equipo de ensayo se conforma de una caja de corte metálica en la que se ubica la muestra de suelo. La caja se divide horizontalmente en dos partes. Se aplica una fuerza normal a la muestra mediante una placa de carga. La fuerza de corte se aplica a una de las partes de la caja, la cual se ira moviendo con respecto a la otra para provocando la falla en la muestra.

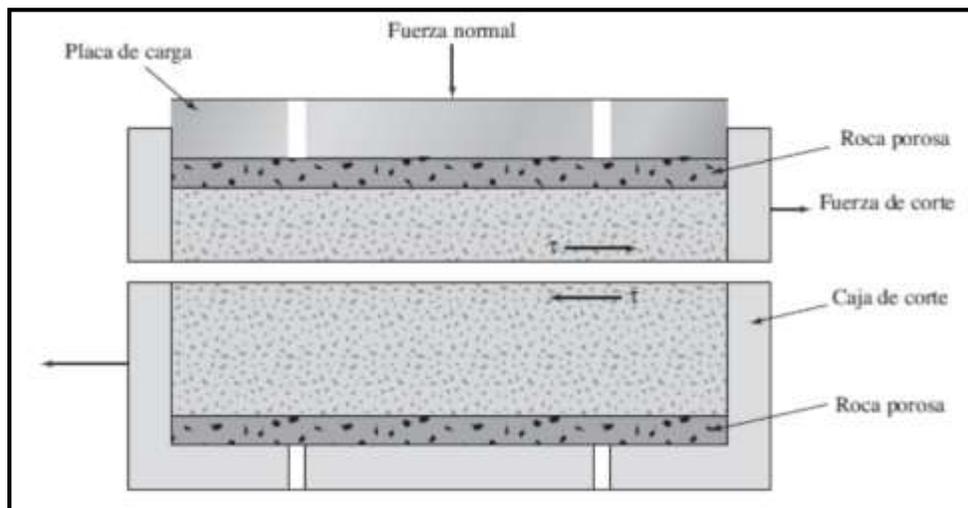


Figura 2-1. Diagrama de un arreglo de prueba de corte directo. Fuente: Das (2013).

- *Prueba triaxial*

En la Figura 2-2 se muestra un diagrama del montaje del ensayo triaxial.

En el ensayo triaxial se utiliza una muestra desde de 33 mm de diámetro hasta 100 mm de diámetro. La muestra está protegida por una membrana de latex, al cual se ubica dentro de una cámara cilíndrica de plástico la cual se llena con agua o glicerina. La muestra es sometida a una presión de

confinamiento debido a la presión del agua o la glicerina en la cámara. Para generar la falla en la muestra se aplica una fuerza axial por medio de un pistón de carga.

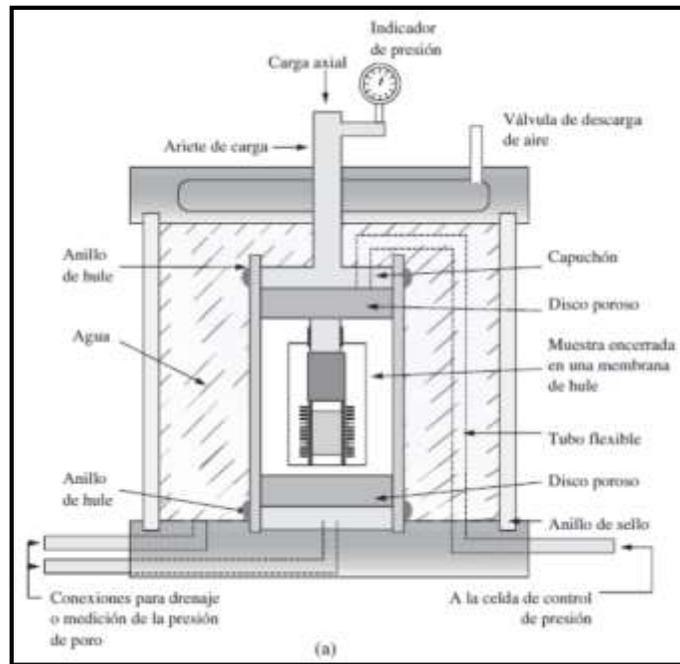


Figura 2-2. Diagrama de un equipo de prueba triaxial. Fuente: Das (2013).

Se proporciona conexiones para medir el drenaje o para medir la presión del agua intersticial. En general se miden tres tipos de pruebas estándar.

1. Prueba consolidada drenada (CD).
2. Prueba consolidada no drenada (CU).
3. Prueba no consolidada – no drenada (UU).

- *Prueba consolidada drenada (CD).*

En el ensayo consolidado drenado, a la muestra se le aplica una presión de confinamiento,  $\sigma_3$ , por medio de la compresión de fluido del agua o la glicerina que se encuentra en la cámara. A medida que se aplica la presión de confinamiento, la presión de agua en los poros de la muestra aumenta.

En el momento que se mantenga abierta la llave de drenaje el exceso de presión de agua intersticial o en los poros se disipa, generando la consolidación. Al mismo tiempo el esfuerzo desviador,  $\Delta\sigma_d$ , en la muestra se incrementa a un ritmo bajo permitiendo la disipación de presión de agua intersticial.

- *Prueba consolidada no drenada (CU).*

En este ensayo la muestra de suelo se consolida de igual manera como se indicó anteriormente. Luego cuando se aplica el esfuerzo desviador la línea de drenaje de la muestra se mantiene cerrada, impidiendo la disipación de la presión de poros.

- *Prueba no consolidada – no drenada (UU).*

En el ensayo no consolidado – no drenado, cuando se aplica la presión de la cámara  $\sigma_3$ , no se deja abierta la válvula de drenaje. Luego la muestra falla al aplicarle el esfuerzo desviador  $\Delta\sigma_d$ , siendo el procedimiento de ensayo más rápido.

- *Compresión inconfiada.*

En este ensayo no se aplica ningún esfuerzo de confinamiento quiere decir que  $\sigma_3$  es 0, aplicando la carga axial rápidamente llevando la muestra a la falla.

## **2.2. Exploración con nuevas tecnologías**

Debido al desarrollo de la electrónica, la instrumentación y telecomunicaciones se han venido desarrollando una serie procedimientos de exploración, que permiten obtener información del subsuelo por medio de la medición de algunos parámetros característicos del suelo.

Los ensayos de campo más utilizados son:

- Ensayo de reflexión sísmica.
- Down Hole, Up Hole, Cross Hole
- Dilatómetro de Marchetti.
- Presurómetro de Menard.
- Ensayo de piezocono.

A continuación, se describe brevemente cada uno de los ensayos nombrados anteriormente, profundizando en el piezocono.

### **2.2.1. Ensayo de reflexión sísmica, Down Hole, Up Hole, Cross Hole.**

#### ***Down Hole***

En una perforación se ubica a la profundidad de interés un receptor, mientras que en la superficie del terreno se ubica la fuente emisora o de perturbación que genera ondas (S), ya sea mediante un fuerte

golpe o una explosión inducida, dicha perturbación es registrado por un geófono que se encuentra ubicado en la perforación y se va ubicando a diferentes profundidades con el objeto de caracterizar el subsuelo (ver la Figura 2-3).

Se miden la velocidad de propagación de las ondas a través del suelo que se encuentra entre el equipo que genera las ondas y el geófono triaxial, realizando el ensayo a distintas profundidades se obtiene un perfil de velocidades vs la profundidad.

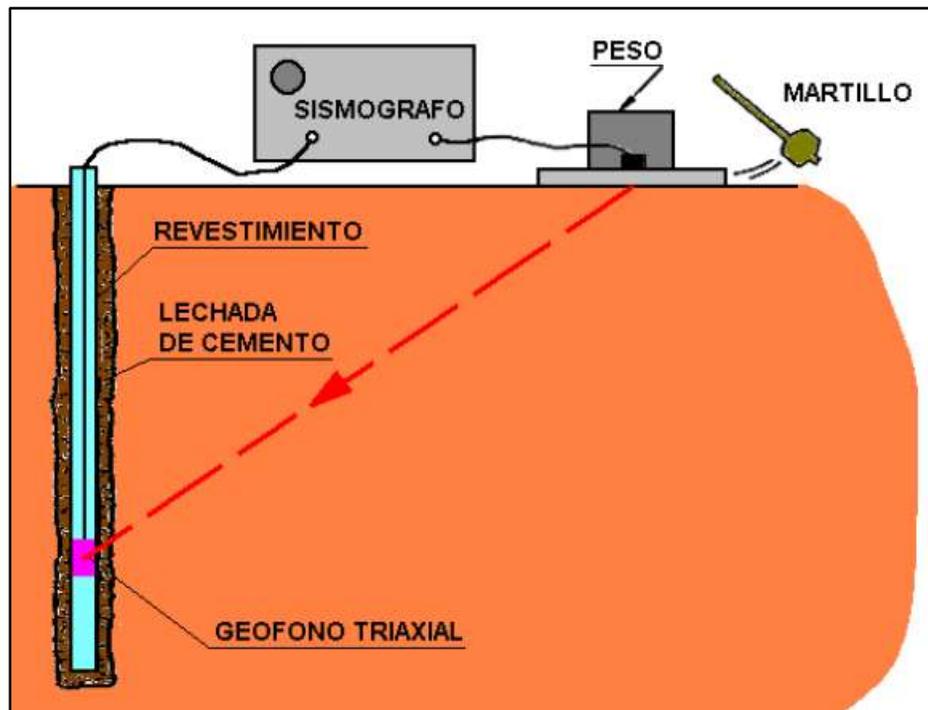


Figura 2-3. Componentes del ensayo Dow Hole. Fuente: CEDEX (2000).

### *Up Hole*

El método Up-Hole consiste en generar ondas en un punto de la perforación y registrar su llegada a la superficie. Generalmente se utilizan explosivos como fuente generadora ondas de corte (ondas S) y ondas longitudinales (ondas P) de manera simultánea. Las llegadas de las ondas S y P son monitoreadas por geófonos ubicados en la superficie.

### *Cross Hole*

Este ensayo se registra la velocidad de onda sísmicas en el subsuelo. La fuente emisora de energía se ubica en un sondeo y los receptores se ubican en otros dos sondeos, midiendo la velocidad de propagación de las ondas a través del subsuelo que se encuentra entre ambos sondeos. El ensayo se repite a diferentes profundidades obteniendo el perfil de velocidades vs la profundidad (ver la Figura 2-4).

Con la diferencia de los tiempos de llegada de los dos sondeos se calcula las velocidades de onda

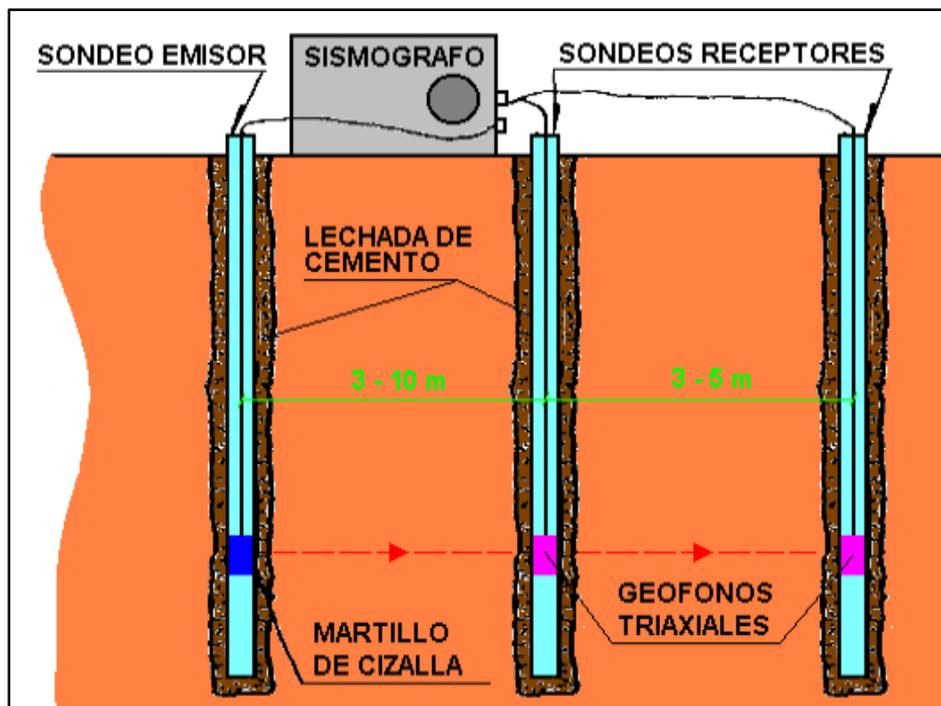


Figura 2-4. Componentes del ensayo cross hole. Fuente: CEDEX (2000).

#### **2.2.2. Dilatómetro de Marchetti.**

El ensayo está conformado por una paleta plana que se hinca en el terreno, el cual está conformado por una membrana metálica circular expandible horizontalmente en el suelo mediante gas a presión (ver la Figura 2-5).

Se determinan la presión  $P_0$  necesario para desplazar la membrana y la presión  $P_1$  para un movimiento de 1,1 mm en el centro de la misma, el procedimiento se repite en distancias de aproximadamente 20 cm.

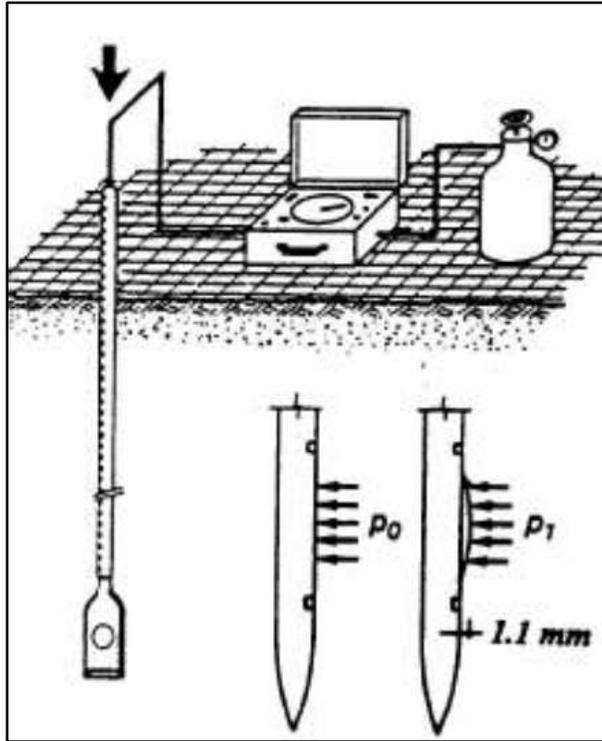


Figura 2-5. Dilatómetro de Marchetti. Fuente: Devincenzi & Frank (2004).

El ensayo aplica para suelos granulares como en suelos cohesivos. Las tres aplicaciones principales del dilatómetro de Marchetti son (Marchetti, In situ tests by flat dilatometer, 1980):

- Determinación del perfil estratigráfico
- Determinar los parámetros geotécnicos de los estratos penetrados.
- Cálculo de la capacidad portante del subsuelo y determinación de asentamientos

El ensayo arroja tres parámetros: Índice del material o tipo de suelo (ID), índice horizontal de esfuerzo (KD) y el Módulo DMT (ED). A partir dellos es posible estimar los diferentes parámetros geotécnicos de resistencia, deformabilidad e historia tensional del suelo. Entre las principales correlaciones se destacan el grado de sobreconsolidación (OCR), el coeficiente de empuje en reposo  $K_0$ , el  $C_u$  para arcillas y el ángulo de fricción  $\phi$  para arenas (Devincenzi & Frank, 2004).

### 2.2.3. Presurómetro de Menard.

El presurómetro de Menard, es un ensayo de campo en el que se le aplica carga lateral al terreno mediante una sonda cilíndrica expandible, registrando la carga y la deformación. En la Figura 2-6 se indica el montaje.

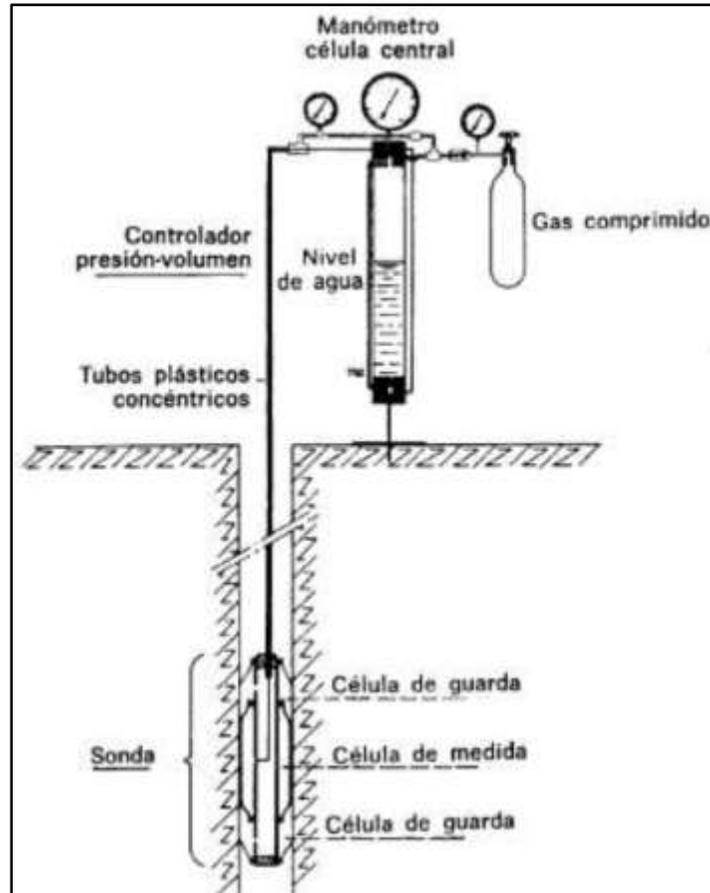


Figura 2-6. Montaje del presurómetro de Menard. Fuente: Devincenzi & Frank (2004).

Lo primero que se tiene que realizar es una perforación de unos 65 mm de diámetro, cuyas muestras se utiliza para caracterizar geotécnicamente el subsuelo.

Se desciende la célula a la profundidad a caracterizar el suelo, la cual se llenó previamente de agua.

Estando la sonda en la profundidad a caracterizar el subsuelo, se incremente la presión progresivamente.

Al finalizar el ensayo se tienen curvas de presión y deformación en la que se pueden distinguir tres sectores (ver la Figura 2-7):

- P a P<sub>0</sub>: Presión en la cual la sonda se adapta a las paredes de la perforación.
- P<sub>0</sub> a P<sub>f</sub>: Fase elástica lineal, en la cual se obtiene el módulo de deformación del suelo E.
- P<sub>f</sub> a P<sub>L</sub>: Fase plástica hasta la rotura del terreno. En este sector se puede calcular la presión de fluencia a la que el material deja de comportarse elásticamente, y la presión límite, a la que el subsuelo falla.

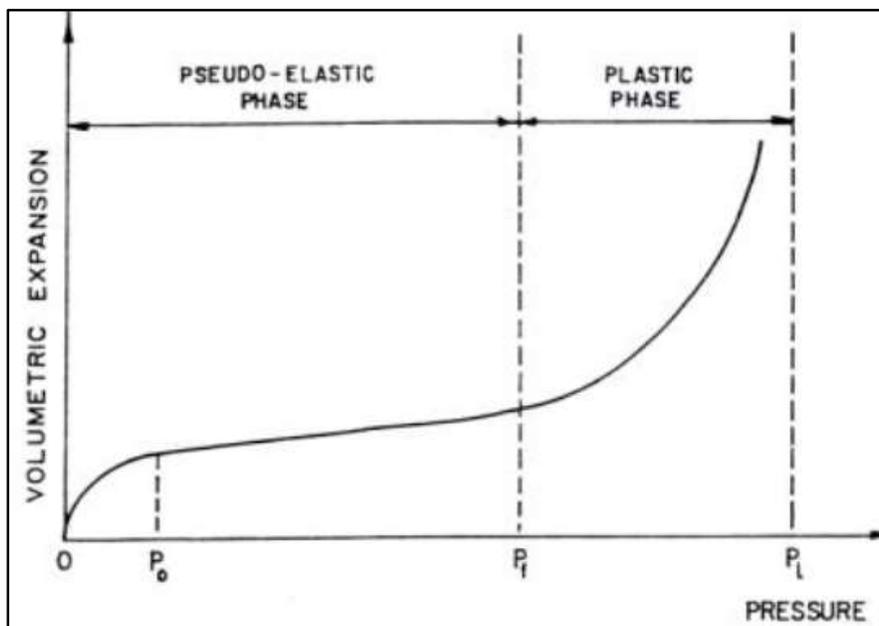


Figura 2-7. Curva presión vs volumen. Fuente: Sánchez (2010).

A partir de los resultados arrojados por el ensayo, y mediante correlaciones, se obtienen los diferentes parámetros mecánicos de interés del suelo, entre ellos principalmente la resistencia al corte no drenado en arcillas ( $C_u$ ), y el ángulo de fricción ( $\phi$ ) para arenas (Devincenzi & Frank, 2004).

#### 2.2.4. Ensayo de piezocono sísmico SCPTu.

Las pruebas de penetración con cono pueden clasificarse según la velocidad de avance de acuerdo con la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Tipos de prueba de penetración con cono.

Ítem	Tipo	Avance por punta		Uso	Observaciones
		Método	Velocidad		
1	Estático	Durante incrementos de carga constante	0	Solo para Investigación, en algunos lugares del mundo	En general demasiado lento para ser usado de campo
2	Cuasi - Estático	Por medio de un gato hidráulico o mecánico	1 a 2 cm/seg	En todo el mundo	Usualmente el cono tiene 10 cm <sup>2</sup> en la base y 60° en la punta
3	Dinámico	Por medio del impacto de un peso	Variable	En todo el mundo	Gran variedad de tamaños
4	Cuasi estático y dinámico	Combina el ítem 2 con el ítem 3 usando el dinámico cuando mediante la prueba cuasi-estática no se puede penetrar mas		Francia y Suiza	Usa puntas especiales
5	Tornillo	Rotación de un cono helicoidal	Variable	Suecia y Noruega	
6	Inercial	Dejando caer libremente el cono o impulsándolo hacia la superficie del suelo	Variable	Investigación del fondo marino	Útil para exploraciones poco profundas en áreas inaccesibles

Fuente: M.M & Levadoux JN (1986).

El ensayo CPTu es una prueba de carga lenta y cuasi – estática, en donde los penetrómetros vienen desde tamaños de 2 cm<sup>2</sup> a hasta 40 cm<sup>2</sup> (ver la Figura 2-8), donde los mini conos se utilizan para investigaciones poco profundas, mientras que los conos grandes pueden ser utilizados en suelos con presencia de gravas.



Figura 2-8. Gama de cono (de izquierda a derecha: 2cm<sup>2</sup>, 10cm<sup>2</sup>, 15 cm<sup>2</sup> y 40cm<sup>2</sup>). Fuente: Robertson & Cabal (2010).

El ensayo CPT consta de:

- Un penetrómetro
- Una máquina de empuje hidráulico.
- Cables y transmisores.
- Unidad de adquisición de datos.
- Tubería de penetración.
- Computador portátil.



Figura 2-9. Máquina de empuje hidráulico anclado. Fuente: Robertson & Cabal (2010).

El cono consiste en una punta cónica de  $60^\circ$  que tiene un pequeño reborde de aproximadamente 5 mm (0,2 pulgadas) de largo en la parte superior. Una celda de carga interna registrar la fuerza axial en la punta del cono ( $F_c$ ). Una segunda celda de carga se usa para registrar la fuerza axial a lo largo del fuste ( $F_s$ ), o bien, para registrar la fuerza total ( $F_c + F_s$ ).

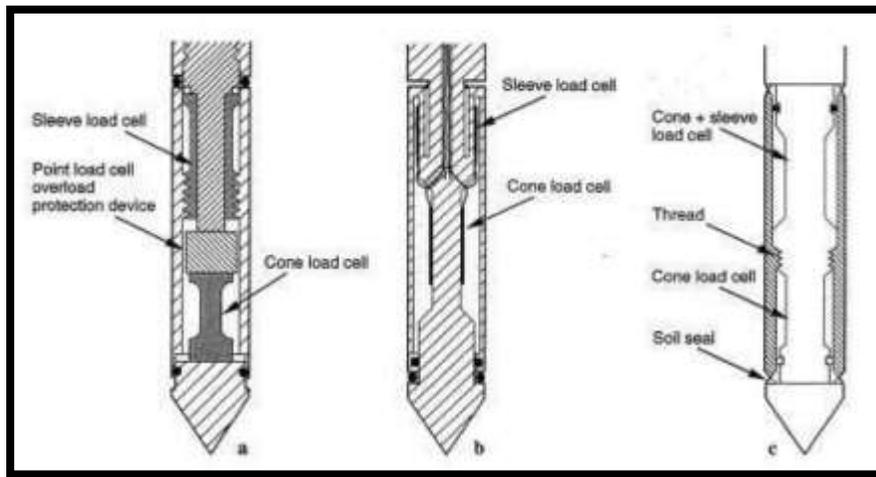


Figura 2-10. Diseño de conos. (a) Celda de carga en la punta y manguito de fricción en compresión (b) Celda de carga en la punta en compresión y celda de carga del fuste de fricción en tensión (c) diseño de celda de carga en serie por sustracción. Fuente: Robertson & Cabal (2010).

En la actualidad los sistemas de CPT incluyen mediciones de presión de poros y son conocidos como conos CPTu; éstos proporcionan resultados en forma digital. También se puede medir la velocidad de onda de corte los cuales son denominados como SCPTu. Por lo tanto, en un ensayo SCPTu se registra la resistencia al cono ( $q_c$ ), la fricción en el fuste ( $f_s$ ), la presión de poros ( $u$ ) y, la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), medidos en un perfil. La medición de la velocidad de onda de corte ha proporcionado una información valiosa sobre las correlaciones entre la resistencia del cono y el módulo del suelo.

La prueba consiste en hincar en el terreno a una velocidad constante de  $20 \pm 5$  mm/seg, un elemento cónico que permite medir mediante el uso de sensores, la resistencia a la penetración o resistencia en la punta ( $q_c$ ), y el esfuerzo de fricción en el fuste ( $f_s$ ) de un manguito ubicado encima de la punta cónica y la presión intersticial del agua, a medida que el cono penetra en el terreno. Cuando se mide la presión intersticial se denomina piezocono o (CPTu). Si solo se mide la resistencia por punta ( $q_c$ ) y la fricción lateral ( $f_s$ ), se denomina (CPT).

Para la penetración en suelos duros o rellenos puede ser necesario realizar una pre-perforación con el fin de evitar dañar el cono. La perforación previa, deberá realizarse con un diámetro ligeramente mayor que el cono. Es también común usar equipos manuales en los primeros metros en las zonas urbanas para evitar redes de servicios públicos subterráneos o avanzar en rellenos de carreteras.

La máquina de compresión debe ser configurada de forma que se obtenga una dirección de empuje lo más cerca como sea posible a la vertical. La desviación de la dirección de empuje inicial vertical no debe superar los 2 grados y las varillas de empuje deben ser revisadas para asegurar su rectitud. Los conos modernos tienen incorporados sensores sencillos que permiten una medida de la no verticalidad de la sonda. Esto es útil para evitar daños en el equipo y la rotura en las barras de empuje. Para profundidades de menos de 15m, no es importante la medida de verticalidad, siempre que el empuje inicial sea en dirección vertical.

Cuando se realiza la prueba con un piezocono CPTu, se dispone de un sensor de presión con un filtro para registrar datos de presión de poros, el cual se puede ubicar en alguna de las siguientes posiciones: sobre la punta del cono (posición u1), detrás de la punta del cono (posición u2), o atrás del fuste de fricción (posición u3).

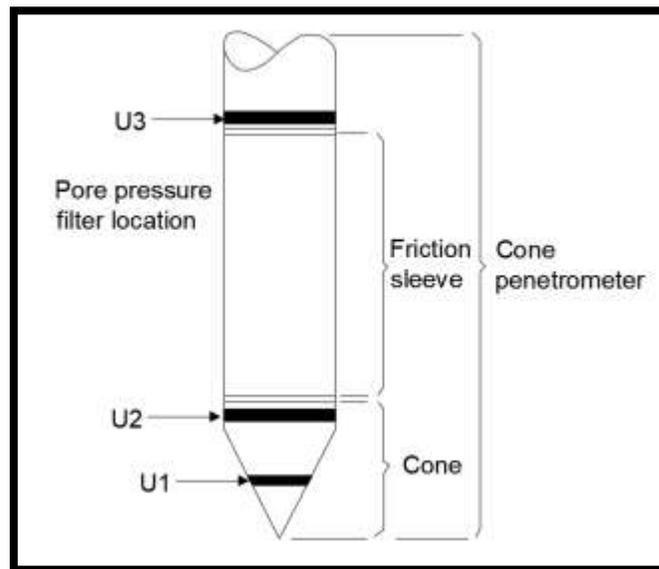


Figura 2-11. Localización de sensores de presión en un Piezocono. Fuente: Robertson & Cabal (2010).

El filtro se puede ubicar en la cara del cono (u1), o sobre la base del cono (u2). Varios autores han desarrollado investigaciones comparativas sobre este aspecto como (Campanella et al, 1988). La posición de (u1) o (u2) depende del tipo de suelo y los objetivos del estudio; la tendencia es a la ubicación del filtro encima de la base del cono (u2). (ASTM-D5778, 2007).

#### 2.2.4.1. Parámetros registrados con el CPTu.

La fuerza axial medida ( $F_c$ ) dividida por el área ofrece la resistencia por punta,  $q_c = F_c / A_c$ . Esta resistencia debe ser corregida por presiones intersticiales que actúan sobre áreas desiguales en la punta del cono, especialmente cobra importancia en arcillas y limos de consistencia blanda a firme. La resistencia por punta corregida o resistencia total en la punta del cono se designa como  $q_t$ , y requiere la calibración especial del penetrómetro en una cámara triaxial para determinar la relación de superficie neta ( $a$ ).

Debido a la geometría interior del cono, la presión ambiente del agua actúa sobre el hombro detrás del cono y en los extremos del manguito de fricción. Este efecto se refiere a menudo como el efecto final de área desigual.

En las arcillas y limos blandos, la medida de ( $q_c$ ) debe ser corregida por la presión de poros actuando sobre la geometría de cono, obteniendo así la resistencia de cono corregida, ( $q_t$ ). En la Ecuación (2) se indica la corrección de la resistencia en la punta (Robertson & Cabal, 2010).

$$q_t = q_c + u_2 (1 - a) \quad (2)$$

Donde “ $a$ ” es la relación de área neta, determinada en ensayos de calibración en laboratorio, con valores típicos entre 0.70 a 0.85.

En arenas limpias y suelos granulares densos, el valor de  $q_t=q_c$ ; por lo tanto, la corrección no es primordial. Sin embargo, en suelos arcillosos de consistencia blanda a firme, las presiones intersticiales que se generan son apreciables y la corrección puede ser muy significativa, del 20% al 70% en algunos casos.

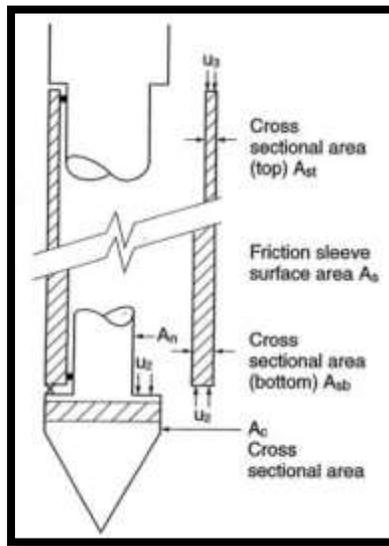


Figura 2-12. Área desigual de la punta del cono y los extremos del manguito de fricción. Fuente: Jamiolkowski M. L. (1985).

El factor de área de la punta “a” se usa para la corrección del valor medido de la resistencia por punta debido a presiones intersticiales y el factor de área del manguito de fricción (b), el cual se obtiene a partir de ensayos en cámaras de calibración, se usa para la corrección del valor medido de fricción en el manguito.

La fuerza axial medida sobre el manguito ( $F_s$ ) se divide por el área del manguito para obtener la fricción del manguito,  $f_s = F_s / a_s$ . Una corrección similar se debe aplicar a la fricción del manguito, sin embargo, la norma ASTM requiere que los conos tengan igual área final del manguito de fricción, lo que reduce la necesidad de dicha corrección (Robertson & Cabal, 2010).

Todos los conos deben tener los mismos extremos de la zona del manguito de fricción, con pequeñas zonas extremas para reducir al mínimo el efecto de la presión del agua en las mediciones del manguito de fricción. En la Ecuación (3) (Robertson & Cabal, 2010), se indica la corrección a la fricción del manguito.

$$f_t = f_s - (u_2 A_{sb} - u_3 A_{st}) / A_s \quad (3)$$

Donde

$f_s$  = Medida del manguito de fricción lateral.

$u_2$  = Presión de poros atrás de la punta del cono.

$u_3$  = Presión de poros en la parte superior del manguito.

Asb = Área de la sección transversal en la base del manguito.

Ast = Área de la sección transversal en la parte superior del manguito.

Un ejemplo de calibración de un cono dentro de una cámara presurizada triaxial para las tres lecturas se presenta en la Figura 2-13. Se puede observar que el transductor del agua intersticial proporciona una correspondencia de uno a uno con las presiones de la cámara aplicadas; la resistencia del cono por punta ( $q_c$ ) no corregida muestra significativamente menos respuesta, con una relación de área neta correspondiente  $a_n=0.58$  para este cono en particular. La respuesta en el manguito teóricamente no debería mostrar ninguna lectura. (Mayne, 2007)

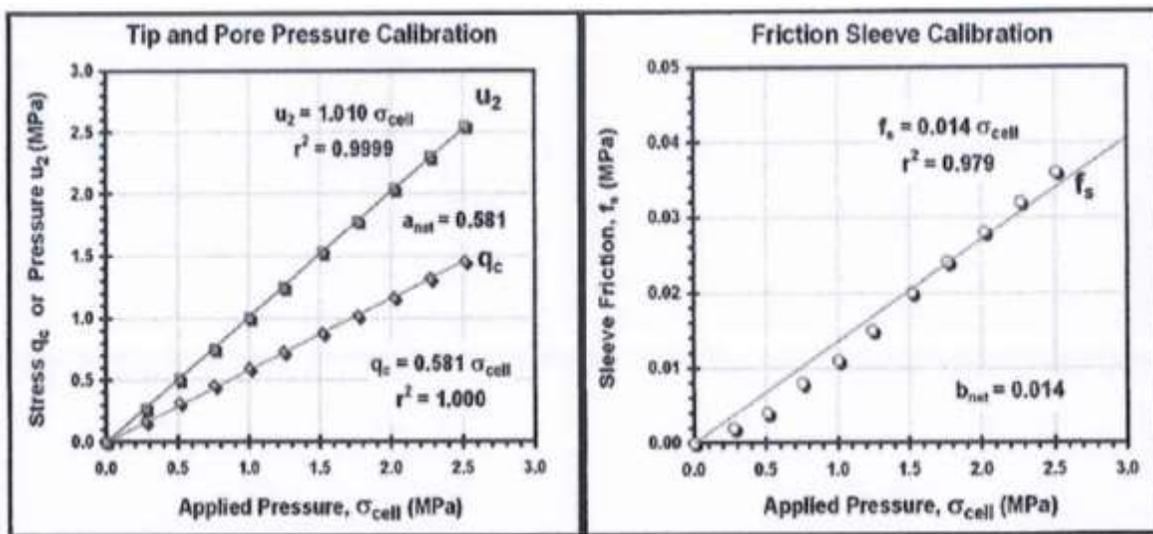


Figura 2-13. Resultados de calibración de un cono en una cámara triaxial para determinar la relación del área neta. Fuente: Mayne (2007).

A partir de los valores obtenidos de  $q_c$ ,  $f_s$  y  $\mu$  se derivan los siguientes parámetros in situ de este ensayo (ver la Ecuación ((4),  $Q_t$  = resistencia del cono normalizada, Ecuación (5),  $F_r$  = Relación de fricción normalizada, y Ecuación (6),  $B_q$  = Relación de presión de poros)

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad (4)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \quad (5)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}} \quad (6)$$

Donde:

$q_t$  = Resistencia a la penetración por punta corregida

$f_s$  = Medida del manguito de fricción lateral

$U_2$  = Presión de poros atrás de la punta del cono

$U_0$  = Presión de poros de equilibrio (frecuentemente asumida como la presión hidrostática)

$\sigma'_{v_0}$  = Esfuerzo vertical efectivo in situ

$\sigma_{v_0}$  = Esfuerzo vertical in situ

Con el fin de analizar los resultados obtenidos en la prueba de penetración con cono (CPTu), desde el punto de vista de la resistencia por punta, se han propuesto las siguientes teorías:

- Teoría de Capacidad Portante:

En esta teoría, la resistencia a la penetración del cono se asume que es igual a la carga de falla de una fundación circular profunda.

Para determinar esta resistencia, se utiliza el método de equilibrio límite y el método de la línea de deslizamiento. En el método de equilibrio límite, se asume un mecanismo de falla y se realiza un equilibrio global de la masa de suelo para determinar la carga de falla.

Por otra parte, en el método de la línea de deslizamiento, un criterio de falla (Criterio de Mohr Coulomb o Tresca) se combina con las ecuaciones de equilibrio para obtener una serie de ecuaciones diferenciales de equilibrio plástico. Una limitación de la teoría de capacidad portante, es que no considera las propiedades esfuerzo-deformación y los cambios de volumen del suelo.

- Teoría de Expansión de Cavidades:

De acuerdo con esta teoría, la presión requerida para producir un agujero profundo en un medio elástico-plástico es proporcional a la presión necesaria para expandir una cavidad del mismo volumen bajo condiciones similares (Bishop, 1945). Para utilizar la teoría de expansión de cavidades en la predicción de la resistencia a la penetración del cono, se requiere desarrollar soluciones de presión límite para expansión de cavidades en un suelo y relacionar la presión límite de expansión con la resistencia del cono.

Se han propuesto algunas soluciones para suelos cohesivos y no cohesivos, las cuales difieren principalmente en las suposiciones realizadas con respecto al comportamiento constitutivo del suelo en las zonas plásticas y elásticas alrededor de la cavidad expandida, a las contribuciones de expansión

de cavidades esféricas y cilíndricas, y la rotación de esfuerzos de la expansión de la cavidad cilíndrica a la resistencia de penetración vertical.

- Aproximación de Condición Estable:

En suelos isotrópicos homogéneos, la resistencia a la penetración del cono puede tratarse como un problema de estado estable. En esta aproximación, el proceso de penetración es visto como una condición estable de flujo del suelo alrededor de un cono fijo (Levadoux, 1986). El uso de este método ha sido restringido a arcillas no drenadas.

- Método Incremental de elementos Finitos:

La prueba de penetración de cono en suelos ha sido analizada por algunos investigadores, utilizando un método de elementos finitos con desplazamiento incremental. Debido a sus dificultades numéricas, especialmente en arcillas no drenadas, se presentan muchas incertidumbres relacionadas con la precisión de los factores de cono derivados del análisis de elementos finitos (Bishop, 1945).

- Pruebas en Cámaras de Calibración:

Debido a las dificultades en los análisis de las pruebas de penetración del cono en suelo, se han utilizado cámaras de calibración para establecer correlaciones empíricas entre la resistencia a la penetración del cono y las propiedades del suelo. Las cámaras de calibración son de tamaño limitado y por lo tanto, estas correlaciones no son aplicables a situaciones de campo sin el uso de factores de corrección.

#### **2.2.4.2. Parámetros geotécnicos obtenidos a partir del SCPTu.**

Numerosas correlaciones semi-empíricas se han desarrollado para estimar parámetros geotécnicos en una amplia gama de suelos con base al CPT. Estas correlaciones varían en su confiabilidad y aplicabilidad. Debido a que el CPT tiene sensores adicionales (por ejemplo, presión de poros CPTu y sísmico SCPTu), la aplicabilidad para estimar los parámetros del suelo varía. Los ensayos de CPT con mediciones de presiones de poros (CPTu) están comúnmente disponibles. En la Tabla 2-4 se muestra una estimación, con base en calificaciones de alta a baja fiabilidad de la aplicabilidad percibida del CPTu para determinar parámetros del suelo. Si se añade la componente sísmica, la capacidad para estimar la rigidez del suelo ( $E$ ,  $G$  &  $G_0$ ) mejora aún más.

Tabla 2-4. Idoneidad descrita de SCPTu para determinar los parámetros geotécnicos del suelo.

Tipo de suelo	Dr	$\psi$	Ko	OCR	S <sub>t</sub>	S <sub>u</sub>	$\phi'$	E,G	M	G <sub>o</sub>	k	Ch
Arena	2-3	2-3	5	5	N.A	N.A	2-3	2-3	2-3	2-3	3	3 – 4
Arcilla	N.A	N.A	2	1	2	1-2	4	2-4	2-3	2-4	2 - 3	2 - 3

Fuente: Robertson & Cabal (2010).

Dónde:

1: Alto.

2: Alto a moderado.

3: Moderado.

4: Moderado a bajo.

5: Baja fiabilidad.

Dr = Densidad relativa.

$\psi$  = Parámetro de estado.

E, G = Módulo de Young y de corte.

OCR = Relación de sobre consolidación.

S<sub>u</sub> = Resistencia al corte no drenada.

Ch: = Coeficiente de consolidación.

$\phi'$ : = Angulo de fricción.

Ko = Relación de esfuerzos in situ.

G<sub>o</sub> = Módulo de corte a pequeñas deformaciones.

M = Compresibilidad.

St = Sensibilidad.

K = Permeabilidad.

### 2.2.4.3. Tipo de comportamiento del suelo SBT.

La principal aplicación del ensayo de CPT es identificar perfiles de suelo y tipos de suelos. Es típico que la resistencia del cono, (qt) es alta en arenas y baja en arcillas, mientras que la relación de fricción ( $R_f = f_s / qt$ ) tiende a ser baja en las arenas y alta en arcillas. El CPT no indica el tipo de suelo sobre la base de las características físicas, como, por ejemplo, la distribución de tamaño de grano, pero indica una estimación de las características mecánicas (resistencia y rigidez) del suelo, o el Tipo de Comportamiento del Suelo (SBT).

En cuanto a la identificación de tipo de suelos mediante el Piezocono, ha habido un proceso histórico pasando de tratar de identificar suelos como lo hace un método de clasificación convencional a tratar de ubicar comportamientos característicos.

#### 2.2.4.4. Aproximación No Normalizada (SBT).

El uso más común del ensayo de CPT es determinar el Tipo de Comportamiento del Suelo (SBT), gráfica sugerida por Robertson et al. (1986) y una versión actualizada, adimensional (Robertson, 2010). Esta gráfica que se muestra en la Figura 2-14 utiliza los parámetros básicos del CPT, la relación de resistencia cono,  $q_t$  y la relación de fricción,  $R_f$ . La gráfica es de carácter general, puesto que se ha calibrado en suelos de muchas partes del mundo, y puede proporcionar predicciones razonables respecto del tipo de suelo en sondeos CPT hasta aproximadamente 20 o 30 metros de profundidad. La superposición en algunas zonas se puede esperar y además las zonas pueden ser ajustadas de acuerdo con la experiencia local.

En esta propuesta se identifican nueve zonas, las cuales van desde suelos finos sensitivos con baja relación de fricción y baja resistencia en la punta hasta las zonas tipo 8 (Arena muy Densa a Arena Arcillosa) y 9 (Suelo fino muy firme) de la gráfica del Tipo de Comportamiento del Suelo (SBT), que se encuentra fuertemente sobreconsolidado o cementado. Esta aproximación es para la prueba CPT sin medición de presión de poros (ver la Tabla 2-5).

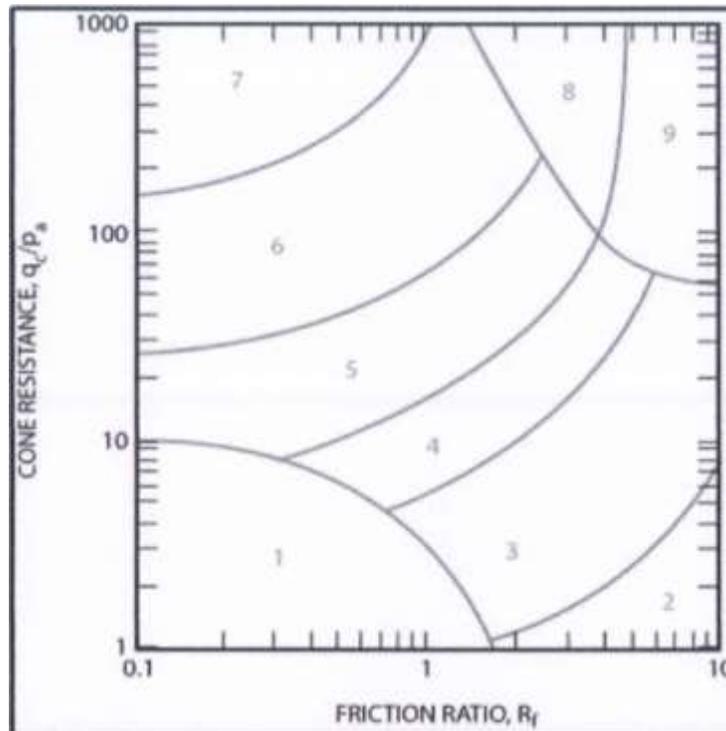


Figura 2-14. Tipo de Comportamiento del Suelo (SBT), para un Cono Dinámico CPT. Fuente: Robertson & Cabal (2010).

Tabla 2-5. Tipo de Comportamiento del Suelo (SBT), para un Cono Dinámico CPT.

<b>Zona</b>	<b>Tipo de comportamiento del suelo (SBT)</b>
1	Suelos fino sensitivo
2	Suelos orgánicos
3	Arcillas
4	Arcilla limosa a limo arcilloso
5	Limo arenoso a arena limosa
6	Arena
7	Arenas densas a gravosas
8	Arena muy densa a arena arcillosa
9	Suelo fino muy firme

Fuente: Robertson (2010).

#### **2.2.4.5. Aproximación Normalizada (SBTN).**

Según Robertson (2010), la resistencia a la penetración en la punta como la del manguito de fricción aumentan con la profundidad, debido al incremento del esfuerzo efectivo de la sobrecarga, los datos del CPT requieren ser normalizados para esfuerzos por sobrecarga muy superficiales o muy profundos.

Una aproximación muy común del Tipo de Comportamiento del Suelo basado en datos normalizados del CPT es la propuesta por Robertson (1990), la cual se muestra en la Figura 2-15, donde “Qt” y “Fr” corresponde a la resistencia en la punta normalizada y a la relación de fricción normalizada respectivamente (ver la Ecuación (4) y (5)); una zona central, que ha sido identificada, en la cual los resultados del CPT muestran suelos normalmente consolidados, sin cementación y con sensibilidad nula. La gráfica identifica las tendencias generales en cuanto a respuesta del suelo se trata, tales como, aumento de la densidad del suelo, OCR, la edad y la cementación para suelos arenosos, la historia de incrementos de esfuerzos y la del suelo ( $S_t$ ) para suelos cohesivos. Según Robertson (1990) la gráfica es de carácter mundial y sirve como guía para el tipo de comportamiento del suelo (SBT). La superposición en algunas zonas se puede esperar y las zonas pueden ser ajustadas de acuerdo con la experiencia local.

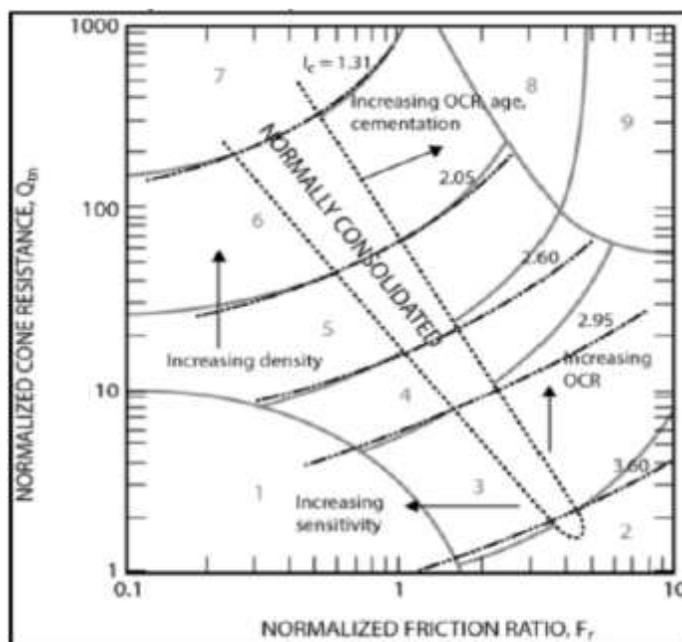


Figura 2-15. Tipo de Comportamiento del Suelo Normalizado (SBTN). Fuente: Robertson & Cabal (2010).

Tabla 2-6. Tipo de Comportamiento del Suelo Normalizado (SBTN).

Zona	Tipo de comportamiento del suelo (SBT)	Ic
1	Suelos fino sensitivo	N/A
2	Suelos orgánicos	>3.6
3	Arcillas	2.95-3.6
4	Arcilla limosa a limo arcilloso	2.6-2.95
5	Limo arenoso a arena limosa	2.05-2.6
6	Arenas	1.31-2.05
7	Arenas densas a gravosas	<1.31
8	Arena muy densa a arena arcillosa	N/A
9	Suelo fino muy firme	N/A

Fuente: Robertson & Cabal (2010).

Los gráficos completos SBTN normalizados sugeridos por Robertson (1990), incluyen una gráfica adicional con base en los parámetros de presión de poros normalizada, Bq. En la Ecuación (7) se indica la razón de presión de poros Bq, (Robertson & Cabal, 2010).

$$B_q = \frac{u_2 - u_o}{q_t - \sigma_{vo}} \quad (7)$$

Dónde:

$B_q$  = Razón de presión de poros.

$q_t$  = Resistencia a la penetración por punta corregida.

$U_2$  = Presión de poros atrás de la punta del cono.

$U_0$ : Presión de poros de equilibrio (frecuentemente asumida como la presión hidrostática).

$\sigma'_{vo}$  : Esfuerzo vertical efectivo in situ.

$\sigma_{vo}$ : Esfuerzo vertical in situ.

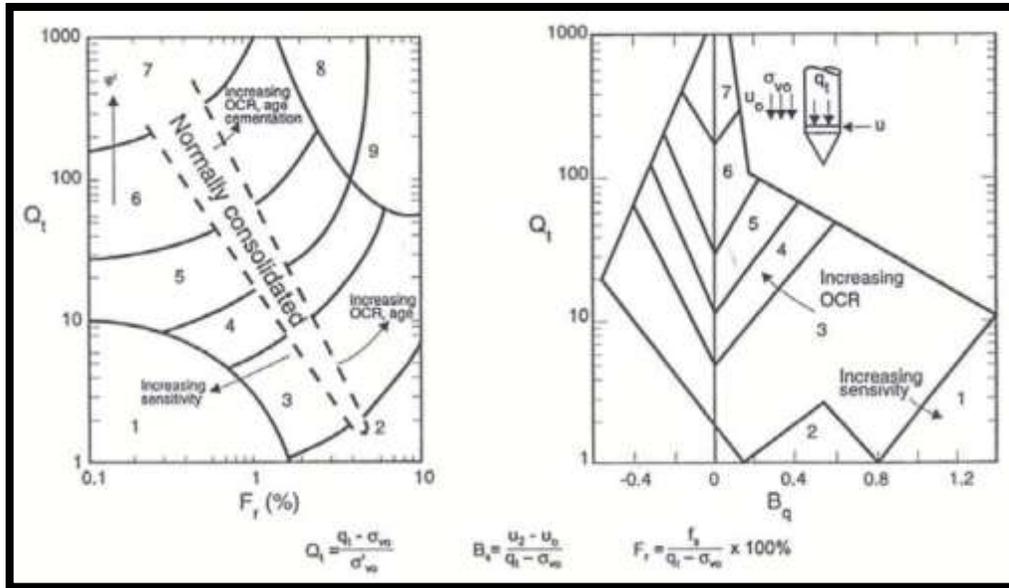


Figura 2-16. Tipo de Comportamiento del Suelo Normalizados (SBTN)  $Q_t$ - $F_r$  y  $Q_t$ - $B_q$ . Fuente: Robertson & Cabal (2010).

Tabla 2-7. Tipo de Comportamiento del Suelo Normalizados (SBTN)  $Q_t$ - $F_r$  y  $Q_t$ - $B_q$ .

Zona	Tipo de comportamiento del suelo
1	Sensible, grano fino
2	Suelos orgánicos – turbas
3	Arcillas – arcilla a arcillas limosas
4	Limo mezclado con limo arcilloso a arcilla limosa
5	Mezclas de arenas, arenas limosas y limos arenosos
6	Arenas; arenas limpias a arenas limosas
7	Arenas con grava a arena
8	Arena muy firme a arena arcillosa
9	Muy firme de grano fino

Fuente: Robertson & Cabal (2010).

La clasificación del tipo de suelo se puede mejorar, si también se recogen datos de presión de poros. Para esto se registra la disipación de la presión de poros durante una pausa en la penetración. En suelos arenosos cualquier exceso en la presión de poros se disipa muy rápidamente, mientras que en arcillas la tasa de disipación puede ser muy lenta.

Según Robertson (1990), para simplificar la aplicación de la gráfica de SBTN, los parámetros del cono normalizados  $qt$  y  $Fr$ , pueden ser combinados dentro de un Índice de Comportamiento del tipo de suelo  $I_c$ , el cual puede ser definido de la siguiente manera (ver la Ecuación (8)).

$$I_c = ((3.47 + \log(qt))^2 + (\log(Fr) + 1.22)^2)^{0.5} \quad (8)$$

Dónde:

$qt$  = Resistencia del cono normalizada.

$Fr$  = Razón de fricción normalizada.

Estudios independientes han demostrado que la gráfica del SBTN normalizada tiene un porcentaje de confiabilidad mayor al 80% al compararla con muestras obtenidas en el terreno.

#### **2.2.4.6. Peso unitario.**

El peso unitario total puede ser estimado a partir de los resultados de CPT, empleando la Ecuación (9) y la Figura 2-17.

$$\gamma = \gamma_w * (0.27 * \log(Rf) + 0.36 * \log\left(\frac{qt}{pa}\right) + 1.236) \quad (9)$$

$Rf$ : Relación de fricción  $= (f_s/q_t) * 100$ , (%).

$qt$  : Resistencia a la penetración por punta corregida

$\gamma_w$ : Peso unitario del agua, en las mismas unidades de  $\gamma$

$Pa$ : Presión atmosférica, en las mismas unidades de  $qt$

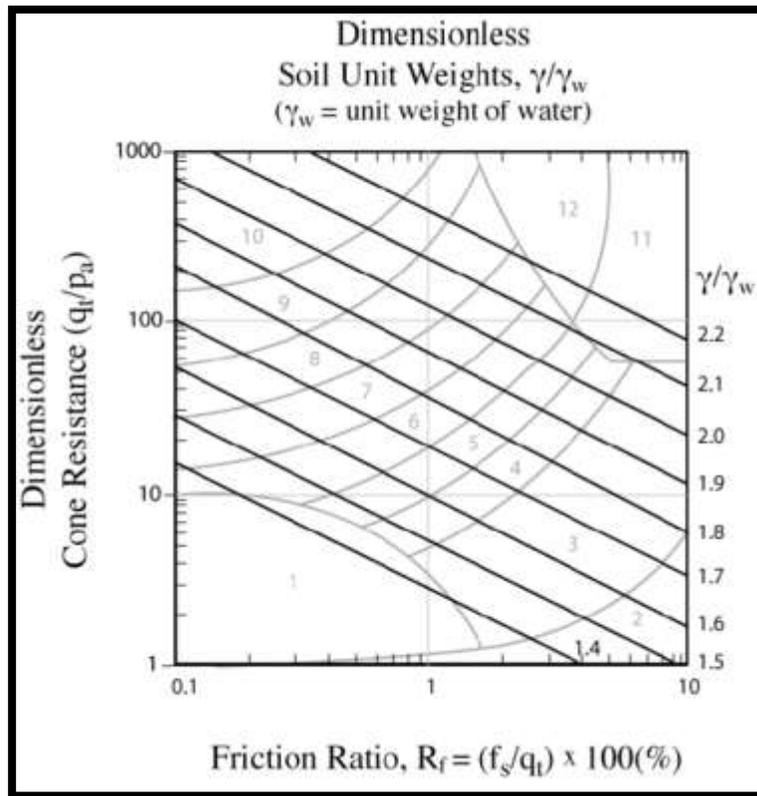


Figura 2-17. Peso Unitario adimensional  $\gamma/\gamma_w$ , basado en el ensayo CPT. Fuente: Robertson (2010).

#### 2.2.4.7. Resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ).

Soluciones teóricas han proporcionado alguna información sobre la forma de la relación entre la resistencia del cono y  $S_u$ . A continuación se presenta la correlación propuesta por F.H. & P.W (1990), para suelos finos (ver la Ecuación (10)).

$$S_u = \frac{qt - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (10)$$

Dónde:

$qt$  : Resistencia a la penetración por punta corregida por presión de poros.

$\sigma_v$ : Esfuerzo total vertical in situ.

$N_{kt}$ : Factor del cono.

Esta Ecuación se deriva de la Ecuación de capacidad de carga del suelo establecida para el caso de cimentaciones profundas (pilotes), en condiciones no drenadas, donde es aplicable el concepto  $\phi' = 0$  (ver la Ecuación (11). Carga por punta).

$$Q_p = A_p(CN_c + \gamma d) \quad (11)$$

Dónde:

Qp: Carga por punta

A<sub>p</sub>: Área transversal de la punta

C: Cohesión del material (igual a la resistencia media no drenada del suelo Su; aplicando el concepto de  $\phi=0$ )

N<sub>c</sub>: Factor de capacidad de carga (superficie horizontal del elemento que carga)

γ: Peso unitario total del suelo

d : Profundidad de cimentación

γd: Esfuerzo total vertical

Por lo tanto,

$$\frac{Q_p}{A_p} = q_c = S_u * N_c + \sigma_{vo} \quad (12)$$

En la Ecuación (13) se indica la correlación para la resistencia al corte no drenado.

$$S_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N_c} \quad (13)$$

Dónde:

N<sub>c</sub> = N<sub>kt</sub>

Debido a la gran variabilidad que puede tener el factor de cono N<sub>kt</sub>, a continuación, se presentan algunas propuestas para evaluar dicho factor:

Robertson & Cabal (2010), exponen que N<sub>kt</sub> es el factor de cono que a su vez depende de la rigidez, la sensibilidad y OCR del suelo, pero la experiencia en las pruebas realizadas por ellos ha demostrado que la sensibilidad del suelo tiene la mayor influencia. N<sub>kt</sub> se puede vincular a la sensibilidad del suelo a través de la relación de fricción normalizada, Fr, y puede ser representado aproximadamente por la Ecuación (14).

$$N_{KT} = 10.5 + 7 \text{Log}(Fr) \quad (14)$$

Según Robertson & Cabal (2010), normalmente N<sub>kt</sub> varía de 10 a 18, con un 14 de media para Su (promedio). N<sub>kt</sub> tiende a aumentar cuando crece la plasticidad y a disminuir cuando aumenta la

sensibilidad del suelo. Para los depósitos donde se dispone de poca experiencia, la estimación de ( $S_u$ ) debe realizarse usando la resistencia del cono ( $q_t$ ) y valores de los factores preliminares del cono ( $N_{kt}$ ) desde 14 hasta 16. Para una estimación más conservadora, se debe seleccionar un valor cercano al límite superior.

Lunne T., Robertson P.K., & Powell J.J.M. (1997), mostraron que NKT varía con  $B_q$  (razón de presión de poros), obteniéndose que NKT disminuye a medida que aumenta  $B_q$  y cuando  $B_q = 1,0$ , NKT puede ser tan bajo como 6.

Larsson R. & Mulabdic M. (1991), presentan la siguiente relación para  $N_{kt}$  en función del límite líquido (ver la Ecuación (15))

$$N_{KT} = 13.4 + 6.65LL \quad (15)$$

En arcillas blandas saturadas, donde hay gran incertidumbre en la determinación de  $q_t$ , puede determinarse la resistencia no drenada  $S_u$  en función del exceso de presiones de poros  $\Delta u$  (Larsson R. & Mulabdic M.,1991), cuando la presión de poros es medida en la posición inmediatamente después de la base del cono,  $u_2$ , a través de la Ecuación (16).

$$S_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta U}} \quad (16)$$

Basado en la teoría de expansión de cavidades, se ha demostrado que  $N_{\Delta u}$  varía entre 2 y 205. Investigaciones realizadas sobre arcillas ligeramente sobreconsolidadas, (Leroueil S., Demers D., & La Rochelle, 1995), teniendo como referencia la resistencia de la veleta de campo no corregida determinaron que  $N_{\Delta u}$  varía en un rango entre 7 y 9. Lunne et al. (1988) encontraron que  $N_{\Delta u}$  varía entre 4 y 10, para arcillas del Mar del Norte tomando la resistencia obtenida de ensayos de compresión triaxial consolidado no drenado como la resistencia de referencia. Basado en este mismo tipo de ensayos para determinar  $S_u$ , realizados sobre muestras de bloque, Karlsrud, Lunne, Kort, & Strandvik (1996), obtuvieron valores de  $N_{\Delta u}$  que varían entre 6 y 8.

Lunne et al. (1997), recomiendan evaluar la resistencia al corte no drenado  $S_u$  en suelos cohesivos a partir de los datos de  $CPT_u$  como sigue:

Para depósitos donde no se tiene penetraciones de CPT previas, se puede estimar  $S_u$  usando la resistencia total del cono ( $q_t$ ) a partir de factor de cono ( $N_{kt}$ ) en un rango de 15 a 20. Para un estimativo más conservador, se debe seleccionar un valor cerca del límite superior. Para arcillas de normalmente a ligeramente sobreconsolidadas  $N_{kt}$  puede estar cerca de 10 y en arcillas duras puede llegar a ser 30. En arcillas muy blandas donde puede haber un poco de incertidumbre con la exactitud en la medida

de ( $q_t$ ), se debe estimar  $S_u$  a partir de los datos de exceso de presión de poros ( $\Delta u_2$ ) medida inmediatamente encima del cono usando  $N\Delta u$  de 7 a 10. Para un estimativo más conservador, se debe seleccionar un valor cercano al valor superior.

Si existen datos anteriores disponibles del mismo depósito estudiado, deben ajustarse los valores sugeridos para reflejar dicha experiencia. Para proyectos grandes en los que se disponga de datos de campo y laboratorio de alta calidad pueden desarrollarse correlaciones específicas para el sitio, basadas en valores apropiados y confiables de  $S_u$ .

En la Figura 2-18 se indica la resistencia al corte no drenada determinada por medio de instrumentos de bolsillo como son el penetrómetro y la veleta de corte. También se presenta el “ $C_u$ ” estimado mediante resultado del CPT para dos factores de cono de  $N_c=15$  y  $N_c=20$  (Konkol & Balachowski, 2017), junto con valores estimados de “ $C_u$ ” mediante el modelo de calibración modificado Cam Clay “MCC”. Es de resaltar que los resultados obtenidos por medio de instrumentos de bolsillo no presentan una buena estimación.

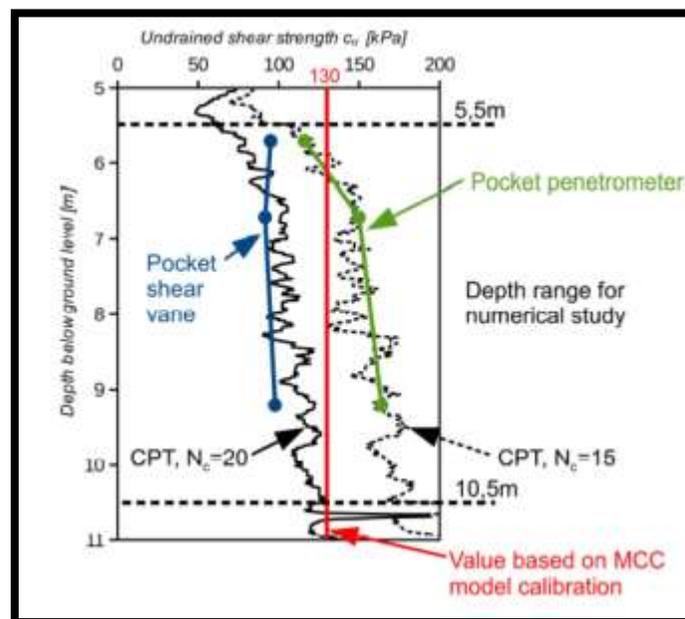


Figura 2-18. Estimación de la Resistencia al corte no drenado. Fuente: Konkol & Balachowski (2017).

### **Resistencia al corte no drenada remodelada.**

Según Gorman, Drnevich, & Hopkins, (1975) la resistencia al corte no drenada remodelada se toma como el valor medido de la resistencia a la fricción en el ensayo CPT (ver la Ecuación (17))

$$S_{U(REM)} = fs \quad (17)$$

### **2.2.4.8. Sensitividad.**

La sensibilidad ( $S_t$ ) de una arcilla es la relación entre la resistencia al corte no drenada inalterada y la resistencia al corte no drenada remodelada.

La resistencia al corte no drenada remodelada ha sido considerada por varios investigadores igual a la resistencia por fuste  $f_s$ , de modo que la sensibilidad de una arcilla podría calcularse a través de la expresión indicada en la Ecuación (18).

$$S_t = \frac{S_u}{S_{u(rem)}} = \frac{q_{t-\sigma_v}}{N_{KT}} \frac{1}{f_s} = \frac{7.1}{F_r} \quad (18)$$

Donde la constante varía de aproximadamente 5 a 10, con una media de aproximadamente 7.1. Es similar al valor de 7.5 sugerido por N.S. & T. (1988), utilizando relación de fricción no normalizada ( $R_f$ ) y el valor de 7.3 sugerido por Mayne P.W. & Campanella R.G., (2007).

### **2.2.4.9. Ángulo de fricción interna.**

Numerosos estudios han sido publicados para evaluar  $\phi'$  a partir de ensayos de CPT en arenas limpias y, básicamente los métodos caen en una de las siguientes tres categorías:

- Teoría de la expansión de cavidades
- Teoría de la capacidad portante
- Métodos empíricos, basados en pruebas en cámaras de calibración.

Avances significativos se han hecho en el proceso del desarrollo de las teorías del modelo de penetración con cono en arenas (Yu & Mitchell, 1998).

Roberson P.K & Campanella R.G (1984), sugirieron una correlación para estimar el ángulo de fricción pico ( $\phi'$ ) para arenas cuarzosas no cementadas, sin envejecer y moderadamente compresibles, basadas en resultados de pruebas de cámaras de calibración. (por ejemplo, arenas

carbonatadas o arenas con alto contenido de mica), el método tenderá a predecir ángulo de fricción bajos.

$$\tan\phi' = \frac{1}{2.68} \left[ \log \left[ \frac{qc}{\sigma'_{vo}} \right] + 0.29 \right] \quad (19)$$

#### 2.2.5.10. Densidad relativa (Dr).

Para suelos de grano grueso la densidad relativa es definida como se indica en la Ecuación (20).

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \quad (20)$$

Donde

$e_{m\acute{a}x}$  = máxima relación de vacíos

$e_{m\acute{i}n}$  = mínima relación de vacíos

$e$  = relación de vacíos en campo

Muchos investigadores tienen relaciones empíricas entre la presión en la punta y la densidad relativa (Jamolkowski M. L., 1985). En la Figura 2-19 se relaciona la resistencia en la punta normalizada y la densidad relativa.

Jamolkowski (1985), propone la correlación indicada en la Ecuación (21) entre la presión en la punta y la densidad relativa.

$$ID(\%) = -98 + 66 \text{Log} \frac{q_c}{[\sigma'_v]^{0.5}} \quad (21)$$

Donde

$q_c$  = presión en la punta.

$\sigma'_v$  = esfuerzo vertical efectivo.

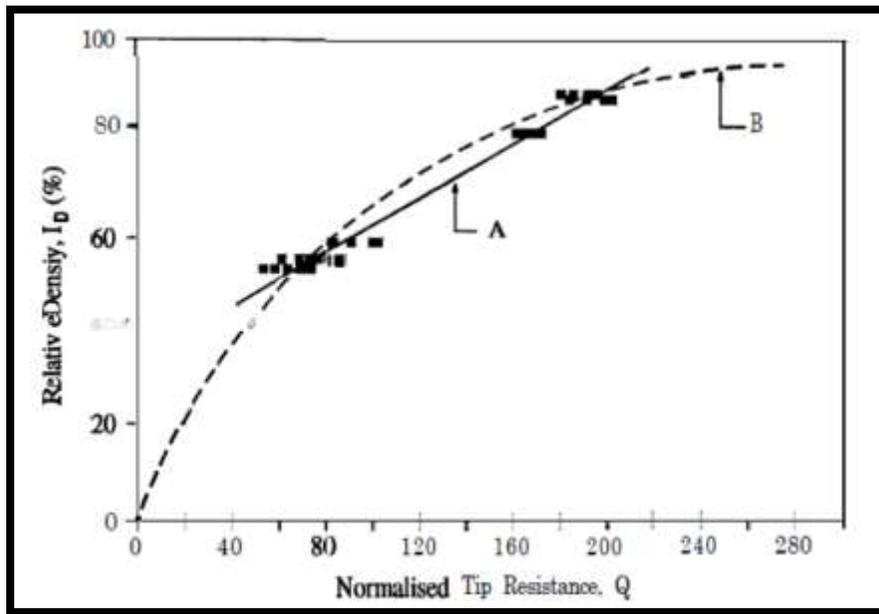


Figura 2-19. Relación entre la densidad relativa (ID) y la presión en la punta normalizada (qt).

Fuente: Bolton M. & Gui M.W.(1993).

### 2.2.5.11. Disipación de la presión de poros.

Adicionalmente a cualquier profundidad del ensayo de penetración se puede realizar el ensayo de disipación de presión de poros; la norma que describe el procedimiento de ensayo es la ASTM D-5778-95, en el cual se detiene la penetración del cono y se registran la disipación de la presión de poros  $\Delta u$  hasta alcanzar el equilibrio que viene siendo la presión hidrostática a la profundidad del ensayo, obteniendo así, información de la permeabilidad y de las características de consolidación.

En la Figura 2-20 se observa un ejemplo de un ensayo de disipación de presión de poros a una profundidad de 90.223 pie, en el cual la presión hidrostática es de 27 psi, durante la ejecución del ensayo CPTu la presión intersticial llega a 85.7 psi, luego se detiene la penetración, y la presión intersticial inicia a disiparse, obteniendo un tiempo de 170 segundos para lograr el 50 % de la disipación.

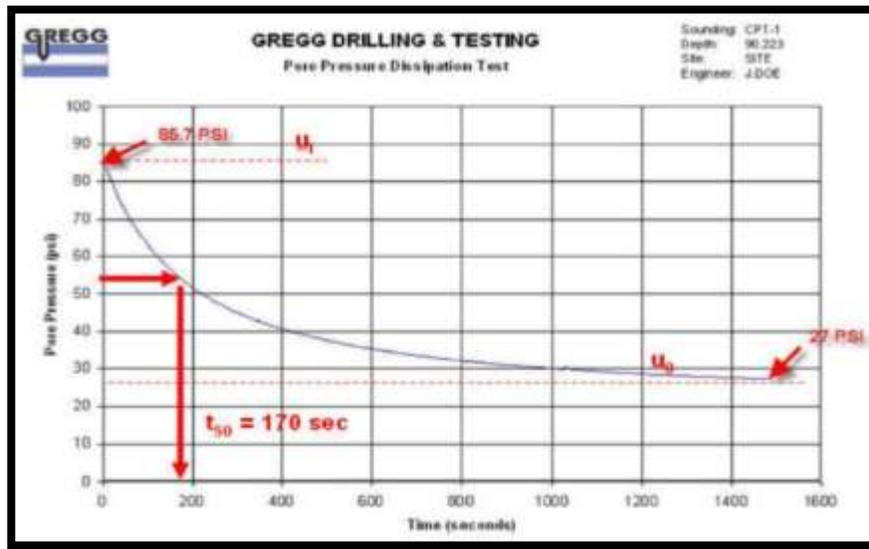


Figura 2-20. Ensayo de disipación de presión de poros. Fuente: P. K. Robertson y Gregg Drilling & Testing (2010).

En la Tabla 2-8 y Tabla 2-9 se indica el “ $t_{50}$ ” en minutos y el coeficiente de consolidación “ $C_v$ ” en  $\text{cm}^2/\text{min}$  obtenido en diferentes sitios de Investigación, durante ensayos de disipación de presión de poros, localizando el sensor de presión de poros en la posición “ $u_1$ ” y en la posición “ $u_2$ ” del penetrómetro. En la Tabla 2-9 se relacionan los sitios investigados, junto con el tipo de suelo investigado.

Tabla 2-8. Resumen de resultados de disipación de presión de poros posición u1 CPTU.

Item	Site (location)	Pore pressure location	t50, min		Cv, cm <sup>2</sup> /min	
			Range	Average	Range	Average
1	Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil )	u1	3.8-9.2	5.6	0.012-0.06	0.036
	Saugus, 1-5 (U.S.A)					
2	Saugus, 1-5 (U.S.A)	u1	4.9-8.8	6.7	0.06-0.12	0.09
		u1	0.2-2.4	1.1	0.12-0.6	0.36
3	Colebrook overpass B.C (Canada)	u1	1-7.2	2.9	0.018-0.17	0.093
4	McDonal Farm (Canada)	u1	2.8-6.0	4.4	1.1-3.3	2.2
5	Srong Pit. B.C. (Canada)	u1	6.3-10.5	8.4	0.038-0.17	0.057
6	Fucino (Italy)	u1	2.6-21	8.5	0.003-0.014	0.008
7	Porto Tolle (Italy)	u1	2.8-8.9	5.2	0.13-0.21	0.17
8	Brage (Norway)	u1	0.13-2.0	1.05	0.46-17.5	5.4
9	Drammen (Norway)	u1	1.6-4.5	3.5	0.004-0.008	0.006
10	Haga (Norway)	u1	14.6	14.6	0.17-0.35	0.26
11	Onsoy (Norway)	u1	2-12	5.9	0.06-0.13	0.1
12	Snorre (Norway)	u1	2-7	4.3	0.05-0.17	0.11
13	Stjordal – Halsen (Norway)	u1	0.15-0.53	0.27	2.9-14.7	7.9
14	Troll (Norway)	u1	3-24	8.3	0.04-0.16	0.12
15	Amherst (U.S.A)	u1	0.05-2.5	0.48	0.06-0.12	0.09
17	Attakapa Landing (U.S.A)	u1	8-50	24	0.014	0.024
18	Lake Alice Clay (U.S.A)	u1	1.2-13.3	7.31	0.06-0.57	0.43
19	Saint – Alban (Canada)	u1	4.1-6.5	5.0	0.003-0.006	0.0045
		u1	94.7- 117.7	106.2	0.006-0.018	0.12
20	Norco, Louisiana (U.S.A)	u1	49.4-69.9	59.7	0.012-0.036	0.024
		u1	25.7-33.4	29.6	0.012-0.09	0.051
21	Cowden (U.K)	u1	17-70	33	0.03-0.114	0.072
22	Madingley (U.K)	u1	1.5-12	4.5	0.019-0.048	0.04
23	Brent Cross (U.K)	u1	60-280	128	0.005-0.019	0.0119

Fuente: Robertson, y otros (1992).

Tabla 2-9. Lista de sitios investigados con referencias asociadas.

Localización	Tipo de suelo	Referencia
Amherst (U.S.A.)	Arcilla moderadamente a ligeramente sobreconsolidada	(Baligh & Levadoux, 1980)
Attakapa Landing (U.S.A.)	Arcilla blanda y limo arcilloso normalmente consolidado	(Tumay & Acar, 1984)
Saugus (U.S.A.)	Arcilla azul de Boston; moderadamente a ligeramente sobreconsolidada	(Baligh & Levadoux, 1980)
Brage, North Sea (Norway)	Arcilla marina y limo arenoso normalmente consolidado	(Norwegian Geotechnical Institute, Contract report Norsk Hydro, 1988)
Saint-Alban (Canadá)	Arcilla marina de Champlain, muy sensitiva, ligeramente sobreconsolidada	(Tavena, Chapeau, Rochelle, & Roy, 1974)
McDonald Farm (Canadá)	Limo arcilloso normalmente consolidado	(Gillespie & Campanella, 1991) (Hers, 1989)
Troll, North Sea (Norway)	Arcilla arenosa marina, ligeramente sobreconsolidada	(Norwegian Geotechnical Institute, Contract report Norsk Hydro, 1988)
Onsoy (Norway)	Arcilla limosa marina normalmente consolidada	(Mokkelbost, 1988)
Snorre, North Sea (Norway)	Arcilla marina limoarenosa ligeramente sobreconsolidada	(Norwegian Geotechnical Institute, Contract report Saga Petroleum A/S, 1988)
Stjordal-Halsen (Norway)	Arcilla marina limoarenosa normalmente consolidada.	(Senneset, Janbu, & Svano, Strength and deformation parameters from cone penetration tests, 1982)
Drammen (Norway)	Arcilla limosa normalmente consolidada, sensitiva	Mokkelbost (1988)
Strong Pit, B.C. (Canada)	Limo arcilloso glaciomarino, ligeramente a moderadamente sobreconsolidado.	(Campanella & Robertson, 1988)
Haga (Norway)	Arcilla marina, moderadamente sobreconsolidada	Mokkelbost (1988)
Fucino (Italy)	Limo arcilloso deposito lacustre, normalmente consolidado	(Associazione Geotecnica Italiana, 1979)
Porto Tolle (Italy)	Limo arcilloso blando, normalmente consolidado	(Battaglio, Jamiolkowski, Lancellotta, & Maniscalco, 1981)
Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil)	Arcilla limosa blanda, normalmente consolidado	(Sills, Almeida, & Danziger, 1988)
Norco, Louisiana (U.S.A.)	Arena limosa normalmente consolidada	(Tumay & Acar, 1984)
Langley, Lower 232 Street (Canadá)	Limo arcilloso sensitiva, ligeramente sobreconsolidado a normalmente consolidado	(Zavoral D.Z, 1988)
Laing Bridge South, B.C. (Canada)	Limo arcilloso blando, normalmente consolidado	Le Clair (1988)
Trieste (Italy)	Arcilla orgánica blanda homogénea, normalmente consolidada.	(Jamiolkowski, Lancellotta, & Wolski, 1983)
Site 1/11 (France)	Limo arcilloso	(Parez & Bachelier, 1981)
Glava (Norway)	Arcilla marina medianamente rígida sobreconsolidada	(Senneset, Sandven, & Janbu, 1989)
SLS (U.S.A.)	Arcilla limosa de consistencia blanda a mediana, ligeramente sobreconsolidada	(Kabir & Lutenerger, 1990)
Storz 264, Nebraska (U.S.A.)	Arcilla normalmente consolidada del lago Florence	(Lutenerger, Kabir, & Saye, 1988)
Brent Cross (U.K.)	Arcilla de Londres, fisurada, rígida altamente consolidada.	(Powell & Quaterman, 1988)
Bothkennar (U.K.) (Grangemouth)	Arcilla limosa orgánica blanda, ligeramente fisurada.	Powell et al. (1988)
Cowden (U.K.)	Glacial rígido	(Quarterman & Powell, 1988)
Madingley, (U.K.)	Arcilla limosa rígida fisurada	Lunne et al. (1986)

Fuente: Robertson, y otros (1992).

### 2.2.5.12. Ensayos de penetración con cono miniatura en cámaras de calibración.

El ensayo de penetración estática de cono (CPT) se viene ejecutando durante largo tiempo, el cual no proporciona propiedades del suelo directamente, sin embargo extensas investigaciones que han desarrollado correlaciones entre los datos suministrados por el CPT y las propiedades de suelos ya sea mediante ensayos de laboratorio o experimentos en cámaras de calibración como los ejecutados por Been & Jefferies (1992), Konrad (1997), y comparando con ensayos de campo como son Olson & Stark (2003), o análisis numéricos, incluyendo expansión de cavidades, elementos finitos o análisis de elementos discretos Shuttle & Jefferies (1998), Russell & Khalili (2002), Ahmadi & Byrne (2005), y Butlanska & Arroyo (2014)

Las cámaras de calibración proporcionan información de confianza para la interpretación de los datos registrados de campo con el CPT debido a que todo el procedimiento (la consolidación y preparación de la muestra) es ejecutada en el laboratorio, la cual puede ser monitoreada y controlada. Por lo tanto, los resultados obtenidos en la cámara de calibración pueden ser realmente usados para obtener correlaciones entre las propiedades mecánicas del suelo y la resistencia en la punta y el fuste. (Sepideh Damavandinejad Monfared, 2014).

En la Figura 2-21 se observan los elementos que hacen parte de una cámara de calibración.

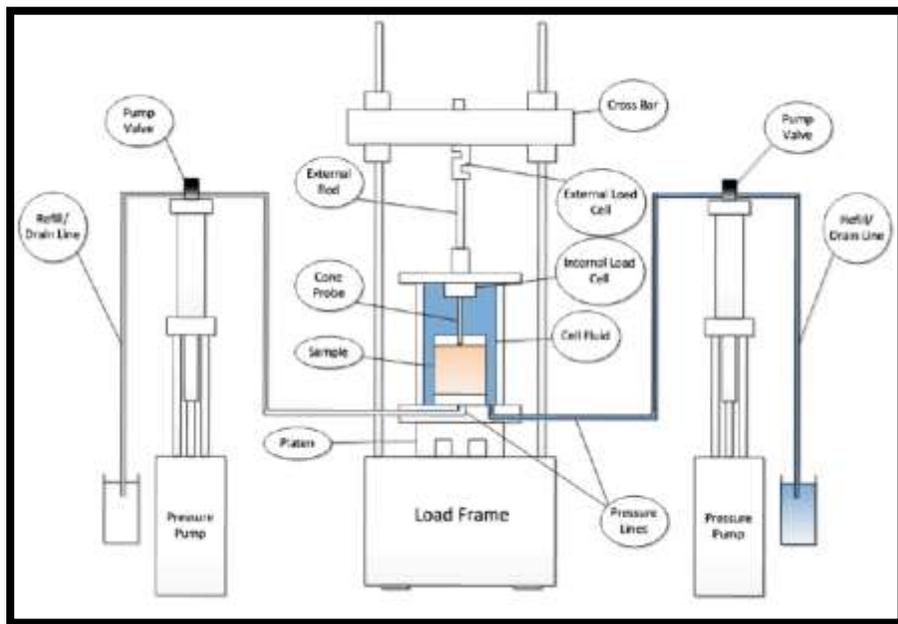


Figura 2-21. Configuración de una cámara de calibración. Fuente: Sepideh Damavandinejad Monfared (2014).

### Cono miniatura.

Varios investigadores como Ghionna and Jamiolkowski (1991); Harman (1976); Baldi, Bellotti, Ghionna, Jamiolkowski, & Pasqualini (1986); y Huntsman (1985), desarrollaron una cámara de calibración, haciendo uso de un CPT de 35.7 mm de diámetro, lo que conlleva a tener cámaras de aproximadamente 1.20 m de altura, dificultando la preparación de la muestra y el tamaño del marco de carga.

En la Figura 2- 22 se observa el cono miniatura diseñado y fabricado por el ingeniero Sepideh Damavandinejad Monfared (2014), el cual posee un diámetro de 6 mm, con un ángulo de 60°.

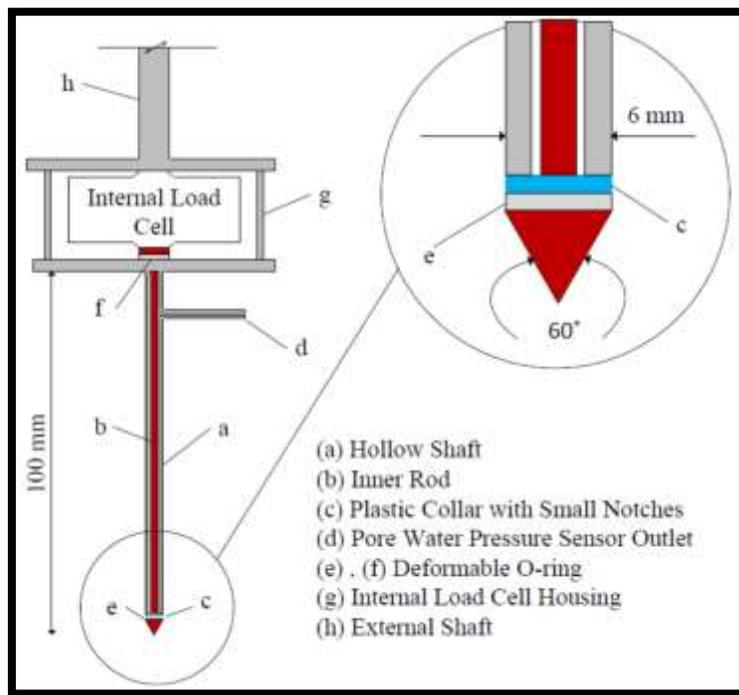


Figura 2- 22. Esquema de un cono miniatura. Fuente: Sepideh Damavandinejad Monfared (2014).

En la Tabla 2-10 se relacionan las dimensiones de las cámaras y de los conos desarrollados por diferentes autores

Tabla 2-10. Dimensiones de cámaras de calibración y conos miniatura desarrollados.

Institution	Sample dimensions (mm)		Cone diameter (mm)	Penetration rate (mm/min)	Chamber to cone diameter ration	Measured data	Material tested	Reference
	Diameter	Height						
Indian Institute of science	91	133.5	19.5	0.021	4.67	qc	Clean sand / silty sand	Kumar & Raju (2008)
Chuo University	100	200	6	2	16.67	qc	NA	Kokusho , Murahata, & Hushikida (2003)
University of Rhode Island	450	560	11.3	20	39.82	qc / fs	NA	Franzen (2006)
The University of Newcastle	100	185	10	0.012	10	qc	Sandy clay loam	Abedin (1995)
The University of New South Wales	460	840	16	20	52.5	qc / fs	Sydney sand	Pournaghiazar, Russel, & Khalili (2011)

Fuente: Sepideh Damavandinejad Monfared (2014).

En la Figura 2-23 se encuentra la tapa superior de la cámara con el mini cono y en la Figura 2-34 se indica la cámara triaxial de calibración modificada por el ingeniero Sepideh Damavandinejad Monfared para un cono miniatura.

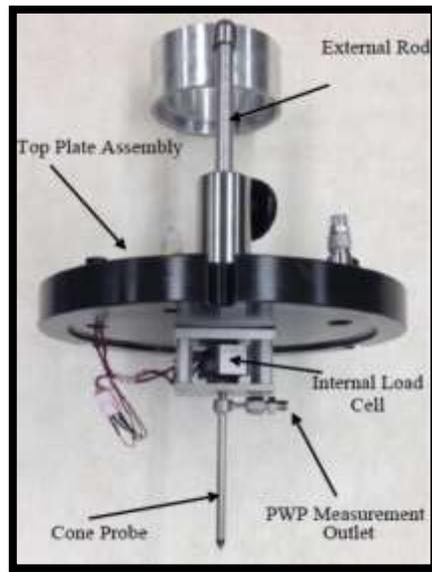


Figura 2-23. Montaje de la placa superior con mini cono. Fuente: Sepideh Damavandinejad Monfared (2014).

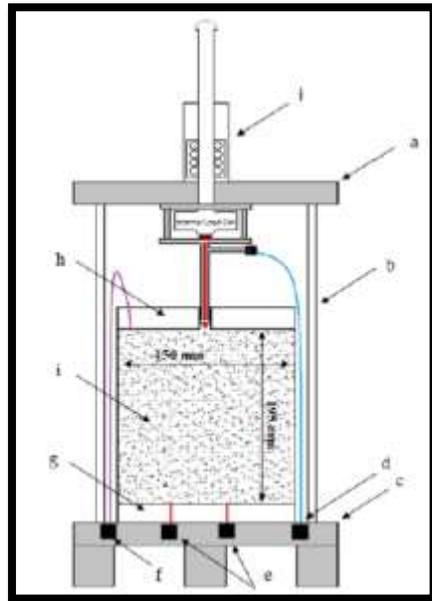


Figura 2-24. Esquemas de la cámara triaxial grande utilizada como cámara de calibración. (a: placa superior, b: celda acrílica, c: placa inferior, d: conexión de medición presión de poros, e: drenaje de la muestra, f: líneas de drenaje de muestras conectadas a la atmósfera, g: tapa inferior, h: tapa superior de la muestra, i: muestra, j: buje. Fuente: Sepideh Damavandinejad Monfared (2014).

## 2.3. Historia del Piezocono

### 2.3.1. Cono mecánico.

La primera prueba de penetrómetro cónico holandés fue realizada en 1932 por P. Barentsen, un ingeniero del Rijkswaterstaat (departamento de obras públicas) en Holanda. Se utilizó una tubería de gas de 19 mm de diámetro interior; dentro de esta, una varilla de acero de 15 mm podía moverse libremente hacia arriba y hacia abajo. Se adjuntó un cono de 10 cm<sup>2</sup> a la varilla de acero con un ángulo de vértice de 60° (ver la Figura 2-25), el cual se empujaba hacia abajo con la mano (Barentsen, 1936). Barentsen corrigió la resistencia del cono restando el peso de la varilla interior. La profundidad máxima de penetración fue de 10 a 12 metros y la resistencia de penetración se leyó en un manómetro.

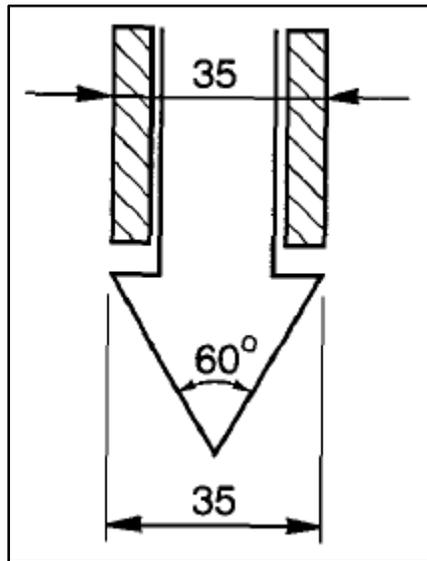


Figura 2-25. Cono Holandés antiguo. Fuente: Robertson & Cabal (2010).

El primer director del laboratorio de mecánica de suelos de Delft, T.K. Huizing diseñó el primer equipo de penetración de cono de 10 toneladas operado manualmente, cuya primera prueba se llevó a cabo en 1935 (Graaf y Vermeiden, 1988). En la Figura 2-26 se muestra una fotografía de este sistema. Este dispositivo también utilizó una "carcasa" exterior de 19 mm que elimina la fricción.

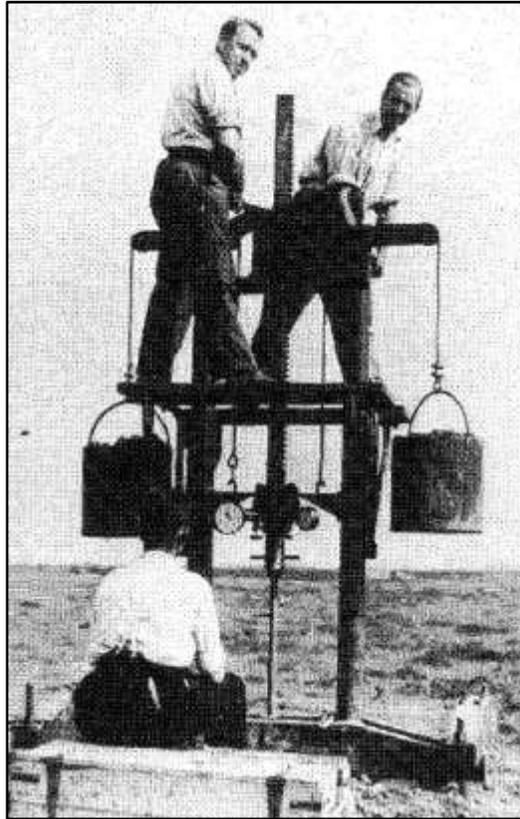


Figura 2-26. Cono Holandés, sistema mecánico usado en 1940. Fuente: Robertson & Cabal (2010).

Como señalan Broms y Flodin (1988), y Sanglerat (1972), en otros países como Bélgica, Seden, Alemania, Francia, Rusia, se desarrollaron otros penetrómetros de cono mecánico con características algo diferentes.

La mayoría de los penetrómetros de cono mecánico miden la fuerza necesaria para presionar la varilla interior con un manómetro a nivel del suelo.

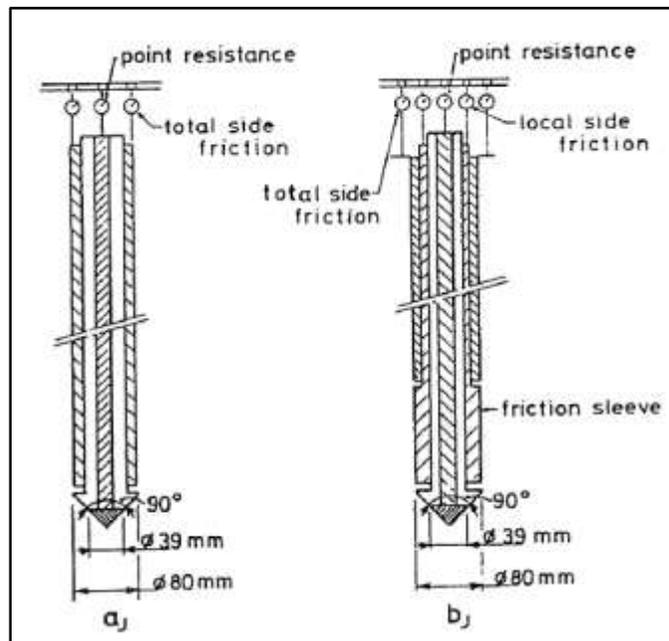


Figura 2-27. (a) Registro de la resistencia en la punta y fricción total, (b) Con registro de la fricción en el fuste. Fuente: Lunne, Robertson, & Powell (1992).

Sanglerat (1972), también informó del desarrollo por Parez de un penetrómetro de cono que consistía en una punta cónica conectada al pistón de un pequeño gato hidráulico en la base o la varilla. Una línea de presión de aceite transmite la presión a los manómetros ubicados en la superficie del suelo, lo que permite una lectura continua de la resistencia del cono.

El centro Experimental “du Batiment et des Travaux Publics” (CEBTP) en Francia, también construyó penetrómetros hidráulicos en 1966 (Sanglerat, 1972). La resistencia del cono se midió hidráulicamente con manómetros en la superficie del suelo. El diámetro de estos penetrómetros variaba de 100 mm a 320 mm. Según Sanglerat, CEBTP también desarrolló un penetrómetro dinámico estático.

Los penetrómetros cónicos mecánicos todavía se utilizan ampliamente debido a su costo, simplicidad y robustez. En suelos competentes bastante homogéneos, sin variaciones bruscas en la resistencia del cono, los datos mecánicos del cono pueden ser adecuados, siempre que el equipo se mantenga adecuadamente y el operador tenga la experiencia requerida. No obstante, la calidad de los datos sigue dependiendo en cierta medida del operador. En suelos blandos, la precisión de los resultados a veces puede ser inadecuada para un análisis cuantitativo de las propiedades del suelo.

### 2.3.2. Cono eléctrico.

Según Broms y Flodin (1988), el primer penetrómetro de cono eléctrico probablemente se desarrolló en la Fundación Alemana de Investigación Científica “Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik” (Degebo), en Berlín durante la Segunda Guerra Mundial.

Las señales se transmitieron a la superficie del suelo a través de un cable dentro de las varillas huecas del penetrómetro.

El primer penetrómetro de cono eléctrico en Holanda, llamado cono de Rotterdam, fue desarrollado y patentado en 1948 por el ingeniero Bakker.

El laboratorio de mecánica de suelos de Delft (DSML) había trabajado con penetrómetros de cono eléctrico desde 1949, y en 1957 produjo el primer penetrómetro de cono eléctrico donde la fricción lateral se podía medir por separado (Vlasbom, 1985).

En 1965 Fugro desarrolló un cono eléctrico en cooperación con el Instituto Estatal de Investigaciones de los Países Bajos (TNO), (Ruiter, 1971). En la Figura 2-28 se muestra un diagrama de penetrómetro de cono de fricción eléctrico de Fugro, la forma y las dimensiones de este cono formaron la base del procedimiento de prueba de referencia internacional (ISSMFE, 1977,1989), contando con un inclinómetro que permitía medir la desviación del cono durante la penetración.

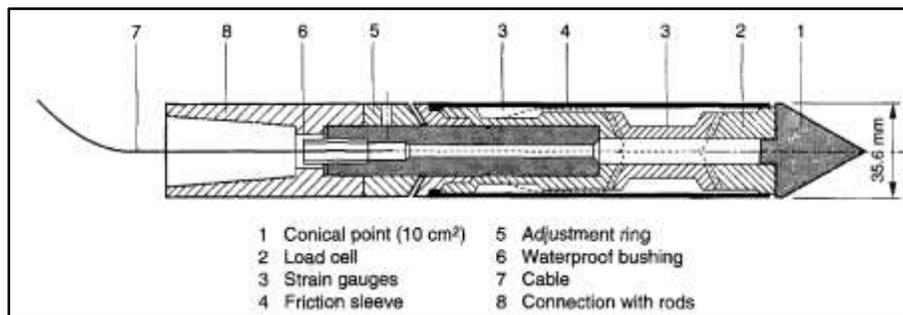


Figura 2-28. Cono eléctrico de Fugro. Fuente: Ruiter (1971).

### **2.3.3. El piezocono.**

En 1974, en la primera conferencia europea sobre Ensayos de Penetración en Estocolmo se presentaron dos artículos que registraron presiones de poros durante la penetración, Janbu y Senneset (1974), utilizaron un piezómetro eléctrico convencional, desarrollado por el Instituto Geotécnico Noruego (NGI), para medir las presiones de los poros durante la penetración adyacente a los perfiles de CPT, y Schmertmann (1974), también introdujo una sonda piezómetro y midió las presiones de los poros durante la penetración. Schmertmann reconoció la importancia de la medición de la presión del agua intersticial para la interpretación de los datos de CPT. Tanto Janbu como Senneset y Schmertmann, mostraron los resultados de los cambios en las presiones de poros durante una pausa en la penetración.

Casi simultáneamente, Torstensson (1975), en Suecia, y Wissa et al. (1975), en los EE. UU, desarrollaron sondas de piezómetro con el propósito especial de medir las presiones de agua intersticial durante la penetración y pausas en la penetración. Las dos sondas eran de geometría similar. La sonda utilizada por Wissa se indica en la Figura 2-29.

La primera publicación de medición combinada de la resistencia del cono y la presión de poro en el mismo equipo fue proporcionada por Roy (1980), realizando pruebas en arcillas canadienses sensibles, estudiando la presión de poros por encima de la punta del cono, y utilizando puntas desmontables para variar la posición de la medición.

En la Convención Nacional de la ASCE en 1981 en St. Louis, Missouri, varios autores de Ruitter (1981); Muromachi (1981); Baligh et al. (1981); Jones et al. (1981); Tumay et al. (1981); Campanella y Robertson (1981), presentaron resultados de pruebas de piezocono midiendo presión de poro simultáneamente con la resistencia del cono y la fricción en el fuste durante la penetración.

En los últimos años se han desarrollado una gran cantidad de piezoconos, para proyectos prácticos, las presiones intersticiales se miden normalmente detrás del cono, para proyectos de Investigación y especiales, se han desarrollado piezoconos con dos o tres posiciones de filtro, Bayne y Tjelta (1987) y Zuidberg et al. (1987).

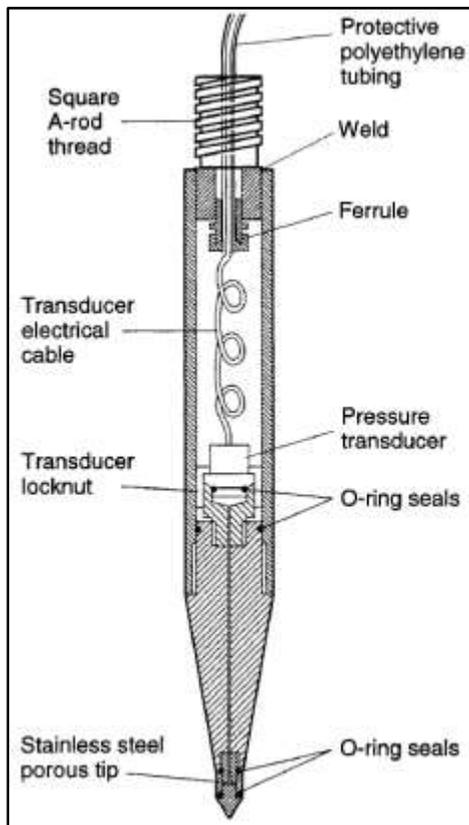


Figura 2-29. Piezómetro de Wissa. Fuente: Wissa (1974).

### 2.3.4. Historia del ensayo en Colombia.

Según Gutiérrez (2002), la primera persona en traer un equipo CPT fue un holandés, quien utilizó el equipo en los suelos arenosos de Cartagena. Aproximadamente en 1960, Víctor Romero, Ingeniero Civil de la Universidad Nacional, compró un penetrómetro mecánico y un muestreador de pistón especial para utilizar con el cono.

Dentro de los registros de estudios de suelos realizados se encuentran algunas construcciones conocidas como los centros comerciales Metrópolis y Unicentro, urbanizaciones como la floresta, y edificios de entidades como el SENA, ETB y Universidad Nacional.

Según Gutiérrez (2002), Víctor Romero utiliza el ensayo de CPT para generar estratigrafías, clasificación de suelos y estimación de parámetros geotécnicos. Debido a su gran experiencia con el ensayo en Bogotá, ha podido determinar algunas correlaciones, las cuales ha verificado a través del tiempo mediante ensayos de laboratorio. Por ejemplo, para la cohesión de drenada:

$$Su = \frac{q_c}{17} \quad (22)$$

El segundo colombiano en adquirir el equipo fue Luis Fernando Orozco R. (LFOR & Cia.) en 1981. Este penetrómetro mecánico tiene una capacidad de 5 Toneladas y es utilizado para el diseño de pilotes por fricción. Según Según Gutiérrez (2002), únicamente se registraban mediciones de la resistencia por punta, no se toman mediciones de la fricción, ya que se trata de un proceso que se tornaba complicado. El valor  $q_c$  es tomado como guía dentro de los criterios de diseño:

$$Su = \frac{q_c}{12} \quad (23)$$

En la actualidad, en Colombia muchas más empresas de ingeniería, instituciones de Investigación como el Servicio Geológico Colombiano, y universidades, han adquirido equipos de piezoconos, los cuales se han venido utilizando en la caracterización geotécnica para diversos proyectos de construcción.

#### 2.4. Funcionamiento de los Sensores en el Piezocono

Los piezoconos utilizan celdas de carga con galgas extensiométricas para medir la fuerza en la punta y la fricción en el fuste. Los diseños básicos utilizan celdas de carga separadas o celdas de carga de sustracción. En la Figura 2-30 se observan tres tipos de diseños de conos.

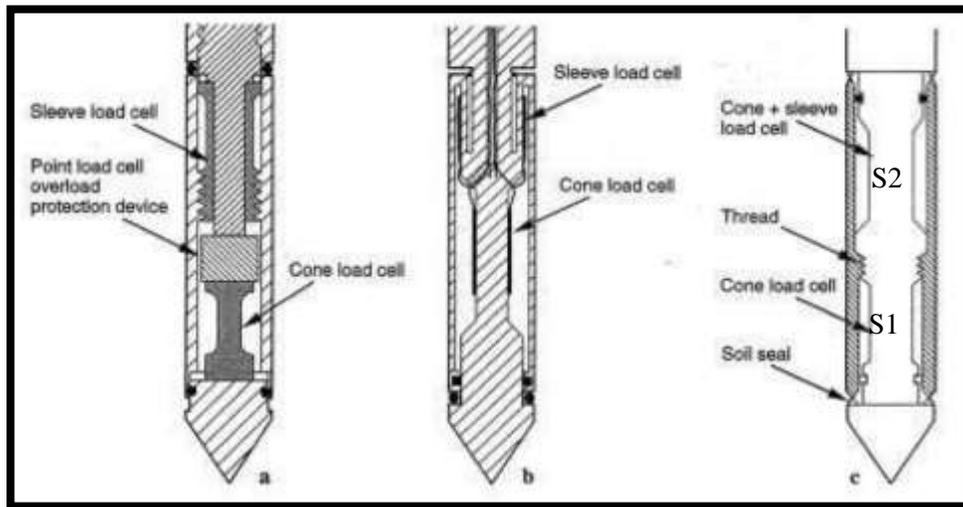


Figura 2-30. Tipos de diseño de conos de penetración: (a) Celdas de carga por punta y fricción trabajando a compresión. (b) celda de carga por punta trabajando a compresión y celda de carga de fricción trabajando a tensión. (c) celdas de carga en serie por sustracción. Fuente: Robertson & Cabal (2010).

La fuerza en la punta es registrada con una celda de carga que trabaja a compresión, al igual que la fricción en el fuste es registrada con otra celda que recibe carga a compresión (ver la Figura 2-30 (a)); en este diseño las dos celdas de carga trabajan por separado.

En el diseño indicado en la Figura 2-30 (b), la celda de carga que registra la fuerza en el cono trabaja a compresión, mientras que la celda de carga que registra la fricción en el fuste trabaja a tensión.

El diseño indicado en la Figura 2-30 (c), que corresponde al cono con celdas de carga de sustracción, dos celdas se encuentran en serie de tal manera que la celda de carga S1 captura la fuerza en el cono y la celda de carga S2 registra la fuerza en el cono más la fricción en el fuste, lo cual indica que para obtener la fuerza de fricción en el fuste se le debe restar al dato obtenido en la celda de carga S2, la fuerza registrada en el cono por la celda S1.

#### 2.4.1. Funcionamiento de celdas de carga basado en galgas extensométricas.

De forma general, una celda de carga consiste en un elemento que puede ser cilíndrico, tipo S o viga sobre el cual se instalan galgas extensométricas (ver la Figura 2-31). Este elemento suele estar hecho de acero o aluminio el cual se deforma ligeramente en presencia de una carga y vuelve a su posición original cuando la carga desaparece, ofreciendo una respuesta elástica a cualquier carga. Esas pequeñas deformaciones del material se pueden medir utilizando galgas extensométricas. Mediante un sistema electrónico de análisis se interpreta la deformación de la galga extensométrica y determina la fuerza.

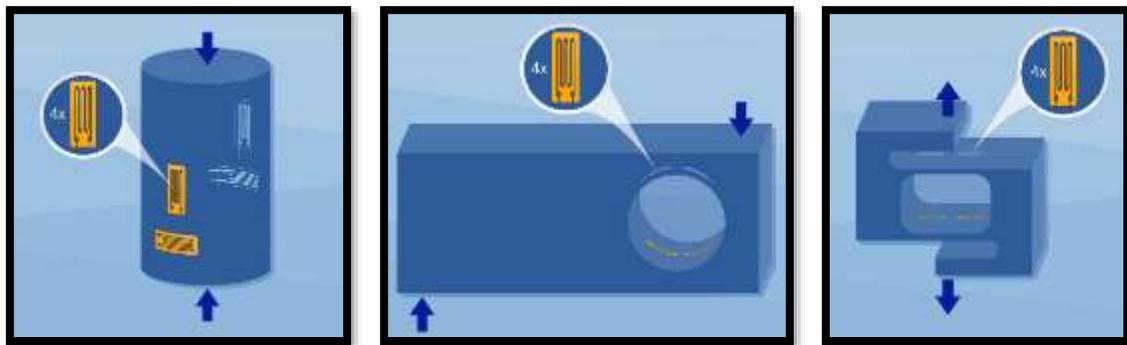


Figura 2-31. Celda de carga de compresión (izquierda), celda de carga de flexión de viga (centro), celda de carga tipo S a compresión o tracción (derecha). Fuente: Hottinger Bruel Kjaer (2017).

Las galgas extensométricas están conformadas por materiales eléctricos dispuestos en una forma ondulante adheridos a una película (ver la Figura 2-32). Cuando se estira la película, los conductores

se alarga y cuando la película se comprime, se acorta (ver la Figura 2-33). Las deformaciones del conductor generan cambios en la resistencia de los conductores eléctricos. A partir de los cambios de resistencia se puede calcular la deformación, ya que la resistencia eléctrica aumenta de forma proporcional a la elongación y disminuye con la contracción.

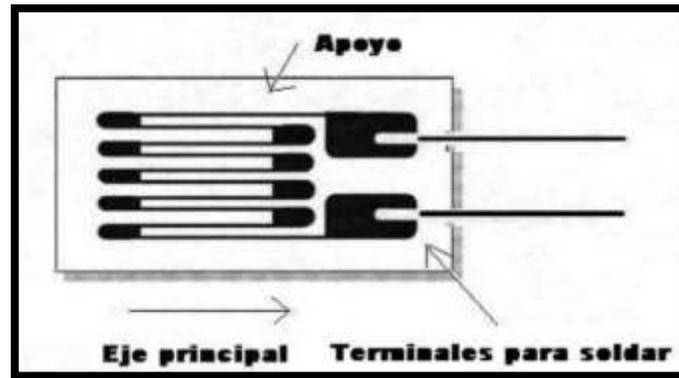


Figura 2-32. Galga extensométrica. Fuente: Hottinger Bruel Kjaer (2017).

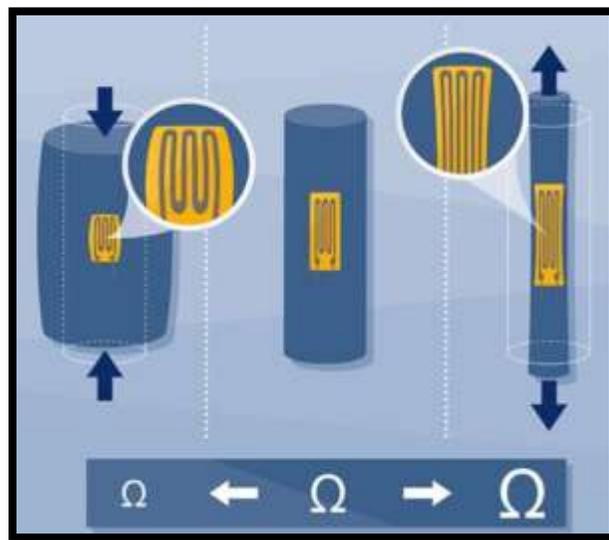


Figura 2-33. Variación de la resistencia en una galga extensométrica. Fuente: Hottinger Bruel Kjaer (2017).

Las galgas extensométricas están firmemente fijadas al cuerpo metálico (cilíndrico, viga o celda tipo S) y, en consecuencia, experimentan los mismos movimientos que éste. Las galgas extensométricas se disponen en un puente de Wheatstone (ver la Figura 2-34).

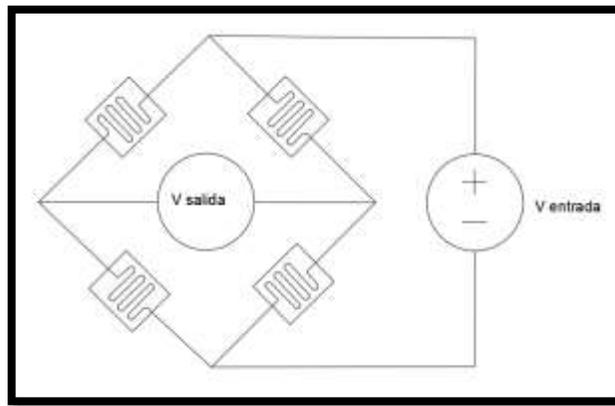


Figura 2-34. Galgas extensométricas dispuestas en puente de Wheatstone. Fuente: Nolla (2019).

En la Figura 2-35 se observa un corte de un cono donde se visualizan las galgas extensiométricas adheridas a un cuerpo cilíndrico conformando de esta manera dos celdas de carga, una registra la fuerza en el cono y la otra registra la fricción en el fuste.



Figura 2-35. Corte de piezocono con visualización de galgas extensométricas. Fuente: Robertson P. k. (2015).

En la Figura 2-36 se observa la ubicación del sensor de presión de poros, al igual que la ubicación de las galgas extensiométricas.

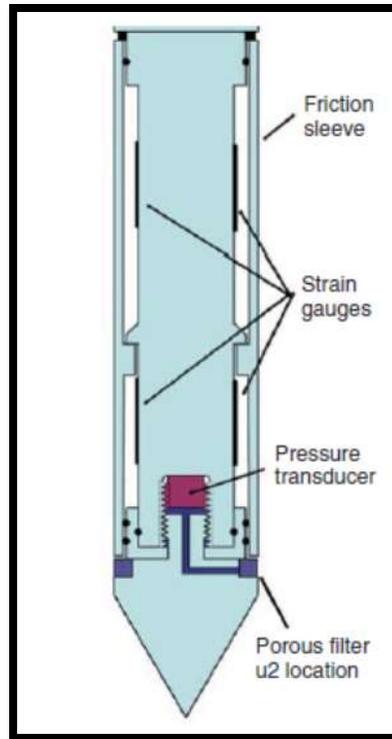


Figura 2-36. Galgas extensométricas y sensor de presión de poros en el cono de penetración.

Fuente: Briaud (2013).

## 2.5. Tipos de sensores de presión.

Para registrar la presión con transductores, se necesita un sensor que mide el valor de presión y lo convierte en una señal eléctrica (ver la Figura 2-37).

Los cuatro tipos para la medición de presión son:

- Sensores resistivos
- Sensores piezoresistivos
- Sensores capacitivos
- Sensores piezoeléctricos

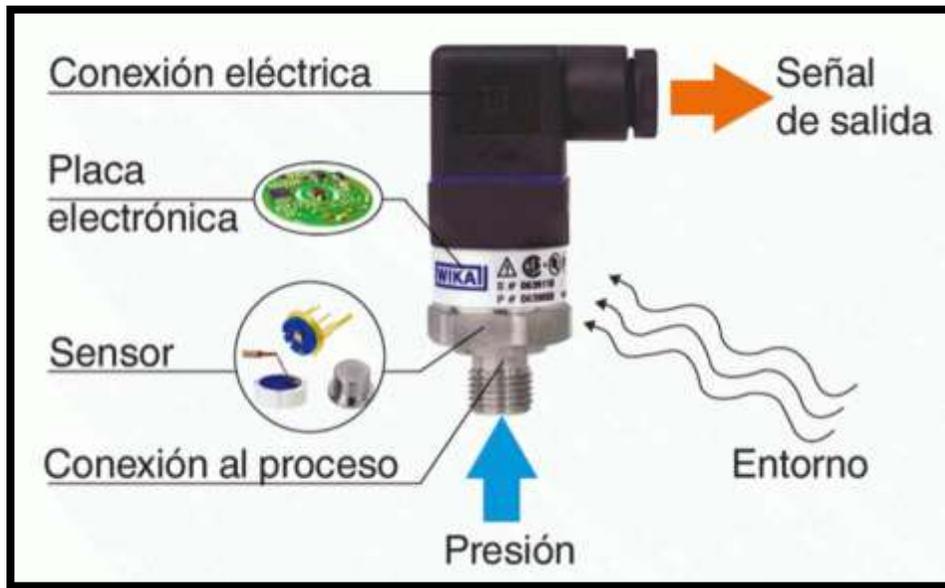


Figura 2-37. Sensor de presión. Fuente: Nolla (2019).

### 2.5.1. Sensores de presión resistivos.

La presión en el sensor genera cambios en la longitud del conductor, viéndose reflejada en variaciones de la resistencia. La resistencia de un conductor eléctrico se determina mediante la siguiente ecuación:

$$R = \rho * \frac{l}{A} \quad (24)$$

R = resistencia eléctrica.  
 $\rho$  = resistencia específica.  
 l = longitud.  
 A = área de la sección.

Habitualmente se colocan cuatro cintas extensométricas en un diafragma (ver la Figura 2-38), donde la deformación del diafragma provoca la deformación de las cintas provocando un aumento o reducción proporcional de la resistencia. Para realizar una medición precisa, se conectan las cintas extensométricas en un puente de Wheatstone (ver la Figura 2-39).

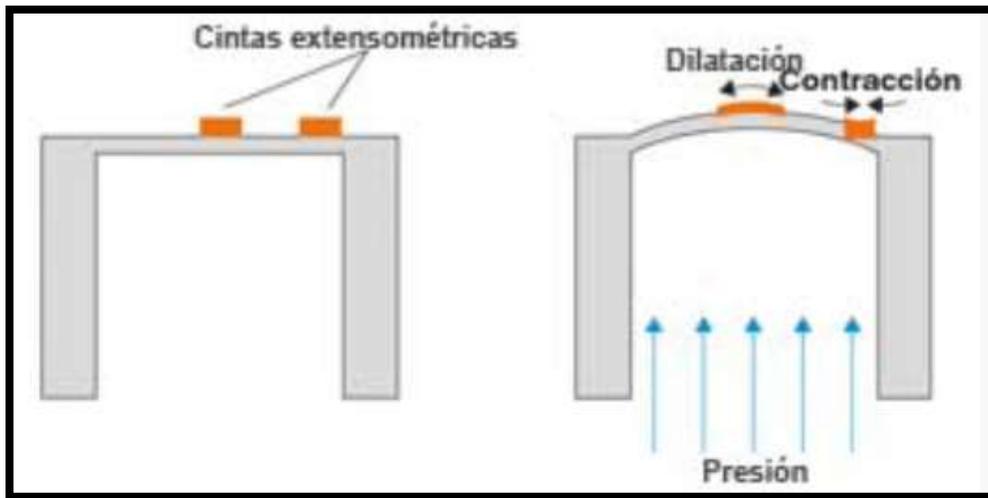


Figura 2-38. Cintas extensométricas en membrana. Fuente: Rojas (2008).

### 2.5.1.1. Puente de Wheatstone.

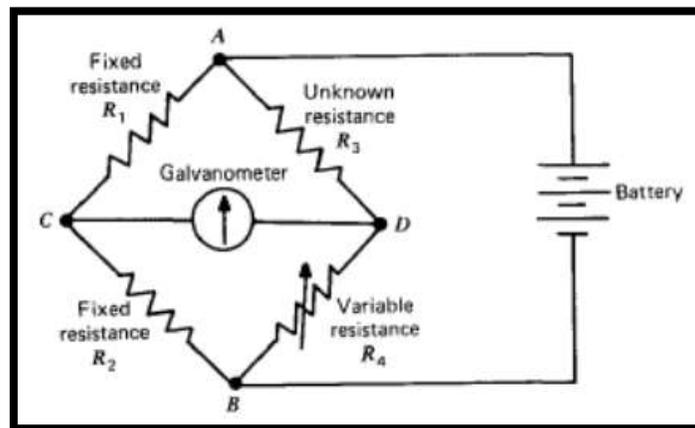


Figura 2-39. Puente de Wheatstone. Fuente: Dunicliff (1988).

El circuito posee cuatro brazos formados por las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$ , donde las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  son fijas, la resistencia  $R_4$  es variable, y la resistencia  $R_3$  es desconocida. Un voltaje se aplica entre A y B, luego se empieza a variar la resistencia  $R_4$  hasta que el voltaje entre C y D registrado por el galvanómetro sea cero, esto quiere decir que no fluye corriente entre C y D y el puente se encuentra en equilibrio. Conocidas las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$ , y  $R_3$  se realiza un divisor de voltaje con el objeto de conocer el valor de la resistencia  $R_3$  (ver de la Ecuación (25) hasta la Ecuación (29)).

$$V_C = V_B * \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (25)$$

$$V_D = V_B * \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (26)$$

$$V_B - V_D = V_A = 0 \quad (27)$$

$$V_B * \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = V_B * \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (28)$$

$$R_3 = \frac{R_4 R_1}{R_2} \quad (29)$$

### 2.5.1.2. Compensación de temperatura.

Las galgas extensométricas son sensibles a la temperatura, pero con el uso de puente de Wheatstone permite reducir esta interferencia. Si se utiliza una galga simple que experimenta una variación a la temperatura, además de la galga que se utiliza para medir la variación debida al esfuerzo, basta con disponer de otra galga igual pero pasiva (1/4 de puente), es decir, no sometida al esfuerzo a medir (ver la Figura 2-40 ).

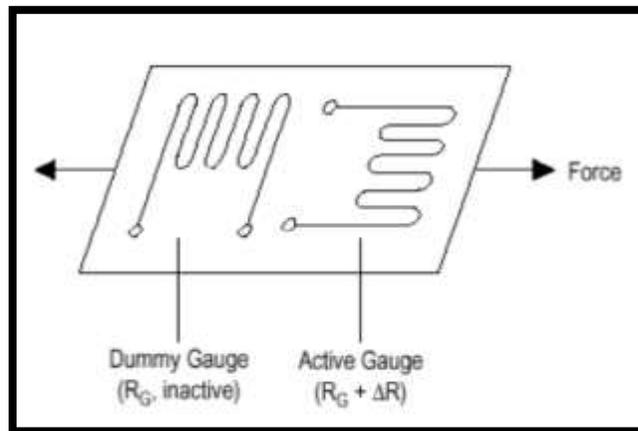


Figura 2-40. Galgas activa y pasiva. Fuente: Velasco (2000).

La compensación completa de temperatura en las galgas extensométricas y conductores se logra ubicando las cuatro galgas que conforman el puente de wheatstone en el mismo medio

experimentando el mismo cambio de temperatura. Las galgas extensométricas se pueden disponer de tres maneras:

- Dos galgas activas y otra dos inactivas (ver la Figura 2-41 (a)).
- Todas las galgas activas orientadas a  $90^\circ$  (ver la Figura 2-41 (b)).
- Todas las galgas activas, dos a compresión y dos a tensión (ver la Figura 2-41 (c)).

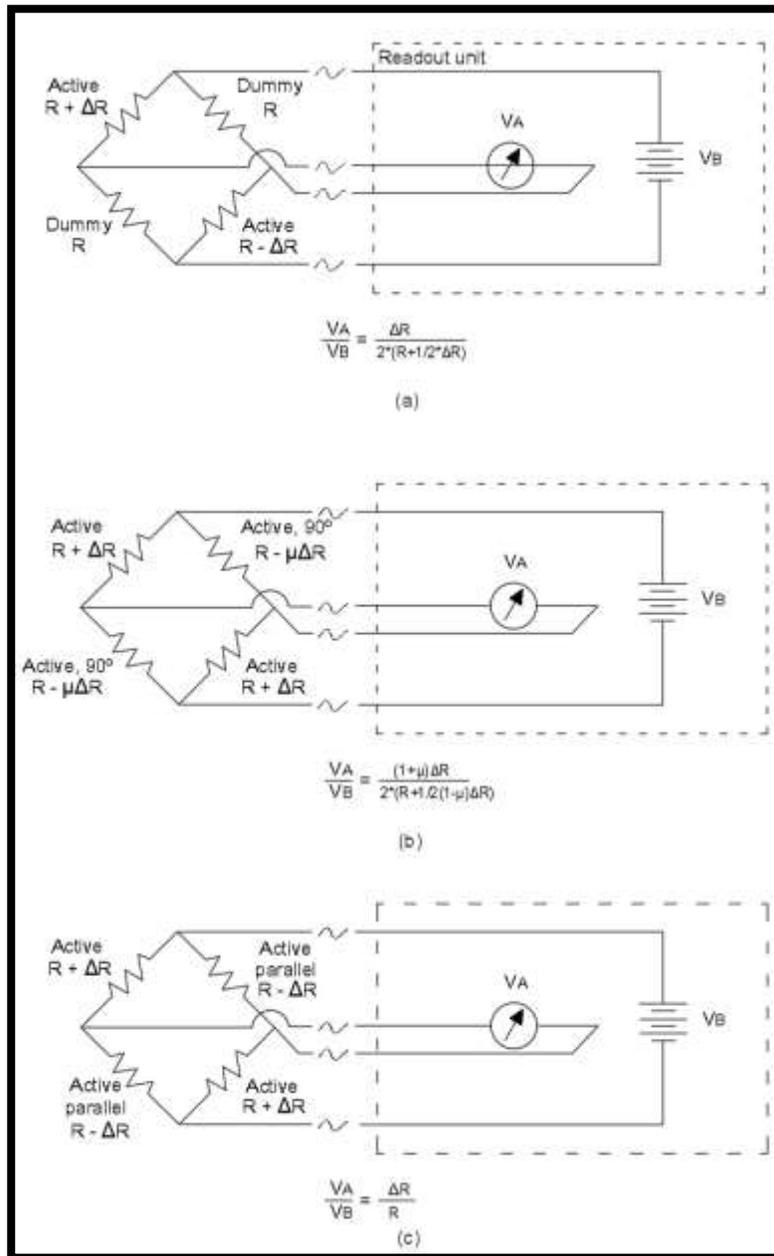


Figura 2-41. Compensación completa puente de Wheatstone (a) galgas inactivas, (b) todas las galgas activas a 90°, (c) todas las galgas activas, dos a compresión, dos a tensión. Fuente: Dunncliff (1988).

Los sensores de presión hidráulica tipo resistivo, disponen las cuatro galgas en el mismo medio, experimentando igual cambio de temperatura, las cuales se ubican en un diafragma orientadas a 90° (ver la Figura 2-42)

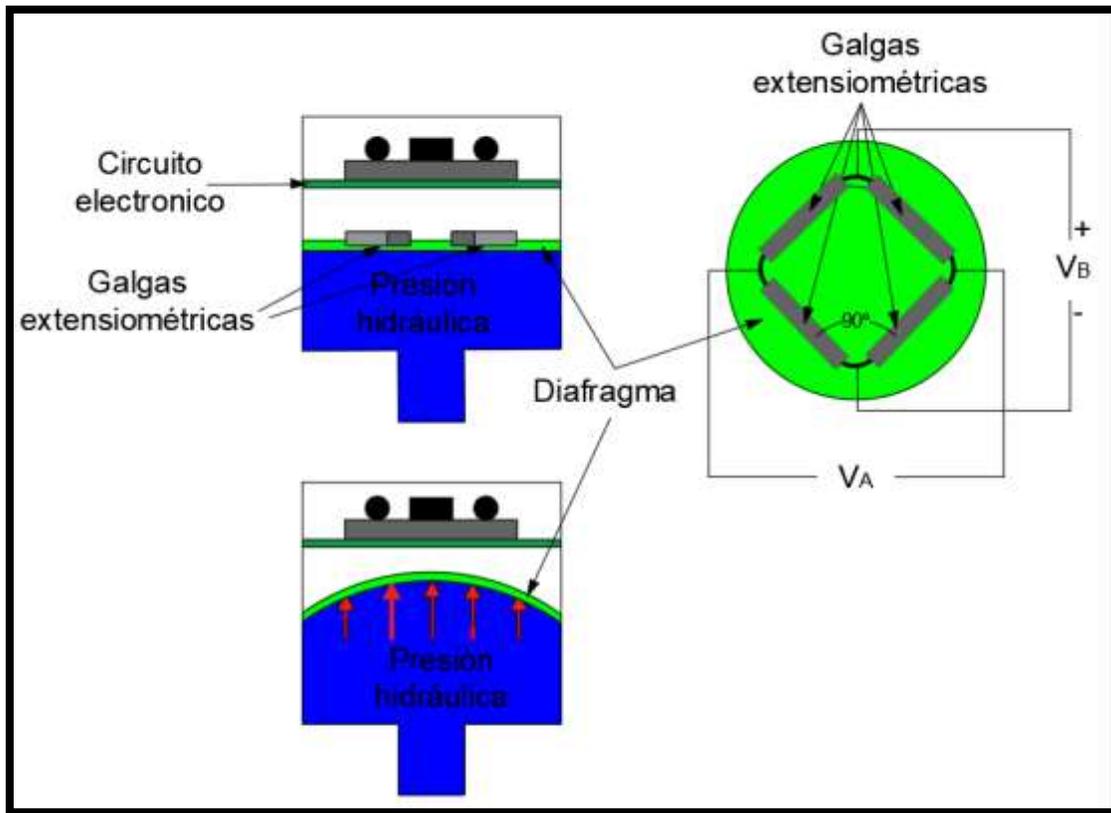


Figura 2-42. Ubicación de galgas extensométricas en sensor presión hidráulico resistivo. Fuente: Velasco (2000).

Para determinar la variación de voltaje teórica en el puente de Wheatstone dispuesto en el sensor de presión hidráulica se puede aplicar la Ecuación (30), sin embargo el voltaje lo registra la tarjeta electrónica que se encuentra en el cuerpo del sensor.

$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{(1 + \mu)\Delta R}{2(R + \frac{1}{2} * (1 - \mu) * \Delta R)} \quad (30)$$

Donde:

$V_A$  = Voltaje en A.

$V_B$  = Voltaje en B.

$\mu$  = Coeficiente de poisson.

$\Delta R$  = Variación de la resistencia eléctrica.

$R$  = Resistencia eléctrica.

### 2.5.2. Sensores de presión piezoresistivos.

En los sensores de presión piezoresistivos se utilizan semiconductores como cintas extensométricas, donde la deformación genera una variación de la resistencia específica.

Las cintas semiconductoras se encuentran como microestructura en la membrana que se deforma por la presión, lo que significa que las cintas extensométricas y la membrana expuesta a la deformación están conformadas del mismo material. Usualmente se encuentran cuatro cintas en una membrana de silicio configuradas en un puente de Wheatstone.

La aplicación de este tipo de sensores se tiene en procesos que trabajen a muy bajas presiones.

### 2.5.3. Sensores de presión capacitivos.

En este tipo de sensores se tiene dos placas, una fija y la otra móvil (ver la Figura 2-43), esta última se desplaza por acción de la presión a medir, lo cual genera variación en la capacidad de un condensador, donde la capacidad de un condensador de dos placas se determina mediante la siguiente ecuación:

$$C = \epsilon * \frac{A}{d} \quad (31)$$

C = capacidad del condensador  
 $\epsilon$  = constante dieléctrica  
A = área efectiva de las placas  
d = distancia entre las placas

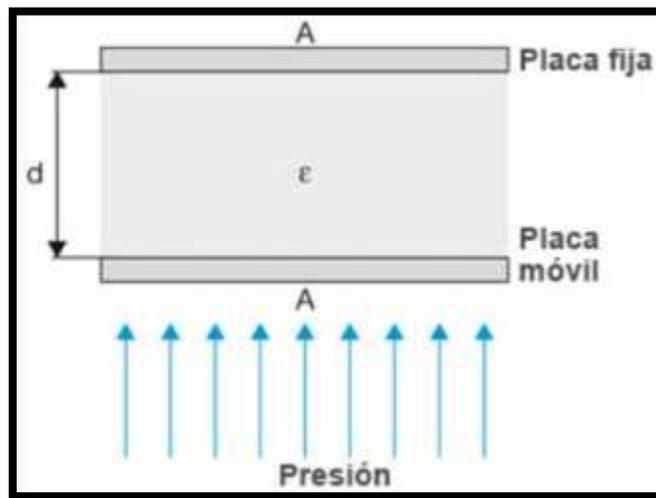


Figura 2-43. Configuración condensador. Fuente: Rojas (2008).

El sensor de presión capacitivo permite el registro de presión en rango de milibares, además de ofrecer seguridad por sobrecarga.

#### 2.5.4. Sensores de presión piezoeléctricos.

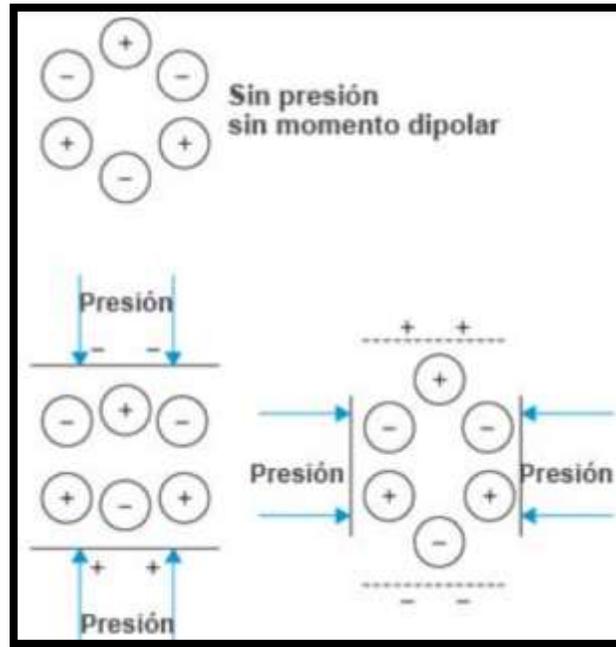


Figura 2-44. Sensor piezoeléctrico. Fuente: Rojas (2008).

Cuando en un cristal no conductor como por ejemplo el cuarzo se le aplica una fuerza, se genera una polarización en superficies opuestas, viéndose reflejada en una carga que a su vez genera una tensión eléctrica, la cual puede captarse y amplificarse, donde la carga generada es proporcional a la fuerza aplicada.

#### 2.6. Incertidumbre en la Medición

La instrumentación se utiliza para realizar mediciones, y cada medición implica un error e incertidumbre.

A continuación, se definen términos asociados con la incertidumbre, para examinar los distintos tipos de error que pueden afectar a una medición y cómo se pueden minimizar.

### 2.6.1. Precisión.

Al observar la dispersión de una serie de mediciones repetidas se puede indicar la precisión, si las lecturas realizadas presentan baja dispersión la precisión es alta, y sucede lo contrario, si la dispersión de los datos es alta, la precisión es baja.

### 2.6.2. Exactitud.

La exactitud se refiere a la diferencia entre una lectura o valor experimental y el valor verdadero, que en términos estadísticos se expresa como el error absoluto. En otros términos, significa que tan cerca se encuentra el valor real del valor medido.

### 2.6.3. Resolución.

La resolución es la división más pequeña en la escala de lectura del instrumento. En algunos casos puede ser posible y conveniente interpolar entre divisiones en la escala de lectura, pero la interpolación es subjetiva y no aumenta la resolución del instrumento.

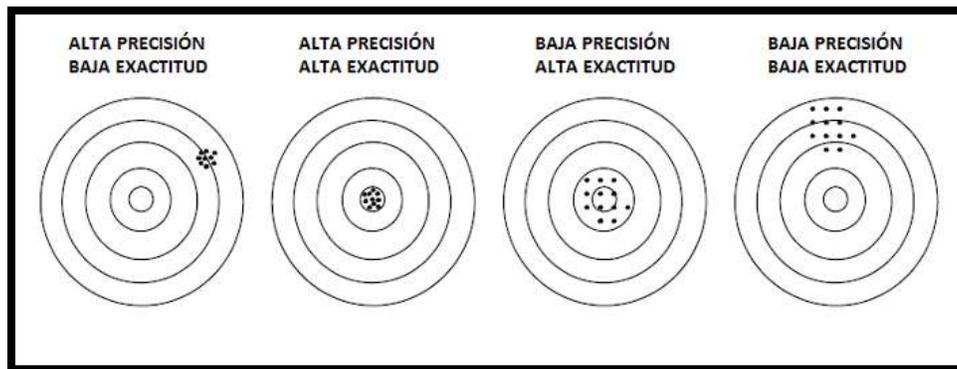


Figura 2-45. Exactitud y precisión. Fuente: Dunncliff (1988).

### 2.6.4. Sensibilidad.

La sensibilidad se refiere a la cantidad de respuesta de salida que produce un instrumento o transductor cuando se le aplica una cantidad de entradas.

### 2.6.5. Linealidad.

Se dice que un instrumento es lineal cuando los valores medidos son directamente proporcionales a la cantidad que se mide como se ilustra en la Figura 2-46.

La relación gráfica entre el valor indicado y el valor actual es a menudo ligeramente curva, debido a limitaciones del instrumento. La distancia entre la línea curva y la línea recta corresponde a la brecha, la cual es una medida de la linealidad.

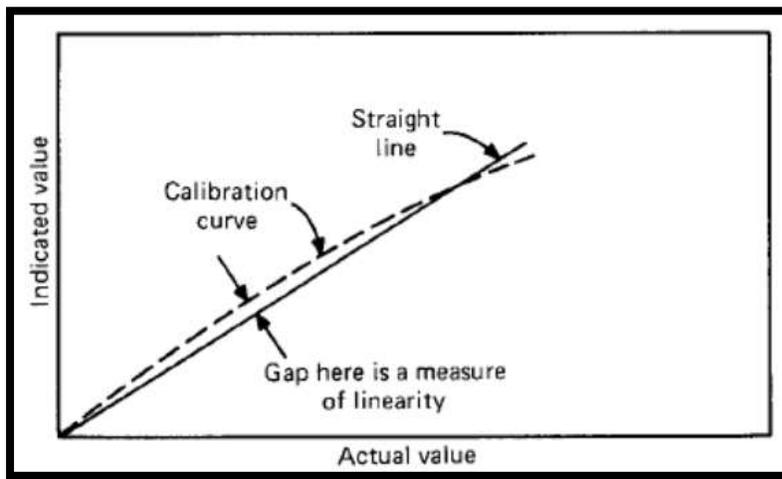


Figura 2-46. Linealidad. Fuente: Dunnicliff (1988).

### 2.6.6. Histéresis.

Cuando la magnitud medida está sujeta a cíclicos de carga, la medida decrece o crece, en la Figura 2-47 se muestra la curva de incremento de carga y descarga, la separación entre las dos curvas es una medida de la histéresis, la histéresis es causada usualmente por la fricción.

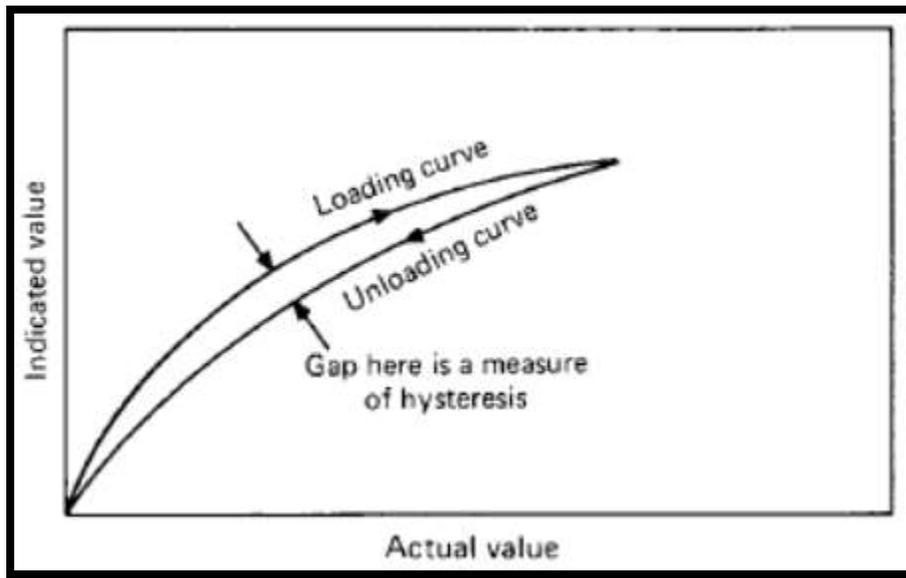


Figura 2-47. Histéresis. Fuente: Dunicliff (1988).

### 2.6.7. Ruido.

Ruido es el término usado para las variaciones de las mediciones causado por factores externos, generando falta de precisión y exactitud. Fuentes de alto voltaje, transmisoras de radio, son un ejemplo de factores externos que generan ruido.

### Capítulo III

#### Investigaciones Desarrolladas con el Piezocono en Colombia

La aplicación de ensayos CPT se encuentra limitada en Colombia debido al alto costo de los equipos, sin embargo, la adquisición y el uso del mismo, se ha venido realizando por parte de empresas de consultoría en geotecnia a nivel nacional, quienes, en trabajo conjunto con estudiantes y docente de especializaciones, maestrías y doctorados en geotecnia, han venido desarrollando proyectos de investigaciones con relación al uso del piezocono.

La resistencia al corte no dreanda se puede determinar con la Ecuación (32) a partir de la presión en la punta del cono “qt” obtenida en el ensayo CPTu, el esfuerzo vertical efectivo  $\sigma'v$ , y el parámetro del cono “Nkt”, Roberson P.K. & Campanella R.G. (1984), recomienda determinar la variable local “Nkt”, dependiendo del tipo de suelo que se explora, sin embargo, en caso que no se haya determinado locamente, recomienda utilizar un rango entre 10 a 16.

$$Su = \frac{qt - \sigma v}{N_{kt}} \quad (32)$$

Dónde:

qt : Resistencia a la penetración por punta corregida por presión de poros.

$\sigma v$ : Esfuerzo total vertical in situ.

$N_{kt}$ : Factor del cono.

En la Tabla 3-1 se relacionan las investigaciones que se han realizado en la caracterización de suelos en Colombia con uso del piezocono.

Tabla 3-1. Investigaciones desarrolladas en Colombia con uso del piezocono.

N	TÍTULO	AUTOR	SITIO DE APLICACIÓN	AÑO
1	Revisión bibliográfica de ensayos in-situ en el marco de la academia, la industria y las normativas bajo el contexto Colombiano y Norte Americano	Vega Salazar (2016)	Colombia – Estados Unidos	2016
2	Análisis geo estadístico para la obtención de un modelo Geológico – Geotécnico. Caso de estudio metro de Bogotá - Colombia.	Narvárez Segura & Torres Romero (2019)	Metro de Bogotá	2019
3	Zonificación de estabilidad de los sectores de Pomarroso y Miraflores Escala 1:5000, para la reubicación del casco urbano del municipio de Gramalote en norte de Santander.	Servicio Geológico Colombiano (2012)	Pomarroso y Miraflores, Santander	2012
4	Comportamiento dinámico de depósitos aluviales en Colombia	García Nuñez, Días Parra, & Alarcón Guzmán, (2006)	Base aérea en Tumaco y en el sector de Navarro en la ciudad de Cali	2006
5	Estructuración técnica del tramo 1 de la primera línea del metro de Bogotá	Nacional & Bogotá (2017)	Bogotá	2017
6	Caracterización geotécnica de la ciudad de Barranquilla. Colombia	Molina Mendoza (2016)	Barranquilla	2016
7	Metodología con redes neuronales para la clasificación de suelos por medio de sondeos de CPT	Gutiérrez (2002)	Canal salitre – Bogotá	2002
8	Caracterización de un sitio mediante ensayo de CPTU.	Díaz Trillos (2011)	Finca “La Pelusa”, Facatativá - Cundinamarca	2011
9	Análisis comparativo de capacidad portante y asentamientos de pilotes a partir de ecuaciones semi-empíricas, modelos numéricos y ensayos CPTU	Rodríguez Granados & Sánchez Salinas (2013)	Bocagrande - Cartagena - Colombia	2013
10	Obtención de parámetros geomecánicos con piezocono sísmico en el campus de la Universidad Nacional sede Bogotá	Rodríguez Granados (2013)	Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá - Colombia	2013
11	Uso del piezocono (CPTU) para determinar la caracterización geotécnica de depósitos arcillosos blandos en algunos sitios del departamento de Boyacá.	López Ramírez & Durán Gutiérrez (2013)	Dos sitios de Investigación , uno en la zona Urbana de Tunja y el otro en la vereda Punta Larga del municipio de Nobsa.	2015
12	Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería (SEGECI)	Sarmiento & León (2016)	Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	2016

Fuente: propia.

La mayoría de investigaciones desarrolladas con el piezocono no indican que parámetro del cono cono “Nkt” utilizaron, sin embargo, tres autores si lo documentan. Por un lado el ingeniero Rodriguez Granados (2013), determina la resistencia al corte no drenada con un valor de  $N_{kt} = 14$ , también determinar el parámetro del cono con la Ecuación (33), la cual tiene en cuenta la relación de fricción normalizada, “Fr”. Por otro lado, López Ramírez & Durán Gutiérrez (2013), no indica que valor de  $N_{kt}$  fue tomado, sin embargo informan que el rango en el que se puede tomar el parámetro del cono se encuentra entre 10 a 20. Por último Sarmiento & León (2016), determinan valores de “Nkt”, a partir de las resistencias al corte no drenada obtenidas en los ensayos de compresión inconfiada, triaxial UU, y veleta de campo, a partir de la resistencia en la punta del ensayo CPTu, recomendando para las arcillas de consistencia blanda del norte de la ciudad de Bogotá, utilizar un parámetro del cono de 12 (ver la Tabla 3-2).

$$N_{KT} = 10.5 + 7 \log Fr \quad (33)$$

Donde:

$N_{kt}$ : parámetro del cono

Fr: relación de fricción normalizada

Tabla 3-2. Valor de “Nkt” utilizado en las investigaciones con el piezocono en Colombia.

<b>N</b>	<b>AUTOR</b>	<b>VALOR DE “Nkt”</b>
1	Vega Salazar (2016)	No se indica que valor de Nkt fue tomado o determinado localmente
2	Narváez Segura & Torres Romero (2019)	No se indica que valor de Nkt fue tomado o determinado localmente
3	Servicio Geológico Colombiano (2012)	No se indica que valor de Nkt fue tomado o determinado localmente
4	García Nuñez, Días Parra, & Alarcón Guzmán (2006)	No se indica que valor de Nkt fue tomado o determinado localmente
5	Financiera de Desarrollo Nacional & Consorcio Metro Bog (2017)	No se indica que valor de Nkt fue tomado o determinado localmente
6	Molina Mendoza (2016)	No se indica que valor de Nkt fue tomado o determinado localmente
7	Gutiérrez (2002)	No se indica que valor de Nkt fue tomado o determinado localmente
8	Díaz Trillos (2011)	No se indica que valor de Nkt fue tomado o determinado localmente
9	Rodríguez Granados & Sánchez Salinas (2013)	No se indica que valor de Nkt fue tomado o determinado localmente
10	Rodriguez Granados (2013)	El valor de Su se calcula de dos formas, con la variable empírica de $Nkt = 14$ y con la relación de fricción normalizada
11	López Ramírez & Durán Gutiérrez (2013)	No indica el valor de Nkt asumido, sin embargo establece los rangos en los cuales puede estar el parámetro del cono, siendo este de 10 a 20.
12	Sarmiento & León (2016)	Se determinan valores de “Nkt”, a partir de las resistencias al corte no drenada obtenidas en los ensayos de compresión inconfiada, triaxial UU y veleta de campo, junto con la resistencia en la punta de ensayos CPTu, donde se recomienda para el tipo de suelo explorado, utilizar un parámetro del cono de 12.

Fuente: propia.

## Capítulo IV

### Diseño

En el presente capítulo se describe el diseño de la máquina hidráulica encargada de penetrar el cono instrumentado, la cual es anclada al terreno mediante tornillos helicoidales, y el diseño del cono instrumentado con transductores de presión hidráulica.

#### 4.1. Diseño de la Máquina Hidráulica para Penetrar el Cono

La máquina hidráulica para hincar el sensor en el terreno se diseña teniendo en cuenta las especificaciones indicadas en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Parámetros de diseño.

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD
Velocidad de aplicación de la carga	$20 \pm 5$ mm/s
Fuerza de aplicación	5 Toneladas

Fuente: propia.

Se realiza un pre dimensionamiento y modelado de las piezas en el software Inventor versión educativa, con el objeto de identificar los esfuerzos, deformaciones y el factor de seguridad en el mecanismo al momento de aplicar la carga de 5 Toneladas (ver la Figura 4-1).

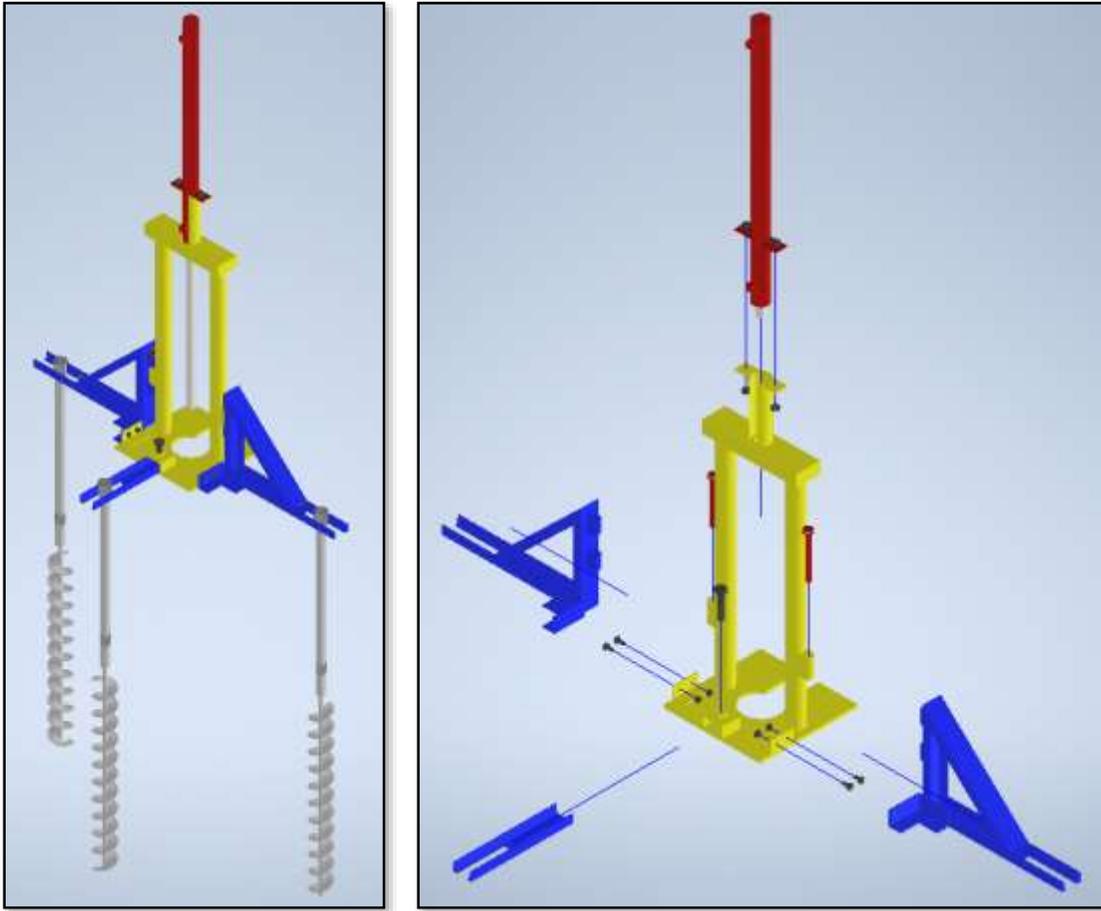
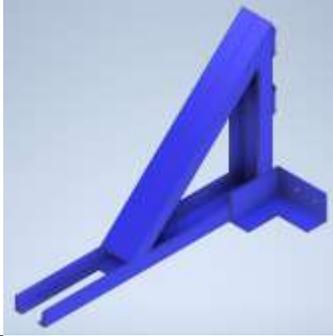
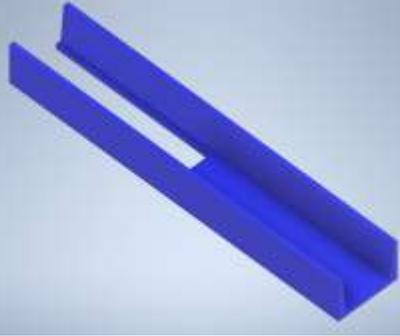
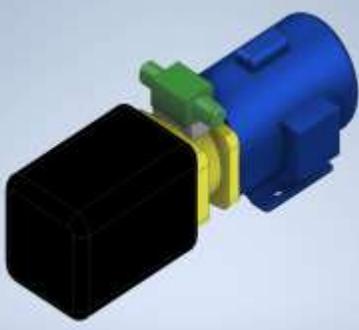


Figura 4-1. Modelación del marco para la aplicación de la carga. Fuente: propia.

Las piezas modeladas se relacionan en la Tabla 4-2, y sus planos se encuentran en el Anexo 2.

Tabla 4-2. Piezas modeladas.

		
1.Marco de carga	2. Base para anclaje	3. Viga para anclaje
		
4. Pasador	5. Unidad hidráulica	6. Cilindro hidráulico
		
7. Barreno de anclaje	8. Tubería	9. Acople para penetrar tubería
		
10. Bloque para extraer tubería	11. Acople para extraer tubería	12. Base para extraer tubería

Fuente: propia.

La barra del cilindro hidráulico de doble efecto se seleccionó ingresando en la Figura 4-2 con una longitud de barra de 90 cm y fuerza de 5000 kg, obteniendo un diámetro de vástago mínimo de 30 mm, para lo cual se selecciona un diámetro comercial de 34 mm (ver la Tabla 4-3), garantizando que la barra no presentara pandeo.

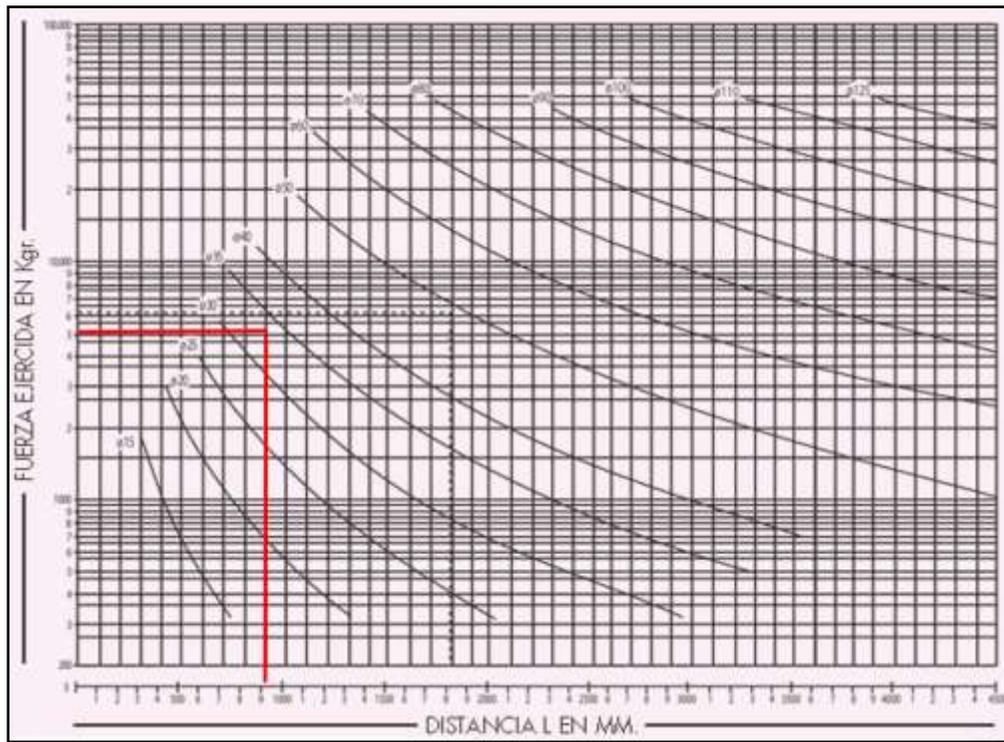


Figura 4-2. Selección de la barra para un cilindro hidráulico. Fuente: Maccaferri (2004).

Tabla 4-3. Selección del diámetro del vástago.

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD
Fuerza ejercida, kg	5000
L, mm	900
Diámetro mínimo del vástago, mm	30
Diámetro comercial del vástago, mm	34
Material	SAE-1045
Factor de seguridad	3

Fuente: Propia.

#### 4.1.1. Análisis de esfuerzos y deformaciones.

Mediante la modelación de esfuerzos y deformaciones con el software Inventor versión educativa se obtiene un esfuerzo máximo de tensión de 111.1 MPa, con un factor de seguridad de 2.34 (ver la Figura 4-3), y deformaciones máximas de 0.105 mm, 0.1003 mm y 0.5842 mm en los ejes “x”, “y” y “z” respectivamente, (ver la Figura 4-4), indicando que la estructura pre dimensionada soporta adecuadamente los esfuerzos y deformaciones en condiciones de seguridad.

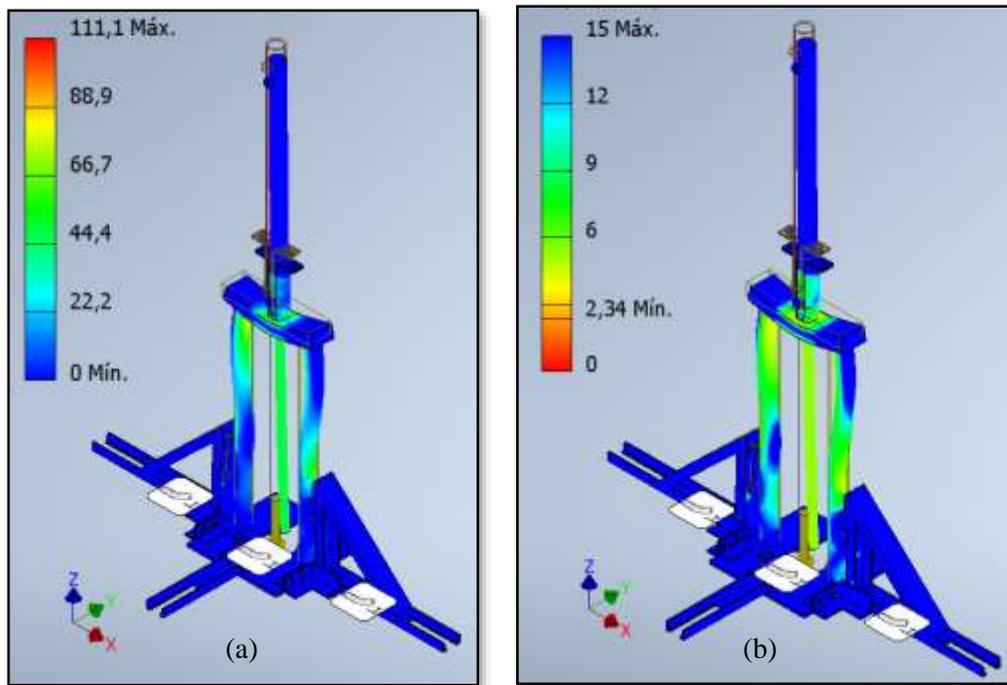


Figura 4-3. (a) Tensión de Von Mises, unidades en MPa, (b) Factor de seguridad. Fuente: propia.

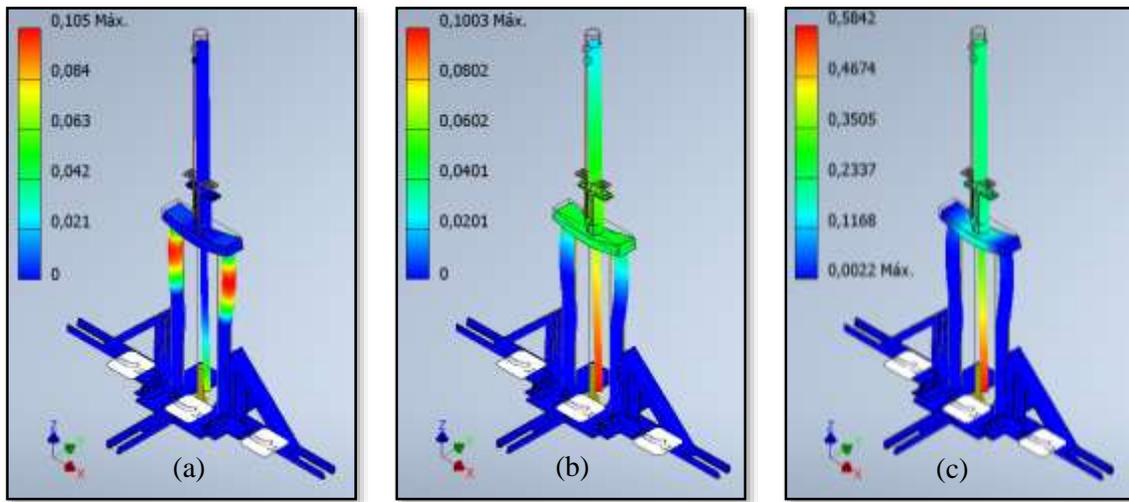


Figura 4-4. (a) Deformaciones en el eje “x”, (b) Deformación en el eje “y”, (c) Deformación en el eje “z”, unidades en mm. Fuente: propia.

#### 4.1.2. Selección de la unidad hidráulica.

A partir de las dimensiones del cilindro hidráulico y una velocidad de aplicación de la carga de  $20 \pm 5$  mm/s, se determina el caudal de la bomba, el cual es mínimo de 0.59 gal/min y máximo de 0.99 gal/min (ver la Tabla 4-4).

Tabla 4-4. Selección del caudal de la bomba.

Descripción	Mínimo	Medio	Máximo
Velocidad, mm/s	15	20	25
Longitud, cm	90	90	90
Diámetro, cm	5,5	5,5	5,5
Área, cm <sup>2</sup>	23,76	23,76	23,76
Volumen, cm <sup>3</sup>	2138,25	2138,25	2138,25
Caudal, gal/min	0,565	0,753	0,942
n, rendimiento volumétrico	0,95	0,95	0,95
Caudal, gal/min	0,59	0,79	0,99

Fuente: propia.

Con las dimensiones del pistón del cilindro hidráulico y la fuerza a aplicar, se determina la presión mínima de la bomba, la cual corresponde a 3000 psi (Ver la Tabla 4-5).

Tabla 4-5. Selección de la presión de la bomba.

Descripción	Magnitud
Fuerza, Ton	5,0
Diámetro, cm	5,5
Área, cm <sup>2</sup>	23,76
Presión, MPa	20,65
Presión, psi	2949,35
Presión, bar	203,35

Fuente: propia.

Con la presión y el caudal del sistema hidráulico se determina la potencia a instalar del motor eléctrico o motor de combustión interna, haciendo uso de la Ecuación (34).sugerida por Audureau (1986).

$$P_i = \frac{Q * P}{600} \quad (34)$$

Donde:

Pi: potencia a instalar en Kw

Q: caudal en l/min

P: presión en bar

La potencia promedio calculada para un motor eléctrico es de 1.02 kW, mientras que la potencia para un motor de combustión interna es de 1.65 HP, teniendo en cuenta que para motores de combustión interna se presenta un incremento del 20% de la potencia (ver la Tabla 4-6).

Tabla 4-6. Potencia del motor.

Descripción	Mínimo	Medio	Máximo
Velocidad, mm/s	15	20	25
Presión, bar	203,35	203,35	203,35
Caudal, l/min	2,25	3,00	3,75
Potencia a instalar, kW	0,76	1,02	1,27
Potencia a instalar, HP	1,03	1,37	1,72
Potencia motor de combustión interna, HP	1.24	1.65	2.06

Fuente: propia.

A partir del caudal, la presión y la potencia del motor eléctrico indicadas en la Tabla 4-7, se selecciona la unidad hidráulica disponible comercialmente, la cual se describe en el capítulo V. Fabricación y calibración.

Tabla 4-7. Especificaciones para la selección de la unidad hidráulica.

Descripción	Mínima	Media	Máxima
Velocidad, mm/s	15	20	25
Caudal, gal/min	0,59	0,79	0,99
Capacidad del tanque, Gal	2,47	2,47	2,47
Presión, psi	3000	3000	3000
Potencia motor eléctrico, kW	0,77	1,02	1,28

Fuente: propia.

## 4.2. Diseño del Cono con Sensores Hidráulicos

El cono instrumentado tiene por objeto registrar la presión en la punta y la fricción en el fuste mediante cámaras hidráulicas utilizando transductores de presión hidráulica (ver la Figura 4-5).

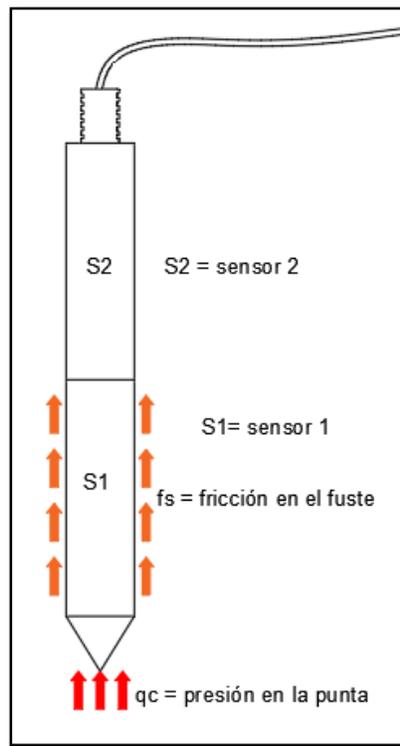


Figura 4-5. Ubicación de los sensores en el cono instrumentado. Fuente: propia.

El sensor 1 (S1), registra la presión en la punta ( $q_c$ ), mientras que el sensor (S2) registra la fricción en el fuste más la presión en la punta, de tal manera que para determinar la fricción en el fuste “ $f_s$ ” se debe restar al sensor S2 la presión en la punta registrada por el sensor S1.

Se seleccionaron los sensores de presión hidráulica a partir del rango de esfuerzos indicado en la Tabla 4-8, magnitudes establecidas por Bustamante & Ganeselli (1982), para una arcilla de consistencia media, que corresponde a un rango de 1 a 5 MPa, adquiriendo sensores en un rango de 0-40 bar (0-4 MPa).

Tabla 4-8. Presión en la punta.

<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>q<sub>c</sub>, MPa</b>
Arcilla blanda y lodo	< 1
Arcilla de consistencia media	1 a 5
Limo y arena suelta	≤ 5
Arcilla compacta a rígida y limo compacto	> 5
Tiza blanda	≤ 5
Grava y arena moderadamente compacta	5 a 12
Tiza degradada a fragmentada	>5
Grava y arena compacta a muy compacta	>12

Fuente: Bustamante & Ganeselli (1982).

#### **4.2.1. Especificaciones ASTM D5778.**

Para el diseño mecánico del cono instrumentado se tuvo en cuenta las dimensiones de los transductores de presión, el diámetro de la camisa, y del vástago del cilindro hidráulico, las cuales estuvieron limitadas a elementos que se encuentran disponibles en el comercio en Bogotá, el ángulo en la punta del cono es de 60°, según la norma ASTM D 5778 (Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration testing of soil).

El diámetro del cono diseñado es de 60 mm, el cual no cumple con los diámetros normalizados por la norma ASTM D 5778, y que son de 35.7 mm o 43.7 mm, dado que el diseño está limitado por las dimensiones de los sensores de presión hidráulica; es de resaltar que en el mercado se encuentran conos disponibles desde 16 mm hasta 71.4 mm de diámetro (ver la Figura 4-6 y la Tabla 4-9).



Figura 4-6. Rango de tamaños de conos en el ensayo CPT (2 cm<sup>2</sup>, 10 cm<sup>2</sup>, 15 cm<sup>2</sup>, 40 cm<sup>2</sup>). Fuente: Robertson & Cabal (2010).

Según Vertek (2015), los conos pequeños hasta 1 cm<sup>2</sup>, en el ensayo CPT, se utilizan en laboratorio o investigaciones especializadas; mientras que los conos de mayor diámetro, ofrecen una resistencia al cono más precisa en suelos de consistencia blanda. El cono propuesto en el presente documento se encuentra dentro de los rangos indicados por Robertson & Cabal, 2010 (ver la Tabla 4-9), y su aplicación se desarrollará en suelos de consistencia blanda, por lo que se encuentra dentro de las aplicaciones descritas por Vertek (2015).

Tabla 4-9. Rangos de diámetro y área de piezocono.

<b>Diámetro, mm</b>	<b>Área, cm<sup>2</sup></b>
16.0	2
35.7	10
43.7	15
71.4	40

Fuente: Robertson & Cabal (2010).

Se realiza el pre dimensionamiento de los elementos mediante el software Inventor, para luego hacer el ensamble del conjunto de todos los elementos. En el Anexo 2 se pueden consultar los planos de detalle. En la Figura 4-7 se observa el modelo del cono instrumentado, y en la Tabla 4-10 las piezas diseñadas que hacen parte del mismo.

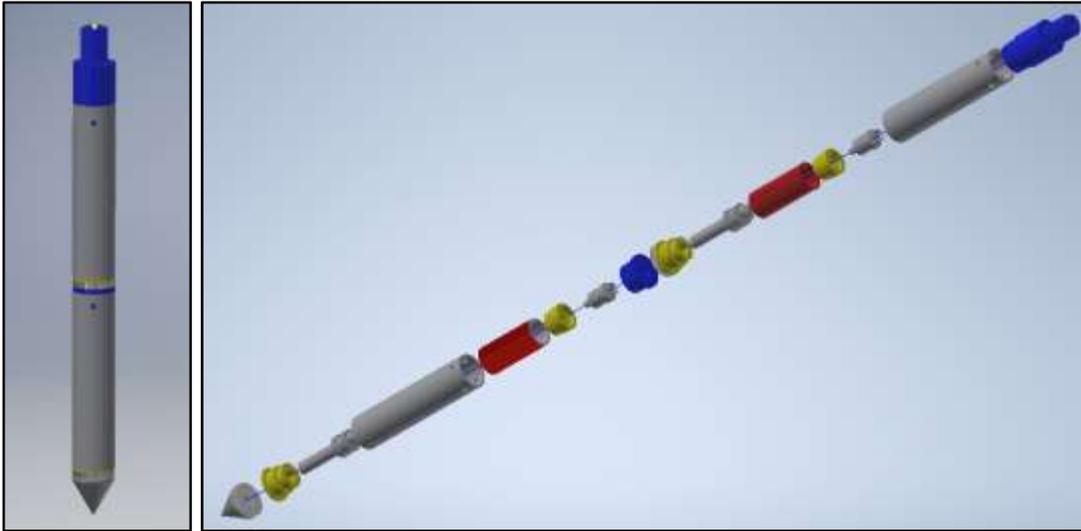
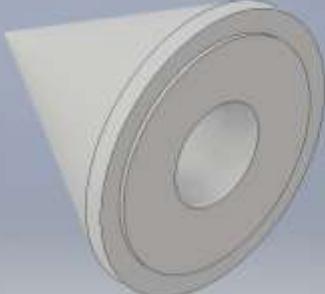
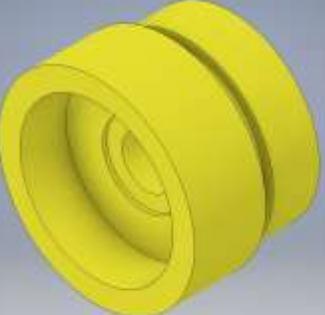
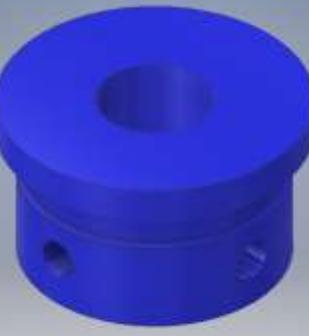


Figura 4-7. Cono instrumentado modelado. Fuente: propia.

Tabla 4-10. Piezas modeladas en el software inventor.

		
<p>1. Cono</p>	<p>2. Tapón inferior del cilindro hidráulico (dos piezas iguales)</p>	<p>3. Pistón y vástago para el cilindro hidráulico (dos piezas iguales)</p>
		
<p>4. Tapón superior del cilindro hidráulico (dos piezas iguales)</p>	<p>5. Cilindro hidráulico (dos piezas iguales)</p>	<p>6. Sensor de presión (dos elementos iguales)</p>
		
<p>7. Camisa externa (dos piezas iguales)</p>	<p>8. Acople entre el sensor de la punta y el fuste</p>	<p>9. Acople de la camisa del sensor del fuste y la tubería de penetración</p>

Fuente: propia.

#### 4.2.2. Sistema de adquisición de datos.

Los sensores de presión hidráulica seleccionados son de tipo resistivo, los cuales cuentan con cuatro cintas extensométricas ubicadas en una membrana, donde la deformación de la membrana provoca la deformación de las cintas con el efecto de un aumento o reducción proporcional de la resistencia. Para realizar una medición precisa se conectan las cintas en un puente de Wheatstone.

En su interior el sensor cuenta con una placa electrónica que transforma la variación del voltaje registrado en el puente de Whatstone, en una variación de corriente en miliamperios.

Parte de la ficha técnica del sensor seleccionado se indica en la Figura 4-8, donde se especifica que el voltaje de alimentación es de 9 a 30 VDC, y la señal de salida es de 4 a 20 mA, la ficha completa se puede consultar en el Anexo 2.

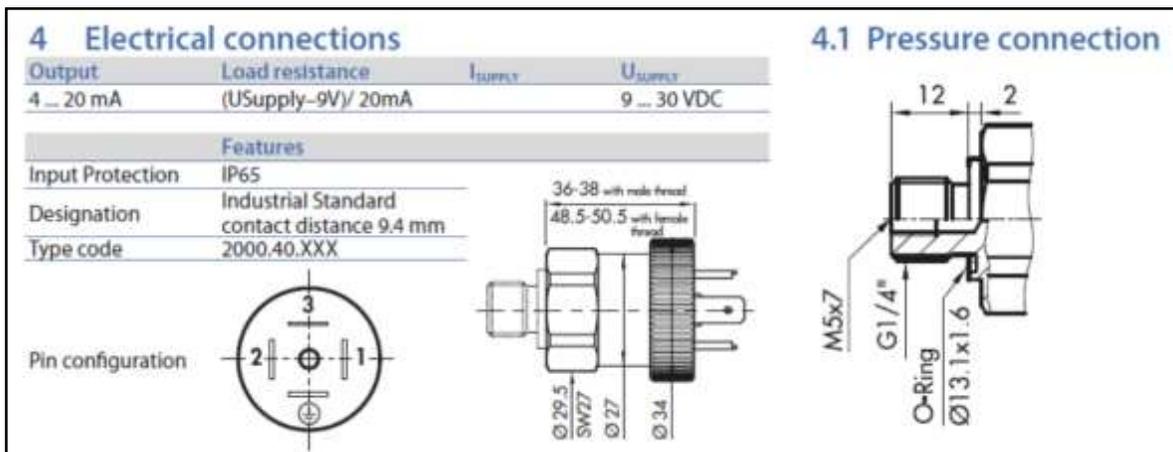


Figura 4-8. Ficha técnica del sensor de presión. Fuente:

<https://www.pixsys.net/es/productos/transmisores-de-presion/ect-transmisor-de-presion> (2016).

Teniendo en cuenta que la señal de salida del sensor de presión es de 4 a 20 mA, se seleccionó el indicador TK4L, el cual cuenta con señal de entrada en miliamperios (ver la Figura 4-9).

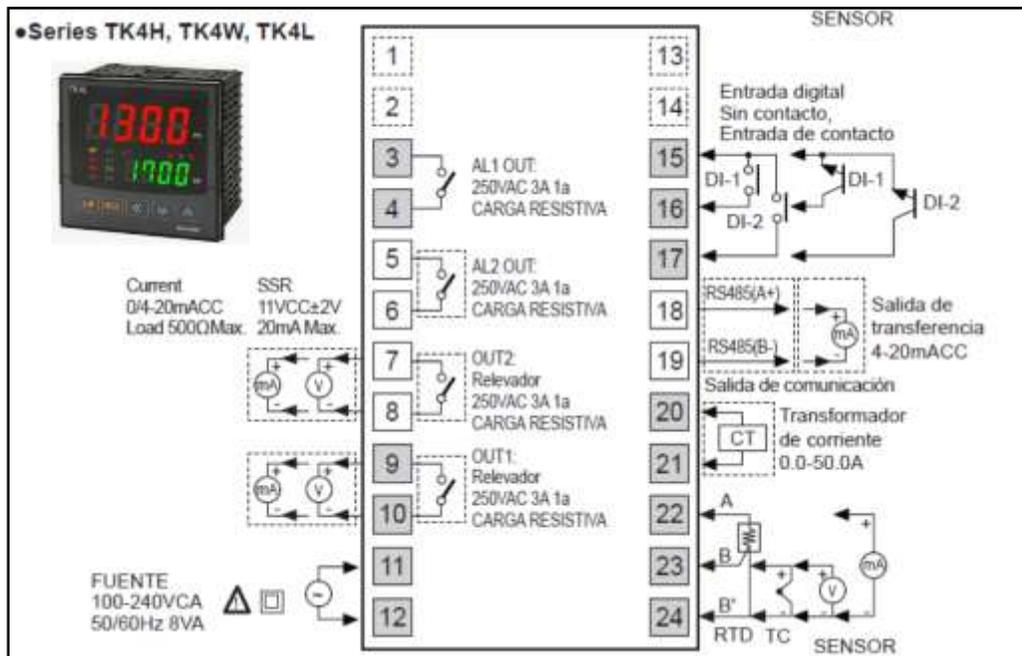


Figura 4-9. Parte de la ficha técnica del indicador TK4L. Fuente:

[https://www.acotron.com/download/861cb276ab43c61bbac29e37d0b147b3\\_TK4\\_upgrade\\_ES\\_EP-ES-03-0210B\\_20140528\\_W.pdf](https://www.acotron.com/download/861cb276ab43c61bbac29e37d0b147b3_TK4_upgrade_ES_EP-ES-03-0210B_20140528_W.pdf) (2016).

A partir del voltaje de alimentación del sensor de presión que corresponde de 9 a 30 VDC, se selecciona una fuente EBCHQ de 12 VDC (ver la Figura 4-10).



Figura 4-10. Fuente de alimentación EBCHQ. Fuente:

[https://www.viaindustrial.com/catalogos\\_pdf/fuentes-de-alimentacion-switcheadas-12-vdc-43369-ebchq-catalogo-ingles.pdf](https://www.viaindustrial.com/catalogos_pdf/fuentes-de-alimentacion-switcheadas-12-vdc-43369-ebchq-catalogo-ingles.pdf) (2016).

Teniendo en cuenta que el indicador TK4L cuenta con conectividad para computador con el objeto de visualizar en tiempo real, y almacenar el registro de los sensores de presión, se selecciona un convertidor de comunicación de puerto RS485 a USB (ver la Figura 4-11).

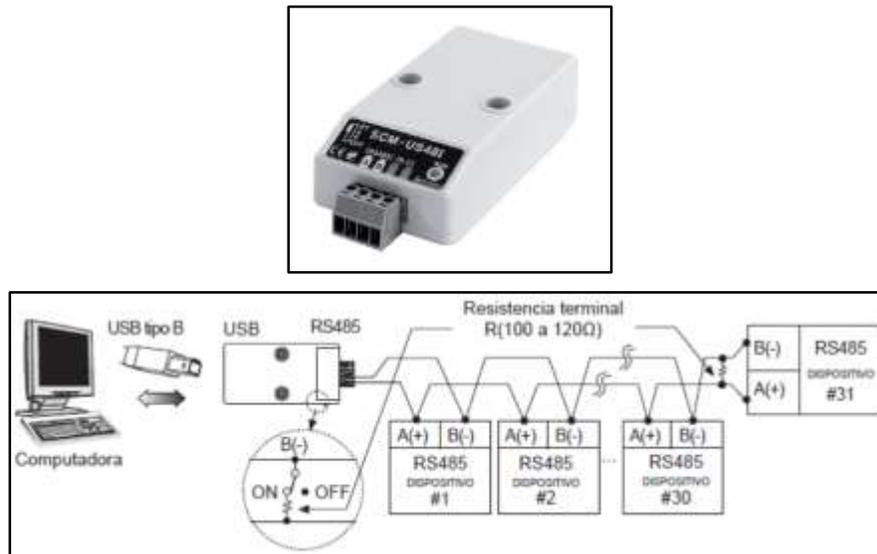


Figura 4-11. Convertidor de comunicación. Fuente:

[https://www.acotron.com/download/152774460becd98499f55d25ac6057f4\\_ACM.pdf](https://www.acotron.com/download/152774460becd98499f55d25ac6057f4_ACM.pdf) (2016).

El indicador TK4L cuenta con un software para administrar dispositivos, útil para configurar parámetros, monitorear datos en tiempo real y almacenar datos (ver-Figura 4-12).

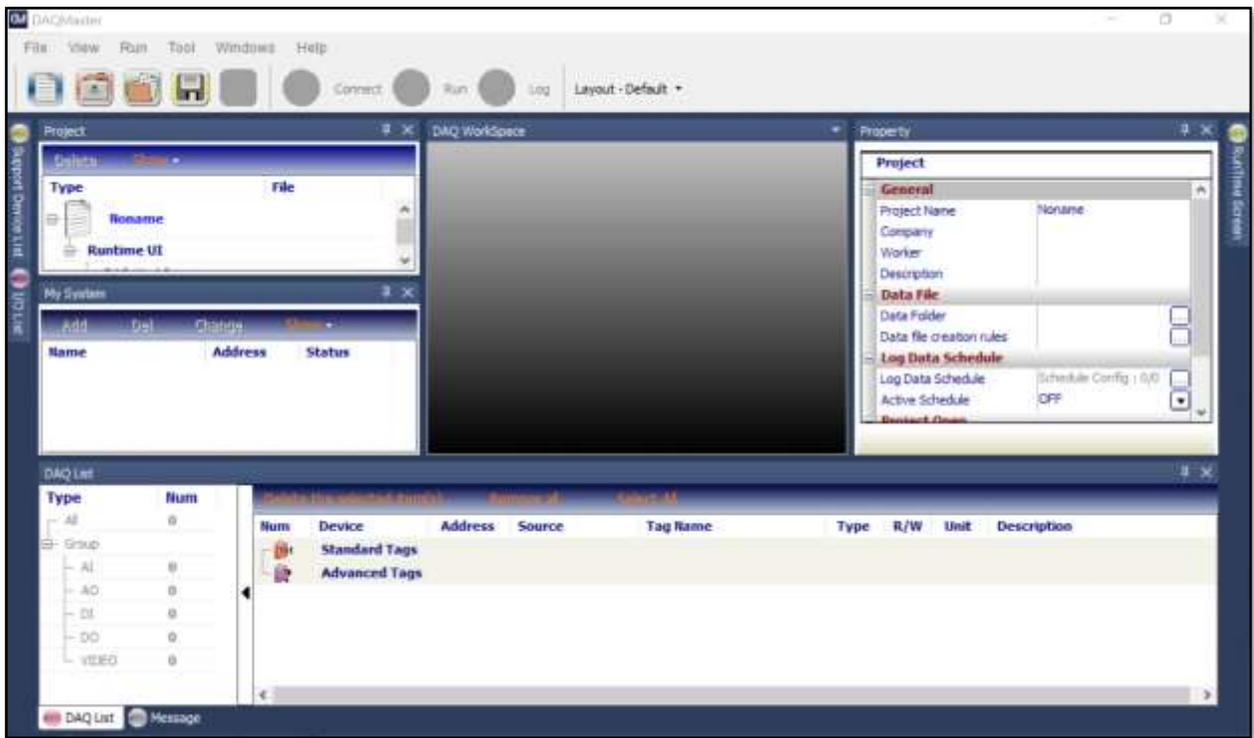


Figura 4-12. Software DAQMaster. Fuente: <https://www.autonics.com/series/3000810> (2016).

Una vez seleccionados los dispositivos, se procede a diseñar el circuito de conexión para la visualización, y almacenamiento de la información de los sensores en la punta y en el fuste (ver la Figura 4-13). En el Anexo 2 se puede consultar el plano.

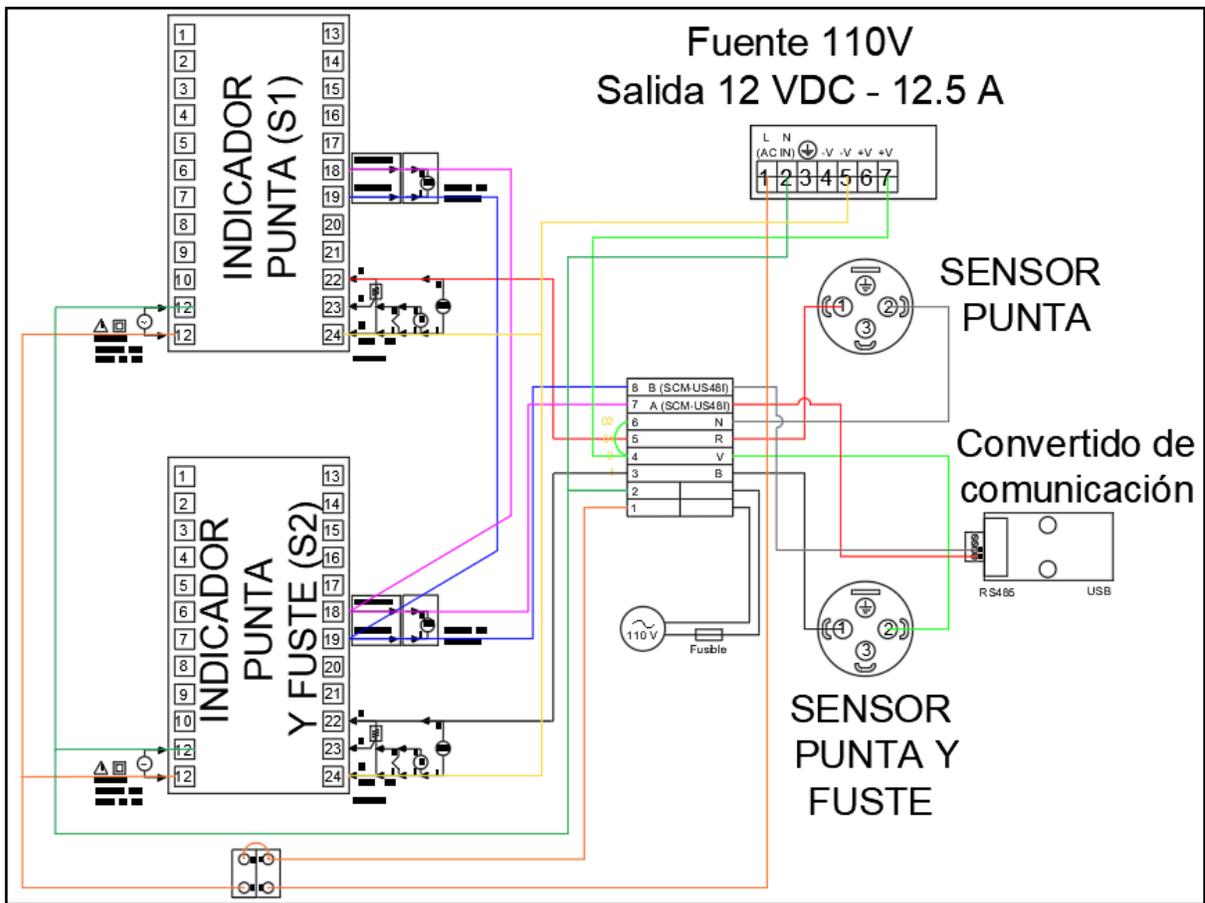


Figura 4-13. Circuito de conexión del indicador, fuente de alimentación, sensores y unidad de comunicación. Fuente: propia.

## Capítulo V

### Fabricación y Calibración

En este capítulo se describe de forma general la fabricación de la máquina hidráulica para hincar el sensor, y la fabricación del cono instrumentado.

#### 5.1. Fabricación de la Máquina Hidráulica para Hincar el Cono Instrumentado

La máquina hidráulica se diseñó y fabricó teniendo en cuenta que durante el proceso de hincado se debe anclar al terreno y el sensor debe penetrar a una velocidad de  $20 \pm 5$  mm/min, con una aplicación de carga de hasta 5 toneladas.

A partir del diseño, se selecciona la unidad de potencia hidráulica con las especificaciones indicadas en la Tabla 5-1 (ver la Figura 5-1).

Tabla 5-1. Especificaciones unidad hidráulica seleccionada.

Descripción	Magnitud
Presión	3500 psi
Caudal, gal/min	0.75
Capacidad del tanque, gal <sup>3</sup>	3.0
Potencia del motor eléctrico, HP	1.5

Fuente: ficha técnica, <https://ph.parker.com/us/es/compact-hydraulic-power-unit-108-series> (2016).



Figura 5-1. Unidad hidráulica. Fuente: propia.

A partir de las dimensiones del cilindro hidráulico establecidas en el diseño, se adquieren los materiales que corresponden a la camisa, el vástago cromado, la empaquetadura, los racores, etc. La fabricación se llevó a cabo en el centro de mecanizado ubicado en el Barrio Ricaurte - Bogotá y en la carrera 104 A Bis No 23D-12 en Fontibón (ver la Figura 5-2).



Figura 5-2. Fabricación cilindro hidráulico. Fuente: propia.

Se adquirió el material y se fabricó el marco de carga, las bases para el anclaje, los pasadores, los barrenos de anclaje, los acoples para penetrar y extraer el sensor, a partir de los planos de diseño (ver la Figura 5-3 y la Tabla 5-2).

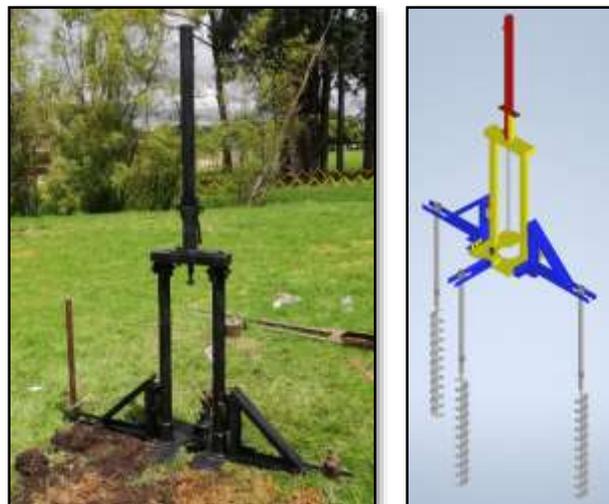


Figura 5-3. Máquina hidráulica para penetrar el sensor. Fuente: propia.

Tabla 5-2. Marco de carga, bases de anclaje, viga de anclaje, barreno.

		
<p>1. Marco de carga</p>	<p>2. Dos bases para anclaje</p>	<p>3. Viga para anclaje</p>
		
<p>4. Barreno de anclaje (tres iguales)</p>	<p>5. Acoples para penetración y extracción</p>	<p>6. Tubería para penetrar sensor</p>

Fuente: propia.

## 5.2. Fabricación del Cono Instrumentado

A continuación, se describe la fabricación del cono instrumentado, el cual registra la penetración en la punta y la fricción en el fuste.

A partir de los planos establecidos en el diseño, se adquieren los materiales para luego realizar el mecanizado en torno y fresa, proceso que se llevó a cabo en la zona del Ricaurte en Bogotá (ver la Tabla 5- 3 y la Figura 5-4).

Tabla 5- 3. Piezas fabricadas para el cono instrumentado.

		
1. Un cono	2. Camisa externa (dos piezas iguales)	3. Vastago con pistón (dos piezas iguales)

		
<p>4. Tapón inferior para cilindro hidráulico (dos piezas iguales)</p>	<p>5. Camisa para sistema hidráulico (dos piezas iguales)</p>	<p>6. Tapón superior con sensor de presión (dos piezas iguales)</p>
		
<p>7. Acople del cono instrumentado con la tubería de penetración</p>	<p>8. Ensamble del sistema hidráulico con el sensor de presión</p>	<p>9. Aceite ISO E-68 en la cámara hidráulica.</p>

Fuente: propia.



Figura 5-4. Sensores de presión en la punta y fricción en el fuste. Fuente: propia.

### 5.2.1. Sistema de adquisición de datos.

En la etapa de diseño se seleccionaron los dispositivos para la adquisición de datos de los transductores de presión del cono instrumentado, luego se procedió a adquirir y conectar los equipos de acuerdo con el diseño del circuito eléctrico presentado en el capítulo 4.2.2. Los equipos adquiridos se indican en la Tabla 5-4 y Tabla 5-5. Para la selección de equipos y ensamblaje se contó con el apoyo del ingeniero en telecomunicaciones Joany Campos

Tabla 5-4. Elementos del sistema de adquisición de datos.

Descripción	Cantidad
Indicador TK4L	2
Fuente de alimentación EBCHQ 12 VDC	1
Convertidor de comunicación US48I	1
Software DAQMaster	1
Sensor de presión 0-40 bar	2
Caja plástica de paso 10cm x 10 cm x 7cm	1
Caja de plástico eléctrica 30cm x 25cm x 12cm	1
Bornera eléctrica	1
Cable apantallado de 4 hilos	40 m
Interruptor de dos fases	1
Porta-fusible con fusible	1

Fuente: propia.

El equipo de adquisición de datos está conformado por dos indicadores, donde el display superior visualiza la presión en la punta y el segundo lectora, la fuerza en el sensor 2, que corresponde a la presión en la punta y la fricción en el fuste (ver la Tabla 5-5).

Tabla 5-5. Elementos del sistema de adquisición de datos.

		
<p>1. Indicadores TK4L</p>	<p>2. Conexión de los indicadores</p>	<p>3. Fuente de alimentación</p>
		
<p>4. Caja de paso</p>	<p>5. Convertidor de comunicación</p>	<p>6. Sensores de presión</p>

Fuente: propia.

### 5.2.2. Calibración del cono.

Una vez fabricado y ensamblado el cono instrumentado, se procede a realizar su calibración en un marco de carga con una celda de carga tipo S, procedimiento que se realiza en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (ver la Figura 5-5).



Figura 5-5. Calibración del cono instrumentado con celda de carga tipo S (Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas). Fuente: propia.

Se realizaron siete procedimientos de calibración para el sensor que registra la presión en la punta “S1”, y siete para el sensor que registra la presión en la punta y la fricción en el fuste “S2”; la información fue registrada en el formato tipo indicado en la Figura 5-6. Las 14 calibraciones se relacionan en el Anexo 3.

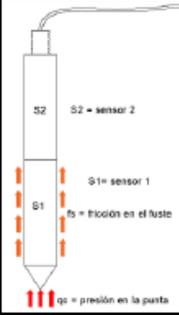
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN GEOTECNIA CALIBRACIÓN COMO INSTRUMENTADO				 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO			
PROYECTO:	Maestría en Ingeniería Civil - Enfasis en Geotecnia	FECHA DE CALIBRACIÓN	02/08/2019				
UBICACIÓN:	Universidad Distrital Francisco José de Caldas	FECHA DE PROXIMA CALIBRACIÓN					
CAPACIDAD MÁXIMA DE LA CELDA DE CARGA DE REFERENCIA		10 kN					
INDICADOR DE LA CELDA DE CARGA DE REFERENCIA		Miniloger Humboldt					
UBICACIÓN DEL SENSOR		En la punta del cono instrumentado (S1)					
CAPACIDAD MÁXIMA DEL SENSOR DE PRESIÓN A CALIBRAR		40 Bar					
INDICADOR DEL SENSOR DE PRESIÓN HIDRÁULICO		Autonics TK4L					
Calibración 1 Sensor S1			Calibración 2 Sensor S1			Parametros ecuación de calibración $y=mx+b$	
Dato	Lectura celda de carga, kN	Lectura sensor de presión, bar	Dato	Lectura celda de carga, kN	Lectura sensor de presión, bar		
1	0,736	358	1	0,980	469	Calibración 1 Sensor S1	
2	0,754	363	2	0,991	479	m	0,0013
3	0,765	367	3	1,013	489	b	0,3378
4	0,780	374	4	1,021	502	$y=0,0013x+0,3378$	
5	0,799	379	5	1,039	511	Calibración 2 Sensor S1	
6	0,806	385	6	1,054	521	m	0,0013
7	0,825	390	7	1,076	530	b	0,3791
8	0,836	397	8	1,091	542	$y=0,0013x+0,3791$	
9	0,847	403	9	1,102	554		
10	0,862	411	10	1,117	567		
11	0,880	418	11	1,135	581		
12	0,887	426	12	1,154	592		
13	0,902	434	13	1,165	605		
14	0,921	442	14	1,187	617		
15	0,932	451	15	1,205	629		
16	0,939	461	16	1,228	644		
17	0,958	471	17	1,239	657		
18	0,972	478	18	1,257	671		
19	0,987	490	19	1,279	684		
20	1,002	503	20	1,290	698		
21	1,009	513	21	1,309	711		
22	1,032	525	22	1,324	725		
23	1,046	535	23	1,339	741		
24	1,061	546	24	1,361	753		
25	1,076	560	25	1,387	765		
26	1,091	571	26	1,398	778		
27	1,098	583	27	1,416	792		
28	1,117	596	28	1,427	804		
29	1,139	606	29	1,438	819		
30	1,146	618	30	1,461	833		
31	1,165	631	31	1,479	845		
32	1,180	642	32	1,498	860		
33	1,191	654	33	1,512	874		
34	1,217	663	34	1,523	886		
35	1,231	676	35	1,549	899		
36	1,250	688	36	1,568	911		
37	1,265	699	37	1,590	923		
38	1,276	711	38	1,612	934		
39	1,298	725	39	1,623	949		
40	1,320	737	40	1,645	963		
41	1,331	750	41	1,664	978		

Figura 5-6. Formato de registro para calibración de los sensores del cono instrumentado. Fuente: propia.

Para las catorce calibraciones se obtuvo la línea de tendencia, las cuales presentaron un comportamiento lineal (ver la Figura 5-7 y Figura 5-8), obteniendo la ecuación de la línea recta, determinando la pendiente “m” y la intersección con el eje y “b” (ver la Tabla 5-6 y la Tabla 5-7).

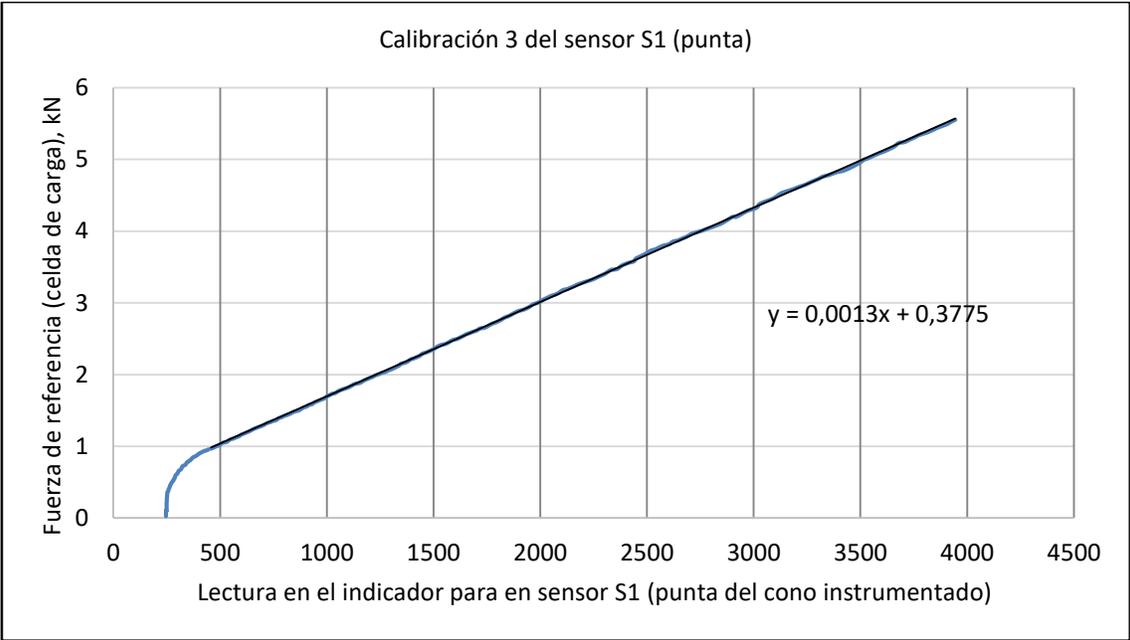


Figura 5-7. Calibración 3 del sensor S1(punta) del cono instrumentado. Fuente: propia.

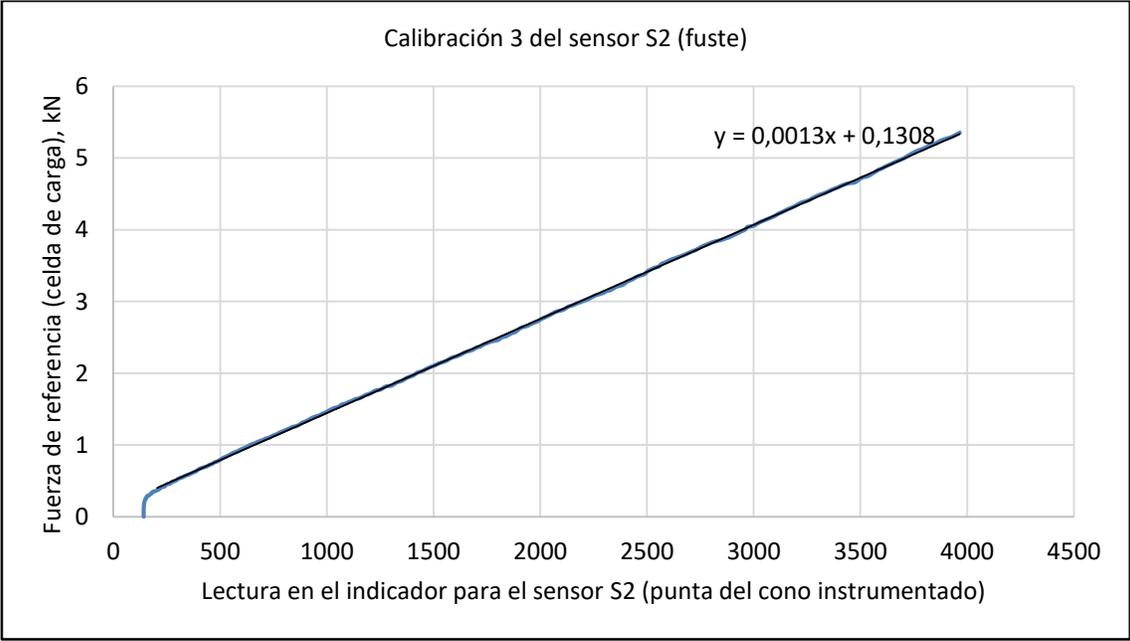


Figura 5-8. Calibración 3 del sensor S2(fuste) del cono instrumentado. Fuente: propia.

Según Mensur M., Soren E., & Rolf L. (1990), en la grafica de resistencia en la punta versus presión de cámara (ver la Figura 5-9), que se realiza durante el proceso de calibracion del piezocono convencional en una camara de calibración, se registra un comportamiento curvo al inicio de la gráfica, el cual se debe a la fricción en los orings (anillos en caucho) al ser movilizadoss; para la calibración de la punta y el fuste del cono propuesto se evidencia un comportamiento similar el cual se debe principalmente a la fricción de la empaquetadura en el pistón del sistema hidráulico.

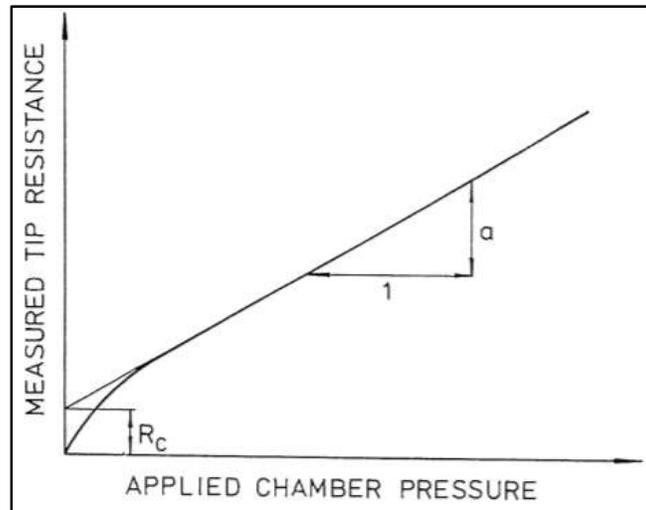


Figura 5-9. Evaluación del factor de área neta “a” y error de fricción “ $R_c$ ” durante el proceso de calibración de un piezocono convencional. Fuente: Mulabic, Eskilson, & Larsson (1990).

La calibración del piezocono convencional se realiza en una cámara de presión como se puede observar en la Figura 7-12, la calibración del cono propuesto no se realiza en una cámara dado que no hace parte del alcance del presente proyecto.

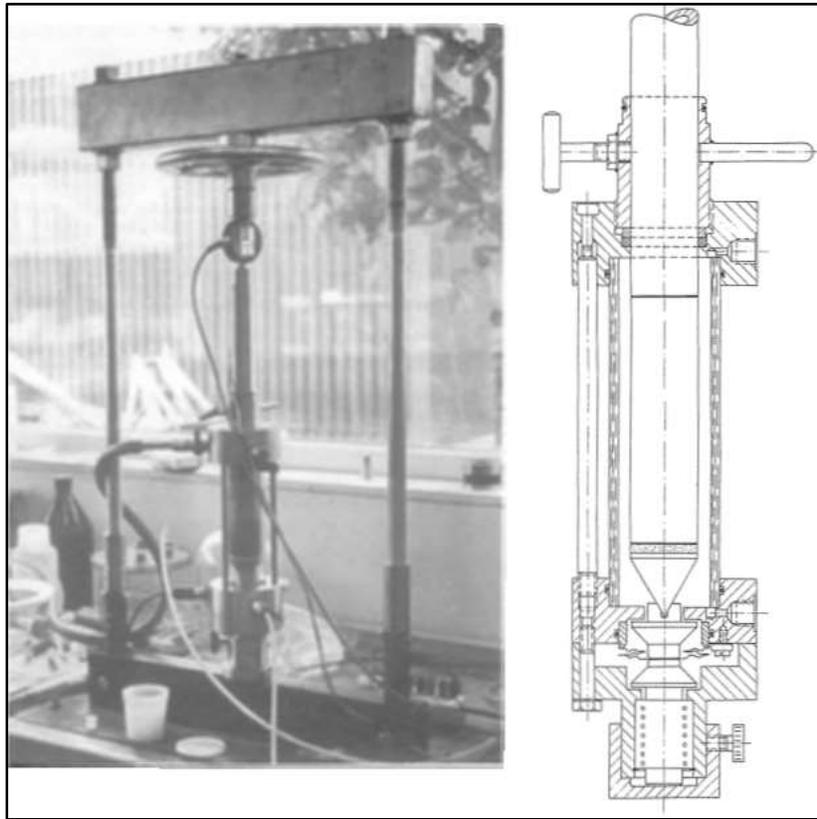


Figura 5-10. Cámara de calibración para piezocono. Fuente: Mulabic, Eskilson, & Larsson (1990).

Se puede observar que la pendiente “m” es la misma en las catorce calibraciones, tanto para el sensor que registra la presión en la punta “S1”, como para el sensor que registra la fricción en el fuste “S2” y que corresponde a  $m = 0.0013$ .

Tabla 5-6. Parámetros de las ecuaciones de calibración del sensor en la punta (S1).

Corrida	m	b	R
1	0,0013	0,3378	0,9998
2	0,0013	0,3791	0,9998
3	0,0013	0,3775	0,9999
4	0,0013	0,3967	0,9999
5	0,0013	0,4257	0,9999
6	0,0013	0,4381	0,9998
7	0,0013	0,4139	0,9998

Fuente: propia.

Tabla 5-7. Parámetros de las ecuaciones de calibración del sensor en el fuste (S2).

Corrida	m	b	R
1	0,0013	0,2631	0,9997
2	0,0013	0,2014	0,9998
3	0,0013	0,1308	0,9999
4	0,0013	0,1179	0,9999
5	0,0013	0,1192	0,9999
6	0,0013	0,13	0,9999
7	0,0013	0,1394	0,9998

Fuente: propia.

De las ecuaciones lineales, se analiza estadísticamente la intersección con el eje de las ordenadas “b”, para obtener la ecuación de calibración promedio del sensor que registra la presión en la punta “S1”, y del sensor que registra la fricción en el fuste “S2” (ver la Tabla 5-8 y la Tabla 5-9).

Tabla 5-8. Análisis estadístico de “b” en la ecuación de calibración del sensor en la punta (S1).

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD
Media	0,396
Error típico	0,013
Mediana	0,397
Desviación estándar	0,034
Varianza de la muestra	0,001
Curtosis	-0,063
Coefficiente de asimetría	-0,541
Rango	0,100
Mínimo	0,338
Máximo	0,438
Suma	2,769
Cuenta	7

Fuente: propia.

Tabla 5-9. Análisis estadístico de “b” en la ecuación de calibración del sensor en el fuste (S2).

DESCRIPCIÓN	MAGNITUD
Media	0,157
Error típico	0,021
Mediana	0,131
Desviación estándar	0,055
Varianza de la muestra	0,003
Curtosis	1,634
Coficiente de asimetría	1,579
Rango	0,145
Mínimo	0,118
Máximo	0,263
Suma	1,102
Cuenta	7

Fuente: propia.

En la Ecuación (35), se indica la formula promedio de calibración para el sensor “S1”, presentando una desviación estándar de 0.034

$$y = 0.0013x + 0.3013 \quad (35)$$

La anterior ecuación se puede expresar con la formula (36)

$$FP = 0.0013Llp + 0.3013 \quad (36)$$

Donde:

FP = Fuerza en la punta

Llp = Lectura del indicador de la punta

En la Ecuación (37), se indica la formula promedio de calibración para el sensor “S2”, la cual presenta una desviación estándar de 0.055.

$$y = 0.0013x + 0.157 \quad (37)$$

La anterior Ecuación se puede expresar con la formula (38)

$$FFP = 0.0013LLfp + 0.157 \quad (38)$$

Donde:

FFP = Fuerza en el fuste y en la punta

LI<sub>fp</sub> = Lectura del indicador de fuste y punta

A partir de las ecuaciones de calibración se realizan diez lecturas para las fuerzas aplicadas de 1kN, 2kN, 3kN, 4kN y 5kN con la celda de carga de referencia, con el objeto de determinar la precisión y exactitud del sensor S1 (punta), y el sensor S2 (fuste).

Dicha información se registra en el formato indicado en la Figura 5-11 y Figura 5-12, los cuales también se pueden consultar en el Anexo 3.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO											ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO			
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN GEOTECNIA														
CALIBRACIÓN DEL CONO INSTRUMENTADO														
PROYECTO:	Maestria en Ingeniería Civil - Enfas en Geotecnia					HOJA					1 de 2			
UBICACIÓN:	Universidad Distrital Francisco José de Caldas					FECHA DE CALIBRACIÓN					6/08/2019			
CAPACIDAD MÁXIMA DE LA CELDA DE CARGA DE REFERENCIA											10 kN			
INDICADOR DE LA CELDA DE CARGA DE REFERENCIA											Minilogger Humboldt			
UBICACION DEL SENSOR											En la punta del cono instrumentado (S1)			
CAPACIDAD MÁXIMA DEL SENSOR DE PRESIÓN A CALIBRAR											40 Bar			
INDICADOR DEL SENSOR DE PRESIÓN HIDRÁULICO											Autonics TK4L			
<b>1. ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN</b>														
$y=0,0013*x+0,3013$											m	0,0013	b	0,3013
<b>2. DATOS REGISTRADOS CON EL INDICADOR TK4L (SENSOR S1 UBICADO EN LA PUNTA)</b>														
Fuerza aplicada, kN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio			
1	529	522	531	544	529	528	499	525	572	520	529,9			
2	1328	1305	1313	1324	1311	1322	1296	1312	1322	1322	1315,5			
3	2089	2087	2092	2095	2098	2107	2073	2106	2111	2117	2097,5			
4	2891	2874	2885	2889	2876	2873	2888	2891	2901	2912	2888			
5	3650	3648	3655	3658	3651	3648	3636	3696	3668	3666	3657,6			
<b>3. FUERZA EN LA PUNTA, DETERMINADA EN EL SENSOR S1 (PUNTA) CON LA ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN</b>														
Fuerza aplicada, kN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio			
1	0,989	0,9799	0,9916	1,0085	0,989	0,9877	0,95	0,9838	1,0449	0,9773	0,99017			
2	2,0277	1,9978	2,0082	2,0225	2,0056	2,0199	1,9861	2,0069	2,0199	2,0199	2,01145			
3	3,017	3,0144	3,0209	3,0248	3,0287	3,0404	2,9962	3,0391	3,0456	3,0534	3,02805			
4	4,0596	4,0375	4,0518	4,057	4,0401	4,0362	4,0557	4,0596	4,0726	4,0869	4,0557			
5	5,0463	5,0437	5,0528	5,0567	5,0476	5,0437	5,0281	5,1061	5,0697	5,0671	5,05618			
<b>4. DIFERENCIAS CON RESPECTO A LA REFERENCIA DE LA CELDA DE CARGA</b>														
Fuerza aplicada, kN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Máxima diferencia, kN	Máxima diferencia, %		
1	0,011	0,0201	0,0084	0,0085	0,011	0,0123	0,05	0,0162	0,0449	0,0227	0,05	5,00		
2	0,0277	0,0022	0,0082	0,0225	0,0056	0,0199	0,0139	0,0069	0,0199	0,0199	0,0277	1,38		
3	0,017	0,0144	0,0209	0,0248	0,0287	0,0404	0,0038	0,0391	0,0456	0,0534	0,0534	1,78		
4	0,0596	0,0375	0,0518	0,057	0,0401	0,0362	0,0557	0,0596	0,0726	0,0869	0,0869	2,17		
5	0,0463	0,0437	0,0528	0,0567	0,0476	0,0437	0,0281	0,1061	0,0697	0,0671	0,1061	2,12		
											Maxima diferencia (Exactitud)	0,1061	5	
											Exactitud promedio		2,49	
<b>5. DIFERENCIAS CON RESPECTO AL PROMEDIO</b>														
Fuerza aplicada, kN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Máxima diferencia, kN	Máxima diferencia, %		
1	0,00117	0,01027	0,00143	0,01833	0,00117	0,00247	0,04017	0,00637	0,05473	0,01287	0,05473	5,53		
2	0,01625	0,01365	0,00325	0,01105	0,00585	0,00845	0,02535	0,00455	0,00845	0,00845	0,02535	1,26		
3	0,01105	0,01365	0,00715	0,00325	0,00065	0,01235	0,03185	0,01105	0,01755	0,02535	0,03185	1,05		
4	0,0039	0,0182	0,0039	0,0013	0,0156	0,0195	0	0,0039	0,0169	0,0312	0,0312	0,77		
5	0,00988	0,01248	0,00338	0,00052	0,00858	0,01248	0,02808	0,04992	0,01352	0,01092	0,04992	0,99		
											Maxima diferencia (Precisión)	0,05473	5,53	
											Precisión promedio		1,92	
<b>6. PARAMETROS DE ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVA DEL ÍTEM 3</b>														
Fuerza de referencia (celda de carga), kN	1	2	3	4	5	OBSERVACIONES								
Media	0,95399	1,97527	2,99187	4,01952	5,02									
Error típico	0,0076504	0,0040754	0,0053854	0,0050125	0,0067305									
Mediana	0,95217	1,97787	2,99057	4,02017	5,01402									
Moda	0,95282	1,98372		4,02342	5,00752									
Desviación estándar	0,0241927	0,0128876	0,0170301	0,0158508	0,0212837									
Varianza de la muestra	0,0005853	0,0001661	0,00029	0,0002512	0,000453									
Curtosis	3,1337372	0,0068843	-0,116554	0,3054764	3,0452703	Ing. Wilson Andrés Vásquez Romero								
Coefficiente de asimetría	0,9984125	-0,759964	-0,328238	0,6284444	1,4479175	REALIZO								
Rango	0,0949	0,0416	0,0572	0,0507	0,078									
Mínimo	0,91382	1,94992	2,96002	4,00002	4,99192									
Máximo	1,00872	1,99152	3,01722	4,05072	5,06992									
Suma	9,5399	19,7527	29,9187	40,1952	50,2	Dr. Guillermo Pabón Gutiérrez								
Cuenta	10	10	10	10	10	REVISO Y APROBO								

Figura 5-11. Formato de registro para determinar precisión y exactitud (hoja 1). (ver en el Anexo 3).

Fuente: propia.

PROYECTO:	Maestría en Ingeniería Civil - Énfasis Geotecnia	HOJA	2 de 2
UBICACIÓN:	Universidad Distrital Francisco José de Caldas	FECHA DE CALIBRACION	6/08/2019
CAPACIDAD MÁXIMA DE LA CELDA DE CARGA DE REFERENCIA		10 kN	
INDICADOR DE LA CELDA DE CARGA DE REFERENCIA		Minilogger Humboldt	
UBICACIÓN DEL SENSOR		En la punta del cono instrumentado (S1)	
CAPACIDAD MÁXIMA DEL SENSOR DE PRESIÓN A CALIBRAR		40 Bar	
INDICADOR DEL SENSOR DE PRESIÓN HIDRÁULICO		Autonics TK4L	

7. REGISTRO DE DATOS PARA 1 kN, 2 kN, 3 kN, 4kN y 5kN

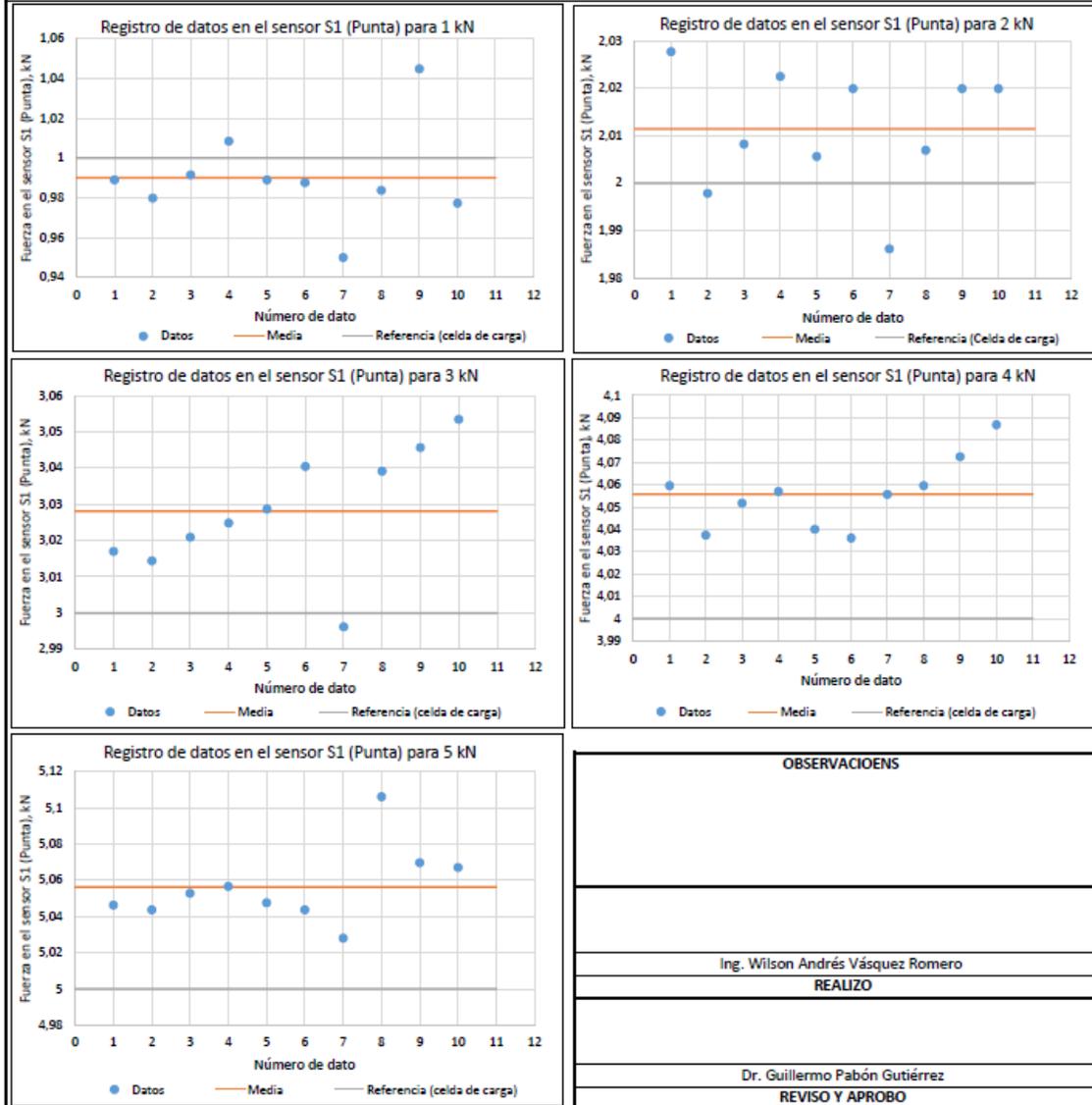


Figura 5-12. Graficas de calibración para determinar precisión y exactitud (hoja 1). (ver en el Anexo 3). Fuente: propia.

En la Tabla 5-10 se relacionan los datos registrados para determinar la precisión y exactitud promedio para el sensor S1 (punta del cono instrumentado), y en la Figura 5-13, el comportamiento de dichos datos para una fuerza de 1kN.

Tabla 5-10. Precisión y exactitud promedio para el sensor en la punta (S1)

3. FUERZA EN LA PUNTA, DETERMINADA EN EL SENSOR S1 (PUNTA) CON LA ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN												
Fuerza aplicada, kN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio	
1	0,989	0,9799	0,9916	1,0085	0,989	0,9877	0,95	0,9838	1,0449	0,9773	0,99017	
2	2,0277	1,9978	2,0082	2,0225	2,0056	2,0199	1,9861	2,0069	2,0199	2,0199	2,01145	
3	3,017	3,0144	3,0209	3,0248	3,0287	3,0404	2,9962	3,0391	3,0456	3,0534	3,02805	
4	4,0596	4,0375	4,0518	4,057	4,0401	4,0362	4,0557	4,0596	4,0726	4,0869	4,0557	
5	5,0463	5,0437	5,0528	5,0567	5,0476	5,0437	5,0281	5,1061	5,0697	5,0671	5,05618	
4. DIFERENCIAS CON RESPECTO A LA REFERENCIA DE LA CELDA DE CARGA												
Fuerza aplicada, kN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Máxima diferencia, kN	Máxima diferencia, %
1	0,011	0,0201	0,0084	0,0085	0,011	0,0123	0,05	0,0162	0,0449	0,0227	0,05	5,00
2	0,0277	0,0022	0,0082	0,0225	0,0056	0,0199	0,0139	0,0069	0,0199	0,0199	0,0277	1,38
3	0,017	0,0144	0,0209	0,0248	0,0287	0,0404	0,0038	0,0391	0,0456	0,0534	0,0534	1,78
4	0,0596	0,0375	0,0518	0,057	0,0401	0,0362	0,0557	0,0596	0,0726	0,0869	0,0869	2,17
5	0,0463	0,0437	0,0528	0,0567	0,0476	0,0437	0,0281	0,1061	0,0697	0,0671	0,1061	2,122
											<b>Maxima diferencia (Exactitud)</b>	0,1061
											<b>Exactitud promedio</b>	2,49
5. DIFERENCIAS CON RESPECTO AL PROMEDIO												
Fuerza aplicada, kN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Máxima diferencia, kN	Máxima diferencia, %
1	0,00117	0,01027	0,00143	0,01833	0,00117	0,00247	0,04017	0,00637	0,05473	0,01287	0,05473	5,53
2	0,01625	0,01365	0,00325	0,01105	0,00585	0,00845	0,02535	0,00455	0,00845	0,00845	0,02535	1,26
3	0,01105	0,01365	0,00715	0,00325	0,00065	0,01235	0,03185	0,01105	0,01755	0,02535	0,03185	1,05
4	0,0039	0,0182	0,0039	0,0013	0,0156	0,0195	0	0,0039	0,0169	0,0312	0,0312	0,77
5	0,00988	0,01248	0,00338	0,00052	0,00858	0,01248	0,02808	0,04992	0,01352	0,01092	0,04992	0,99
											<b>Maxima diferencia (Precisión)</b>	0,05473
											<b>Precisión promedio</b>	1,92

Fuente: propia

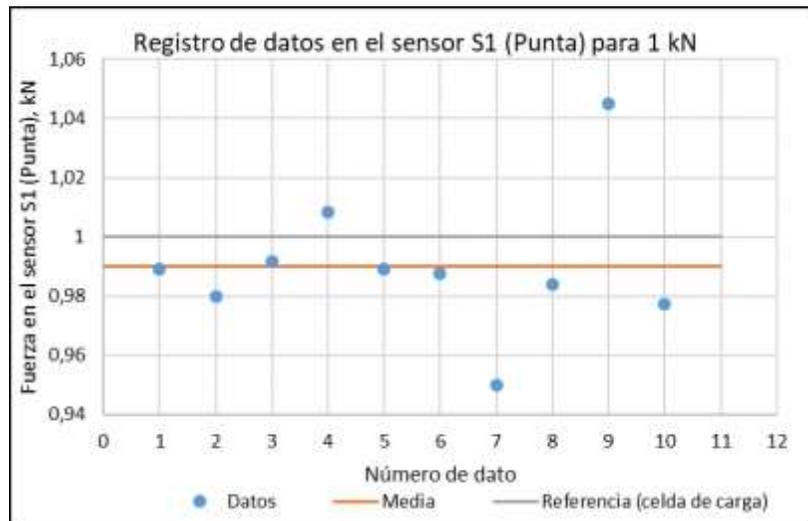


Figura 5-13. Comportamiento de la fuerza para una carga de referencia de 1 kN sensor en la punta (S1). Fuente: propia.

La precisión y exactitud promedio del sensor S1 es de 1.92% y 2.49% respectivamente, mientras que la precisión y exactitud promedio del sensor S2 es de 2.71% y 2.86%, respectivamente (ver la Tabla 5-11).

Tabla 5-11. Precisión y exactitud promedio del sensor en la punta (S1), y sensor en el fuste (S2).

<b>Fuerza, kN</b>	<b>Sensor S1 (Punta)</b>		<b>Sensor S2 (Fuste)</b>	
	<b>Precisión, %</b>	<b>Exactitud, %</b>	<b>Precisión, %</b>	<b>Exactitud, %</b>
1	5,53	5,00	5,15	4,88
2	1,26	1,38	3,15	3,59
3	1,05	1,78	2,21	2,52
4	0,77	2,17	1,78	1,65
5	0,99	2,12	1,26	1,65
Promedio	1,92	2,49	2,71	2,86

Fuente: propia.

## Capítulo VI

### Descripción y Caracterización Geotécnica de los Sitios de Investigación

Se establecieron dos sitios de Investigación, el primero fue el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ubicada en la carrera 45 No. 205 - 59, y el segundo, en la carrera 104 A Bis No 23D-12, en la localidad de Fontibón.

A continuación, se describe la localización, microzonificación sísmica, exploración y caracterización geotécnica de los dos sitios de Investigación.

#### 6.1. Sitio de Investigación 1. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

##### 6.1.1. Localización.

El Sitio de Investigación 1, corresponde al campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ubicada en la carrera 45 No. 205 – 59, en la localidad de Suba de la ciudad de Bogotá (ver la Figura 6-1).



Figura 6-1. Sitio de Investigación 1, Campus de la ECI. Fuente: Google Maps (2018).

De acuerdo con el decreto 523 de 2010 “Microzonificación sísmica de Bogotá”, el perfil del suelo encontrado para el Sitio de Investigación 1 “Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito” corresponde al tipo Lacustre 200 (ver la Tabla 6-1 y la Figura 6-2).

Tabla 6-1. Descripción de las zonas de respuesta sísmica.

Zona	Periodo fundamental del suelo (s)	Velocidad de onda promedio 50 m Vs (m/s)	Efecto de sitio relacionados
Cerro	< 0.3	> 750	Topográfico
Piedemonte A	0.3 – 0.6	200 – 750	Topográfico – Amplificación
Piedemonte B	0.3 – 0.6	300 – 750	Topográfico – Amplificación
Piedemonte C	0.3 – 0.6	300 – 750	Topográfico – Amplificación
Lacustre 50	1.0 – 1.5	< 175	Amplificación
Lacustre 100	1.5 – 2.5	< 175	Amplificación
Lacustre 200	2.5 – 3.5	< 175	Amplificación
Lacustre 300	3.5 – 4.5	< 175	Amplificación
Lacustre 500	4.5 – 6.5	< 175	Amplificación
Lacustre – Aluvial 200	2.0 – 3.0	< 200	Amplificación
Lacustre – Aluvial 300	3.0 – 4.0	< 200	Amplificación
Aluvial 50	0.4 – 0.8	175 – 300	Amplificación – licuación
Aluvial 100	0.8 – 1.2	175 – 300	Amplificación – licuación
Aluvial 200	1.2 – 2.5	175 – 300	Amplificación – licuación
Aluvial 300	2.5 – 4.0	175 – 300	Amplificación – licuación
Depósito Ladera	< 0.3	Variable según deposito	Topográfico

Fuente: Decreto 523 de 2010.



Figura 6-2. Zona de respuesta sísmica 2010: Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: IDIGER.

### **6.1.2. Geología.**

A continuación, se describe la geología regional y local del Sitio de Investigación 1. +

#### **Geología Regional.**

Según el Servicio Geológico Colombiano, la sabana de Bogotá geológicamente se encuentra localizada en el área de la cordillera central y en ella afloran formaciones que datan desde el Cretácico Superior hasta el Cuaternario, las cuales evidencian distintas condiciones de sedimentación.

Se establecieron distintas formaciones a partir del periodo de formación, teniendo así las formaciones Chipaque, La Frontera, Simijaca y Conejo, siendo éstas las más antiguas pasando a través del tiempo hasta tener las formaciones Chorrera, Marichuela, generando la cuenca actual en la cual se generó la depositación por cuenta de las formaciones Subachoque, Rio Tunjuelo y Sabana, acompañados de eventos de glaciación que generaron los depósitos de la formación Siecha y Chisacá.

#### **Geología Local.**

El Sitio de Investigación 1 (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito) se encuentra geológicamente en la formación sabana.

Según Helmes & Van der Hammen (1995), se denomina formación Sabana a los depósitos lacustrinos que afloran en toda la zona plana y que hace parte de la Sabana de Bogotá, constituida principalmente por arcillas y hacia las márgenes de la cuenca se observan arcillas orgánicas, arenosas y turba-lignita.

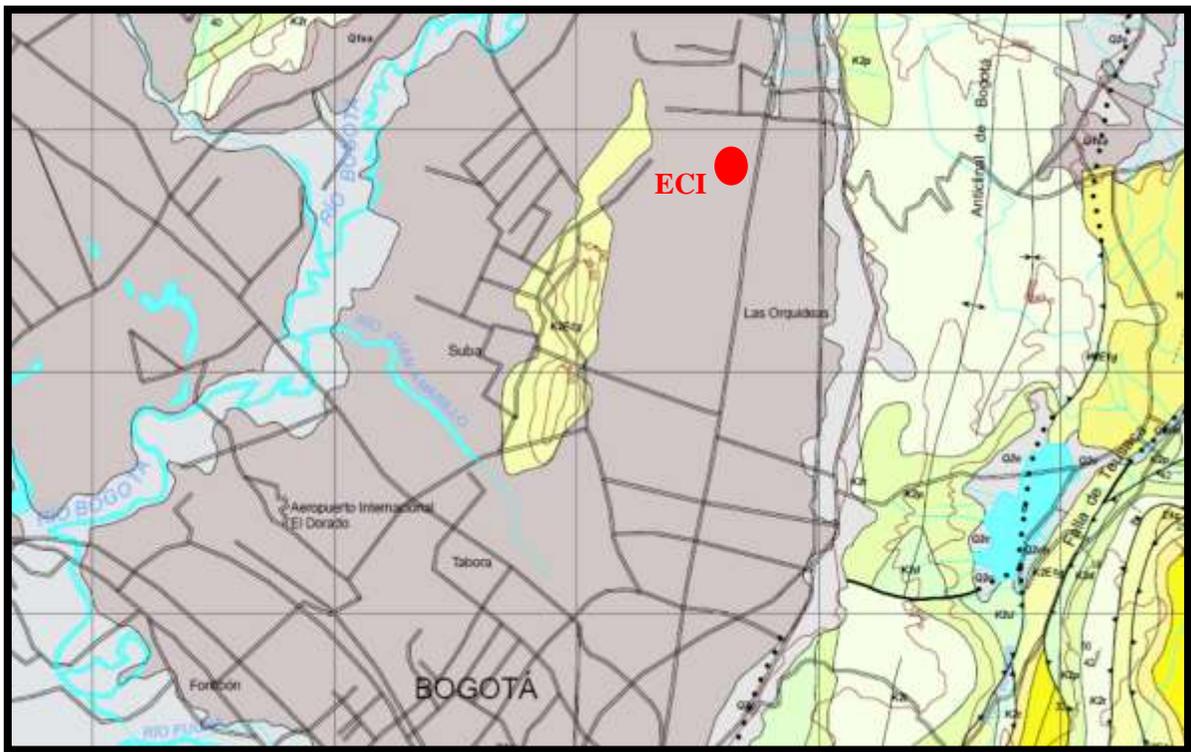


Figura 6-3. Localización del Sitio de Investigación 1 (ECI) en el mapa geológico de Bogotá (Formación Q1sa). Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2005).

### 6.1.3. Exploración del subsuelo.

En el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, se realizaron dos sondeos convencionales a 15 m de profundidad, identificados como S1 y S2, los cuales están ubicados frente al edificio I (ver la Figura 6-4 y la Tabla 6-2).



Figura 6-4. Ubicación del Sitio de Investigación 1 en el campus de la ECI. Fuente: propia.

Tabla 6-2. Ubicación de los sondeos convencionales ECI.

Sondeo	Descripción	Latitud, Norte	Longitud, Este	Profundidad, m
S1	Perforación convencional (toma de muestras para ensayo de compresión inconfiada y límites de consistencia)	1020613.4505	1003683.0938	15
S2	Perforación convencional (toma de muestras para ensayo triaxial y corte con veleta de campo)	1020610.1562	1003684.2761	15

Fuente: propia.

La distribución y separación de los sondeos se puede observar en la Figura 6-5

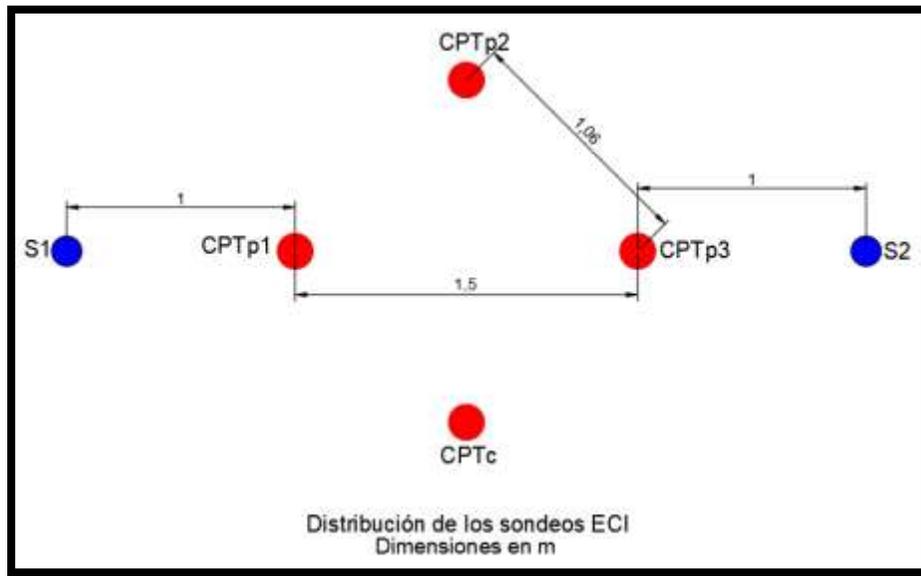


Figura 6-5. Distribución de los sondeos en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

Dichas exploraciones se llevaron a cabo en la misma área donde se ejecutó una penetración estática de cono (CPTu), realizada durante la investigación titulada “Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el Sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería (SEGECI)” desarrollada por los ingenieros Sarmiento & León (2016).

En el sondeo S1 se realizó una perforación convencional hasta una profundidad de 15 m, tomando muestras alteradas e inalteradas.

Las muestras inalteradas se tomaron mediante tubo de pared delgada tipo shelby, a las cuales se le determinó el peso unitario y la resistencia al corte no drenada mediante el ensayo de compresión inconfiada. A las muestras alteradas se les determinó el contenido de humedad natural, el límite líquido, el límite plástico, y la gravedad específica.

En el sondeo S2 se tomaron muestras inalteradas mediante el tubo de pared delgada, a las cuales se les determinó la resistencia al corte no drenada, mediante el ensayo triaxial no consolidado no drenado (ver la Figura 6-6).



Figura 6-6. Exploración en la ECI por el método convencional (muestras tipo Shelby). Fuente: propia.

#### 6.1.4. Ensayos de campo y laboratorio.

En la exploración del subsuelo realizada en el Sitio de Investigación 1 que corresponde al campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI), se caracterizó geotécnicamente el sondeo S1 y S2, mediante los ensayos de laboratorio como son límite líquido, límite plástico, contenido de humedad natural, y gravedad específica. En el sondeo S1 y S2 se tomaron muestras inalteradas con el tubo de pared delgada para la ejecución de ensayo de compresión inconfiada y triaxial UU.

En la Tabla 6-3 se indican los ensayos de laboratorio y campo realizados para la caracterización geotecnia del Sitio de Investigación 1 (ECI).

Tabla 6-3. Ensayos de laboratorio y campo realizados para la caracterización geotécnica del Sitio de Investigación 1 (ECI).

ENSAYO	NORMA	CANTIDAD
Contenido de humedad natural	I.N.V E-122	20
Límite plástico e Índice de plasticidad	I.N.V E-126	18
Límite Líquido	I.N.V E-125	18
Gravedad específica	I.N.V E-128	10
Consolidación de suelos	I.N.V E-151	1
Compresión inconfiada	I.N.V E-152	5
Triaxial UU	I.N.V E-153	5
Corte con veleta de campo	I.N.V E-170	5

Fuente: propia.

Con base en los resultados derivados de la etapa de exploración del subsuelo y los ensayos de laboratorio, fue posible establecer la siguiente secuencia estratigráfica.

Desde la superficie actual del terreno y hasta una profundidad de exploración de 1.40 m se encuentra una turba con humedad natural promedio de 60.38% , continua de 1.40m a 2.80 m, un estrato de arcilla de alta plasticidad color carmelito claro, con betas de óxido, con humedad natural promedio de 77% , límite líquido promedio de 107 % , límite plástico promedio de 40% e índice de plasticidad promedio de 67%; de 2.80 m a 15 m, se reporta la existencia de una arcilla de alta plasticidad color gris verdoso de consistencia blanda, con valores de humedad natural promedio de 107%. , límite líquido promedio de 160%, límite plástico promedio de 47% e índice de plasticidad promedio de 113%.

Se reporta nivel freático a -1.50 m.

En la Tabla 6-4 se indica el resumen de las propiedades físicas del estrato de suelo encontrado en los sondeos S1 y S2. En la Figura 6-7 y Figura 6-8 se indica la variación en profundidad de límite líquido, el límite plástico y la humedad natural de los sondeos S1 y S2 respectivamente, en los cuales se evidencio que la humedad natural se encuentra entre el límite plástico y el límite líquido, indicando que el subsuelo explorado para los dos sondeos se encuentra en estado plástico, con la tendencia de la húmedad hacia el límite líquido.

El perfil estratigráfico del sondeo S2 y los resultados de laboratorio se encuentran en el Anexo 1.

Tabla 6-4. Resumen de propiedades de los estratos de suelo en los sondeos S1 y S2. (ECI).

Sondeo	Profundidad, m	LL	LP	IP	W, %	USCS
S1	0,70	-	-	-	63,84	pt
S1	1,40	93,40	37,01	56,39	66,89	CH
S1	3,00	123,36	44,07	79,29	82,31	CH
S1	4,50	162,08	51,94	110,14	105,37	CH
S1	6,00	189,22	64,02	125,20	110,53	CH
S1	8,00	190,73	47,53	143,20	103,11	CH
S1	10,00	206,76	51,26	155,50	140,03	CH
S1	12,00	131,40	38,24	93,17	106,69	CH
S1	13,00	140,87	41,36	99,51	102,72	CH
S1	15,00	142,85	47,23	95,62	109,38	CH
S2	0,70	-	-	-	52,74	pt
S2	1,50	81,34	35,10	46,24	68,49	CH
S2	2,80	131,38	42,86	88,51	93,18	CH
S2	3,50	164,81	50,37	114,44	101,24	CH
S2	6,00	182,29	39,69	142,61	110,87	CH
S2	8,20	184,92	46,38	138,54	103,36	CH
S2	11,00	162,35	50,05	112,30	100,59	CH
S2	12,50	124,30	47,13	77,17	92,76	CH
S2	13,50	136,94	40,76	96,18	103,10	CH
S2	15,00	134,33	45,79	88,53	115,43	CH

Norma I.N.V E-122. Contenido de humedad natural

Norma I.N.V E-125. Límite Líquido

Norma I.N.V E-126. Límite Plástico e Índice de Plasticidad

Fuente: propia.

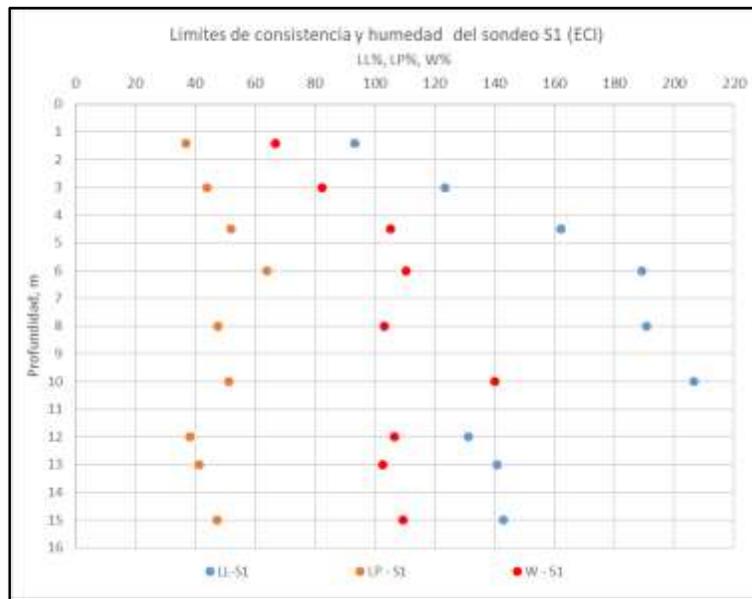


Figura 6-7. Límite líquido, límite plástico y contenido de humedad en el sondeo S1 (ECI). Fuente: propia.

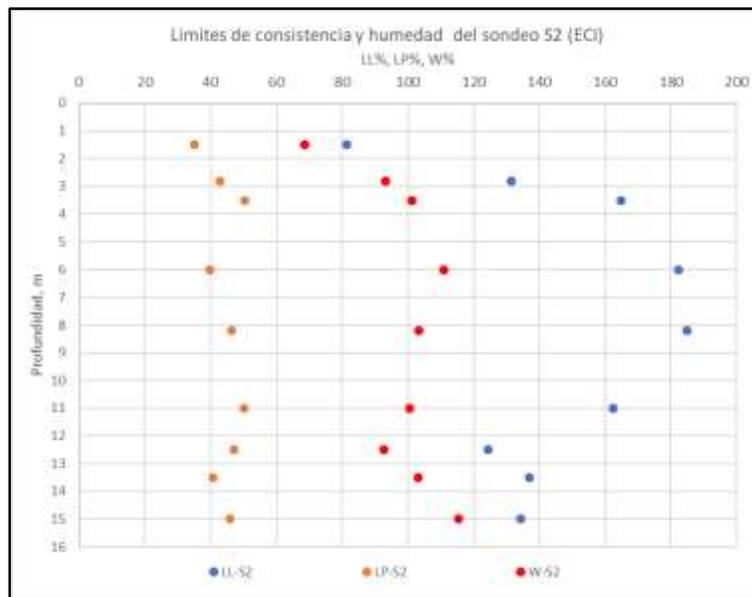


Figura 6-8. Límite líquido, límite plástico y contenido de humedad en el sondeo S2 (ECI). Fuente: propia.

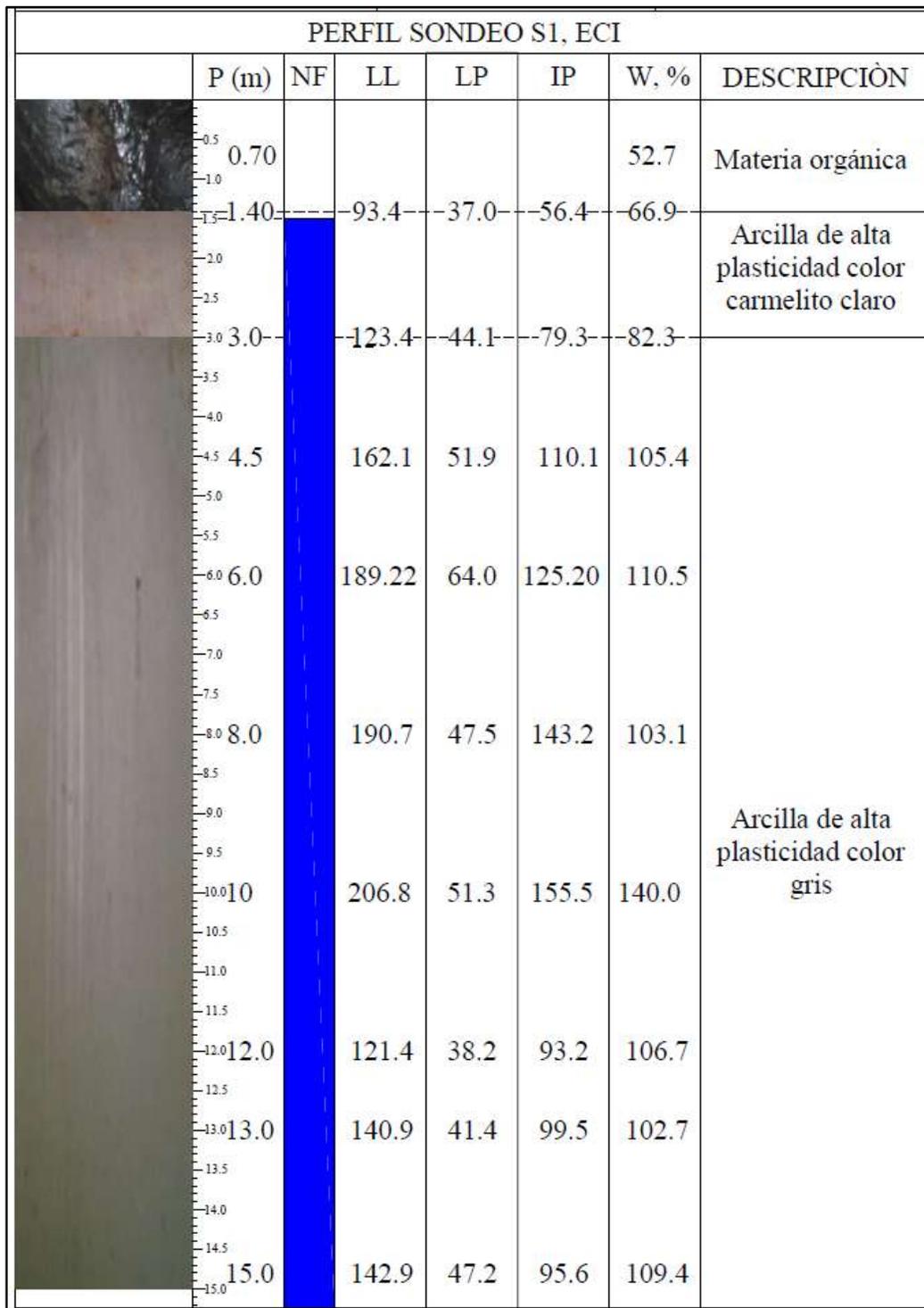


Figura 6-9. Perfil estratigráfico del Sondeo S1 (ECI). Fuente: propia.

A partir de las muestras inalteradas tomadas en el Sondeo S1 mediante tubo “Shelby”, se determina el peso unitario y la resistencia al corte no drenada, datos que se obtienen mediante el ensayo de compresión inconfiada. Dichos parámetros se reportan en la Tabla 6-5 (ver la Figura 6-10).

Tabla 6-5. Peso unitario y cohesión del Sondeo S1 en la ECI.

Profundidad, m	Peso unitario, kN/m <sup>3</sup>	q <sub>u</sub> , kPa	Cu, kPa
2,50	15,79	76,26	38,13
5,50	15,21	74,93	37,47
8,50	14,13	48,25	24,13
11,50	13,54	32,37	16,18
14,50	13,73	29,78	14,89

Norma I.N.V E-152. Compresión inconfiada

Fuente: propia.



Figura 6-10. Compresión inconfiada, (Laboratorio de ingeniería Civil de la Universidad Distrital).

Fuente: propia.

La mayor y menor resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada es de 38.13 kPa, y 14.89 kPa respectivamente, siendo el promedio de 26.16 kPa (ver la Tabla 6-6).

Tabla 6-6. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Descripción	Magnitud
Media	26,16
Error típico	5,01
Mediana	24,13
Desviación estándar	11,20
Varianza de la muestra	125,46
Rango	23,24
Mínimo	14,89
Máximo	38,13
Suma	130,80
Cuenta	5,00

Fuente: propia.

A partir de las muestras inalteradas obtenidas en el Sondeo 2, se determina la resistencia al corte no drenada mediante el ensayo triaxial no consolidado, no drenado (ver la Figura 6-11 y la Tabla 6-7).



Figura 6-11. Ensayo triaxial UU (Laboratorio de ingeniería Civil de la Universidad Distrital).

Fuente: propia.

Tabla 6-7. Resumen del ensayo triaxial UU del Sondeo S2 (Sitio de Investigación 1, ECI).

Profundidad, m	Presión de cámara, kPa	Esfuerzo desviador, kPa	Esfuerzo principal mayor, kPa	Cu, kPa	Peso unitario, kN/m <sup>3</sup>
2,50	20	126,76	146,76	63,38	15,49
5,50	25	71,57	96,57	35,78	14,73
8,50	30	81,09	111,09	40,54	14,54
11,50	35	110,65	145,65	55,33	13,58
14,50	45	75,39	120,39	37,70	13,72

Norma I.N.V E-153. Triaxial UU

Fuente: propia.

La mayor y menor resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU es de 63.38 kPa, y 35.78 kPa respectivamente, siendo el promedio de 46.55 kPa (ver la Figura 6-8).

Tabla 6-8. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Descripción	Magnitud
Media	46,55
Error típico	5,43
Mediana	40,54
Desviación estándar	12,15
Varianza de la muestra	147,68
Rango	27,60
Mínimo	35,78
Máximo	63,38
Suma	232,73
Cuenta	5,00

Fuente: propia.

En el Sondeo S2 también se determinó la resistencia al corte no drenada mediante el corte con veleta de campo; los resultados se indican en la Tabla 6-9 (ver la Figura 6-12).

Tabla 6-9. Resistencia al corte mediante veleta de campo en el Sondeo 2 (ECI).

Profundidad, m	Cu, kPa	Cu, remoldeado, kPa
2	51,99	26,00
5	28,25	17,12
8	25,41	12,30
11	27,08	15,93
14	31,53	21,57

Norma I.N.V E-152. Corte con veleta de campo

Fuente: propia.



Figura 6-12. Corte con veleta de campo, Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

La mayor y menor resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de corte con veleta de campo es de 51.99 kPa, y 25.41 kPa respectivamente, siendo el promedio de 32.85 kPa (ver la Tabla 6-10).

Tabla 6-10. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de corte con veleta de campo en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Descripción	Magnitud
Media	32,85
Error típico	4,89
Mediana	28,25
Desviación estándar	10,93
Varianza de la muestra	119,47
Rango	26,58
Mínimo	25,41
Máximo	51,99
Suma	164,27
Cuenta	5,00

Fuente: propia.

En la Figura 6-13 se grafica la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU, y el ensayo de corte con veleta de campo, del Sitio de Investigación 1 (ECI), en la cual se evidencia que:

- La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el triaxial UU es mayor a las determinadas mediante los ensayos de corte con veleta de campo y compresión inconfiada.
- La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada es la menor con respecto a las determinadas con los ensayos de veleta de campo y triaxial UU.

Las menores resistencias al corte no drenada obtenidas mediante el ensayo compresión inconfiada se debe a que la aplicación de carga durante la falla de la muestra inalterada no simula de ninguna manera el esfuerzo de confinamiento a la cual está sometida la muestra en campo.

La mayor resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU se debe a que durante la aplicación de carga se simula el esfuerzo de confinamiento al que está sometida la muestra en campo, proceso que se logra mediante una cámara triaxial.

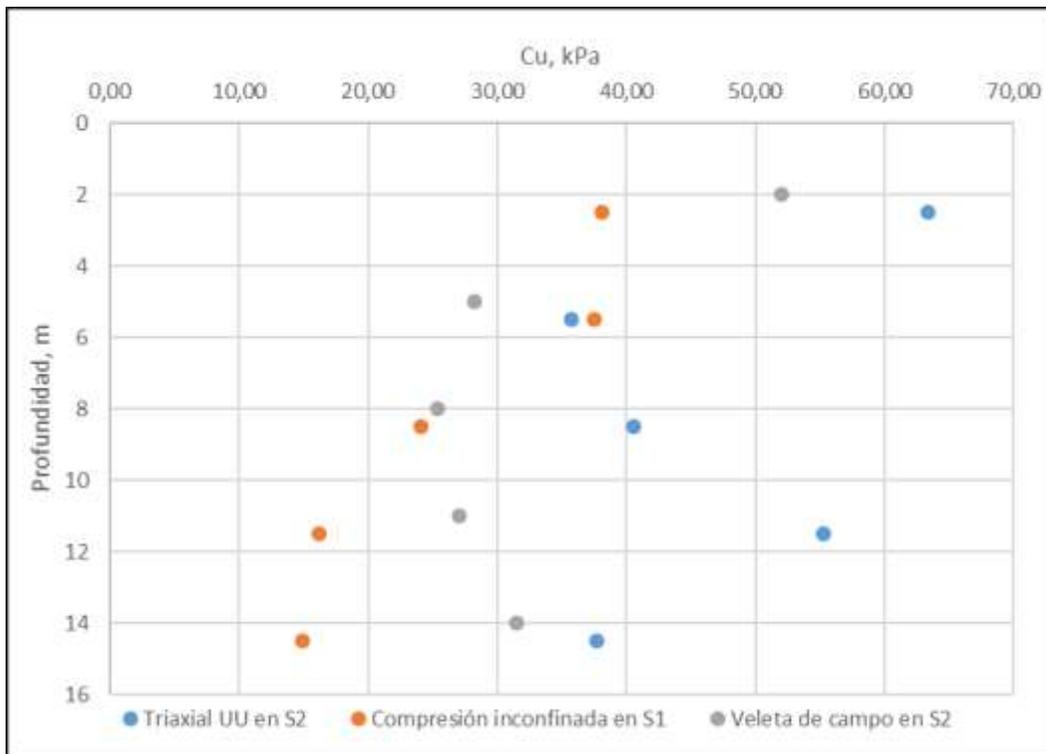


Figura 6-13. Resistencia al corte no drenada en los sondeos S1 y S2 mediante ensayos de compresión inconfínada, triaxial UU, y veleta de campo en la ECI. Fuente: propia.

En la Figura 6-14 se indican los pesos unitarios obtenidos en los sondeos S1 y S2 del Sitio de Investigación 1 (ECI), en el cual se puede observar que a mayor profundidad el peso unitario tiende a disminuir.

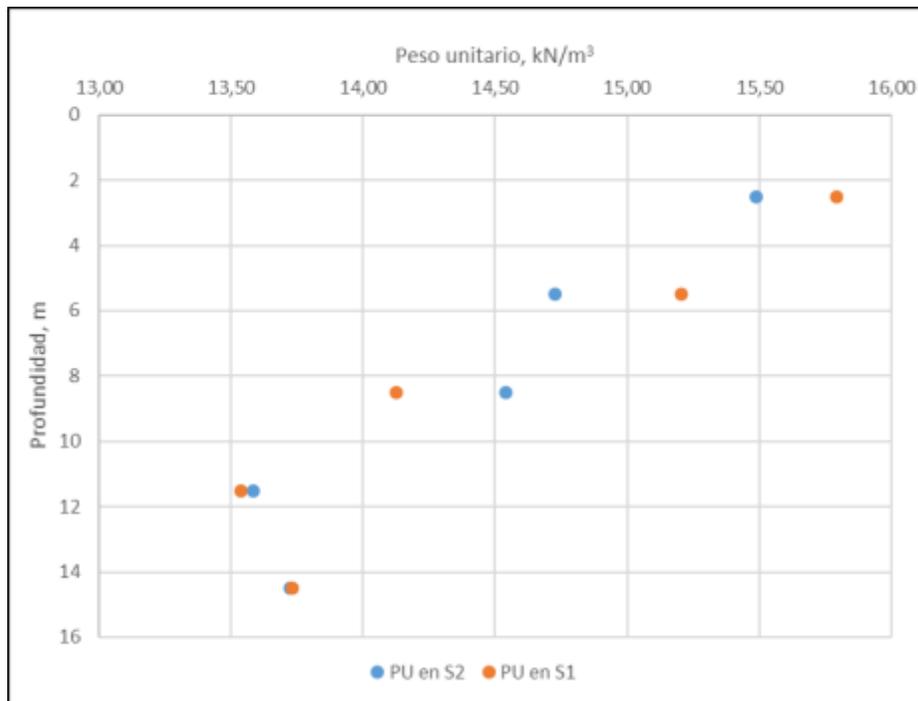


Figura 6-14. Peso unitario en los sondeos S1 y S2 del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

El mayor y menor peso unitario en el sitio de investigación 1 (ECI) es de 15.79 kPa, y 13.54 kPa respectivamente, siendo el promedio de 14.45 kPa (ver la Tabla 6-11), presentando la tendencia de disminución del peso unitario a mayor profundidad.

Tabla 6-11. Parámetros estadísticos del peso unitario en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Descripción	Magnitud
Media	14,45
Error típico	0,26
Mediana	14,33
Desviación estándar	0,83
Varianza de la muestra	0,70
Rango	2,26
Mínimo	13,54
Máximo	15,79
Cuenta	10,00

Fuente: propia.

En la Tabla 6-12 se indican las gravedades específicas obtenidas en los sondeos S1 y S2.

Tabla 6-12. Gravedad específica de los sondeos S1 y S2 del Sitio de Investigación 1 (ECI).

Sondeo	Profundidad, m	Gs
S1	2,5	2,68
S1	5,5	2,75
S1	8,5	2,71
S1	11,5	2,42
S1	14,5	2,55
S2	2,5	2,60
S2	5,5	2,53
S2	8,5	2,60
S2	11,5	2,64
S2	14,5	2,56

Norma I.N.V E-128. Gravedad específica

Fuente: propia.

La mayor y menor gravedad específica en el Sitio de Investigación 1 (ECI) es de 2.75, y 2.42 respectivamente, siendo el promedio de 2.60 (ver la Tabla 6-13).

Tabla 6-13. Parámetros estadísticos de la gravedad específica en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Descripción	Magnitud
Media	2,60
Error típico	0,03
Mediana	2,60
Desviación estándar	0,10
Varianza de la muestra	0,01
Rango	0,33
Mínimo	2,42
Máximo	2,75
Suma	26,03
Cuenta	10,00

Fuente: propia.

Los resultados de ensayos de laboratorio del Sitio de Investigación 1 (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito) se encuentran en el Anexo 1.

### 6.1.5. Penetración con el cono convencional.

Para el desarrollo del proyecto de grado titulado “Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el Sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería (SEGECI)” desarrollado por Sarmiento & León, (2016), se realizó una penetración con piezocono sísmico en el campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería (ver la Figura 6-15), la cual fue realizada por la empresa IGR S.A.S, ubicada en el mismo sector donde se realizaron las exploraciones con el cono propuesto. Dicha perforación CPTu convencional se toma como referencia para la calibración del cono propuesto. En la Tabla 6-14 se indica la ubicación y la profundidad de la exploración CPTu.



Figura 6-15. Prueba de campo SCPTu (IGR SAS). Fuente: Sarmiento & León (2016).

Tabla 6-14. Localización del ensayo piezono realizado por IGR SAS en la ECI.

Sondeo	Descripción	Latitud, Norte	Longitud, Este	Profundidad, m
CPTu	Prueba de campo CPTu realizada por la empresa IGR SAS (noviembre de 2015)	1020611.550	1003682.979	40

Fuente: Sarmiento & León (2016)

En la Figura 6-16 y la Figura 6-17 se muestra la variación en profundidad de la presión en la punta “qc” y la fricción en el fuste “fs” para la exploración con el piezocono convencional realizada en el campus de la ECI. Los datos obtenidos en la exploración se encuentran en el Anexo 1.

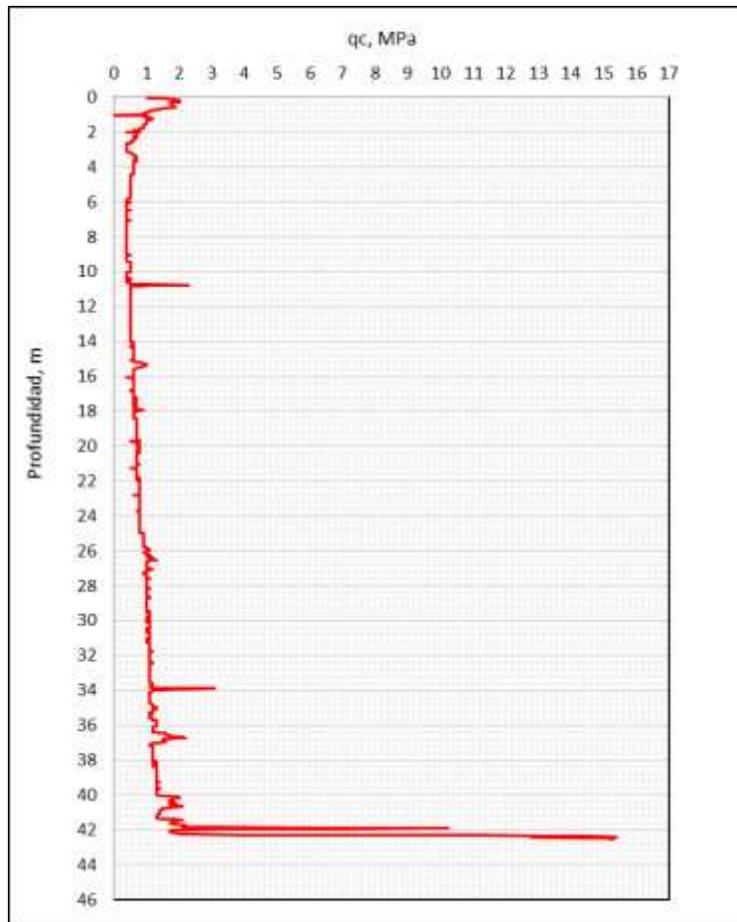


Figura 6-16. Esfuerzo en la punta “qc” con el piezocono convencional. Fuente: Sarmiento & León (2016).

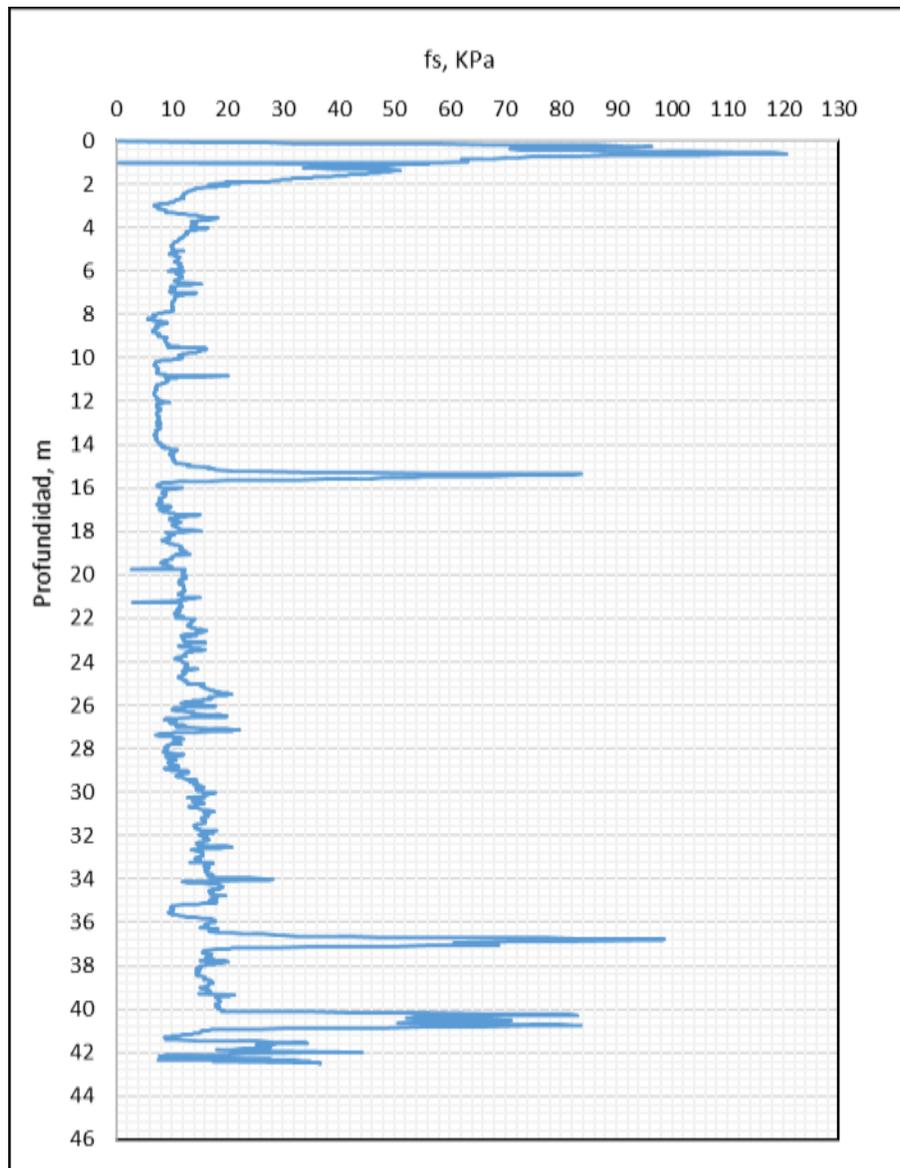


Figura 6-17. Esfuerzo en el fuste “fs” con el piezocono convencional. Fuente: Sarmiento & León (2016).

## 6.2. Sitio de Investigación 2. (Fontibón – La Cabaña)

A continuación, se describe la localización, microzonificación sísmica, exploración y caracterización geotécnica del Sitio de Investigación 2.

### 6.2.1. Localización.

El Sitio de Investigación 2 se encuentra ubicado en la carrera 104 A Bis No 23D-12 en la localidad de Fontibón (ver la Figura 6-18).

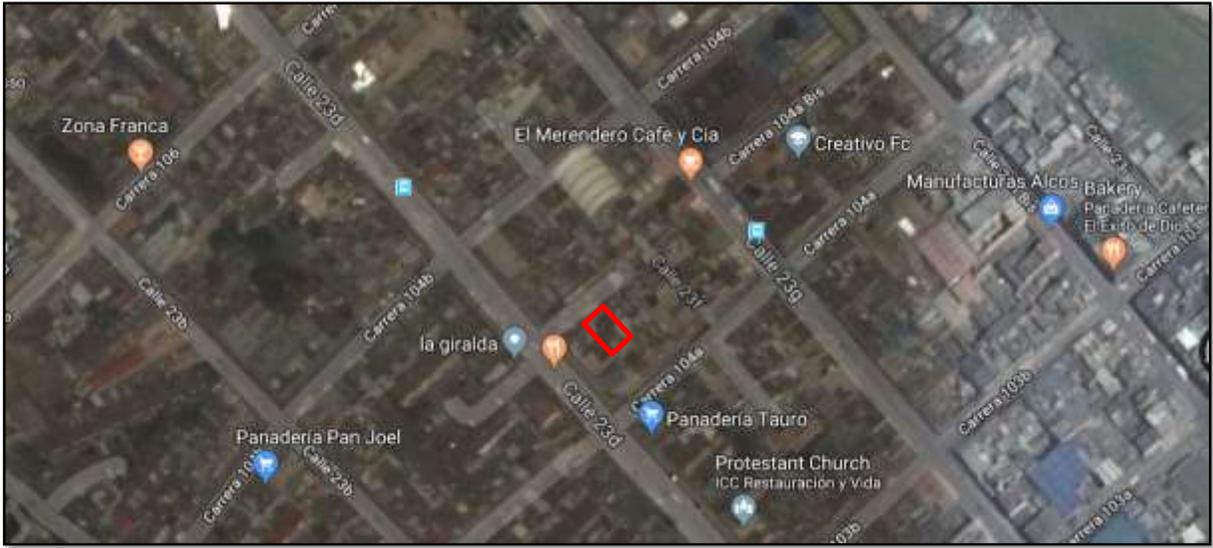


Figura 6-18. Sitio de Investigación 2 (La Cabaña - Fontibón). Fuente: Google Maps.

De acuerdo con el decreto 523 de 2010 “Microzonificación sísmica de Bogotá”, el perfil del suelo encontrado para el Sitio de Investigación 2 “Fontibón – La Cabaña” corresponde al tipo Lacustre 500 (ver la Tabla 6-15 y la Figura 6-19).

Tabla 6-15. Descripción de las zonas de respuesta sísmica del Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Zona	Periodo fundamental del suelo (s)	Velocidad onda promedio 50 m Vs (m/s)	Efecto de sitio relacionados
Lacustre 500	4.5 – 6.5	< 175	Amplificación

Fuente: Decreto 523 de 2010.

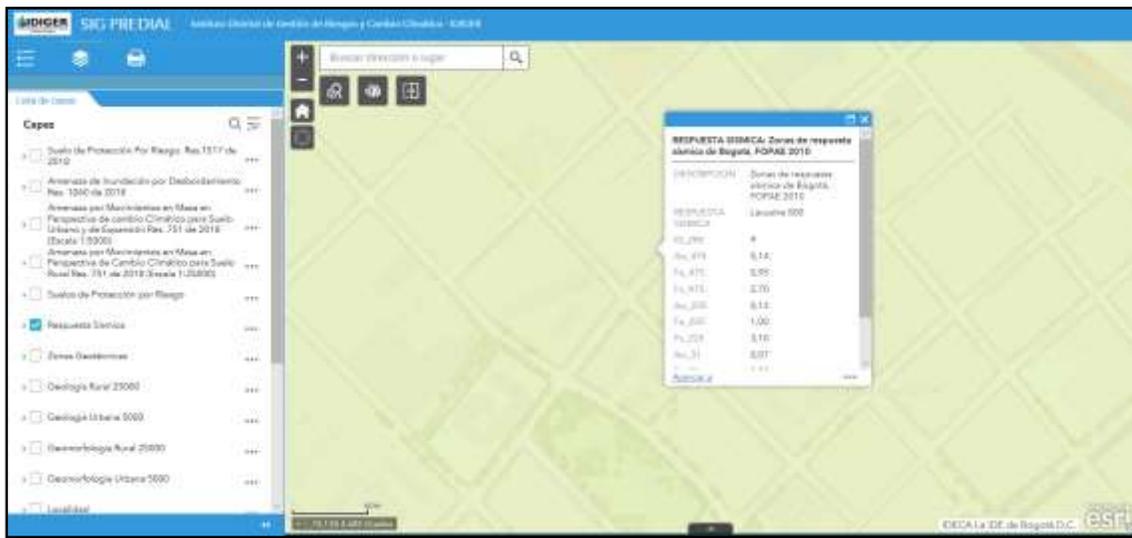


Figura 6-19. Zona de respuesta sísmica 2010 (Lacustre 500): Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Fuente: IDIGER.

### 6.2.2. Geología.

Los Sitio de Investigación 1 y 2 se encuentran ubicados en la misma formación geológica “Q1sa” descrita por el Servicio Geológico Colombiano como Formación Sabana, la cual corresponde a depósitos de capas de arcillas, hacia los bordes se encuentran capas de arenas, arcillas arenosas, turba, y en ocasiones gravas. La edad es Pleistoceno Medio Tardío.

#### Geología regional y local.

Teniendo en cuenta que los sitios de Investigación 1 y 2 se encuentran en la ciudad de Bogotá, la geología regional y local descrita en el literal 6.1.2, aplica para el Sitio de Investigación 2.

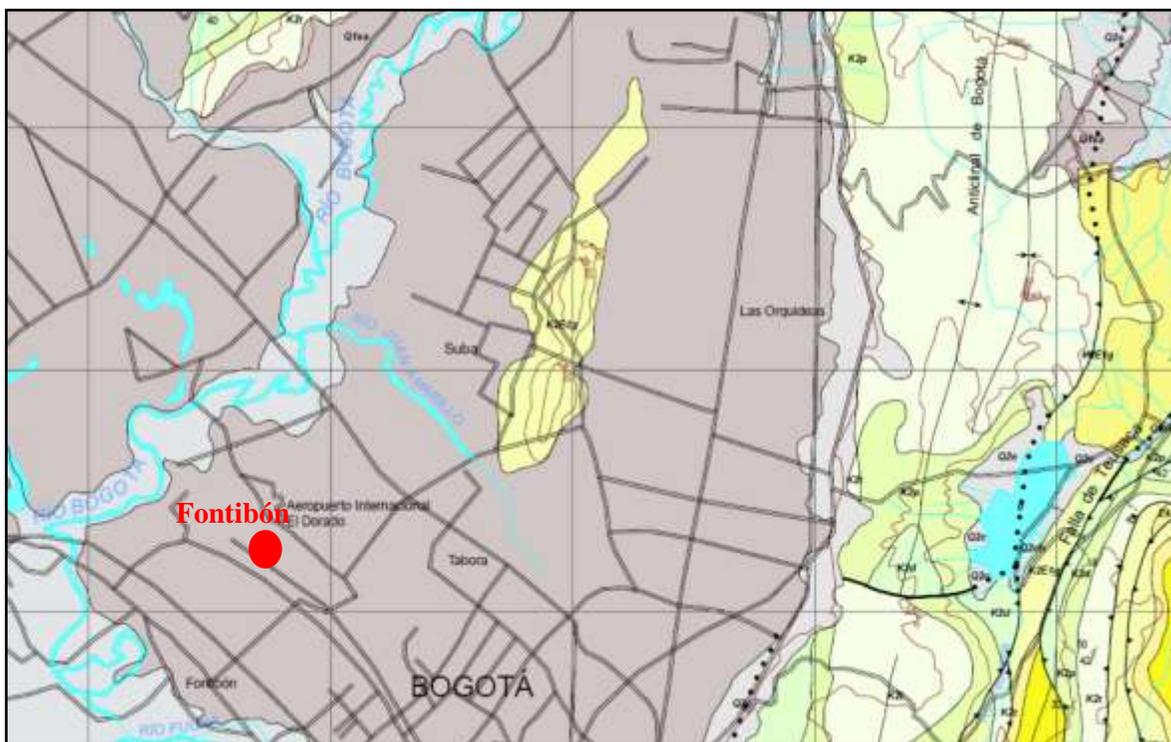


Figura 6-20. Localización del Sitio de Investigación 2 (Fontibón) en el mapa geológico de Bogotá, (Formación Q1sa). Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2005).

### 6.2.3. Exploración del subsuelo.

En el Sitio de Investigación 2 se realizaron tres sondeos convencionales identificados como S1, S2 y S3 (ver la Figura 6-21, la Figura 6-22 y la Tabla 6-16).

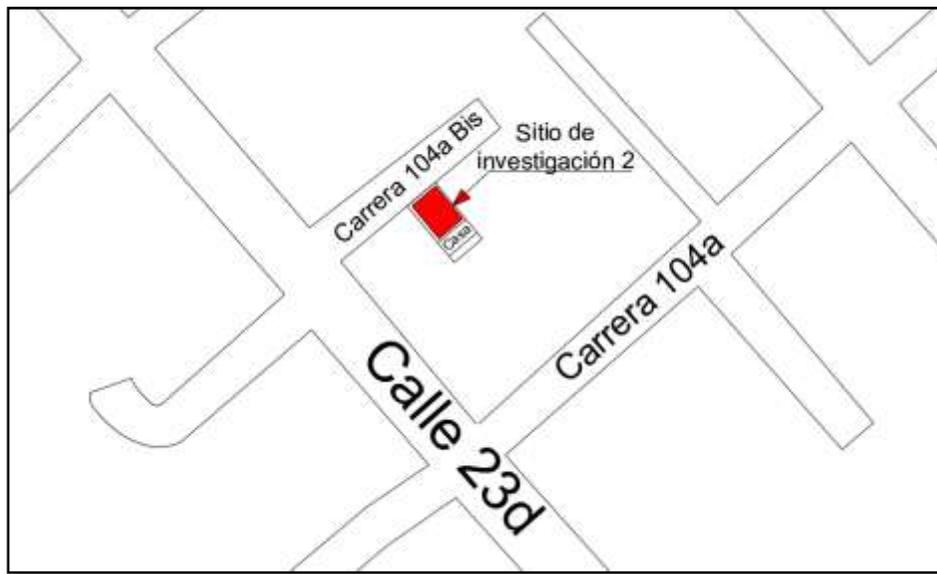


Figura 6-21. Ubicación del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

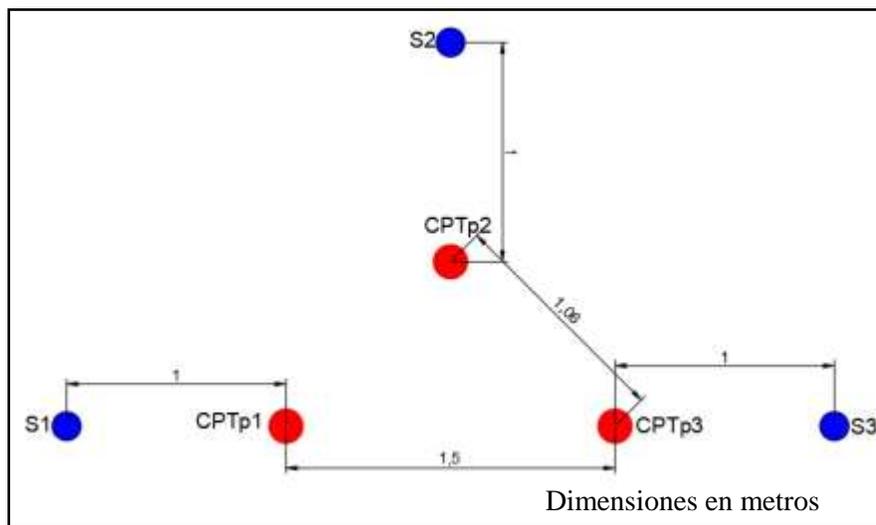


Figura 6-22. Distribución de los sondeos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

Tabla 6-16. Ubicación de los sondeos convencionales en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Sondeo	Descripción	Latitud, Norte	Longitud, Este	Profundidad, m
S1	Perforación convencional (toma de muestras para ensayo de compresión inconfiada)	1009623.5762	993105.1494	15
S2	Perforación convencional (toma de muestras para ensayo triaxial y corte con veleta de campo)	1009622.9372	993107.5403	15
S3	Perforación convencional (toma de muestras para ensayo triaxial y corte con veleta de campo)	1009620.5463	993106.9014	15

Fuente: propia.

En los sondeos S1, S2 y S3, se realizaron perforaciones convencionales, hasta una profundidad de 15 m, tomando muestras alteradas e inalteradas (ver la Figura 6-23).



Figura 6-23. Exploración método convencional en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

#### 6.2.4. Ensayos de campo y laboratorio.

A las muestras alteradas se les determinó el contenido de humedad natural, el límite líquido, el límite plástico y la gravedad específica.

Las muestras inalteradas de los sondeos S1, S2 y S3, se tomaron mediante un tubo de pared delgada tipo shelby, a las cuales se les determinó el peso unitario y la resistencia al corte no drenado mediante el ensayo de compresión inconfiada, y el ensayo triaxial no consolidado no drenado.

En la Tabla 6- 17 se indican los ensayos de laboratorio y campo realizados para la caracterización geotecnia del Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Tabla 6- 17. Ensayos de campo y laboratorio realizados para la caracterización geotécnica del sitio de investigación 2 (Fontibón).

ENSAYO	NORMA	CANTIDAD
Contenido de humedad natural	I.N.V E-122	30
Límite plástico e Índice de plasticidad	I.N.V E-126	27
Límite Líquido	I.N.V E-125	27
Gravedad específica	I.N.V E-128	15
Consolidación de suelos	I.N.V E-151	1
Compresión inconfiada	I.N.V E-152	5
Triaxial UU	I.N.V E-153	10
Corte con veleta de campo	I.N.V E-170	10

Fuente: propia.

Con base en los resultados derivados de la etapa de exploración del subsuelo y los ensayos de laboratorio, fue posible establecer la siguiente secuencia estratigráfica.

Desde la superficie actual del terreno y hasta una profundidad de exploración de 1.40 m se encuentra una turba con escombros con humedad natural promedio de 69.79% , continúa de 1.40 m a 3.50 m un estrato de arcilla de alta plasticidad, color carmelito claro con betas de óxido, con humedad natural promedio de 95%, límite líquido promedio de 136 %, límite plástico promedio de 43 e índice de plasticidad promedio de 93%; de 3.50 m a 15 m, se reporta la existencia de una arcilla de alta plasticidad de color gris y de consistencia baja, con valores de humedad natural promedio de 129%, límite líquido promedio de 197%, límite plástico promedio de 59% e índice de plasticidad promedio de 138%.

Se reporta nivel freático promedio a -1.50 m.

En la Tabla 6-18 se indica el resumen de las propiedades índice y físicas de los sondeos S1, S2 y S3, y en la Figura 6-27 el perfil estratigráfico reportado.

Tabla 6-18. Resumen de las propiedades de los estratos de suelo de los sondeos S1, S2 y S3.  
(Fontibón).

Sondeo	Profundidad, m	LL	LP	IP	W, %	USCS
S1	0,70	-	-	-	70,26	pt
S1	2,00	119,95	42,69	77,26	83,30	CH
S1	4,00	160,52	50,41	110,11	106,88	CH
S1	5,00	171,17	43,71	127,46	123,27	CH
S1	6,00	213,69	70,79	142,89	116,12	CH
S1	7,00	217,63	61,61	156,03	140,60	CH
S1	9,50	205,40	53,93	151,47	123,15	CH
S1	12,00	214,21	64,30	149,91	133,46	CH
S1	14,00	190,10	60,95	129,16	127,49	CH
S1	15,00	204,32	67,55	136,77	130,32	CH
S2	0,70	-	-	-	70,00	pt
S2	2,00	153,09	45,90	107,19	108,56	CH
S2	2,80	123,12	40,16	82,96	82,43	CH
S2	4,50	176,18	60,04	116,14	120,49	CH
S2	7,00	194,49	57,76	136,73	116,50	CH
S2	9,50	204,00	52,71	151,30	141,15	CH
S2	11,00	190,74	60,35	130,39	123,50	CH
S2	12,00	192,55	57,75	134,80	134,87	CH
S2	13,50	182,35	61,89	120,47	128,41	CH
S2	15,00	191,24	53,95	137,30	130,68	CH
S3	0,90	-	-	-	69,11	pt
S3	2,00	149,12	41,65	107,47	107,85	CH
S3	3,90	115,20	38,96	76,24	84,03	CH
S3	4,50	166,09	50,12	115,97	123,72	CH
S3	7,00	222,03	61,46	160,58	129,87	CH
S3	9,50	223,81	59,39	164,42	139,19	CH
S3	10,00	185,00	63,27	121,73	132,30	CH
S3	12,00	201,35	58,16	143,19	133,24	CH
S3	14,00	190,36	61,63	128,73	141,30	CH
S3	15,00	214,53	71,78	142,75	138,54	CH

Norma I.N.V E-122. Contenido de humedad natural

Norma I.N.V E-125. Límite Líquido

Norma I.N.V E-126. Límite Plástico e Índice de Plasticidad

Fuente: propia.

De la Figura 6-24 a la Figura 6-26 se indica la variación en profundidad de límite líquido, el límite plástico y la humedad natural de los sondeos S1, S2 y S3, en los cuales se evidencio que la humedad

natural se encuentra entre el límite plástico y el límite líquido, indicando que el subsuelo explorado para los tres sondeos se encuentra en estado plástico.

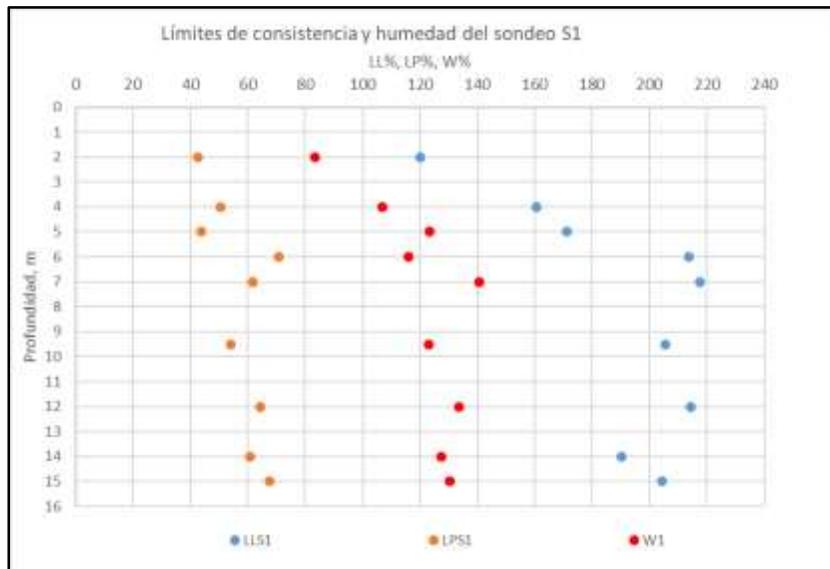


Figura 6-24. Límite líquido, límite plástico y humedad del sondeo S1. (Fontibón). Fuente propia.

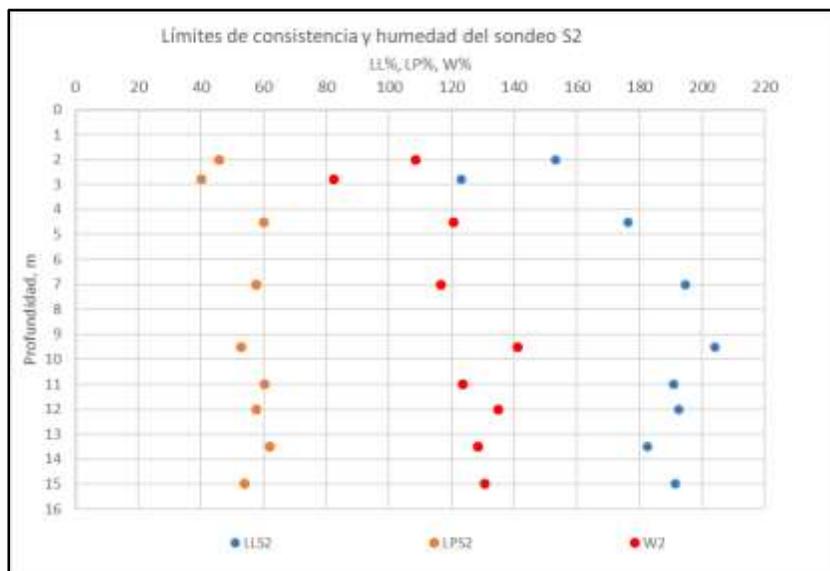


Figura 6-25. Límite líquido, límite plástico y humedad del sondeo S2. (Fontibón). Fuente: propia.

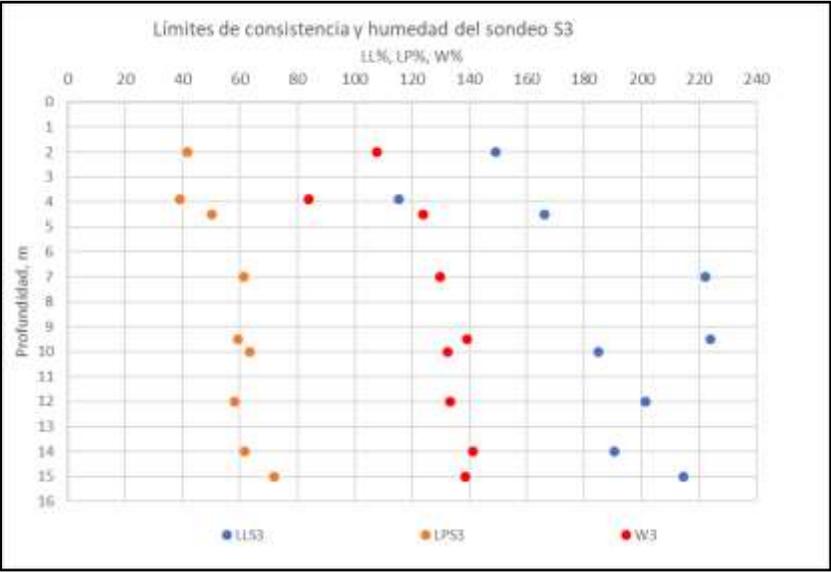


Figura 6-26. Límite líquido, límite plástico y humedad del sondeo S3. (Fontibón). Fuente: propia.

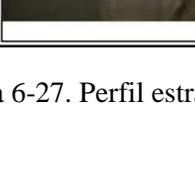
PERFIL SONDEO S1, (Fontibón)							
	P (m)	NF	LL	LP	IP	W, %	DESCRIPCIÓN
	0.70					70.0	Materia orgánica
	2.0		120	42.7	77.3	83.3	Arcilla de alta plasticidad color carmelito claro
	4.0		160.5	50.4	110.1	106.9	Arcilla de alta plasticidad color gris
	5.0		171.2	43.7	127.5	123.3	
	6.0		213.7	70.8	142.9	116.1	
	7.0		217.6	61.6	156.0	140.6	
	9.5		205.4	53.9	151.5	123.2	
	12.0		214.2	64.3	149.9	133.5	
	14.0		190.1	61.0	129.6	127.5	
	15.0		204.3	67.6	136.8	130.3	

Figura 6-27. Perfil estratigráfico del Sondeo S1, Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

A partir de las muestras inalteradas tomadas en el Sondeo S1 mediante tubo “Shelby”, se determina el peso unitario y la resistencia al corte no drenada, los cuales fueron obtenidos mediante el ensayo de compresión inconfiada. Dichos parámetros se reportan en la Tabla 6-19.

Tabla 6-19. Pesos unitarios y resistencias al corte no drenada obtenidos mediante el ensayo compresión inconfiada del Sondeo S1 (Sitio de Investigación 2, Fontibón).

Profundidad, m	Peso unitario, kN/m <sup>3</sup>	q <sub>u</sub> , kPa	C <sub>u</sub> , kPa
2,50	14,62	49,66	24,83
5,50	15,01	33,01	16,50
8,50	13,05	28,60	14,30
11,50	13,24	27,80	13,90
14,50	12,85	24,86	12,43

Norma I.N.V E-152. Compresión inconfiada

Fuente: propia.

La mayor y menor resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada es de 24,83 kPa, y 12,43 kPa respectivamente, siendo el promedio de 16,39 kPa (ver la Tabla 6-20).

Tabla 6-20. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Descripción	Magnitud
Media	16,39
Error típico	2,207
Mediana	14,3
Desviación estándar	4,93
Varianza de la muestra	24,37
Rango	12,4
Mínimo	12,43
Máximo	24,83
Suma	81,96
Cuenta	5

Fuente: propia.

En los sondeos S2 y S3 se toman muestras inalteradas, con el objeto de determinar la resistencia al corte no drenada mediante el ensayo triaxial no consolidado no drenado; los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 6-21.

Tabla 6-21. Resumen de resultados del ensayo triaxial UU de los sondeo S2 y S3 (Sitio de Investigación 2, Fontibón).

Sondeo	Profundidad, m	Peso unitario, kN/m <sup>3</sup>	Presión de cámara, kPa	Esfuerzo desviador, kPa	Esfuerzo principal mayor, kPa	Cu, kPa
S2	2,50	13,93	20	97,27	117,27	48,64
S2	5,50	14,40	25	58,64	83,64	29,32
S2	8,50	13,53	30	75,13	105,13	37,57
S2	11,50	13,45	35	76,96	111,96	38,48
S2	14,50	13,74	45	61,02	106,02	30,51
S3	2,50	14,91	20	122,48	142,48	61,24
S3	5,50	13,83	25	84,46	109,46	42,23
S3	8,50	13,34	30	66,10	96,10	33,05
S3	11,50	12,86	35	57,49	92,49	28,74
S3	14,50	12,95	45	70,04	115,04	35,02

Norma I.N.V E-153. Triaxial

Fuente: propia.

La mayor y menor resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de triaxial UU es de 61.24 kPa, y 28.74 kPa respectivamente, siendo el promedio de 38.47 kPa (ver la Tabla 6-22).

Tabla 6-22. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Descripción	Magnitud
Media	38,47
Error típico	3,19
Mediana	36,29
Desviación estándar	10,10
Varianza de la muestra	102,19
Coefficiente de asimetría	1,410
Rango	32,49
Mínimo	28,74
Máximo	61,24
Suma	384,79
Cuenta	10

Fuente: propia.

Se determina la resistencia al corte no drenada mediante veleta de campo en los sondeos S2 y S3; los resultados se indican en la Tabla 6-23

Tabla 6-23. Resistencia al corte mediante veleta de campo en los sondeos S2 y S3 (Sitio de Investigación 2, Fontibón).

Sondeo	Profundidad, m	Cu, diseño, kPa	Cu, remoldeado, kPa
S2	2	32,50	20,43
S2	5	21,40	10,27
S2	8	30,33	21,32
S2	11	21,51	8,76
S2	14	22,40	17,42
S3	2	36,18	18,09
S3	5	24,69	17,37
S3	8	25,54	14,27
S3	11	27,20	17,87
S3	14	20,37	12,53

Norma I.N.V E-170. Corte con veleta de campo

Fuente: propia.

La mayor y menor resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de corte con veleta de campo es de 36.17 kPa, y 20.36 kPa respectivamente, siendo el promedio de 26.21 kPa (ver la Tabla 6-24).

Tabla 6-24. Parámetros estadísticos de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de corte con veleta de campo en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Descripción	Magnitud
Media	26,21
Error típico	1,67
Mediana	25,11
Desviación estándar	5,30
Varianza de la muestra	28,15
Rango	15,80
Mínimo	20,36
Máximo	36,17
Suma	262,11
Cuenta	10

Fuente: propia.

En la Figura 6-28 se grafica la resistencia al corte no drenada obtenida mediante compresión inconfiada, triaxial UU, y ensayo de corte con veleta de campo, del Sitio de Investigación 2 (Fontibón), en la cual se evidencia que:

- La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el triaxial UU es mayor a las determinadas mediante los ensayos de corte con veleta de campo y compresión inconfiada.
- La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada es la menor con respecto a las determinadas con los ensayos de veleta de campo y triaxial UU.

Las menores resistencias al corte no drenada obtenidas mediante el ensayo compresión inconfiada se debe a que la aplicación de carga durante la falla de la muestra inalterada no simula de ninguna manera el esfuerzo de confinamiento que presenta el subsuelo en campo.

La mayor resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU se debe a que durante la aplicación de carga se simula el esfuerzo de confinamiento al que está sometida la muestra en campo.

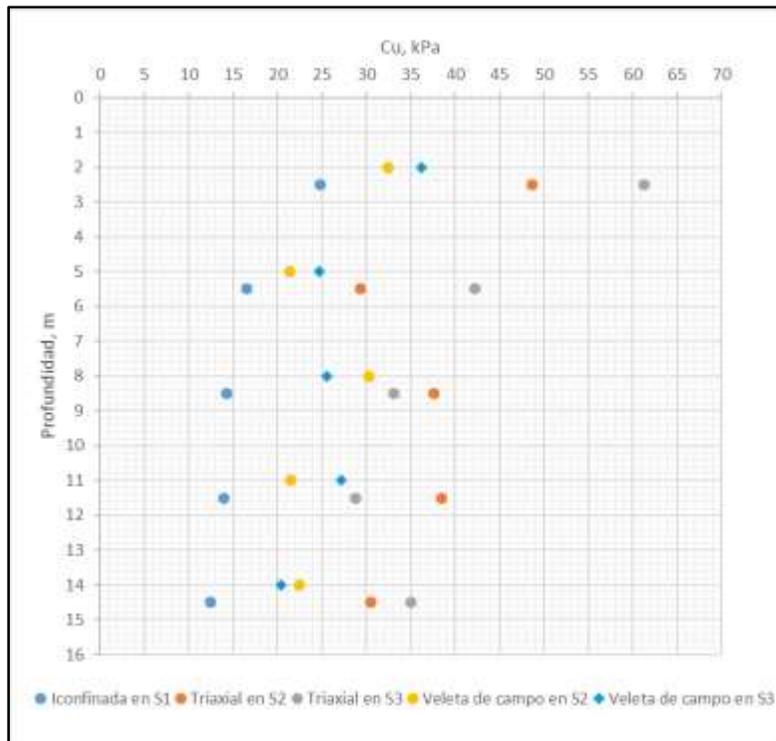


Figura 6-28. Resistencia al corte en S2 y S3 mediante compresión inconfiada, triaxial UU, y veleta de campo en Fontibón. Fuente: propia.

En la Figura 6- 29 se indican los pesos unitarios obtenidos de los sondeos S1, S2, y S3 del Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

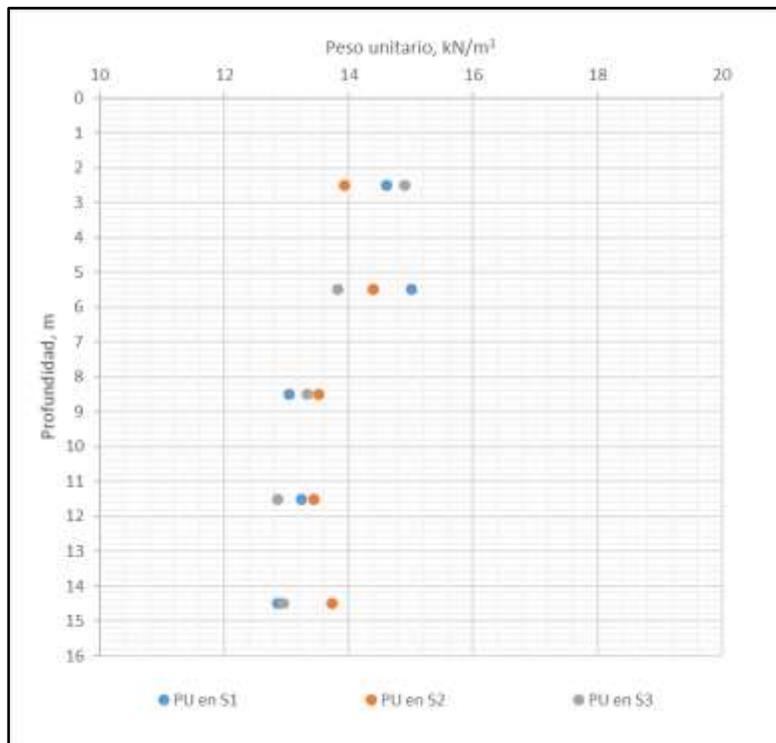


Figura 6- 29. Peso unitario en los sondeos S1 y S2 del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

En la Tabla 6-25 se indica los parámetros estadísticos del peso unitario obtenidos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón), obteniendo un peso unitario máximo de 15.01 kN/m<sup>3</sup> y un peso unitario mínimo de 12.85 kN/m<sup>3</sup>, siendo el promedio de 13.71 kN/m<sup>3</sup>.

Tabla 6-25. Parámetros estadísticos del peso unitario en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Descripción	Magnitud
Media	13,71
Error típico	0,19
Mediana	13,53
Desviación estándar	0,73
Varianza de la muestra	0,53
Rango	2,16
Mínimo	12,85
Máximo	15,01
Suma	205,68
Cuenta	15,00

Fuente: propia.

En la Tabla 6-26 se indican las gravedades específicas de los sondeos S1, S2, y S3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Tabla 6-26. Gravedad específica de los sondeos S1, S2 y S3 del Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Sondeo	Profundidad, m	Gs
S1	2,5	2,68
S1	5,5	2,71
S1	8,5	2,53
S1	11,5	2,48
S1	14,5	2,53
S2	2,5	2,64
S2	5,5	2,49
S2	8,5	2,58
S2	11,5	2,72
S2	14,5	2,69
S3	2,5	2,60
S3	5,5	2,69
S3	8,5	2,58
S3	11,5	2,34
S3	14,5	2,50

Norma I.N.V E-128. Gravedad específica

Fuente: propia.

En la Tabla 6-27 se indican los parámetros estadísticos de la gravedad específica en el sitio de investigación 2 (Fontibón), en el cual se indica que la gravedad específica máxima reportada es de 2.72 y la mínima es de 2.34, con un  $G_s$  promedio de 2.58.

Tabla 6-27. Parámetros estadísticos de la gravedad específica en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Descripción	Magnitud
Media	2,58
Error típico	0,03
Mediana	2,58
Desviación estándar	0,11
Varianza de la muestra	0,01
Rango	0,38
Mínimo	2,34
Máximo	2,72
Suma	38,75
Cuenta	15,00

Fuente: propia.

En la Figura 6-30 se indica la variación de las gravedades específicas obtenidas en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) con respecto a la media, el límite máximo y el límite mínimo de la desviación estándar.



Figura 6-30. Variación de la gravedad específica en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

Los resultados de ensayo de laboratorio del Sitio de Investigación 2 (Fontibón), se encuentran en el Anexo 1.

## Capítulo VII

### Hincado del Cono Propuesto

A continuación, se describe el hincado del cono con los sensores de presión hidráulica en el Sitio de Investigación 1 (Campus de la Escuela Colombiana de Ingeniería), y en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón – La Cabaña).

#### 7.1. Hincado del Cono Propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI)

En los sondeos identificados como CPTp1, CPTp2 y CPTp3, se penetró el cono propuesto con los sensores hidráulicos, registrando la presión en la punta y la fricción en el fuste, haciendo uso de la maquina hidráulica, la cual se diseñó y fabricó para tal fin. (ver la Figura 7-1 y la Tabla 7-1).



Figura 7-1. Penetración con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

En la Tabla 7-1 y Figura 7-2 se indica la ubicación de los sondeos.

Tabla 7-1. Ubicación de las exploraciones con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Sondeo	Descripción	Latitud, Norte	Longitud, Este	Profundidad, m
CPTp1	Hincado del cono propuesto (registro de la presión en la punta y en el fuste)	1020612.5093	1003683.4316	15
CPTp2	Hincado del cono propuesto (registro de la presión en la punta y en el fuste)	1020612.0567	1003684.3908	15
CPTp3	Hincado del cono propuesto (registro de la presión en la punta y en el fuste)	1020612.5093	1003683.9383	15

Fuente: propia.

Las penetraciones con el cono propuesto se realizaron en cercanías a la exploración realizada con el piezocono convencional que se ejecutó para el proyecto de Investigación, “Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería (SEGECI)”, realizado por León & Sarmiento (2016). La ubicación del sondeo convencional se indica en la Figura 7-2 identificada como CPTc.

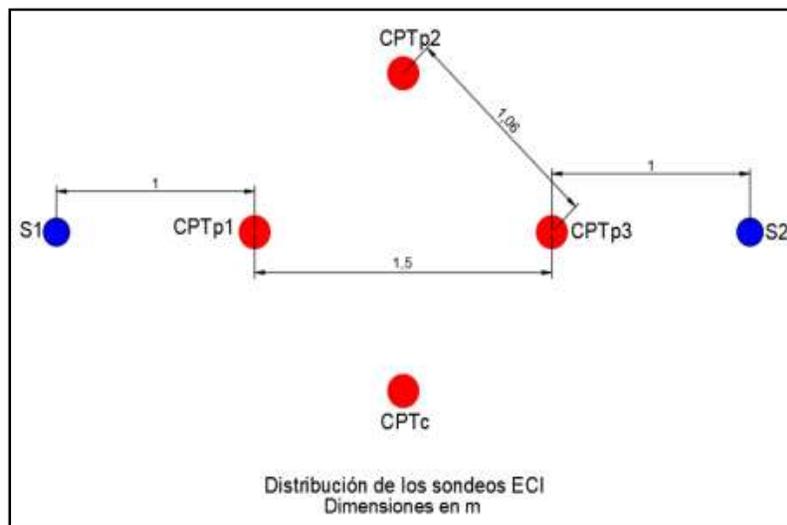


Figura 7-2. Ubicación de las exploraciones con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

Con el objeto de recopilar y calcular la información registrada durante las penetraciones, se creó el formato indicado en la Figura 7-3, en el cual se ingresan los datos almacenados mediante el software DAQMaster. A partir de la información registrada en el sensor S1 y S2, se calcula la fuerza en la punta del cono y la fuerza en el fuste, haciendo uso de las ecuaciones de calibración indicadas en el capítulo 5.2.2 (ver las ecuaciones 35 y 36), para luego con las dimensiones del cono y el fuste determinar el esfuerzo en la punta y el esfuerzo en el fuste, los cuales son graficados con respecto a la profundidad y mostrados en el formato.

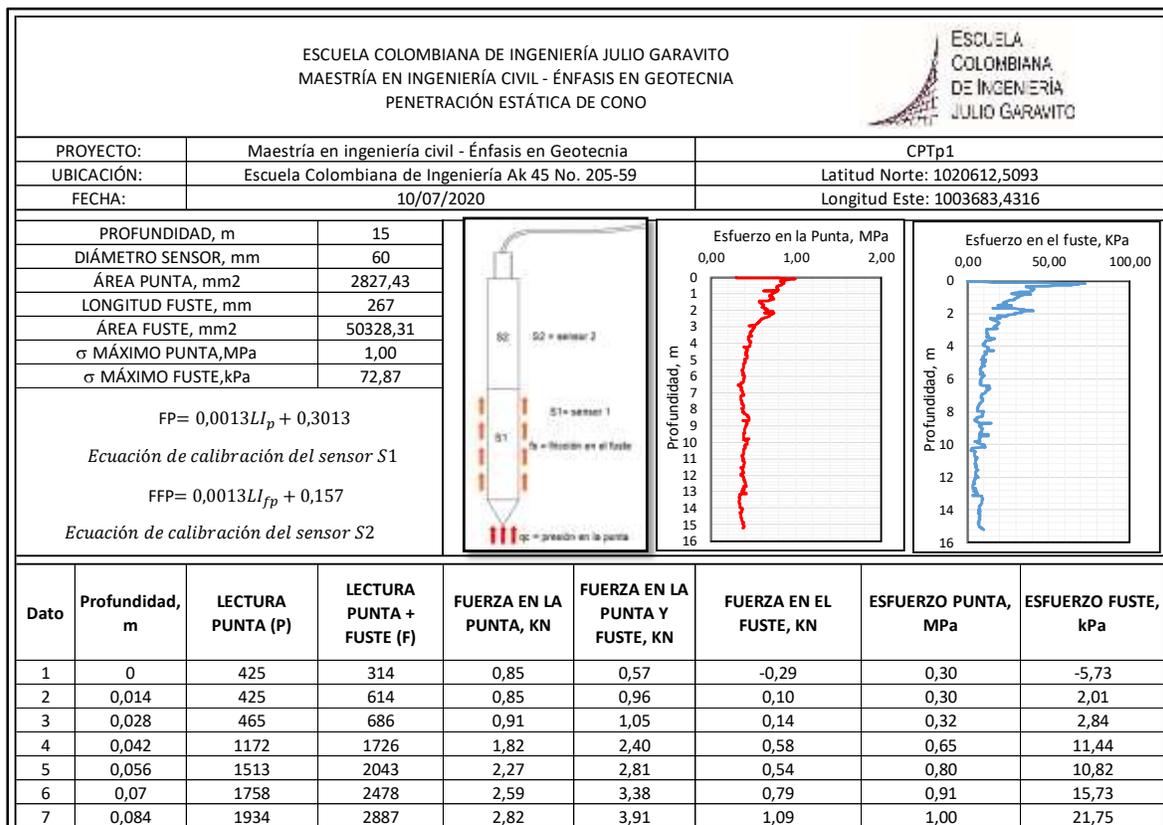


Figura 7-3. Formato de registro de datos para la penetración con el cono propuesto. Fuente: propia:

En la Figura 7-4 y Figura 7-5 se observan las variaciones del esfuerzo en la punta y el esfuerzo en el fuste con la profundidad, respectivamente, registradas con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI), donde se llevaron a cabo tres penetraciones, las cuales se identifican como CPTp1, CPTp2 y CPTp3, llegando hasta una profundidad de 15m.

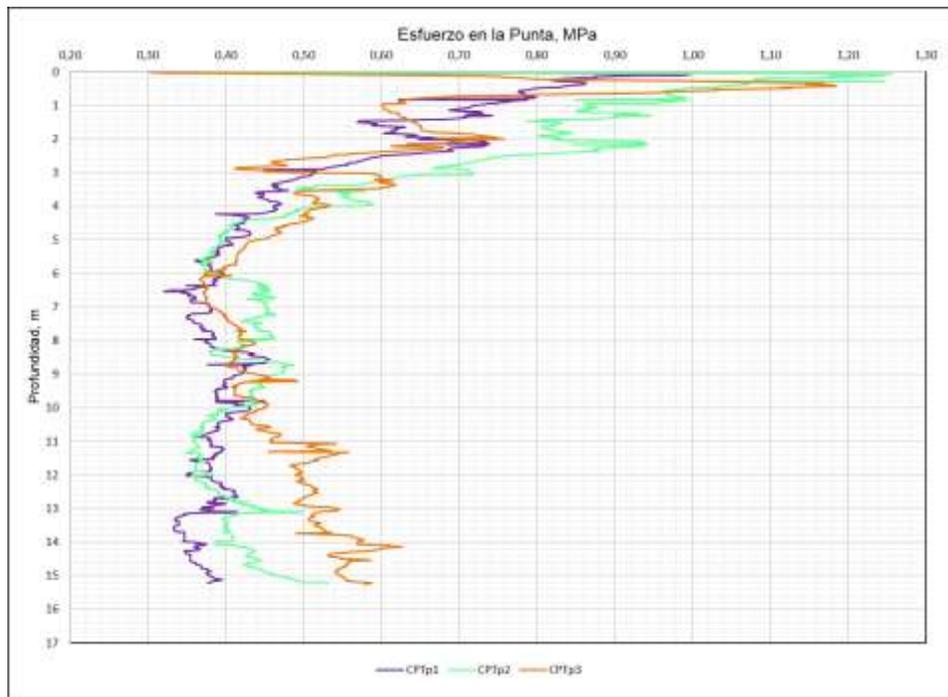


Figura 7-4. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

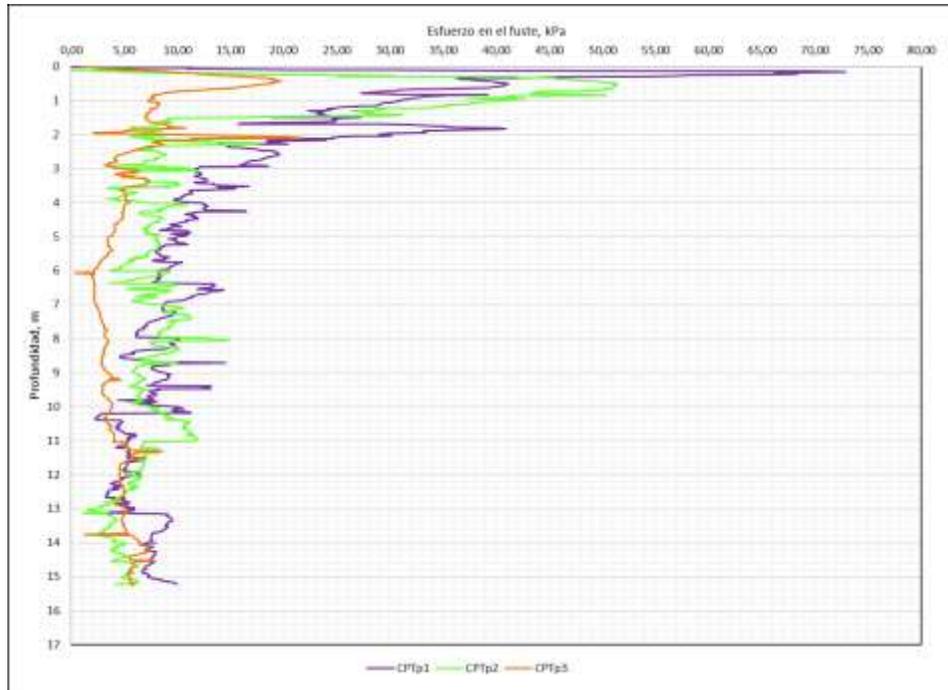


Figura 7-5. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1. (ECI). Fuente: propia.

En el Anexo 4 se relacionan los formatos de registro para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

### 7.1.1. Análisis y conclusiones de la presión en la punta y la fricción en el fuste obtenidos con el cono propuesto y el cono tradicional en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

En la Figura 7-6 se indica la presión en la punta con el piezocono convencional que realizaron Sarmiento y León (2016) en el Sitio de Investigación 1 (ECI), junto con el promedio de la presión en la punta de las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3 con el cono propuesto realizadas en el mismo sitio, en la cual se observa que excepto cerca de la superficie se presenta buena coincidencia, aunque el cono propuesto tiende a dar una resistencia en la punta menor que la correspondiente al cono convencional.

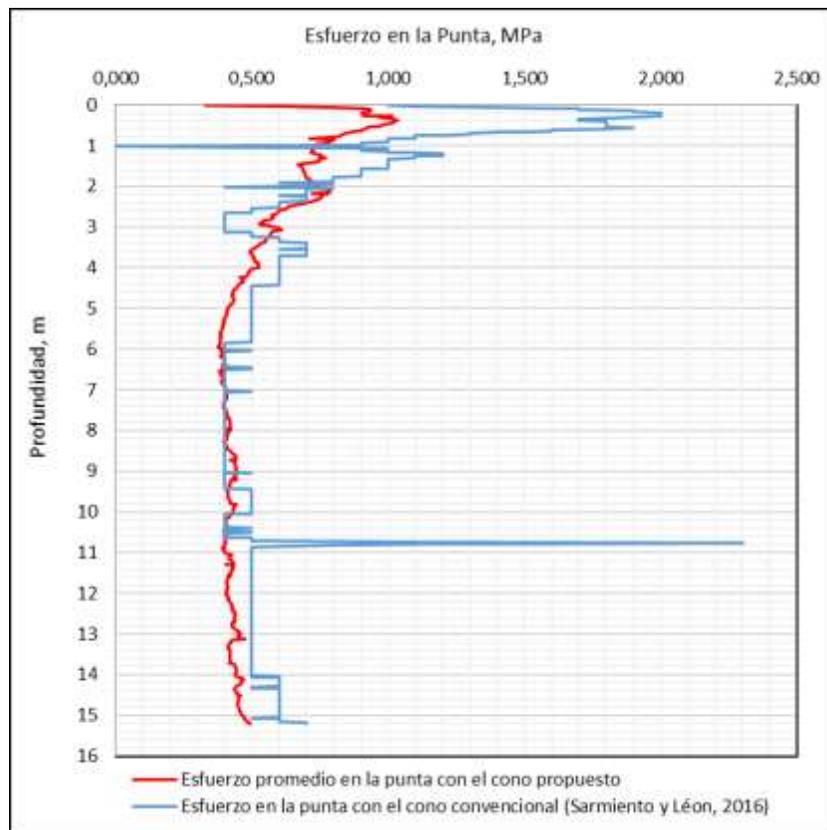


Figura 7-6. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto y con el cono convencional en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

En la Figura 7-7 se indica el esfuerzo en el fuste de la penetración con el piezocono convencional que realizaron Sarmiento y León (2016) en el Sitio de Investigación 1 (ECI), junto con el promedio del esfuerzo en el fuste de las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3 con el cono propuesto realizadas en el mismo sitio, en la cual se observa que con excepción de la información cercan a la superficie, en general existe una buena coincidencia, aunque la resistencia por fuste del cono propuesto es menor que la resistencia por fuste del cono convencional.

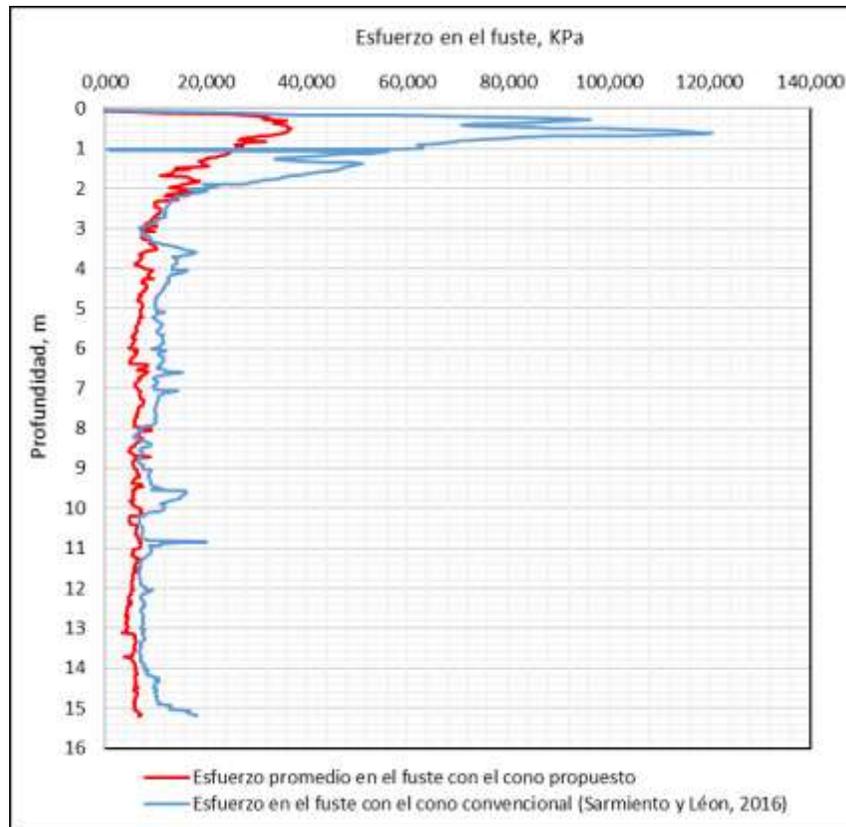


Figura 7-7. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto y con el cono convencional en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

Es posible que la disminución de la presión en la punta y la fricción en el fuste del cono propuesto con respecto al cono convencional, se deba a que el diámetro no es el mismo, siendo el diámetro del cono convencional de 35.7 mm y del cono propuesto de 60 mm.

Tumay M & Sandven R (2000), indican en la investigación desarrollada de penetración de cono miniatura en arcillas, que el piezocono miniatura de 2 cm<sup>2</sup> (15.9 mm de diámetro), registro un 11% más de resistencia en comparación con el estándar de 10 cm<sup>2</sup> (35.7 mm de diámetro).

La disminución de la presión en la punta y fricción en el fuste entre el cono propuesto y el piezocono convencional se encuentra en promedio en 17%.

En la Figura 7-8 se identifican dos sectores de la gráfica del esfuerzo promedio en la punta con respecto a la profundidad, el cual fue obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). A una profundidad entre 0 a 5.0 m se encuentra el sector 1, en el cual se observa un incremento del “qc” obteniendo un valor máximo de 1.03 MPa, luego a una profundidad de 5.0 m a 15.0 m se encuentra el sector 2, en el cual se mantiene el “qc” entre una presión máxima y mínima de 0.50 MPa y 0.38 MPa, respectivamente (ver la Tabla 7-2).

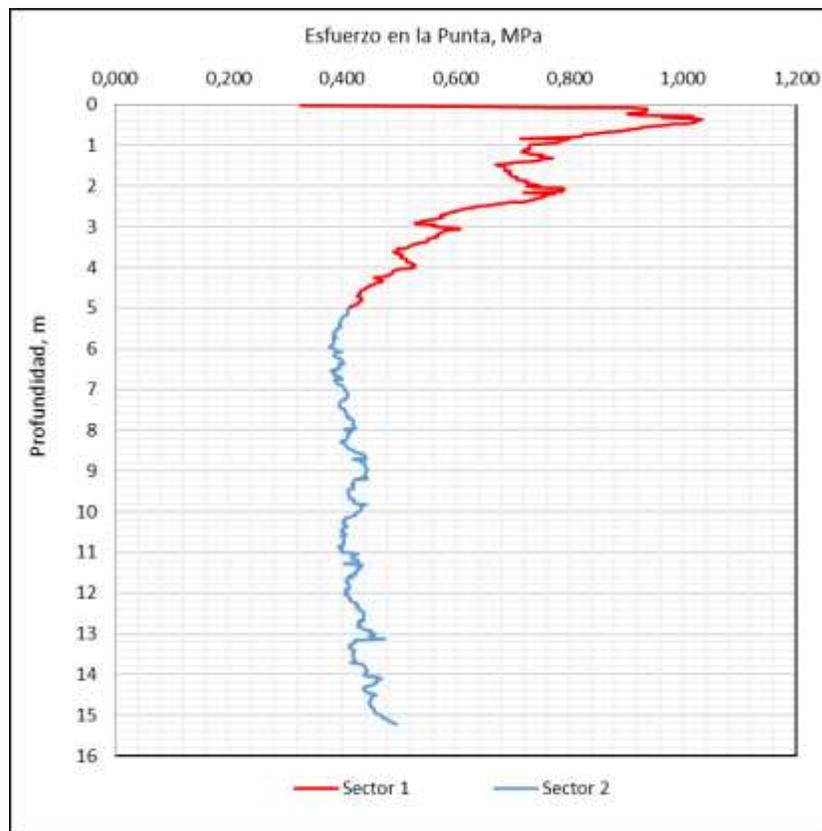


Figura 7-8. Sector 1 y 2 de la presión en la punta promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

Tabla 7-2. Presión en la punta máxima promedio y mínima promedio para el sector 1 y 2 obtenida con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Sector	Profundidad, m	Presión en la punta, MPa	
		Máximo	Mínimo
1	0 – 5	1,03	0,33
2	5 – 15	0,50	0,38

Fuente: propia.

En la Figura 7-9 se identifican dos sectores de la gráfica de fricción en el fuste promedio con respecto a la profundidad, el cual fue obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). A una profundidad entre 0 a 3.0 m se encuentra el sector 1, en el cual se observa un incremento de la fricción en el fuste obteniendo un valor máximo de 37.06 kPa, luego a una profundidad de 3.0 m a 15.0 m se encuentra el sector 2, en el cual se mantiene la fricción en el fuste entre un esfuerzo máximo y mínimo de 10.34 kPa y 3.33 kPa respectivamente (ver la Figura 7-3).

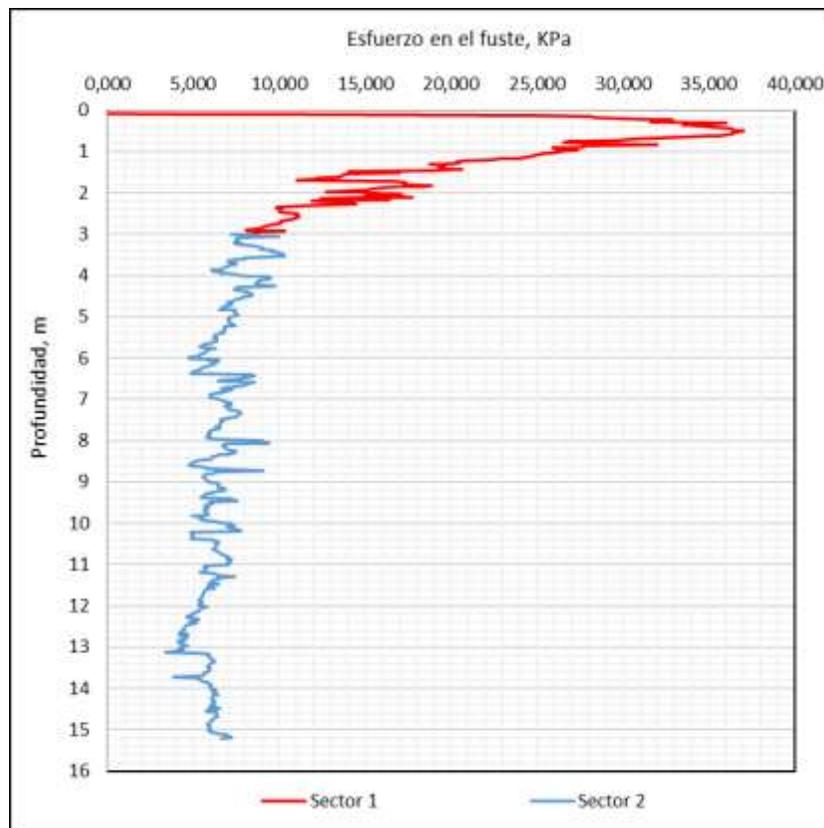


Figura 7-9. Sector 1 y 2 de la fricción en el fuste promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

Tabla 7-3. Fricción en el fuste máximo y mínimo promedio para el sector 1 y 2 obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Sector	Profundidad, m	Fricción en el fuste, kPa	
		Máximo	Mínimo
1	0 -3	37,06	6,07
2	3 - 15	10,34	3,33

Fuente: propia.

Los datos de presión en la punta y fricción en el fuste promedio del cono propuesto se pueden consultar en el Anexo 4.

## 7.2. Hincado del Cono Propuesto en el Sitio de Investigación 2. (Fontibón)

En el Sitio de Investigación 2, se llevaron a cabo tres exploraciones con el cono propuesto, las cuales se identifican como CPTp1, CPTp2 y CPTp3, registrando la presión en la punta y la fricción en el fuste hasta una profundidad de 15 m (ver la Figura 7-10).



Figura 7-10. Exploración con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

En la Tabla 7-4 y Figura 7-11 se indica la ubicación de los sondeos

Tabla 7-4. Ubicación de las exploraciones con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Sondeo	Descripción	Latitud, Norte	Longitud, Este	Profundidad, m
CPTp1	Hincado del sensor propuesto (registro de la presión en la punta y fricción en el fuste)	1009622.7105	993105.650	15
CPTp2	Hincado del sensor propuesto (registro de la presión en la punta y fricción en el fuste)	1009622.4367	993106.6747	15
CPTp3	Hincado del sensor propuesto (registro de la presión en la punta y fricción en el fuste)	1009621.4120	993106.4008	15

Fuente: propia.

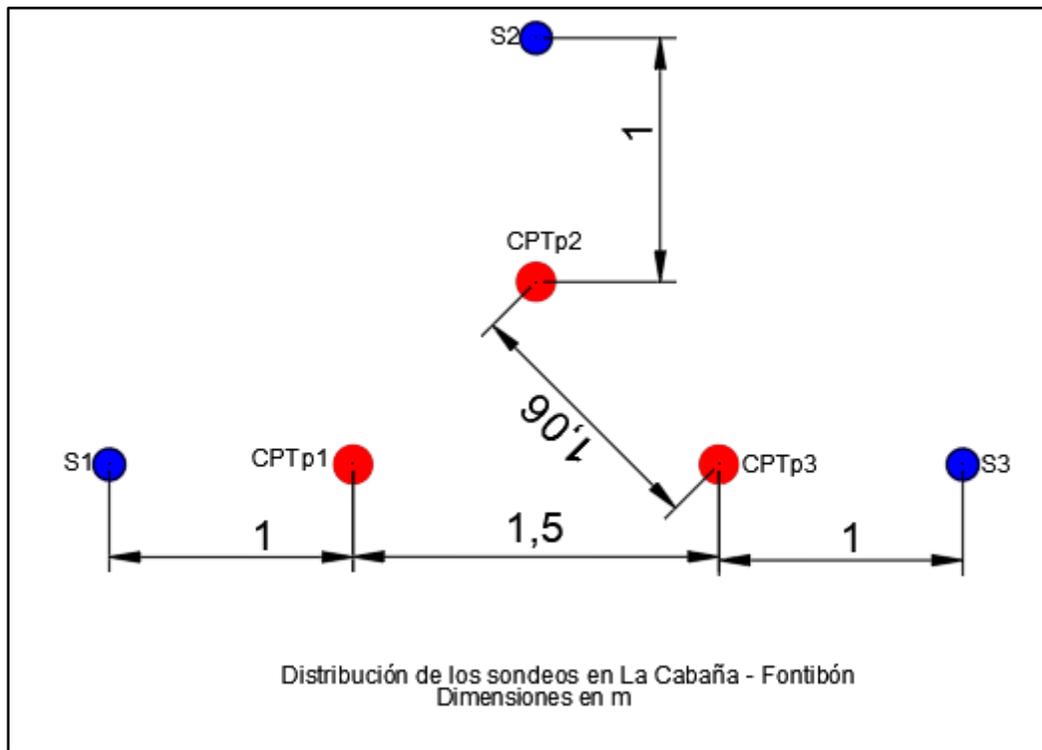


Figura 7-11. Ubicación de las penetraciones con el cono propuesto CPTp1, CPTp2 y CPTp3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

Al igual que en el Sitio de Investigación 1, la información registrada durante las penetraciones se ingresaron en el formato indicado en la Figura 7-3 donde a partir de los datos registrados en el sensor S1 y S2, se calcula la fuerza en la punta del cono y la fuerza en el fuste, haciendo uso de las ecuaciones de calibración indicadas en el numeral 5.2.2 (ver las ecuaciones 36 y 38).

En la Figura 7-12, se observa la variación del esfuerzo en la punta en profundidad y en la Figura 7-13 el esfuerzo en el fuste, los cuales fueron registrados con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón), donde se llevaron a cabo tres penetraciones, las cuales se identifican como CTP1, CTP2 y CTP3, llegando hasta una profundidad de 15m.

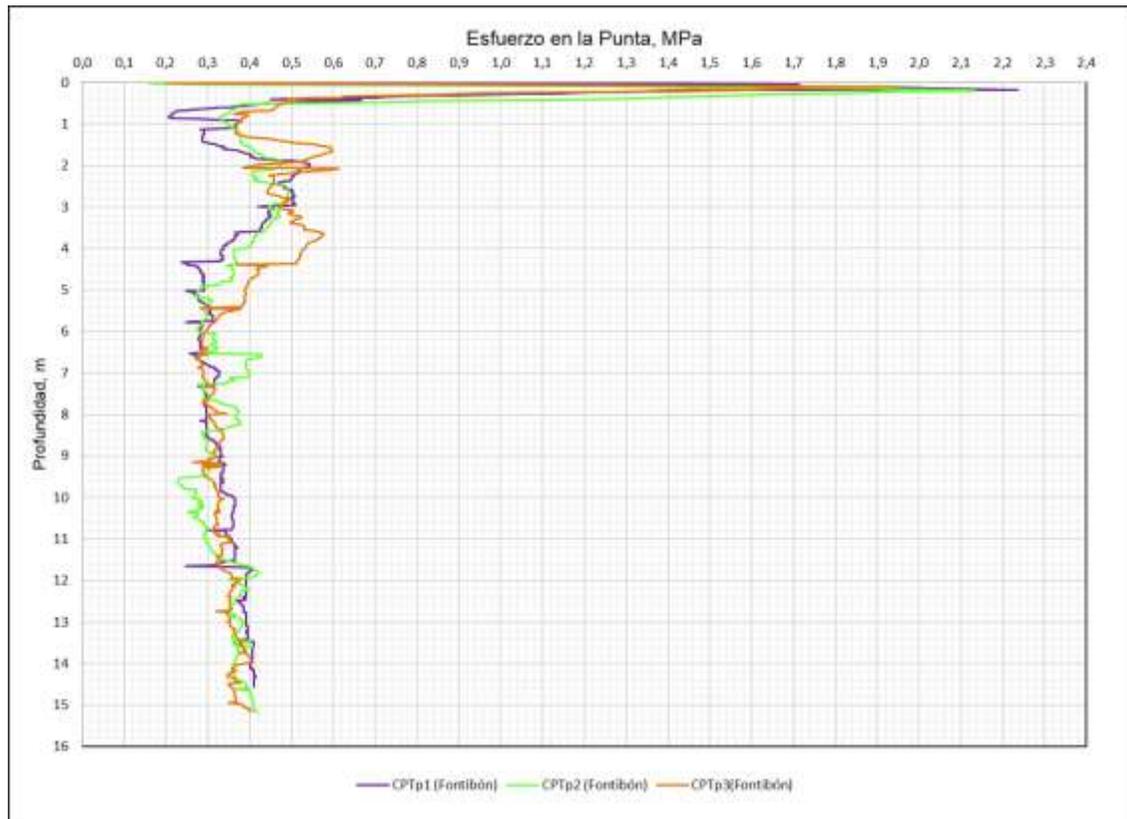


Figura 7-12. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Fuente: propia.

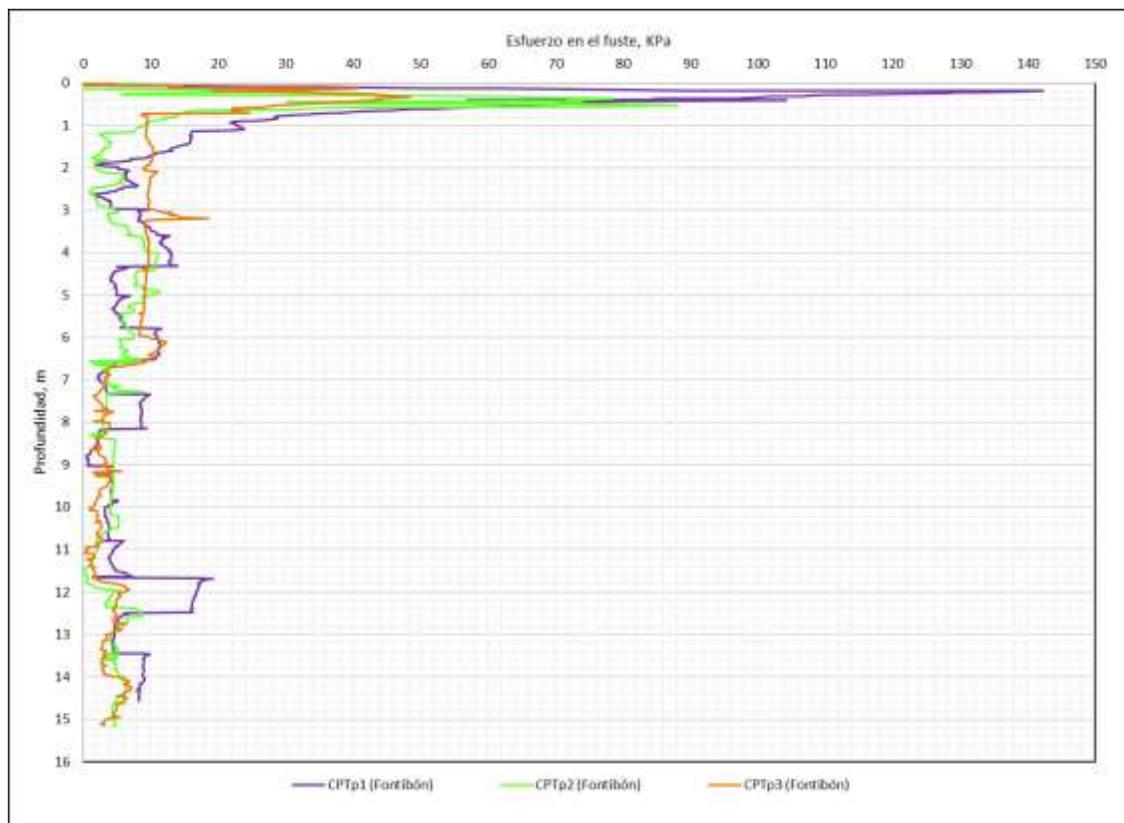


Figura 7-13. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2. (Fontibón).

Fuente: propia.

En el Anexo 4 se relacionan los formatos de registro para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, con el cono propuesto, realizadas en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

### **7.2.2. Análisis y conclusiones de la presión en la punta y la fricción en el fuste obtenidos con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).**

En la Figura 7-14 se observa la variación del esfuerzo promedio en la punta en profundidad, obtenido a partir de las penetraciones del cono propuesto, las cuales se identifican como CPTp1, CPTp2 y CPTp3.

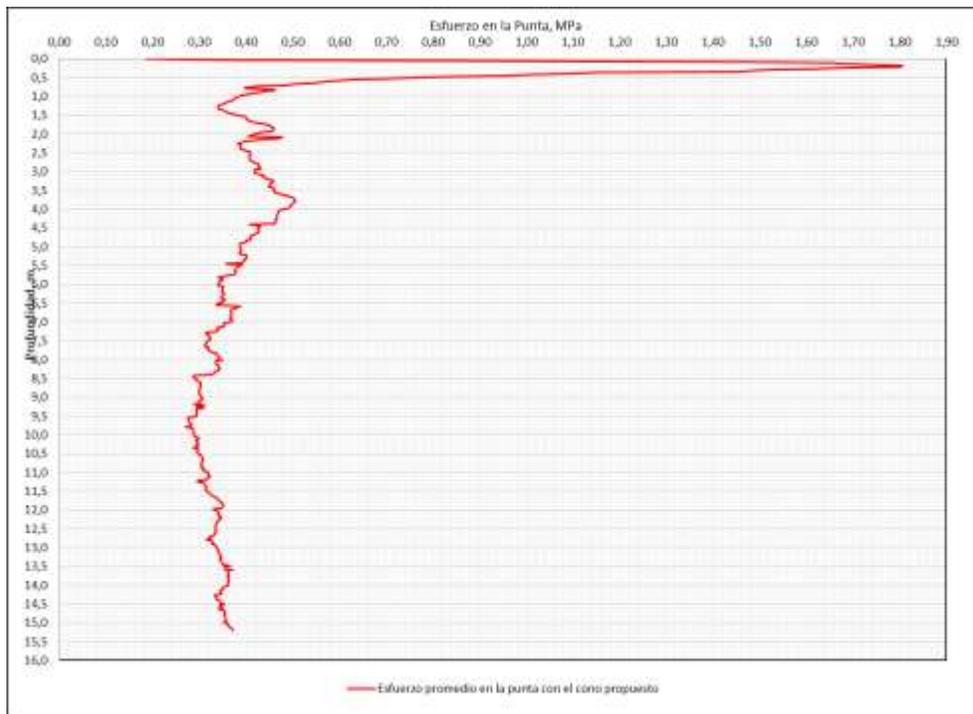


Figura 7-14. Esfuerzo en la punta promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

En la Figura 7-15 se observa la variación del esfuerzo promedio en el fuste en profundidad, obtenido a partir de las penetraciones del cono propuesto, las cuales se identifican como CPTp1, CPTp2 y CPTp3.

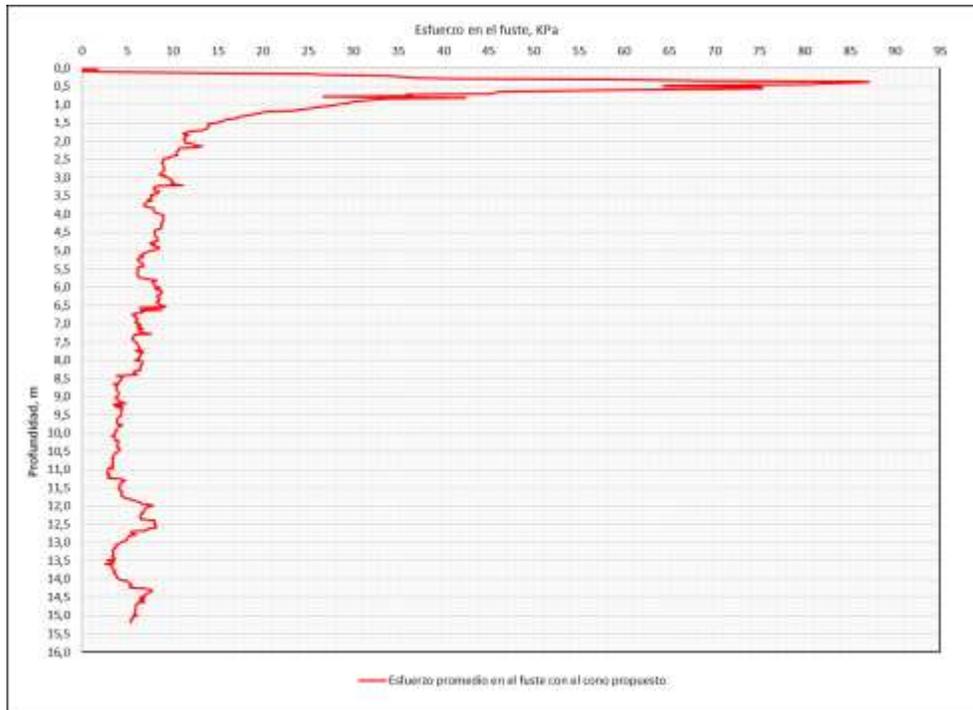


Figura 7-15. Esfuerzo en el fuste promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

En la Figura 7-16 se identifican dos sectores de la gráfica del esfuerzo promedio en la punta con respecto a la profundidad, el cual fue obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). A una profundidad entre 0 a 1.5 m se encuentra el sector 1, en el cual se observa un incremento del “qc” obteniendo un valor máximo de 1.81 MPa, luego a una profundidad de 1.50 m a 15.0 m se encuentra el sector 2, en el cual se mantiene el “qc” entre una presión máxima y mínima de 0.37 MPa y 0.34 MPa, respectivamente (ver la Tabla 7-5).

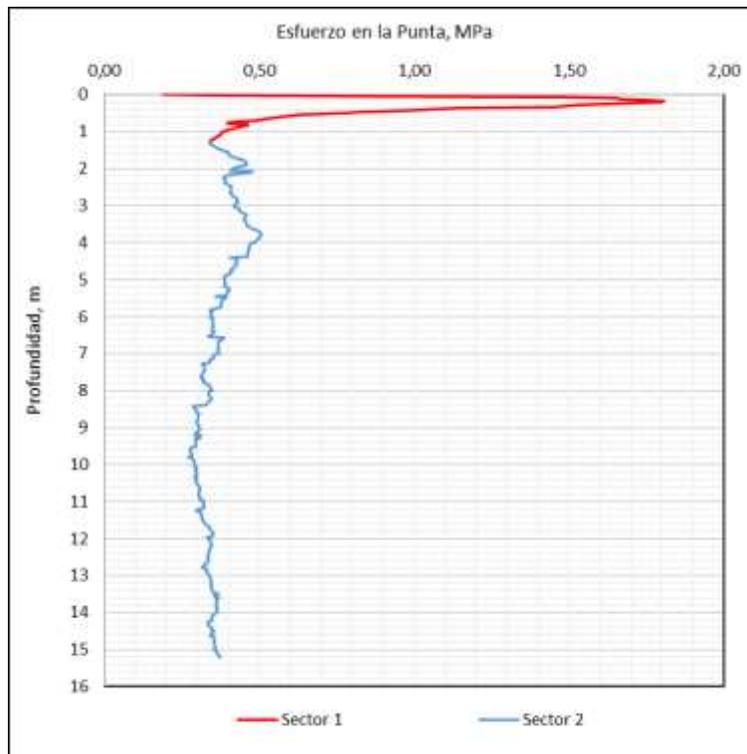


Figura 7-16. Sector 1 y 2 de la presión en la punta promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

Tabla 7-5. Presión en la punta máxima promedio y mínima promedio para el sector 1 y 2 obtenida con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Sector	Profundidad, m	Presión en la punta, MPa	
		Máximo	Mínimo
1	0 - 1,5	1,81	0,19
2	1,5 - 15	0,37	0,34

Fuente: propia.

En la Figura 7-17 se identifican dos sectores de la gráfica de fricción en el fuste promedio con respecto a la profundidad, el cual fue obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). A una profundidad entre 0 a 2.2 m se encuentra el sector 1, en el cual se observa un incremento de la fricción en el fuste obteniendo un valor máximo de 87.15 kPa, luego a una profundidad de 1.50 m a 15.0 m se encuentra el sector 2, en el cual se mantiene la fricción en el fuste entre un esfuerzo máximo y mínimo de 10.69 kPa y 5.36 kPa, respectivamente (ver la Tabla 7-6).

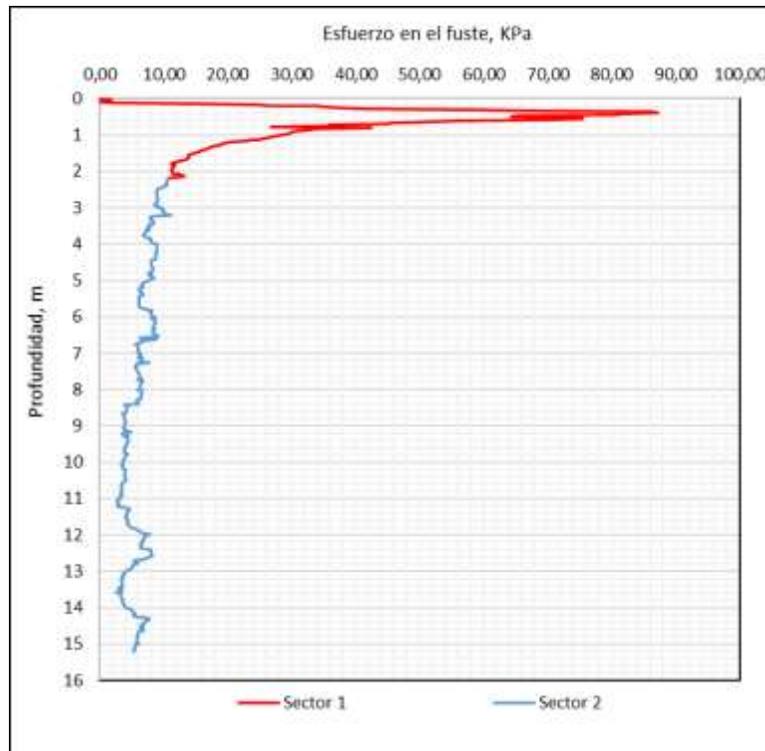


Figura 7-17. Sector 1 y 2 de la fricción en el fuste promedio obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

Tabla 7-6. Fricción en el fuste máximo y mínimo promedio para el sector 1 y 2 obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Fricción en el fuste, kPa			
Sector	Profundidad, m	Máximo	Mínimo
1	0 - 2,2	87,15	2,37
2	2,2 - 15	10,69	5,36

Fuente: propia.

## Capítulo VIII

### Procesamiento y Análisis de la Información

El parámetro geotécnico a analizar corresponde al factor del cono “N<sub>kt</sub>”, el cual se determina haciendo uso de las ecuaciones indicadas en Tabla 8-1

Tabla 8-1. Resumen de los parámetros a evaluar.

Ítem	Parámetro Geotécnico	Ecuación	Autor
1	Resistencia al corte no drenado (S <sub>u</sub> )	$S_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{KT}}$	Kulhawy and Mayne (1990) para suelos finos
2	Factor del cono	$N_{kt} = 10.5 + 7\log(Fr)$	Gregg Drilling & Testing (2010)
3	Relación de fricción normalizada	$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} * 100$	Gregg Drilling & Testing (2010)
4	Factor de cono	$N_{kt} = 13.4 + 6.65LL$	Larsson y Mulabdic (1991)

Fuente: propia.

Debido a la geometría interna del cono, la presión del agua durante la penetración actúa en la parte de atrás del cono y del mango de fricción; este comportamiento es conocido como el área final desigual (ver la Figura 8-1). En arcillas de consistencia blanda y limos con nivel freático, la resistencia en el cono “q<sub>c</sub>”, debe corregirse teniendo en cuenta las presiones de poros que actúan en la geometría del cono, obteniéndose la resistencia corregida del cono “q<sub>t</sub>”.

La resistencia del cono corregida se determina con la Ecuación (39) donde “a” es la relación de área neta, la cual se halla mediante calibración en laboratorio con valores típicos entre 0.70 a 0.85.

$$q_t = q_c + u_2 (1 - a) \tag{39}$$

Donde

u<sub>2</sub>: Presiones intersticiales en el hombro (ver la Figura 8-1).

a: Relación de área neta

q<sub>t</sub>: Resistencia del cono corregida.

q<sub>c</sub>: Resistencia del cono.

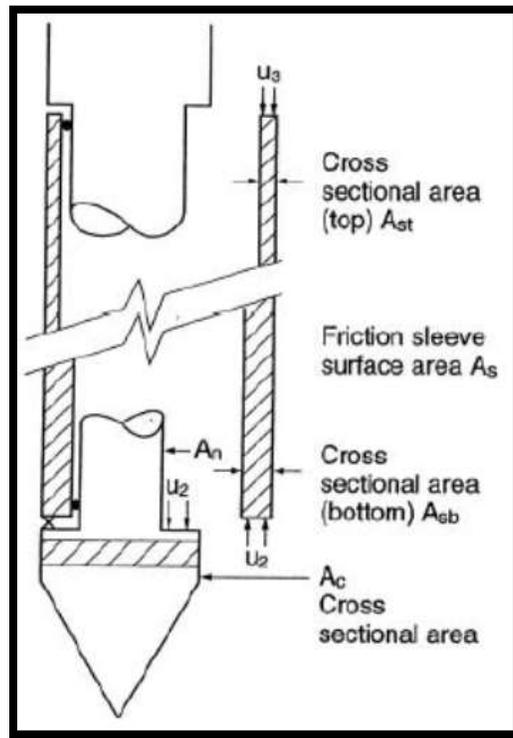


Figura 8-1. Efecto del área final desigual en el cono y el mango de fricción. Fuente: Robertson & Cabal (2010).

En el cono propuesto no se registra la presión de poros, por lo tanto, en la Ecuación (40) la resistencia del cono corregida se toma como la resistencia del cono “ $q_t = q_c$ ”.

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (40)$$

Donde:

$S_u$  = Resistencia al corte no drenada.

$q_t$  = Resistencia del cono corregida.

$\sigma_v$  = Esfuerzo vertical total.

$N_{kt}$  = parámetro del cono.

En el presente capítulo se analiza el factor de cono “ $N_{kt}$ ” a partir de las Ecuaciones (41), (42), (43) y (44).

Al despejar el factor de cono “ $N_{kt}$ ” de la Ecuación (40) se obtiene la Ecuación (41), donde la resistencia en el cono “ $q_c$ ”, se registra en campo mediante el cono propuesto, la resistencia al corte

no drenada "Su", se obtiene mediante muestras inalteradas ejecutando el ensayo triaxial no consolidado no drenado, el ensayo compresión inconfiada y el ensayo de campo de corte con veleta.

$$N_{kt} = \frac{q_c - \sigma_v}{S_u} \quad (41)$$

También se propone determinar el factor como "Nkt" haciendo uso de la Ecuación (42) desarrollada por Gregg Drilling & Testing (2010), a partir de la relación de fricción "Fr" (ver la Ecuación 41), la cual se determina con el esfuerzo de fricción en el fuste "fs", la presión en la punta "qc" registrada con el cono propuesto y el esfuerzo vertical.

$$N_{kt} = 10.5 + 7\log(Fr) \quad (42)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_c - \sigma_v} * 100 \quad (43)$$

Además, se halla el factor del cono "N<sub>kt</sub>" a partir de la ecuación propuesta por Larsson y Mulabdic (1991) (ver la Ecuación 42), a partir del límite líquido.

$$N_{kt} = 13.4 + 6.65LL \quad (44)$$

### 8.1. Determinación Nkt en el Sitio de Investigación 1 (ECI)

En la Tabla 8-2 se presenta la presión en la punta y la fricción en el fuste de las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3 realizadas con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI), a las profundidades en las cuales se determinó la resistencia al corte no drenado mediante los ensayos de compresión inconfiada, triaxial no consolidado no drenado, y corte con veleta de campo.

Tabla 8-2. Esfuerzo en la punta y en el fuste con el cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3 en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Profundidad, m	CPTp1		CPTp2		CPTp3	
	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa
2	672,55	29,01	829,80	6,54	671,17	8,42
2,5	602,67	19,27	761,75	8,29	536,92	5,63
5	400,36	10,15	393,01	7,77	442,66	3,69
5,5	387,49	8,08	380,13	7,08	414,16	3,46
8	375,99	10,20	448,18	13,33	423,81	3,25
8,5	450,02	4,65	404,04	7,80	411,40	3,00
11	381,05	5,30	361,74	11,68	457,84	4,06
11,5	384,73	5,32	365,42	6,92	523,58	5,61
14	359,44	7,16	387,49	5,04	568,64	6,35
14,5	354,39	7,44	437,61	4,26	547,95	5,50

Fuente: propia.

En la Figura 8-2 y Figura 8-3 se observa la presión en la punta y fricción en el fuste registrados con el cono propuesto en las profundidades que se determina el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”.

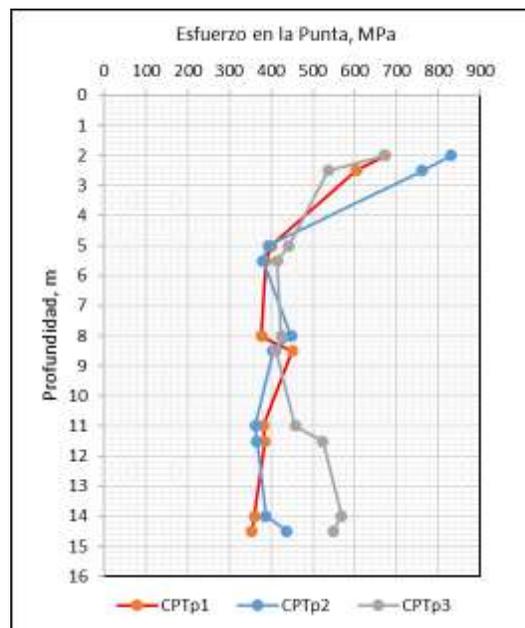


Figura 8-2. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

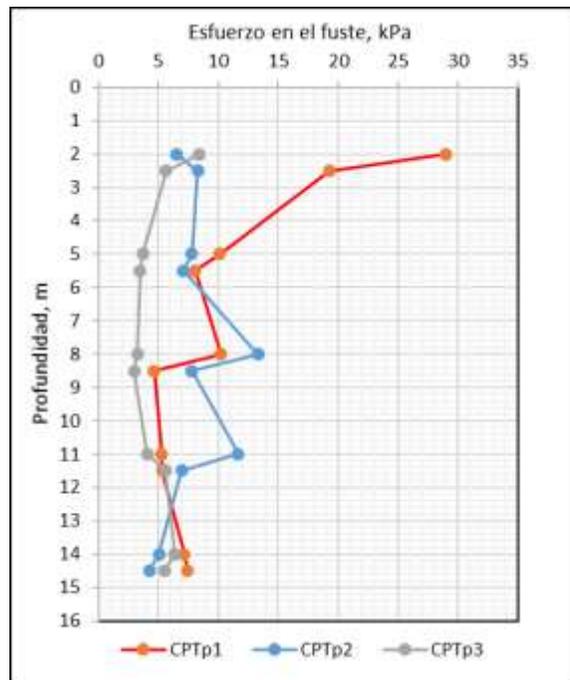


Figura 8-3. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

Para determinar el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir de la resistencia al corte no drenada, la relación de fricción “ $Fr$ ”, y el límite líquido, se estableció el formato indicado en la Figura 8-4, el cual se puede consultar en el Anexo 6.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN GEOTECNIA PENETRACIÓN ESTÁTICA DE CONO									
PROYECTO:		Maestría en ingeniería civil - Énfasis Geotecnia							
UBICACIÓN:		Escuela Colombiana de Ingeniería Ak 45 No. 205-59							
DESCRIPCIÓN:		Sitio de Investigación 1 (ECI)							
1. ESFUERZO EN LA PUNTA Y EN EL FUSTE CON EL CONO PROPUESTO									
Profundidad, m	CPTp1		CPTp2		CPTp3				
	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa			
2	672,55	29,01	829,80	6,54	671,17	8,42			
2,5	602,67	19,27	761,75	8,29	536,92	5,63			
5	400,36	10,15	393,01	7,77	442,66	3,69			
5,5	387,49	8,08	380,13	7,08	414,16	3,46			
8	375,99	10,20	448,18	13,33	423,81	3,25			
8,5	450,02	4,65	404,04	7,80	411,40	3,00			
11	381,05	5,30	361,74	11,68	457,84	4,06			
11,5	384,73	5,32	365,42	6,92	523,58	5,61			
14	359,44	7,16	387,49	5,04	568,64	6,35			
14,5	354,39	7,44	437,61	4,26	547,95	5,50			
2. PARÁMETRO DEL CONO A PARTIR DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA OBTENIDA MEDIANTE EL ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA EN EL SONDEO S1									
SONDEO:	S1	NF, m	1,5	Determinación Nkt a partir del cono propuesto					
Profundidad, m	Cu, kPa	Peso unitario, kN/m3	Esfuerzo vertical total, kPa	Esfuerzo vertical efectivo, kPa	Profundidad, m	Nkt (CPTp1)	Nkt (CPTp2)	Nkt (CPTp3)	Nkt (promedio)
2,5	38,13	15,79	39,49	29,68	2,5	14,77	18,94	13,05	15,59
5,5	37,47	15,21	85,10	45,86	5,5	8,07	7,87	8,78	8,24
8,5	24,13	14,13	127,48	58,81	8,5	13,37	11,46	11,77	12,20
11,5	16,18	13,54	168,09	69,99	11,5	13,39	12,20	21,97	15,85
14,5	14,89	13,73	209,30	81,77	14,5	9,74	15,33	22,74	15,94
$N_{kt} = \frac{q_c - \sigma_v}{S_u \text{ (compresión inconfiada)}}$					Promedio	11,87	13,16	15,66	13,56
					Máximo	14,77	18,94	22,74	15,94
					Mínimo	8,07	7,87	8,78	8,24
3. PARÁMETRO DEL CONO A PARTIR DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA OBTENIDA MEDIANTE EL ENSAYO TRIAXIAL UU EN EL SONDEO S2									
SONDEO:	S1	NF, m	1,5	Determinación Nkt a partir del cono propuesto					
Profundidad, m	Cu, kPa	Peso unitario, kN/m3	Esfuerzo vertical total, kPa	Esfuerzo vertical efectivo, kPa	Profundidad, m	Nkt (CPTp1)	Nkt (CPTp2)	Nkt (CPTp3)	Nkt (promedio)
2,5	63,38	15,49	38,72	28,91	2,5	8,90	11,41	7,86	9,39
5,5	35,78	14,73	82,90	43,66	5,5	8,51	8,31	9,26	8,69
8,5	40,54	14,54	126,51	57,84	8,5	7,98	6,85	7,03	7,28
11,5	55,33	13,58	167,26	69,16	11,5	3,93	3,58	6,44	4,65
14,5	37,70	13,72	208,43	80,90	14,5	3,87	6,08	9,01	6,32
$N_{kt} = \frac{q_c - \sigma_v}{S_u \text{ (triaxial UU)}}$					Promedio	6,64	7,24	7,92	7,27
					Máximo	8,90	11,41	9,26	9,39
					Mínimo	3,87	3,58	6,44	4,65

Figura 8-4. Formato de cálculo para el parámetro del cono “N<sub>kt</sub>” para el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Fuente: propia.

Del capítulo 8.1.1 al 8.1.5. se explica y analiza los valores de “N<sub>kt</sub>” obtenidos por los métodos indicados en la Tabla 8-1.

### 8.1.1. $N_{kt}$ a partir del ensayo de compresión inconfiada.

En la Tabla 8-3 y Figura 8-5 se indica el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” que se determinó a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada en el sondeo S1, y la presión en la punta del cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3.

Tabla 8-3. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada en el sondeo S1, en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Profundidad, m	$C_u$ , kPa	$\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	$\sigma_v$ , kPa	$N_{kt}$ (CPTp1)	$N_{kt}$ (CPTp2)	$N_{kt}$ (CPTp3)
2,5	38,13	15,79	39,49	14,77	18,94	13,05
5,5	37,47	15,21	85,10	8,07	7,87	8,78
8,5	24,13	14,13	127,48	13,37	11,46	11,77
11,5	16,18	13,54	168,09	13,39	12,20	21,97
14,5	14,89	13,73	209,30	9,74	15,33	22,74
	Promedio			11,87	13,16	15,66
	Máximo			14,77	18,94	22,74
	Mínimo			8,07	7,87	8,78

Fuente: propia.

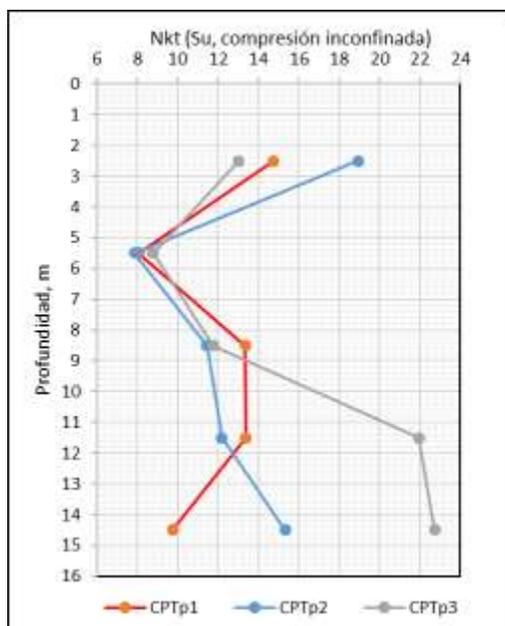


Figura 8-5. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de compresión inconfiada en el sondeo S1 en el sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$  promedio”, a partir de las obtenidas con las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, (ver la Tabla 8-4 y la Figura 8-6), para luego hallar sobre los datos promedio, los parámetros estadísticos como son, la media, la mediana, la desviación estándar, la varianza (ver la Tabla 8-5), obteniendo un parámetro del cono promedio de 13.56 y desviación estándar de 3.36.

Tabla 8-4. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de compresión inconfínada en el sondeo S1 en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).

Profundidad, m	$N_{kt}$ , promedio
2,5	15,59
5,5	8,24
8,5	12,20
11,5	15,85
14,5	15,94

Fuente: propia.

Tabla 8-5. Parámetros estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de compresión inconfínada en el sondeo S1 en el sitio de Investigación 1 (ECI)).

Descripción	Magnitud
Media	13,56
Error típico	1,50
Mediana	15,59
Desviación estándar	3,36
Varianza de la muestra	11,29
Curtosis	0,65
Coficiente de asimetría	-1,31
Rango	7,70
Mínimo	8,24
Máximo	15,94
Suma	67,82
Cuenta	5

Fuente: propia.

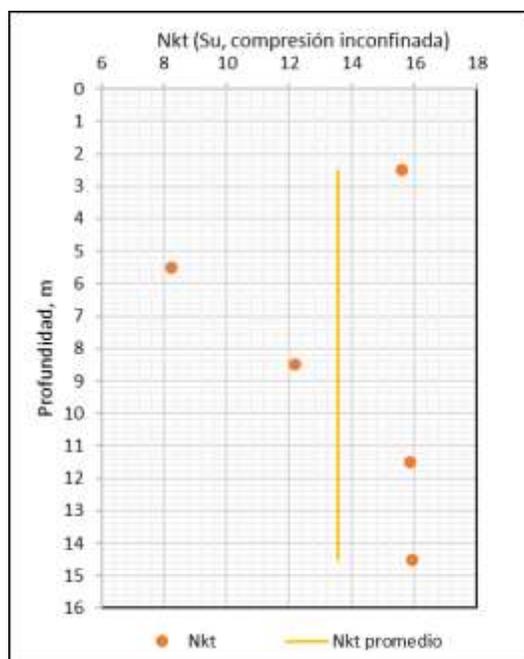


Figura 8-6. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$  promedio” en profundidad (Su obtenida del ensayo de compresión inconfínada en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

### 8.1.2. $N_{kt}$ a partir del ensayo triaxial UU.

En la Tabla 8-6 y Figura 8-7 se indica el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” que se determinó a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en el sondeo S2, y la presión en la punta del cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3.

Tabla 8-6. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”, a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU, en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Profundidad, m	$C_u$ , kPa	$\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	$\sigma_v$ , kPa	$N_{kt}$ (CPTp1)	$N_{kt}$ (CPTp2)	$N_{kt}$ (CPTp3)
2,5	63,38	15,49	38,72	8,90	11,41	7,86
5,5	35,78	14,73	82,90	8,51	8,31	9,26
8,5	40,54	14,54	126,51	7,98	6,85	7,03
11,5	55,33	13,58	167,26	3,93	3,58	6,44
14,5	37,70	13,72	208,43	3,87	6,08	9,01
	Promedio			6,64	7,24	7,27
	Máximo			8,90	11,41	9,39
	Mínimo			3,87	3,58	4,65

Fuente: propia.

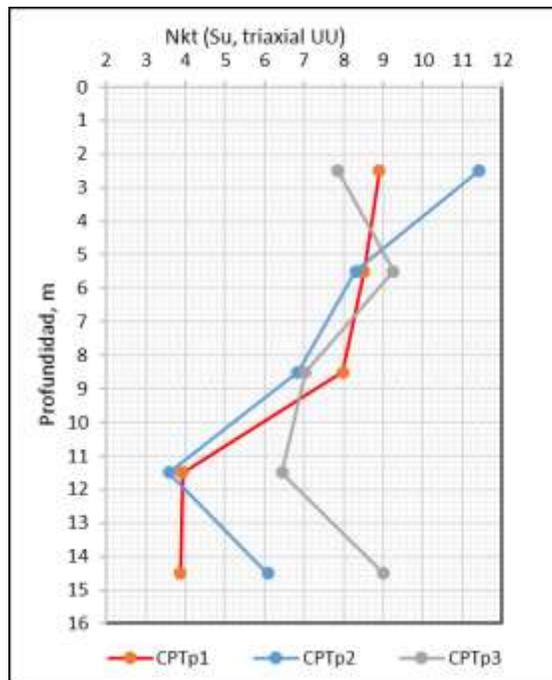


Figura 8-7. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo triaxial UU en el sondeo S2 en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio “ $N_{kt, promedio}$ ”, a partir de las resistencias en la punta obtenidas con las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, (ver la Tabla 8-7 y la Figura 8-8), para luego hallar sobre los datos promedio, los parámetros estadísticos como son, la media, la mediana, la desviación estándar, la varianza (ver la Tabla 8-8) obteniendo un parámetro del cono promedio de 7,27 y desviación estándar de 1,89.

Tabla 8-7. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo triaxial UU en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).

Profundidad, m	$N_{kt, promedio}$
2,5	9,39
5,5	8,69
8,5	7,28
11,5	4,65
14,5	6,32

Fuente: propia.

Tabla 8-8. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo triaxial UU en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).

Descripción	Magnitud
Media	7,27
Error típico	0,84
Mediana	7,28
Desviación estándar	1,89
Varianza de la muestra	3,57
Curtosis	-0,93
Coefficiente de asimetría	-0,39
Rango	4,74
Mínimo	4,65
Máximo	9,39
Suma	36,33
Cuenta	5

Fuente: propia.

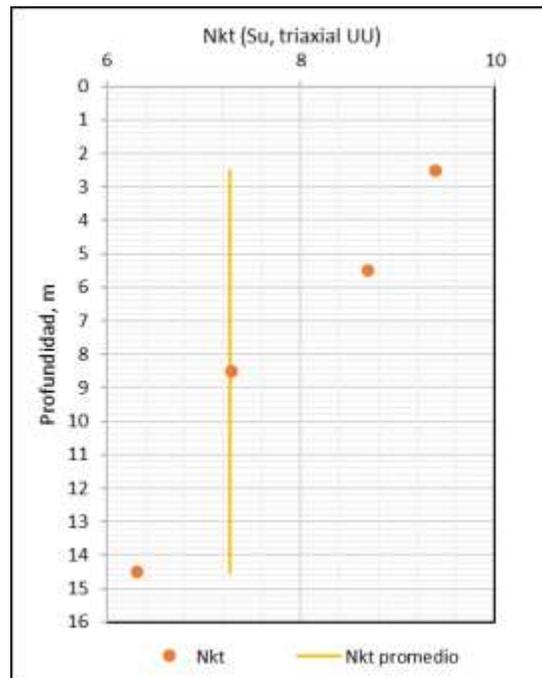


Figura 8-8. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$  promedio” en profundidad (Su obtenida del ensayo triaxial UU, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

### 8.1.3. $N_{kt}$ a partir del ensayo de corte con veleta de campo.

En la Tabla 8-9 y la Figura 8-9 se resume el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” que se determinó a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en el sondeo S2, y la presión en la punta del cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3.

Tabla 8-9. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”, a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Profundidad, m	$C_u$ , kPa	$\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	$\sigma_v$ , kPa	$N_{kt}$ (CPTp1)	$N_{kt}$ (CPTp2)	$N_{kt}$ (CPTp3)
2	51,99	15,49	32,59	12,31	15,43	12,38
5	28,25	14,73	74,83	11,52	12,49	14,25
8	25,41	14,54	117,07	10,19	15,56	14,60
11	27,08	13,58	159,31	8,19	10,95	14,49
14	31,53	13,72	201,55	5,01	9,82	15,56
	Promedio			9,44	12,85	14,26
	Máximo			12,31	15,56	15,56
	Mínimo			5,01	9,82	12,38

Fuente: propia.

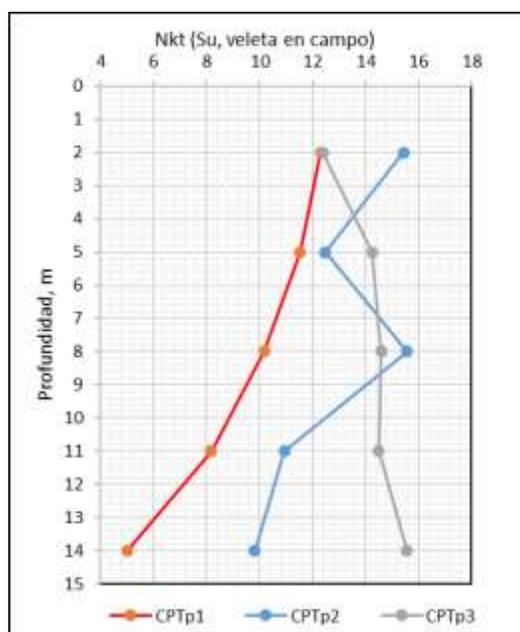


Figura 8-9. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ”, a partir de las resistencias en la punta obtenidas con las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, (ver la Tabla 8-10 y la Figura 8-10), para luego hallar sobre los datos promedio, los parámetros estadísticos como son, la media, la mediana, la desviación estándar, la varianza (ver la Tabla 8-11), obteniendo un parámetro del cono promedio de 12.18 y desviación estándar de 1,46.

Tabla 8-10. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de corte con veleta de campo en el sondeo S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).

Profundidad, m	$N_{kt, \text{ promedio}}$
2	13,37
5	12,75
8	13,45
11	11,21
14	10,13

Fuente: propia.

Tabla 8-11. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en el Sitio de Investigación 1(ECI)).

Descripción	Magnitud
Media	12,18
Error típico	0,65
Mediana	12,75
Desviación estándar	1,46
Varianza de la muestra	2,13
Curtosis	-1,55
Coficiente de asimetría	-0,76
Rango	3,32
Mínimo	10,13
Máximo	13,45
Suma	60,92
Cuenta	5

Fuente: propia.

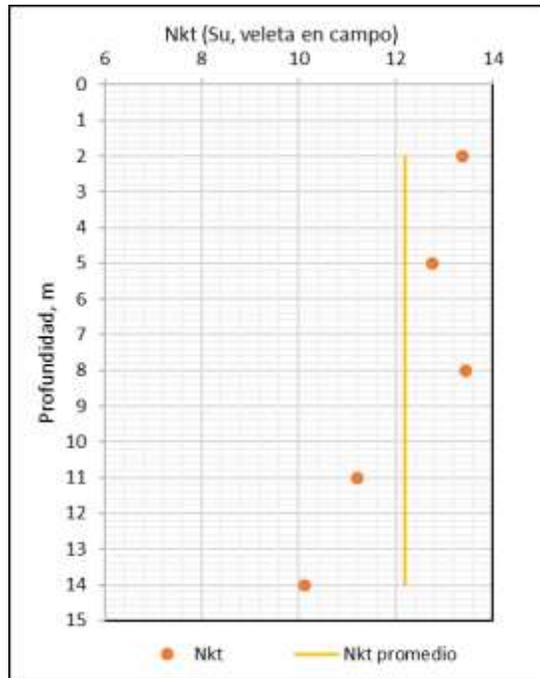


Figura 8-10. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

#### 8.1.4. $N_{kt}$ a partir de la relación de fricción “Fr”.

En la Tabla 8-12 y la Figura 8-11 se indica el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” que se determinó a partir de la relación de fricción “Fr” obtenida mediante las ecuaciones 40 y 41, haciendo uso de la presión en la punta y la fricción en el fuste registradas con el cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, junto con el esfuerzo vertical.

$$N_{kt} = 10.5 + 7\log(Fr) \quad (40)$$

$$Fr = \frac{f_s}{q_c - \sigma_v} * 100 \quad (41)$$

Tabla 8-12. Determinación del parámetro del cono “N<sub>kt</sub>” a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Profundidad, m	$\sigma_v$ , kPa	Fr (CPTp1), %	Fr (CPTp2), %	Fr (CPTp3), %	N <sub>kt</sub> (CPTp1)	N <sub>kt</sub> (CPTp2)	N <sub>kt</sub> (CPTp3)
2	32,59	4,53	0,82	1,32	15,09	9,90	11,34
2,5	38,72	3,42	1,15	1,13	14,24	10,92	10,87
5	74,83	3,12	2,44	1,00	13,96	13,22	10,51
5,5	82,90	2,65	2,38	1,04	13,47	13,14	10,63
8	117,07	3,94	4,03	1,06	14,67	14,73	10,68
8,5	126,51	1,44	2,81	1,05	11,60	13,64	10,65
11	159,31	2,39	5,77	1,36	13,15	15,83	11,43
11,5	167,26	2,45	3,49	1,57	13,22	14,30	11,88
14	201,55	4,53	2,71	1,73	15,09	13,53	12,17
14,5	208,43	5,10	1,86	1,62	15,45	12,39	11,97
Promedio		3,36	2,75	1,29	13,99	13,16	11,21
Máximo		5,10	5,77	1,73	15,45	15,83	12,17
Mínimo		1,44	0,82	1,00	11,60	9,90	10,51

Fuente: propia.

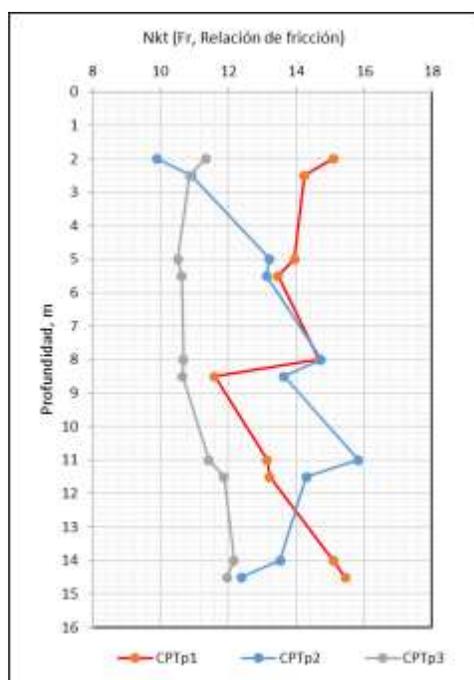


Figura 8-11. Variación del parámetro del cono “N<sub>kt</sub>” en profundidad (obtenido a partir de la relación de fricción Fr en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio " $N_{kt, promedio}$ " a partir de las resistencias a la penetración obtenidas en los hincados CPTp1, CPTp2 y CPTp3, (ver la Tabla 8-13 y la Figura 8-12), para luego hallar sobre los datos promedio, los parámetros estadísticos como son, la media, la mediana, la desviación estándar, la varianza (ver la Tabla 8-14), obteniendo un parámetro del cono promedio de 12.79 y desviación estándar de 0.64.

Tabla 8-13. Parámetro del cono promedio " $N_{kt}$ " (obtenido a partir de la relación de fricción "Fr", en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).

Profundidad, m	$N_{kt, promedio}$
2	12,11
2,5	12,01
5	12,56
5,5	12,41
8	13,36
8,5	11,97
11	13,47
11,5	13,13
14	13,60
14,5	13,27

Fuente: propia.

Tabla 8-14. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio " $N_{kt}$ " (obtenido a partir de la relación de fricción "Fr" en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).

Descripción	Magnitud
Media	12,79
Error típico	0,20
Mediana	12,85
Desviación estándar	0,64
Varianza de la muestra	0,41
Curtosis	-1,95
Coficiente de asimetría	-0,12
Rango	1,63
Mínimo	11,97
Máximo	13,60
Suma	127,89
Cuenta	10,00

Fuente: propia.

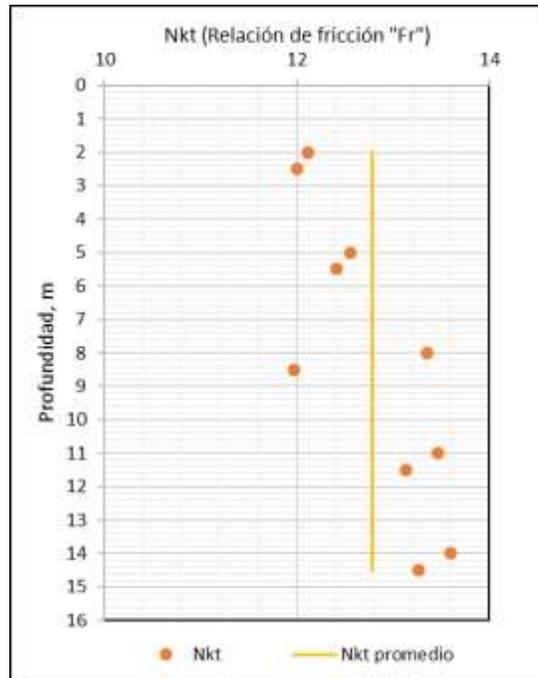


Figura 8-12. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

### 8.1.5. $N_{kt}$ a partir del ensayo del límite líquido.

En la Tabla 8-15 y la Figura 8-13 se indica el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” que se determinó a partir del límite líquido, haciendo uso de la Ecuación 42 desarrollada por Larsson y Mulabdic (1991), la cual fue correlaciona para arcillas blandas de Suecia.

$$N_{kt} = 13.4 + 6.65LL \quad (42)$$

Tabla 8-15. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir del límite líquido en los sondeos S1 y S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Sondeo S1			Sondeo S2		
Profundidad, m	LL, %	$N_{kt}$	Profundidad, m	LL, %	$N_{kt}$
1,40	93,40	19,61	1,50	81,34	18,81
3,00	123,36	21,60	2,80	131,38	22,14
4,50	162,08	24,18	3,50	164,81	24,36
6,00	189,22	25,98	6,00	182,29	25,52
8,00	190,73	26,08	8,20	184,92	25,70
10,00	206,76	27,15	11,00	162,35	24,20
12,00	131,40	22,14	12,50	124,30	21,67
13,00	140,87	22,77	13,50	136,94	22,51
15,00	142,85	22,90	15,00	134,30	22,33
Promedio		23,60	Promedio		23,02
Máximo		27,15	Máximo		25,70
Mínimo		19,61	Mínimo		18,81

Fuente: propia.

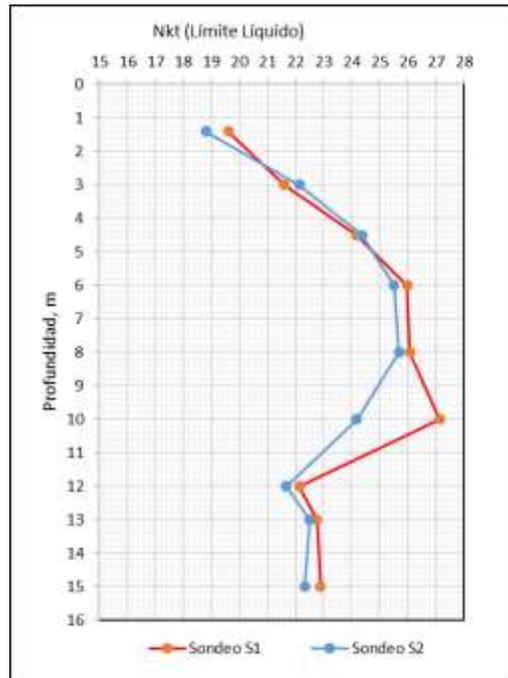


Figura 8-13. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (obtenido a partir del límite líquido de los sondeos S1 y S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio “ $N_{kt\text{ promedio}}$ ” a partir de las resistencias a la penetración obtenidas en los sondeos S1 y S2 (ver la Tabla 8-16 y Figura 8-14), para luego hallar sobre los datos promedio, la media, la mediana, la desviación estándar y la varianza (ver la Tabla 8-17), obteniendo un parámetro del cono promedio de 23,31 y desviación estándar de 2,26.

Tabla 8-16. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (obtenido a partir del límite líquido en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).

Profundidad promedio, m	$N_{KT, \text{ promedio}}$
1,45	19,21
2,90	21,87
4,00	24,27
6,00	25,75
8,10	25,89
10,50	25,67
12,25	21,90
13,25	22,64
15,00	22,62

Fuente: propia.

Tabla 8-17. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (obtenido a partir del límite líquido en el Sitio de Investigación 1 (ECI)).

Descripción	Magnitud
Media	23,31
Error típico	0,75
Mediana	22,64
Desviación estándar	2,26
Varianza de la muestra	5,12
Curtosis	-0,44
Coficiente de asimetría	-0,42
Rango	6,68
Mínimo	19,21
Máximo	25,89
Suma	209,82
Cuenta	9,00

Fuente: propia.

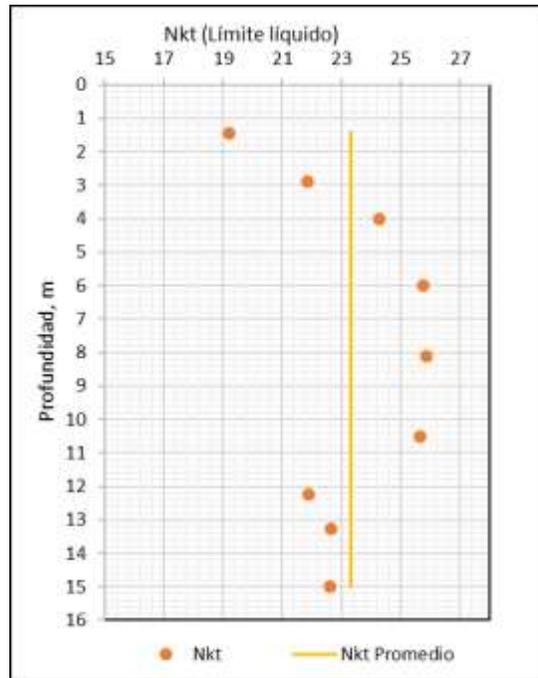


Figura 8-14. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (obtenido a partir del límite líquido de los sondeos S1 y S2, en el Sitio de Investigación 1 (ECI)). Fuente: propia.

### 8.1.6. Comparación y análisis de los parámetros del cono “ $N_{kt}$ ” obtenidos en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

En la Tabla 8-18 se resumen los parámetros del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” obtenidos mediante las cinco metodologías desarrolladas en los numerales 8.1.1, 8.1.2, 8.1.3, 8.1.4, y 8.1.5, las cuales se identifican en la tabla como A, B, C, D, y E. respectivamente.

En los métodos A, B y C se obtiene el parámetro del cono haciendo uso de la Ecuación (41), en la cual se parte del esfuerzo vertical, la resistencia en la punta registrada con el cono propuesto y la resistencia al corte no drenada, esta última, obtenida por los ensayos de compresión inconfiada, triaxial UU, y veleta de campo.

En el método D, se obtiene el parámetro ( $N_{kt}$ ) del cono a partir de la relación de fricción “ $Fr$ ”, aplicando las Ecuaciones (42) y (43).

En el método E, se obtiene el parámetro del cono a partir del límite líquido, aplicando la Ecuación (44).

A partir de los parámetros del cono obtenidos por los métodos A, B,C,D y E (ver la Tabla 8-18 y la Figura 8- 15), se puede decir que:

- El menor parámetro del cono se obtiene a partir de la resistencia al corte no drenada por medio del ensayo triaxial UU, el cual corresponde a 7,27.
- Los parámetros del cono obtenidos a partir de la resistencia al corte no drenada, mediante el ensayo de compresión inconfiada y el ensayo de veleta de campo se encuentran en un rango cercano, correspondiendo a 13,56 y 12,18 respectivamente, con una diferencia de 1,38.
- El parámetro del cono obtenido por el método E, el cual parte del límite líquido, se aleja de los obtenidos por los métodos A, B, C, y D, dado que el “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” obtenido por los métodos A, B, C, y D, se encuentra en un rango de 7.27 a 13.56, y el  $N_{kt}$  obtenido por el método E es de 23.31; dicho comportamiento se debe muy probablemente a que la Ecuación (44) fue desarrollada por Larsson y Mulabdic (1991) para arcillas blandas de Suecia, y no ha sido correlacionada para las arcillas blandas de Bogotá, por tal razón se descarta y no se tiene en cuenta en el presente análisis.
- El método D, el cual determina el parámetro del cono a partir de la relación de fricción “Fr”, presenta la menor desviación estándar siendo esta de 0.64.

La diferencia entre el  $N_{kt \text{ promedio}}$  y el  $N_{kt}$  obtenido por cada método se indica en la Tabla 8-20 siendo la menor diferencia de 0.73, obtenida mediante el método C, en el cual se determina el parámetro del cono a partir de la resistencia al corte no drenada mediante el ensayo de corte con veleta de campo.

Tabla 8-18. Resumen del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” obtenido por diferentes métodos en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Método para obtener $N_{kt}$	A	B	C	D	E
$N_{kt}$ promedio	13,56	7,27	12,18	12,79	23,31
Máximo	15,94	9,39	13,45	13,60	25,89
Mínimo	8,24	4,65	10,13	11,97	19,21
Desviación estándar	3,36	1,89	1,46	0,64	2,26

Parámetro del cono obtenido a partir de:

(A): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfina en el sondeo S1

(B): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en el sondeo S2

(C): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en el sondeo S2

(D): La relación de fricción (Fr)

(E): Límite líquido de los sondeos S1 y S2

Fuente: propia.

En la Tabla 8-19 se indican los datos estadísticos para el parámetro del cono promedio obtenido por los métodos A, B, C y D, en la cual se indica la media, la mediana, la desviación estándar, y el rango. Como parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$  promedio” se tiene 11.45 con una desviación estándar de 2.85.

Tabla 8-19. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$  promedio” para los métodos A, B, C y D, en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Descripción	Magnitud
Media	11,45
Error típico	1,42
Mediana	12,49
Desviación estándar	2,85
Varianza de la muestra	8,10
Curtosis	3,26
Coefficiente de asimetría	-1,76
Rango	6,30
Mínimo	7,27
Máximo	13,56
Suma	45,80
Cuenta	4,00

Fuente: propia.

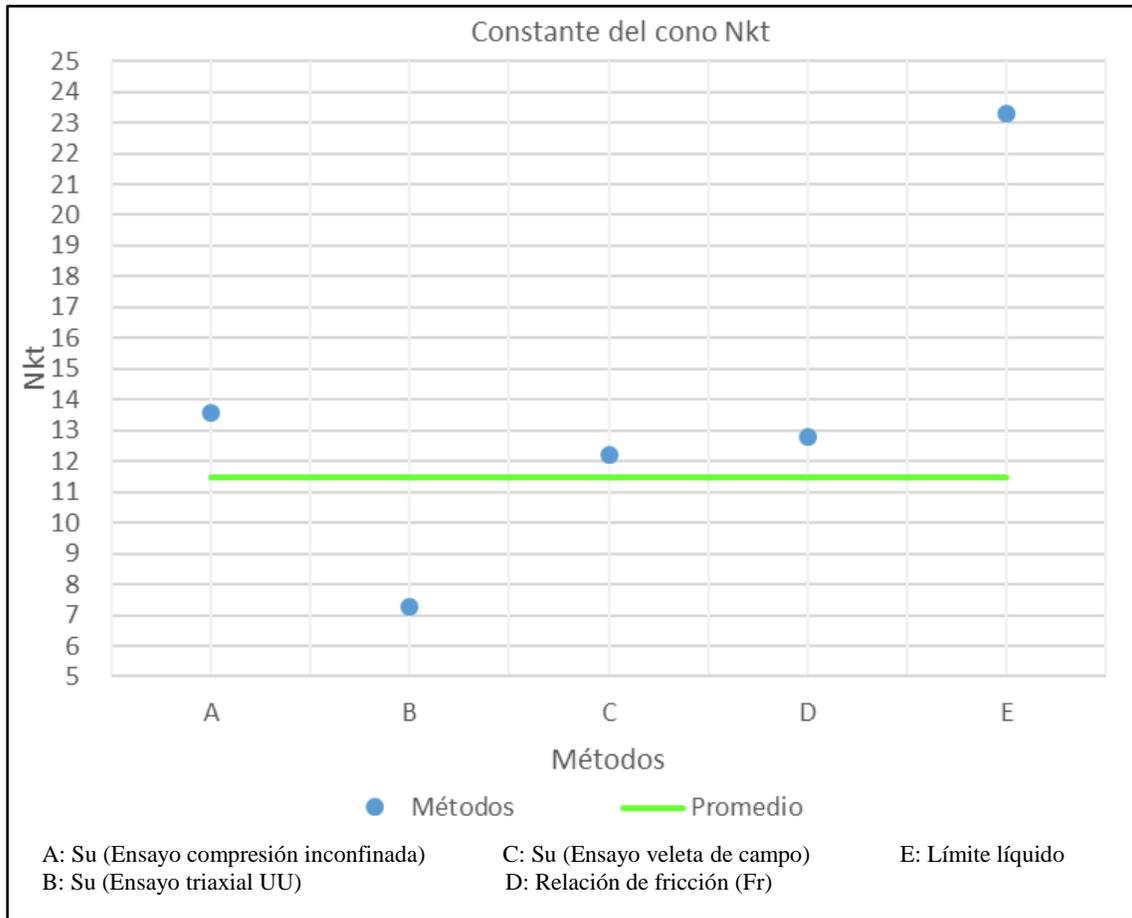


Figura 8- 15. Parámetro del cono “N<sub>kt</sub>” obtenido por los métodos A, B, C, D y E, en el Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

Tabla 8-20. Diferencia entre el N<sub>kt promedio</sub> con respecto al N<sub>kt</sub> determinado por cada método en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Método	A	B	C	D	E
Diferencia	2,11	4,18	0,73	1,34	11,86

Fuente: propia.

### 8.1.7. Ecuación de correlación del parámetro del cono “Nkt” a partir del Límite Líquido en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

De la Figura 8-16 a la Figura 8-19 se grafican los parámetros del cono “Nkt” determinados con el cono propuesto, versus los límites líquidos promedio obtenidos en el del Sitio de Investigación 1 (ECI).

Los parámetros del cono “Nkt” de la Figura 8-16, la Figura 8-17 y la Figura 8-18, corresponde a los determinados a partir de la resistencia al corte no drenada hallada mediante los ensayos de compresión inconfiada, los ensayos triaxial UU y los ensayos de veleta de campo, respectivamente.

Los parámetros del cono “Nkt” de la Figura 8-19, corresponden a los determinados a partir de la relación de fricción “Fr”.

De la Figura 8-16 a la Figura 8-19, también se encuentran graficados los parámetros del cono Nkt determinados con la Ecuación 45 desarrollada por Larsson y Mulabdic (1991), la cual fue correlacionada para los límites líquidos de arcillas blandas de Suecia.

$$N_{kt} = 13.4 + 6.65LL \quad (45)$$

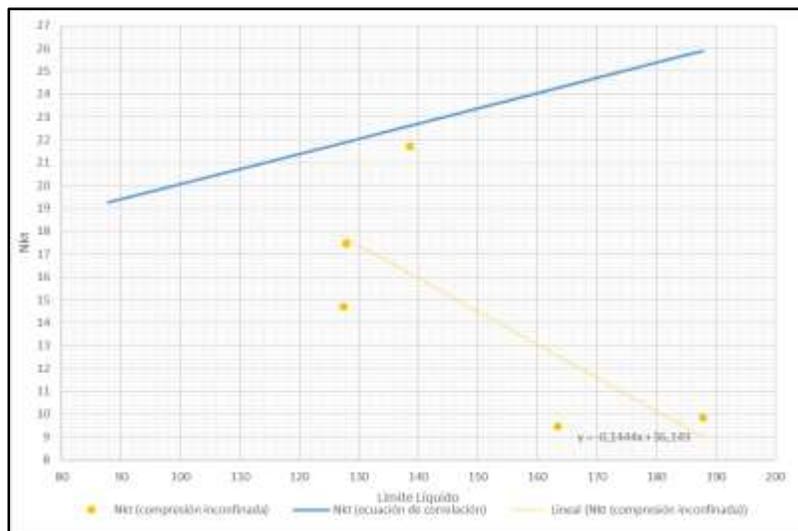


Figura 8-16. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo de compresión inconfiada vs el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

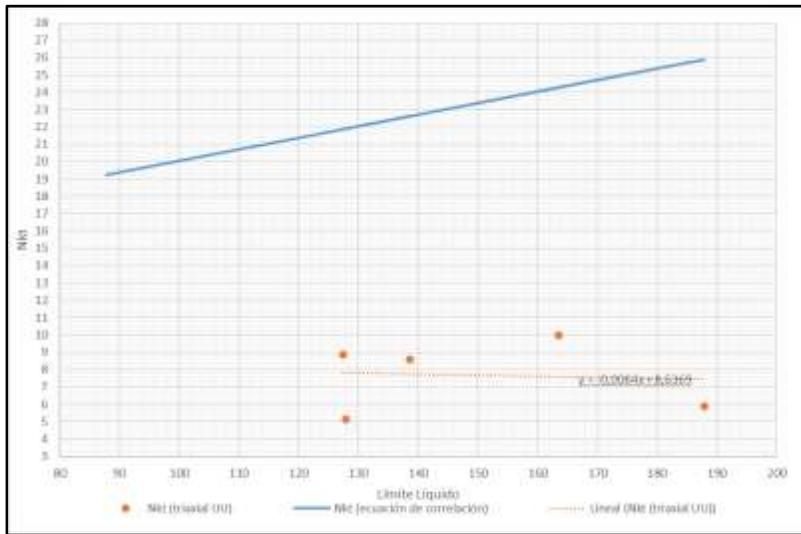


Figura 8-17. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo triaxial UU vs el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

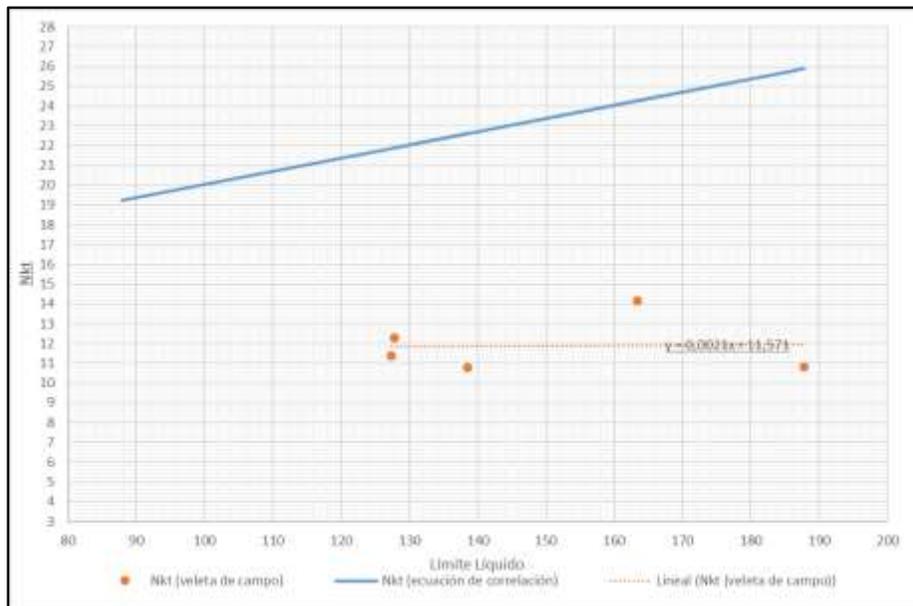


Figura 8-18. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo de veleta de campo vs el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

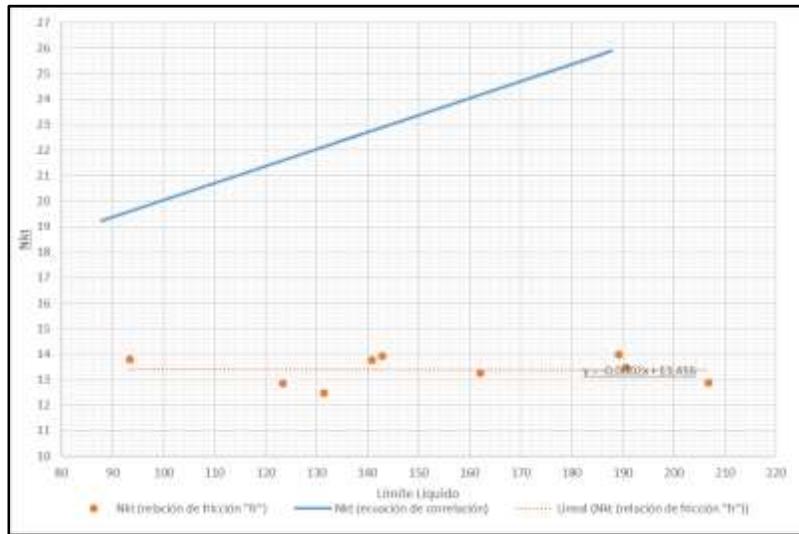


Figura 8-19. Parámetro del cono Nkt determinado a partir de la relación de fricción “Fr” vs el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

En la Tabla 8-21 se indican las ecuaciones de correlación obtenidas de la Figura 8-16 a la Figura 8-19, en el cual el límite líquido se ingresa en tanto por uno.

Las ecuaciones de correlación del parámetro del cono “Nkt” obtenidas mediante el cono propuesto y el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU y la relación de fricción, presentan una pendiente negativa, contrario a la ecuación obtenida mediante el ensayo de veleta de campo, la cual presenta una pendiente positiva.

Tabla 8-21. Ecuaciones de correlación entre el parámetro del cono Nkt y el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI).

N	Descripción	Ecuación	R <sup>2</sup>	r
1	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo de compresión inconfiada	Nkt = 36.149-14.4LL	0.53	-0.72
2	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo triaxial UU	Nkt = 8.6369-0.64LL	0.006	-0.080
3	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo de veleta de campo	Nkt = 11.571+0.21LL	0.001	0.039
4	Nkt obtenido a partir de la relación de fricción	Nkt = 13.461-0.02LL	0.0002	0.014

Fuente: propia.

A partir de las ecuaciones de correlación que presentaron el mismo comportamiento con pendiente negativa, se determina una ecuación de correlación promedio, la cual se indica a continuación.

$$N_{kt} = 19.42 - 5.02LL \quad (46)$$

El coeficiente de determinación promedio “ $R^2$ ” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “ $r$ ”, obtenidos para las ecuaciones de correlación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” determinadas con el cono propuesto y el ensayo de compresión inconfínada, el ensayo triaxial UU, y la relación de fricción “ $F_r$ ”, presentan magnitudes de 0.17 y 0.27 respectivamente, indicando que la dependencia lineal entre el Límite Líquido y el “ $N_{kt}$ ” es baja (ver la Tabla 8-21).

Con la ecuación de correlación determinada anteriormente, se calcula el  $N_{kt}$  a partir de los límites líquidos del Sitio de Investigación 1 (ECI), los cuales se indican en la Tabla 8-22 y la Figura 8-20.

Tabla 8-22.  $N_{kt}$  obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del límite líquido y el cono propuesto del Sitio de Investigación 1 (ECI).

Profundidad, m	LL	$N_{kt}$
1,45	87,85	15,010
2,90	127,37	13,026
4,00	163,44	11,215
6,00	185,76	10,095
8,10	187,82	9,991
10,50	183,93	10,187
12,25	127,85	13,002
13,25	138,91	12,447
15,00	138,58	12,463

Fuente: propia.

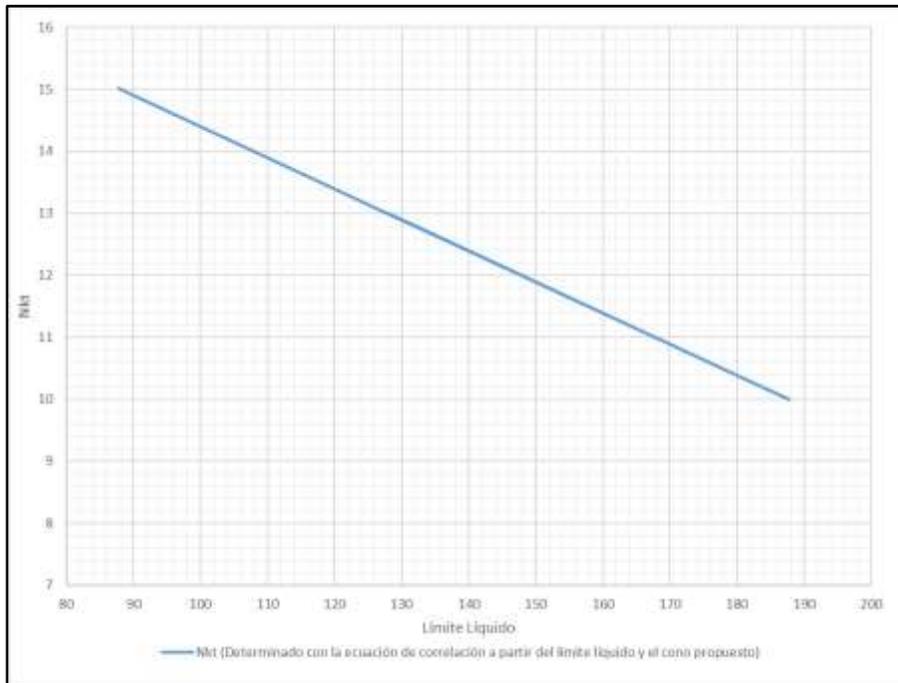


Figura 8-20. Límite Líquido vs Nkt obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del límite líquido y el cono propuesto del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

### 8.1.8. Ecuación de correlación del parámetro del cono “Nkt” a partir del Índice de Plasticidad en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

De la Figura 8-22 a la Figura 8-25 se grafican los parámetros del cono “Nkt” determinados con el cono propuesto, versus los Índices de Plasticidad promedio obtenidos en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Los parámetros del cono “Nkt” de la Figura 8-22, la Figura 8-23 y la Figura 8-24, corresponde a los determinados a partir de la resistencia al corte no drenada hallada mediante los ensayos de compresión inconfiada, los ensayos triaxial UU y los ensayos de veleta de campo, respectivamente.

Los parámetros del cono “Nkt” de la Figura 8-25, corresponde a los determinados a partir de la relación de fricción “Fr”.

De la Figura 8-22 a la Figura 8-25, también se encuentran graficados los parámetros del cono Nkt determinados con la Ecuación 47 desarrollada por Lunne & Eide (1976) (ver la Figura 8-21).

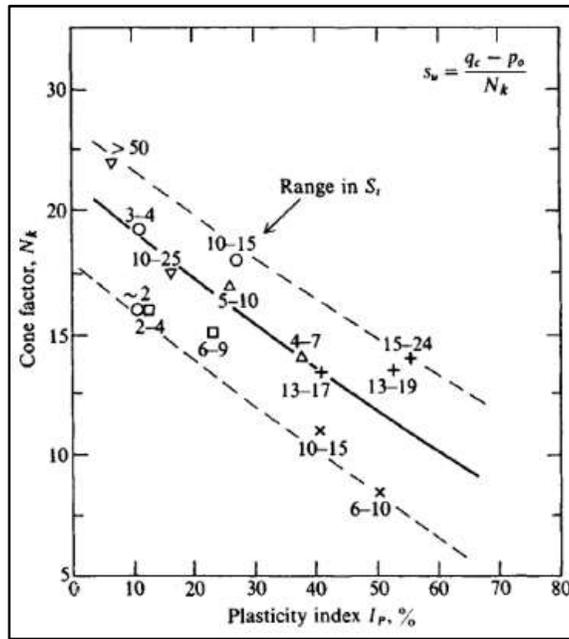


Figura 8-21. Parámetro del cono  $N_{kt}$  versus el Índice de Plasticidad. Fuente: Lunne & Eide (1976).

$$N_{kt} = 20.91 - 17.93IP \quad (47)$$

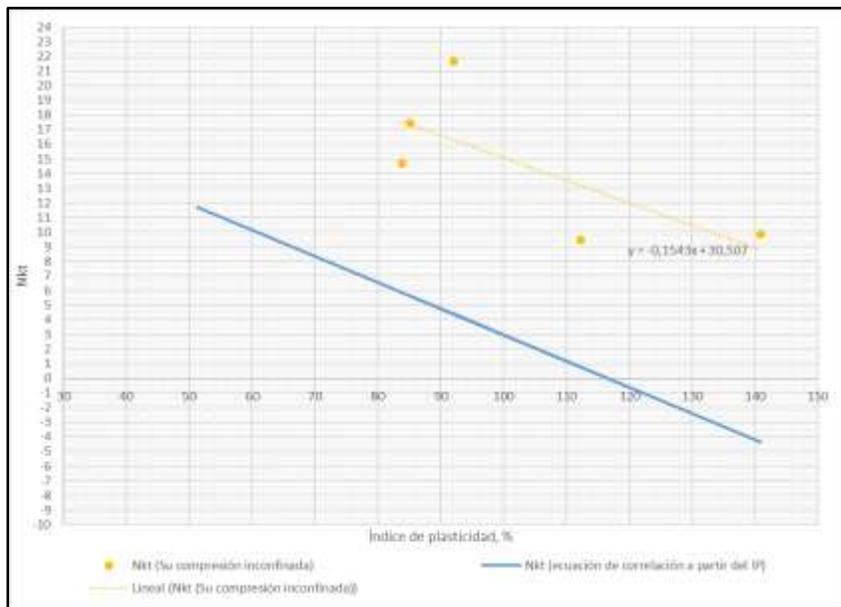


Figura 8-22. Parámetro del cono  $N_{kt}$  determinado a partir del  $S_u$  del ensayo de compresión inconfiada versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

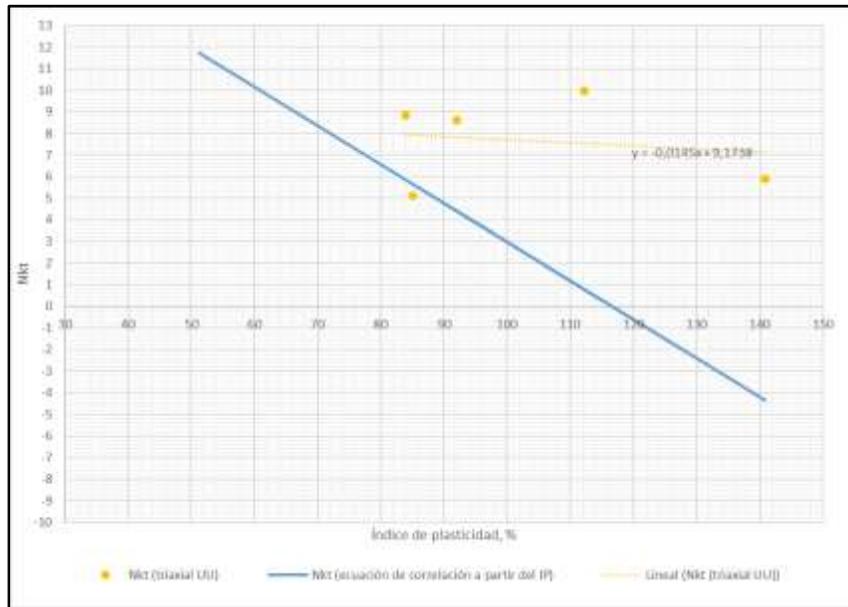


Figura 8-23. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo triaxial UU versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

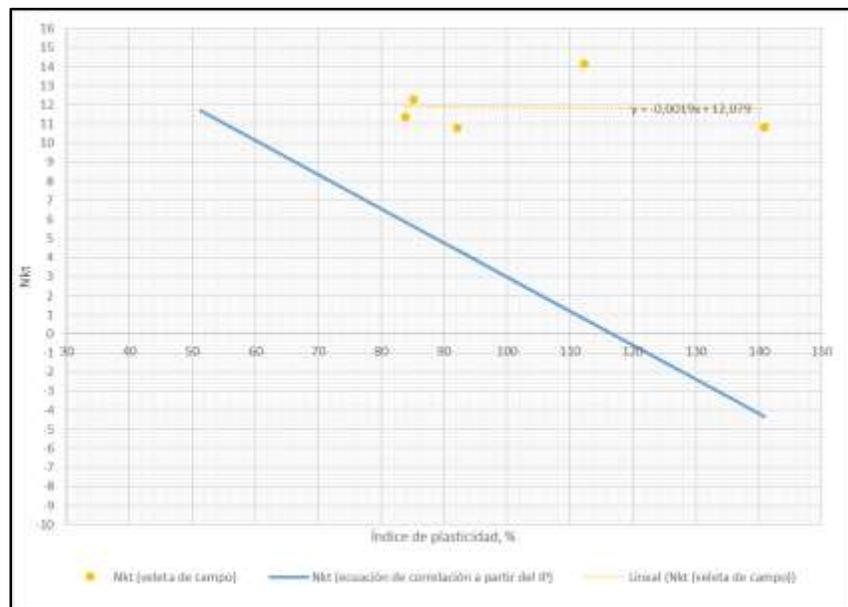


Figura 8-24. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo de veleta de campo versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

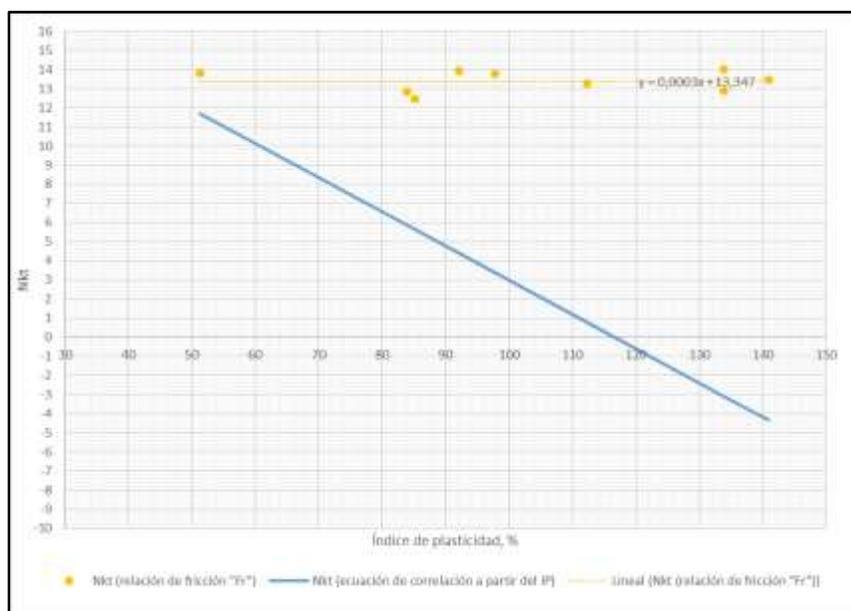


Figura 8-25. Parámetro del cono Nkt determinado a partir de la relación de fricción “Fr” versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

En la Tabla 8-23 se indican las ecuaciones de correlación obtenidas de la Figura 8-22 a la Figura 8-25, en el cual el Índice de Plasticidad se ingresa en tanto por uno.

Las ecuaciones de correlación del parámetro del cono “Nkt” obtenidas mediante el cono propuesto y el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU y el ensayo de veleta de campo, presentan una pendiente negativa, contrario a la ecuación obtenida mediante la relación de fricción “Fr”, la cual presenta una pendiente positiva.

Tabla 8-23. Ecuaciones de correlación entre el parámetro del cono Nkt y el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI).

N	Descripción	Ecuación	R <sup>2</sup>	r
1	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo de compresión inconfiada	$Nkt = 30.50 - 15.43IP$	0.514	-0.717
2	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo triaxial UU	$Nkt = 9.17 - 1.45IP$	0.028	-0.017
3	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo de veleta de campo	$Nkt = 12.07 - 0.19 IP$	0.001	-0.031
4	Nkt obtenido a partir de la relación de fricción	$Nkt = 13.34 + 0.03IP$	0.0003	-0.015

Fuente: propia.

A partir de las ecuaciones de correlación que presentan el mismo comportamiento con la pendiente negativa, se determina una ecuación de correlación promedio, la cual se indica a continuación.

$$N_{kt} = 17.25 - 5.69IP \quad (48)$$

El coeficiente de determinación promedio “R<sup>2</sup>” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para las ecuaciones de correlación del parámetro del cono “Nkt” determinadas con el cono propuesto y el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU y el ensayo de veleta de campo, presentan magnitudes de 0.18 y 0.25 respectivamente, indicando que la dependencia lineal entre el Índice de Plasticidad y el “Nkt” es baja (ver la Tabla 8-23).

Con la ecuación de correlación determinada anteriormente, se calcula el parámetro del cono Nkt a partir de los Índices de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI), los cuales se indican en la Tabla 8-24 y Figura 8-26.

Tabla 8-24. Parámetro del cono “Nkt” obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del Índice de Plasticidad y el cono propuesto del Sitio de Investigación 1 (ECI).

Profundidad, m	LL	Nkt
1,45	51,31	14,33
2,90	83,90	12,48
4,00	112,29	10,86
6,00	133,90	9,63
8,10	140,87	9,23
10,50	133,90	9,63
12,25	85,17	12,40
13,25	97,85	11,68
15,00	92,08	12,01

Fuente: propia.

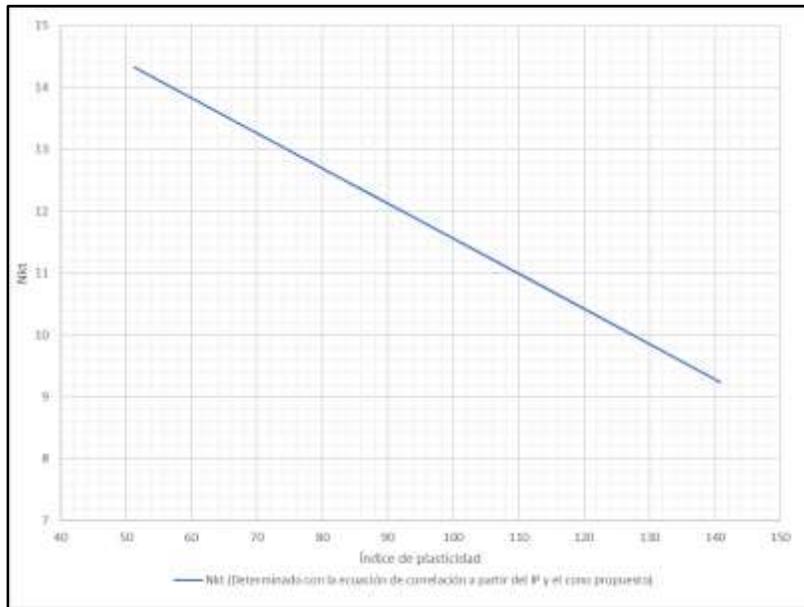


Figura 8-26. Índice de Plasticidad versus parámetro del cono “Nkt” obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del Índice de Plasticidad y el cono propuesto del Sitio de Investigación 1 (ECI). Fuente: propia.

## 8.2. Determinación Nkt en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)

En la Tabla 8-25 se presentan las presiones en la punta y la fricciones en el fuste de las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, realizadas con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón), a las profundidades en las cuales se determinó la resistencia al corte no drenada mediante los ensayos de compresión inconfiada, triaxial no consolidado no drenado (UU), y corte con veleta de campo.

Tabla 8-25. Esfuerzo en la punta y en el fuste con el cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Profundidad, m	CPTp1		CPTp2		CPTp3	
	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa
2	544,03	5,22	473,68	1,86	424,48	9,20
2,5	480,12	5,32	489,31	1,32	450,69	9,66
5	292,07	4,91	283,33	10,10	387,70	9,12
5,5	306,78	5,30	292,07	5,86	361,95	8,78
8	297,12	8,55	370,23	3,02	347,24	1,50
8,5	297,12	2,22	287,47	4,75	336,67	1,96
11	351,38	4,70	292,07	2,20	350,00	0,57
11,5	366,09	4,75	332,53	0,44	325,63	1,50
14	406,09	8,81	365,17	5,32	398,28	4,37
14,5	410,69	8,27	391,84	5,11	348,62	6,54

Fuente: propia.

En la Figura 8-27 y en la Figura 8-28 se observa la presión en la punta y la fricción en el fuste registrados con el cono propuesto a las profundidades que se determina el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”.

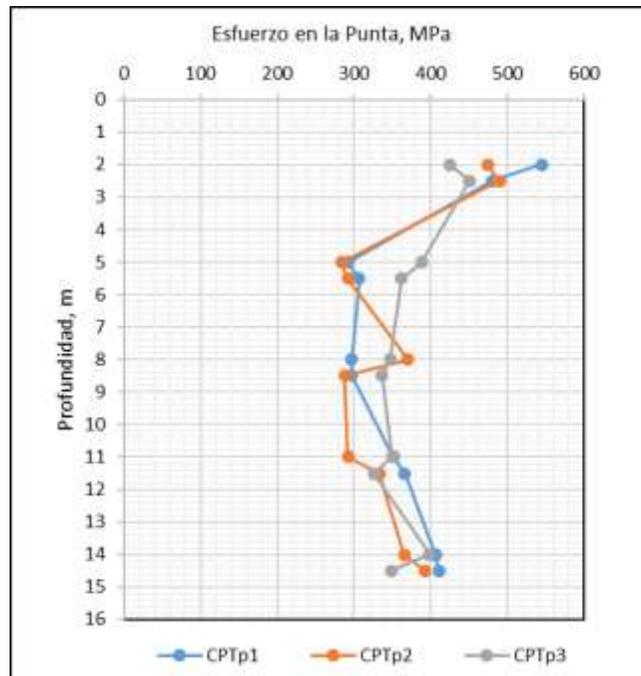


Figura 8-27. Esfuerzo en la punta con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Fuente: propia.

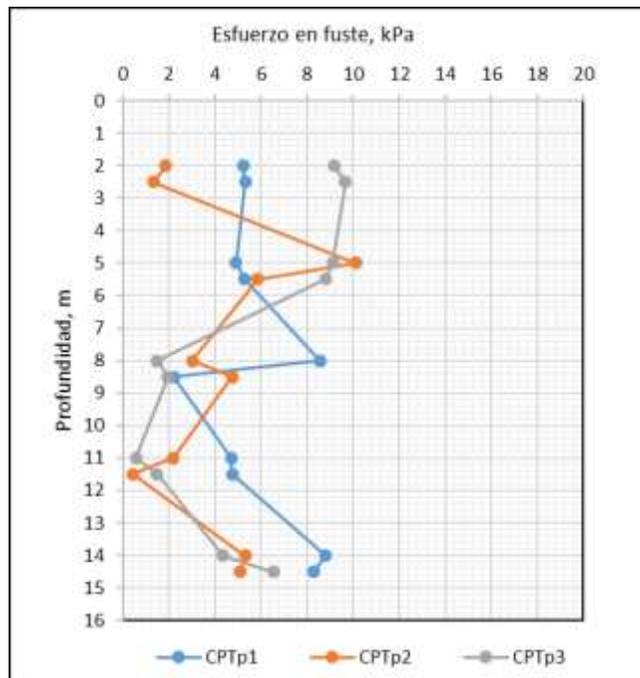


Figura 8-28. Esfuerzo en el fuste con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Fuente: propia.

Para determinar el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir de la resistencia al corte no drenada, la relación de fricción “Fr”, y el límite líquido, se estableció el formato indicado en la Figura 8-29, el cual se puede consultar en el Anexo 6.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - ÉNFASIS EN GEOTECNIA PENETRACIÓN ESTÁTICA DE CONO						ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO			
PROYECTO:		Maestría en ingeniería civil - Énfasis en Geotecnia							
UBICACIÓN:		Carrera 104 A Bis No 23D-12							
DESCRIPCIÓN:		Sitio de Investigación 2 (Fontibón)							
1. ESFUERZO EN LA PUNTA Y EN EL FUSTE CON EL CONO PROPUESTO									
Profundidad, m	CPTp1		CPTp2		CPTp3				
	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa	Esfuerzo en la punta, kPa	Esfuerzo en el fuste, kPa			
2	544,03	5,22	473,68	1,86	424,48	9,20			
2,5	480,12	5,32	489,31	1,32	450,69	9,66			
5	292,07	4,91	283,33	10,10	387,70	9,12			
5,5	306,78	5,30	292,07	5,86	361,95	8,78			
8	297,12	8,55	370,23	3,02	347,24	1,50			
8,5	297,12	2,22	287,47	4,75	336,67	1,96			
11	351,38	4,70	292,07	2,20	350,00	0,57			
11,5	366,09	4,75	332,53	0,44	325,63	1,50			
14	406,09	8,81	365,17	5,32	398,28	4,37			
14,5	410,69	8,27	391,84	5,11	348,62	6,54			
2. PARÁMETRO DEL CONO A PARTIR DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA OBTENIDA MEDIANTE EL ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA EN EL SONDEO S1									
SONDEO:	S1	NF, m	1,5	Determinación de N <sub>kt</sub> a partir del cono propuesto					
Profundidad, m	Cu, kPa	Peso unitario, kN/m <sup>3</sup>	Esfuerzo vertical total, kPa	Esfuerzo vertical efectivo, kPa	Profundidad, m	N <sub>kt</sub> (CPTp1)	N <sub>kt</sub> (CPTp2)	N <sub>kt</sub> (CPTp3)	N <sub>kt</sub> (promedio)
2,5	24,83	14,62	36,54	26,73	2,5	17,86	18,23	16,68	17,59
5,5	16,50	15,60	83,34	44,10	5,5	13,54	12,65	16,88	14,36
8,5	14,30	13,05	122,49	53,82	8,5	12,21	11,54	14,98	12,91
11,5	13,90	13,24	162,22	64,12	11,5	14,67	12,25	11,76	12,89
14,5	12,43	12,25	198,98	71,45	14,5	17,03	15,52	12,04	14,86
$N_{kt} = \frac{q_c - \sigma_v}{S_u \text{ (compresión inconfínada)}}$					Promedio	15,06	14,04	14,47	14,52
					Máximo	17,86	18,23	16,88	17,59
					Mínimo	12,21	11,54	11,76	12,89
3. PARÁMETRO DEL CONO A PARTIR DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA OBTENIDA MEDIANTE EL ENSAYO TRIAXIAL UU EN EL SONDEO S2									
SONDEO:	S2	NF, m	1,5	Determinación de N <sub>kt</sub> a partir del cono propuesto					
Profundidad, m	Cu, kPa	Peso unitario, kN/m <sup>3</sup>	Esfuerzo vertical total, kPa	Esfuerzo vertical efectivo, kPa	Profundidad, m	N <sub>kt</sub> (CPTp1)	N <sub>kt</sub> (CPTp2)	N <sub>kt</sub> (CPTp3)	N <sub>kt</sub> (promedio)
2,5	48,64	13,93	34,83	25,02	2,5	9,15	9,34	8,55	9,02
5,5	29,32	14,40	78,03	38,79	5,5	7,80	7,30	9,68	8,26
8,5	37,57	13,53	118,61	49,94	8,5	4,75	4,49	5,80	5,02
11,5	38,48	13,45	158,94	60,84	11,5	5,38	4,51	4,33	4,74
14,5	30,51	13,74	200,16	72,63	14,5	6,90	6,28	4,87	6,02
$N_{kt} = \frac{q_c - \sigma_v}{S_u \text{ (triaxial UU)}}$					Promedio	6,80	6,39	6,65	6,61
					Máximo	9,15	9,34	9,68	9,02
					Mínimo	4,75	4,49	4,33	4,74
4. PARÁMETRO DEL CONO A PARTIR DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA OBTENIDA MEDIANTE EL ENSAYO TRIAXIAL UU EN EL SONDEO S3									
SONDEO:	S3	NF, m	1,5	Determinación de N <sub>kt</sub> a partir del cono propuesto					
Profundidad, m	Cu, kPa	Peso unitario, kN/m <sup>3</sup>	Esfuerzo vertical total, kPa	Esfuerzo vertical efectivo, kPa	Profundidad, m	N <sub>kt</sub> (CPTp1)	N <sub>kt</sub> (CPTp2)	N <sub>kt</sub> (CPTp3)	N <sub>kt</sub> (promedio)
2,5	61,24	14,91	37,27	37,27	2,5	7,23	7,38	6,75	7,12
5,5	42,23	13,83	78,75	49,32	5,5	5,40	5,05	6,71	5,72
8,5	33,05	13,34	118,76	59,90	8,5	5,40	5,10	6,59	5,70
11,5	28,74	12,86	157,34	69,05	11,5	7,26	6,10	5,86	6,40
14,5	35,02	12,95	196,17	78,45	14,5	6,13	5,59	4,35	5,36
$N_{kt} = \frac{q_c - \sigma_v}{S_u \text{ (triaxial UU)}}$					Promedio	6,28	5,84	6,05	6,06
					Máximo	7,26	7,38	6,75	7,12
					Mínimo	5,40	5,05	4,35	5,36

Figura 8-29. Formato de cálculo para el parámetro del cono “N<sub>kt</sub>”, para el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) Fuente: propia.

Del numeral 8.2.1 al 8.2.5. se explican y analizan los valores de “N<sub>kt</sub>” obtenidos por los métodos indicados en la Tabla 8-1.

### 8.2.1. $N_{kt}$ a partir del ensayo de compresión inconfínada.

En la Tabla 8-26 y en la Figura 8-30 se indica el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” que se determinó a partir de la presión en la punta del cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3 y la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfínada en el sondeo S1 en el Sitio de Investigación 2.

Tabla 8-26. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”, a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfínada en el sondeo S1, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Profundidad, m	$C_u$ , kPa	$\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	$\sigma_v$ , kPa	$N_{kt}$ (CPTp1)	$N_{kt}$ (CPTp2)	$N_{kt}$ (CPTp3)
2,5	24,83	14,62	36,54	17,86	18,23	16,68
5,5	16,50	15,60	83,34	13,54	12,65	16,88
8,5	14,30	13,05	122,49	12,21	11,54	14,98
11,5	13,90	13,24	162,22	14,67	12,25	11,76
14,5	12,43	12,25	198,98	17,03	15,52	12,04
	Promedio			15,06	14,04	14,47
	Máximo			17,86	18,23	16,88
	Mínimo			12,21	11,54	11,76

Fuente: propia.

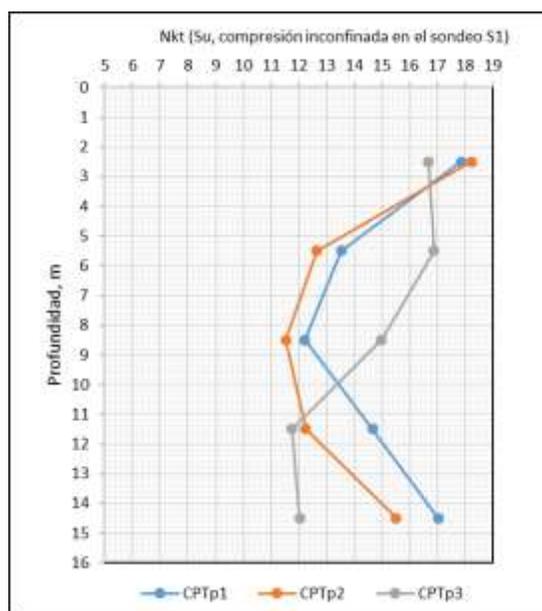


Figura 8-30. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad ( $S_u$ , obtenida del ensayo de compresión inconfínada en el sondeo S1 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio a partir de las  $N_{kt}$  obtenidas con las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, (ver la Tabla 8-27 y Figura 8-31), para luego hallar los parámetros estadísticos como son, la media, la mediana, la desviación estándar, la varianza (ver la Tabla 8-28), obteniendo un parámetro del cono promedio de 14,52 y desviación estándar de 1,93.

Tabla 8-27. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de compresión inconfiada en el sondeo S1 del Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).

Profundidad, m	$N_{kt}$ , promedio
2,5	17,59
5,5	14,36
8,5	12,91
11,5	12,89
14,5	14,86

Fuente: propia.

Tabla 8-28. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de compresión inconfiada en el sondeo S1 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).

Descripción	Magnitud
Media	14,52
Error típico	0,86
Mediana	14,36
Desviación estándar	1,93
Varianza de la muestra	3,71
Curtosis	1,34
Coefficiente de asimetría	1,19
Rango	4,70
Mínimo	12,89
Máximo	17,59
Suma	72,61
Cuenta	5,00

Fuente: propia.

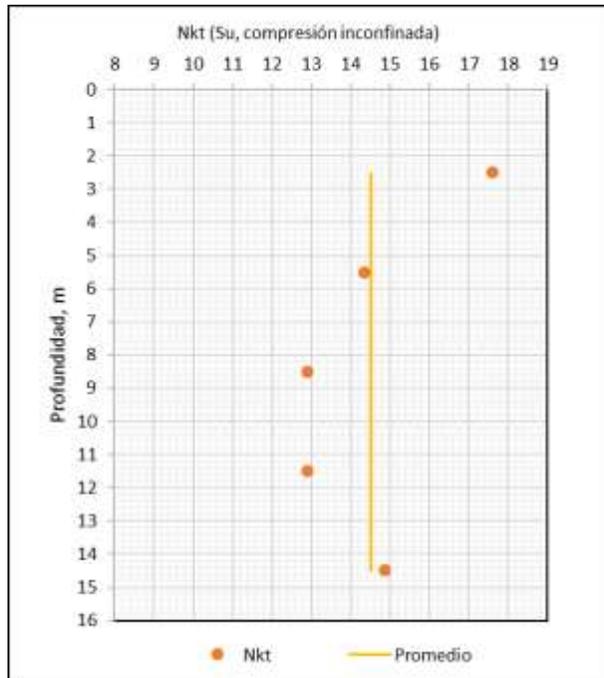


Figura 8-31. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad ( $S_u$  obtenida del ensayo de compresión inconfínada en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.

### 8.2.2. $N_{kt}$ a partir del ensayo triaxial UU.

En la Tabla 8-29 y en la Figura 8-32 se indica el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” que se determinó a partir de la presión en la punta del cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, junto con la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en los sondeo S2 y S3.

Tabla 8-29. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ”, a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial en los sondeos S2 y S3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Sondeo	Profundidad, m	$C_u$ , kPa	$\gamma$ , $\text{kN/m}^3$	$\sigma_v$ , kPa	Nkt (CPTp1)	Nkt (CPTp2)	Nkt (CPTp3)
S2	2,5	48,64	13,93	34,83	9,15	9,34	8,55
S2	5,5	29,32	14,40	78,03	7,80	7,30	9,68
S2	8,5	37,57	13,53	118,61	4,75	4,49	5,80
S2	11,5	38,48	13,45	158,94	5,38	4,51	4,33
S2	14,5	30,51	13,74	200,16	6,90	6,28	4,87
S3	2,5	61,24	14,91	37,27	7,23	7,38	6,75
S3	5,5	42,23	13,83	78,75	5,40	5,05	6,71
S3	8,5	33,05	13,34	118,76	5,40	5,10	6,59
S3	11,5	28,74	12,86	157,34	7,26	6,10	5,86
S3	14,5	35,02	12,95	196,17	6,13	5,59	4,35

Fuente: propia.

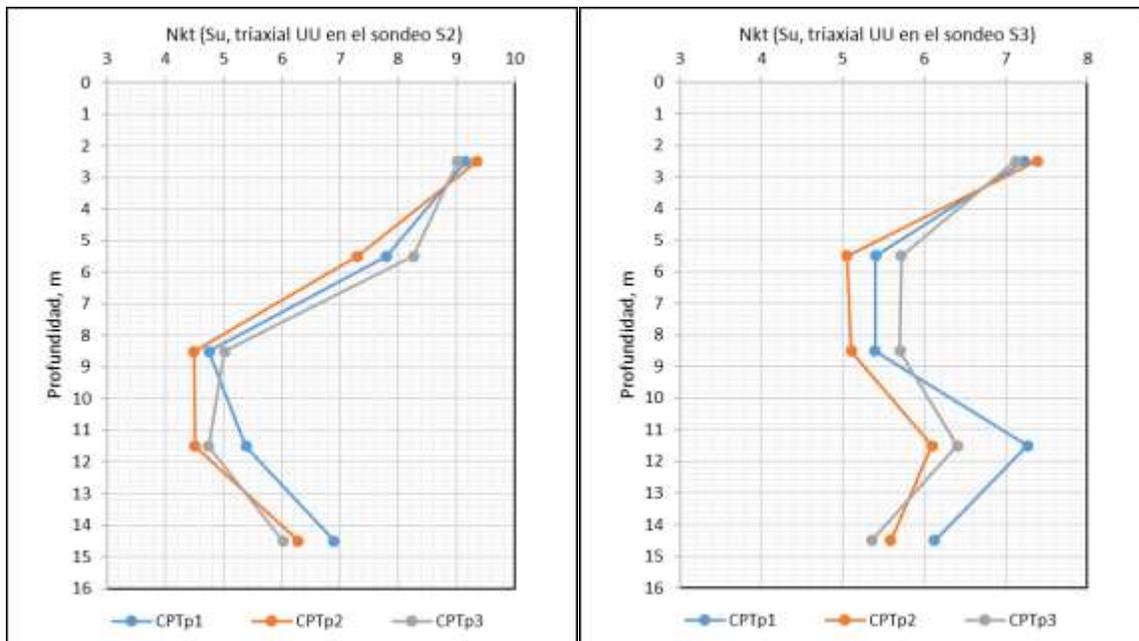


Figura 8-32. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo triaxial UU en los sondeos S2 y S3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” (ver la Tabla 8-30 y la Figura 8-33), para luego hallar sobre los datos promedio, los parámetros estadísticos como son, la media, la mediana, la

desviación estándar, la varianza (ver la Tabla 8- 31), obteniendo un parámetro del cono promedio de 6.41 y desviación estándar de 1,11.

Tabla 8-30. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt, promedio}$ ” (Su obtenida del ensayo triaxial UU en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).

Profundidad, m	$N_{kt, promedio}$
2,5	8,07
5,5	6,99
8,5	5,36
11,5	5,57
14,5	5,69

Fuente: propia.

Tabla 8- 31. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo triaxial UU en los sondeos S2 y S3).

Descripción	Magnitud
Media	6,34
Error típico	0,52
Mediana	5,69
Desviación estándar	1,16
Varianza de la muestra	1,35
Curtosis	-0,68
Coefficiente de asimetría	1,02
Rango	2,71
Mínimo	5,36
Máximo	8,07
Suma	31,68
Cuenta	5,00

Fuente: propia.

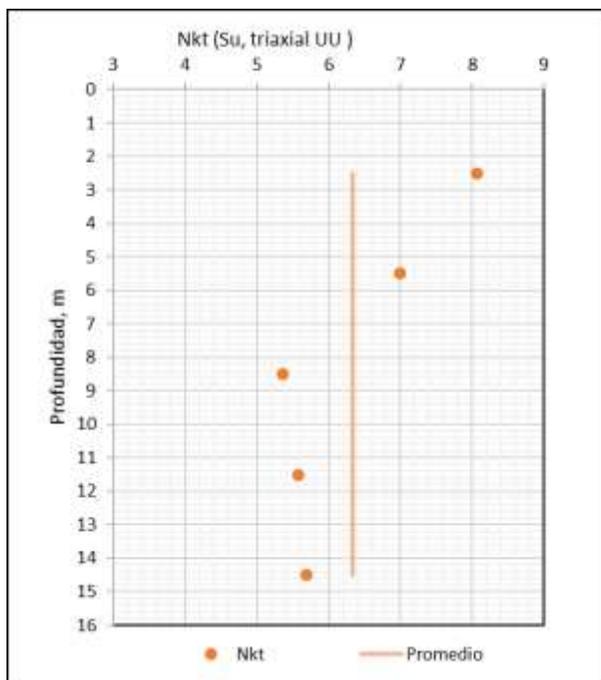


Figura 8-33. Variación del parámetro del cono promedio " $N_{kt \text{ promedio}}$ " en profundidad ( $S_u$  obtenida del ensayo triaxial UU en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.

### 8.2.3. $N_{kt}$ a partir del ensayo de corte con veleta de campo.

En la Tabla 8-32 y en la Figura 8-34, se indica el parámetro del cono " $N_{kt}$ " que se determinó a partir de la presión en la punta del cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, junto con la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en los sondeos S2 y S3.

Tabla 8-32. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Sondeo	Profundidad, m	$C_u$ , kPa	$\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	$\sigma_v$ , kPa	$N_{kt}$ (CPTp1)	$N_{kt}$ (CPTp2)	$N_{kt}$ (CPTp3)
S2	2	32,50	13,96	32,59	15,74	13,57	12,06
S2	5	21,40	14,17	74,83	10,15	9,74	14,62
S2	8	30,33	14,54	117,07	5,94	8,35	7,59
S2	11	21,51	13,96	159,31	8,93	6,17	8,87
S2	14	22,40	13,59	201,55	9,13	7,30	8,78
S3	2	36,18	14,91	29,82	14,21	12,27	10,91
S3	5	24,69	14,37	72,93	8,88	8,52	12,75
S3	8	25,54	13,58	113,67	7,18	10,05	9,15
S3	11	27,20	13,10	152,97	7,29	5,11	7,24
S3	14	20,37	12,90	191,67	10,53	8,52	10,14

Fuente: propia.

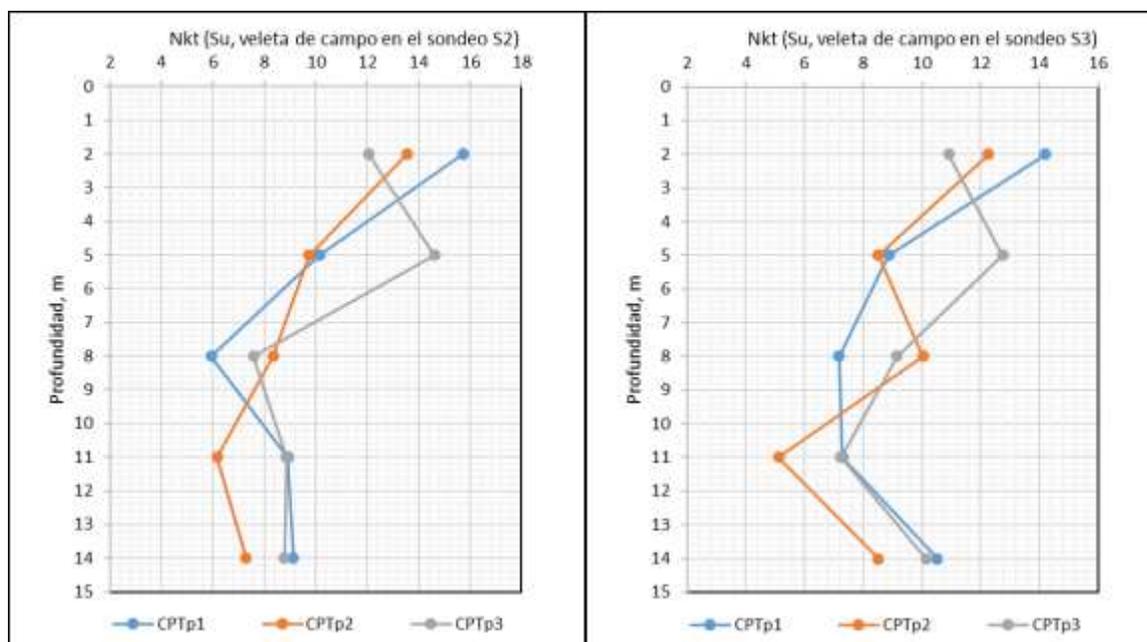


Figura 8-34. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad ( $S_u$  obtenida del ensayo de veleta de campo en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ”, a partir de los valores obtenidos con las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, (ver la Tabla 8-33 y la Figura 8-35), para luego hallar sobre los datos promedio, los parámetros estadísticos como son, la media, la mediana, la desviación

estándar, la varianza (ver la Tabla 8-34), obteniendo un parámetro del cono promedio de 9,66 y desviación estándar de 2,34.

Tabla 8-33. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de corte con veleta de campo en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).

Profundidad, m	$N_{kt}$ , promedio
2	13,13
5	10,78
8	8,04
11	7,27
14	9,07

Fuente: propia.

Tabla 8-34. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en los sondeos S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).

Descripción	Magnitud
Media	9,66
Error típico	1,05
Mediana	9,07
Desviación estándar	2,34
Varianza de la muestra	5,49
Curtosis	-0,28
Coefficiente de asimetría	0,82
Rango	5,86
Mínimo	7,27
Máximo	13,13
Suma	48,28
Cuenta	5,00

Fuente: propia.

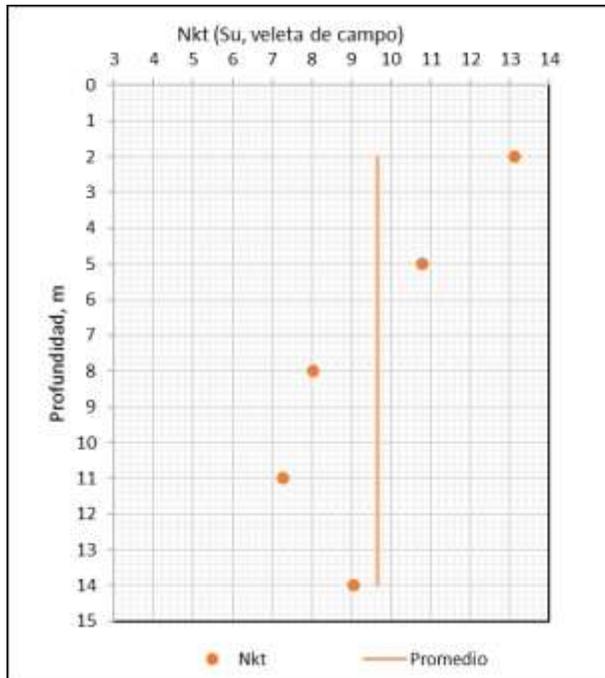


Figura 8-35. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Su obtenida del ensayo de veleta de campo en el Sitio de Investigación 2). Fuente: propia.

#### 8.2.4. $N_{kt}$ a partir de la relación de fricción “Fr”.

En la Tabla 8-35 y en la Figura 8-36 se indica el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” que se determinó a partir de la relación de fricción “Fr” obtenida mediante las ecuaciones 40 y 41, haciendo uso de la presión en la punta y la fricción en el fuste registradas con el cono propuesto para las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, junto con el esfuerzo vertical total.

Tabla 8-35. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Profundidad, m	$\sigma_v$ , kPa	Fr (CPTp1), %	Fr (CPTp2), %	Fr (CPTp3), %	Nkt (CPTp1)	Nkt (CPTp2)	Nkt (CPTp3)
2	32,59	1,02	0,42	2,35	10,56	7,87	13,09
2,5	34,83	1,19	0,29	2,32	11,04	6,74	13,06
5	74,83	2,26	4,84	2,91	12,98	15,30	13,75
5,5	78,03	2,31	2,74	3,09	13,05	13,56	13,93
8	117,07	4,75	1,19	0,65	15,24	11,04	9,19
8,5	118,61	1,24	2,81	0,90	11,16	13,65	10,18
11	159,31	2,45	1,65	0,30	13,22	12,03	6,82
11,5	158,94	2,29	0,25	0,90	13,02	6,32	10,18
14	201,55	4,31	3,25	2,22	14,94	14,09	12,92
14,5	200,16	3,93	2,67	4,40	14,66	13,48	15,01

Fuente: propia.

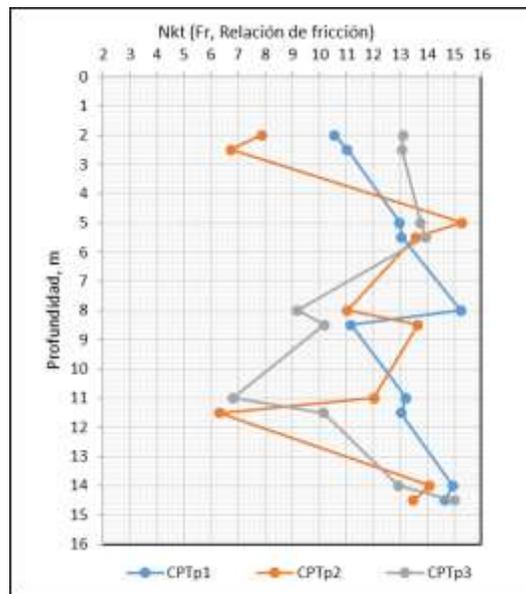


Figura 8-36. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” a partir de los valores obtenidos con las penetraciones CPTp1, CPTp2 y CPTp3, (ver la Tabla 8-36 y la Figura 8-37), para luego hallar sobre los datos promedio, los parámetros estadísticos como son, la media, la mediana, la desviación estándar, la varianza (ver la Tabla 8-37), obteniendo un parámetro del cono promedio de 12,07 y desviación estándar de 1,75.

Tabla 8-36. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).

Profundidad, m	$N_{kt, promedio}$
2	10,51
2,5	10,28
5	14,01
5,5	13,52
8	11,82
8,5	11,66
11	10,69
11,5	9,84
14	13,98
14,5	14,38

Fuente: propia.

Tabla 8-37. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).

Descripción	Magnitud
Media	12,07
Error típico	0,55
Mediana	11,74
Desviación estándar	1,75
Varianza de la muestra	3,07
Curtosis	-1,90
Coefficiente de asimetría	0,16
Rango	4,54
Mínimo	9,84
Máximo	14,38
Suma	120,70
Cuenta	10,00

Fuente: propia.

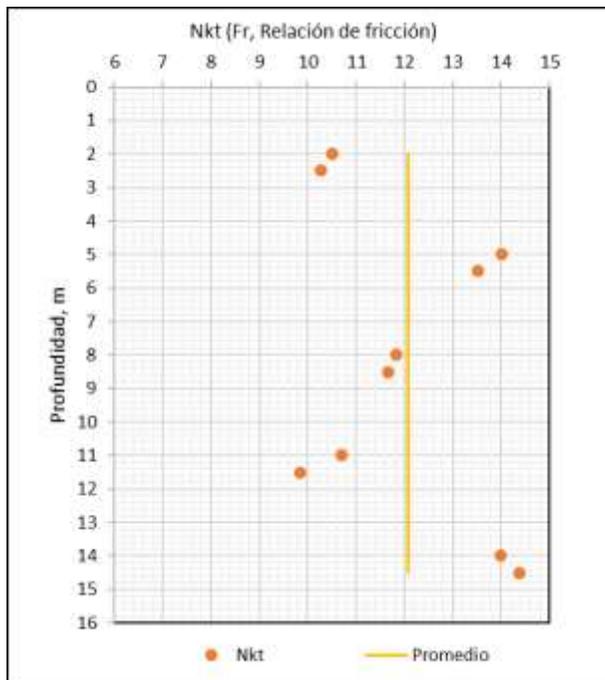


Figura 8-37. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$  promedio” en profundidad (Obtenido a partir de la relación de fricción “Fr” en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.

### 8.2.5. $N_{kt}$ a partir del ensayo de límite líquido.

En la Tabla 8-38 y en la Figura 8-38 se indica el parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” que se determinó a partir del límite líquido haciendo uso de la Ecuación 42, desarrollada por Larsson y Mulabdic (1991), la cual se realizó para arcillas blandas de Suecia.

Tabla 8-38. Determinación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” a partir del límite líquido en el sondeo S1, S2 y S3 en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Sondeo S1			Sondeo S2			Sondeo S3		
Profundidad, m	LL, %	N <sub>kt</sub>	Profundidad, m	LL, %	N <sub>kt</sub>	Profundidad, m	LL, %	N <sub>kt</sub>
2,00	119,95	21,38	2,00	153,09	23,58	2,00	149,12	23,32
4,00	160,52	24,07	2,80	123,12	21,59	3,90	115,20	21,06
5,00	171,17	24,78	4,50	176,18	25,12	4,50	167,74	24,55
6,00	213,69	27,61	7,00	194,49	26,33	7,00	222,03	28,17
7,00	217,63	27,87	9,50	204,00	26,97	9,50	223,81	28,28
9,50	205,40	27,06	11,00	190,74	26,08	10,00	185,00	25,70
12,00	210,36	27,39	12,00	192,55	26,20	12,00	201,35	26,79
14,00	190,10	26,04	13,50	182,35	25,53	14,00	190,36	26,06
15,00	204,32	26,99	15,00	191,24	26,12	15,00	214,53	27,67
Promedio		25,91	Promedio		25,28	Promedio		25,73
Máximo		27,87	Máximo		26,97	Máximo		28,28
Mínimo		21,38	Mínimo		21,59	Mínimo		21,06

Fuente: propia.

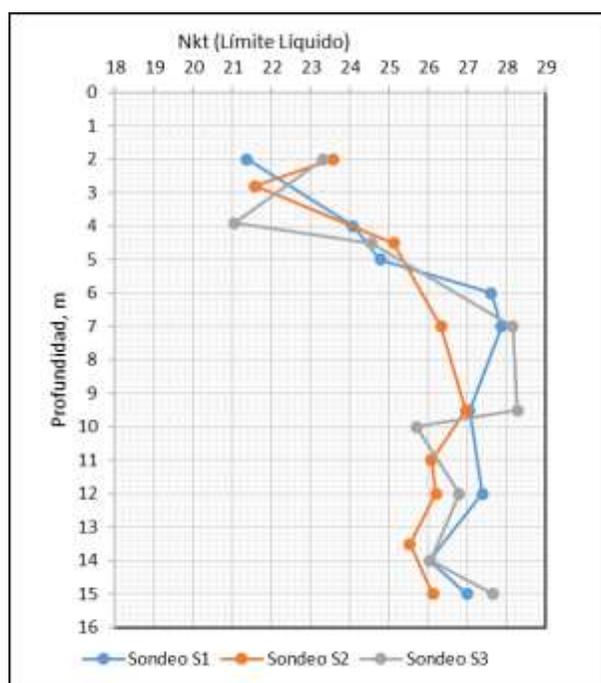


Figura 8-38. Variación del parámetro del cono “ $N_{kt}$ ” en profundidad (Obtenido a partir del límite líquido de los sondeos S1, S2 y S3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.

Se determina el parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” a partir de los valores obtenidos en los sondeos S1, S2 y S3 (ver la Tabla 8-39 y Figura 8-39), para luego hallar sobre los datos promedio, la media, la mediana, la desviación estándar y la varianza (ver la Tabla 8-40), obteniendo un parámetro del cono promedio de 25,64 y una desviación estándar de 1,98.

Tabla 8-39. Parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” (Obtenido a partir del límite líquido en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).

Profundidad promedio, m	$N_{kt, \text{ promedio}}$
2,0	22,76
3,6	22,24
4,7	24,82
6,7	27,37
8,7	27,71
10,2	26,28
12,0	26,79
13,8	25,88
15,0	26,92

Fuente: propia.

Tabla 8-40. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio “ $N_{kt}$ ” (Obtenido a partir del límite líquido en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)).

Descripción	Magnitud
Media	25,64
Error típico	0,66
Mediana	26,28
Desviación estándar	1,98
Varianza de la muestra	3,91
Curtosis	-0,45
Coefficiente de asimetría	-0,96
Rango	5,47
Mínimo	22,24
Máximo	27,71
Suma	230,77
Cuenta	9,00

Fuente: propia.

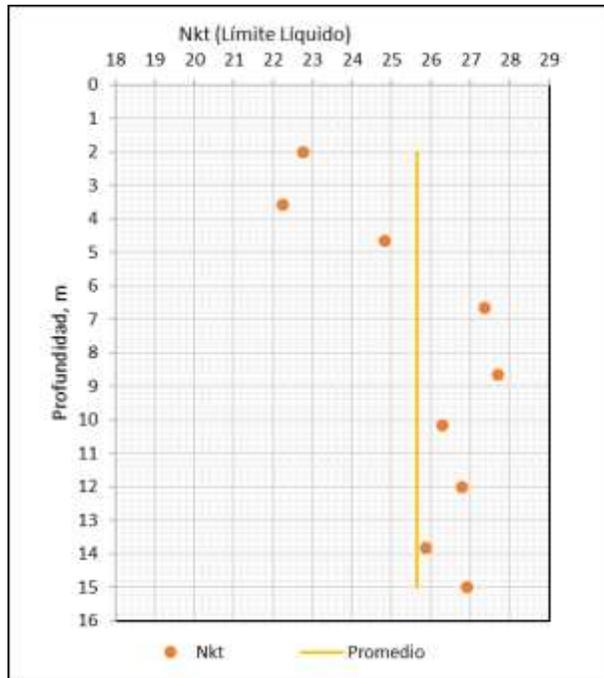


Figura 8-39. Variación del parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” en profundidad (Obtenido a partir del límite líquido de los sondeos S1, S2 y S3, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)). Fuente: propia.

### 8.2.6. Comparación y análisis de los parámetros del cono “ $N_{kt}$ ” obtenidos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

En la Tabla 8-41 se resume los parámetros de cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” obtenidos mediante las cinco metodologías desarrolladas en los numerales 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3, 8.2.4, y 8.2.5, las cuales se identifican en la tabla como A, B, C, D y E.

En los métodos A, B y C se obtiene el parámetro del cono haciendo uso de la Ecuación 38, la cual parte del esfuerzo vertical total, la presión en la punta registrada con el cono propuesto, y la resistencia al corte no drenada, esta última, obtenida por los ensayos de compresión inconfiada, triaxial UU, y veleta de campo.

En el método D se obtiene el parámetro del cono a partir de la relación de fricción “Fr”, aplicando las ecuaciones 40 y 41.

En el método E se obtiene el parámetro del cono a partir del límite líquido, aplicando la Ecuación 42.

A partir de los parámetros del cono obtenidos por los métodos A, B, C, D y E (ver la Tabla 8-41 y la Figura 8-41), se puede decir que:

- El menor parámetro del cono se obtiene a partir de la resistencia al corte no drenada por medio del ensayo triaxial UU, la cual corresponde a 6.41.
- El parámetro del cono obtenido por el método E, la cual parte del límite líquido, se aleja de las obtenidas por los métodos A, B, C, y D, dado que el " $N_{kt \text{ promedio}}$ " obtenido por los métodos A, B, C, y D, se encuentra en un rango de 6.41 a 14.52, y el  $N_{kt}$  obtenido por el método E es de 25.41; dicho comportamiento se debe muy probablemente a que la Ecuación 42 fue desarrollada por Larsson y Mulabdic (1991) para arcillas blandas de Suecia, y no ha sido correlacionada para las arcillas blandas de Bogotá, por tal razón se descarta y no se tiene en cuenta para determinar el  $N_{kt \text{ promedio}}$ .
- El método B, el cual determina el parámetro del cono a partir de la resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU, presenta la menor desviación estándar siendo ésta de 1,11.
- El método D, el cual determina el parámetro del cono a partir de la relación de fricción " $Fr$ ", presenta una desviación estándar baja siendo ésta de 1.75.
- La diferencia entre el  $N_{kt \text{ promedio}}$  y el  $N_{kt}$  obtenido por cada método se indica en la Tabla 8-43, siendo la menor diferencia obtenida mediante el método C, en el cual se determina el parámetro del cono a partir de la resistencia al corte no drenada mediante el ensayo de corte con veleta de campo.

Tabla 8-41. Resumen del parámetro del cono obtenido por diferentes métodos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Método para obtener $N_{kt}$	A	B	C	D	E
$N_{kt}$ promedio	14,52	6,41	9,66	12,07	25,64
Máximo	17,59	8,07	13,13	14,38	27,71
Mínimo	12,89	5,36	7,27	9,84	22,24
Desviación estándar	1,93	1,16	2,34	1,75	1,98

Parámetro del cono obtenido a partir de:

(A): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada en el sondeo S1

(B): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU en los sondeos S2 y S3

(C): La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de veleta de campo en los sondeos S2 y S3

(D): La relación de fricción (Fr) para las penetraciones con el cono propuesto CPTp1, CPTp2 y CPTp3

(E): Límite líquido de los sondeos S1, S2 y S3

Fuente: propia.

En la Tabla 8-42 se indican los datos estadísticos para el parámetro del cono promedio obtenido por los métodos A, B, C y D, en la cual se indica la media, la mediana, la desviación estándar, el rango. Como parámetro del cono promedio se tiene 10,66 ( $N_{kt \text{ promedio}}=10.66$ ) con una desviación estándar de 3.46.

Tabla 8-42. Datos estadísticos del parámetro del cono promedio " $N_{kt \text{ promedio}}$ " para los métodos A, B, C y D, del Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Descripción	Magnitud
Media	10,66
Error típico	1,73
Mediana	10,86
Desviación estándar	3,46
Varianza de la muestra	12,00
Curtosis	-0,66
Coefficiente de asimetría	-0,29
Rango	8,11
Mínimo	6,41
Máximo	14,52
Suma	42,66
Cuenta	4,00

Fuente: propia.

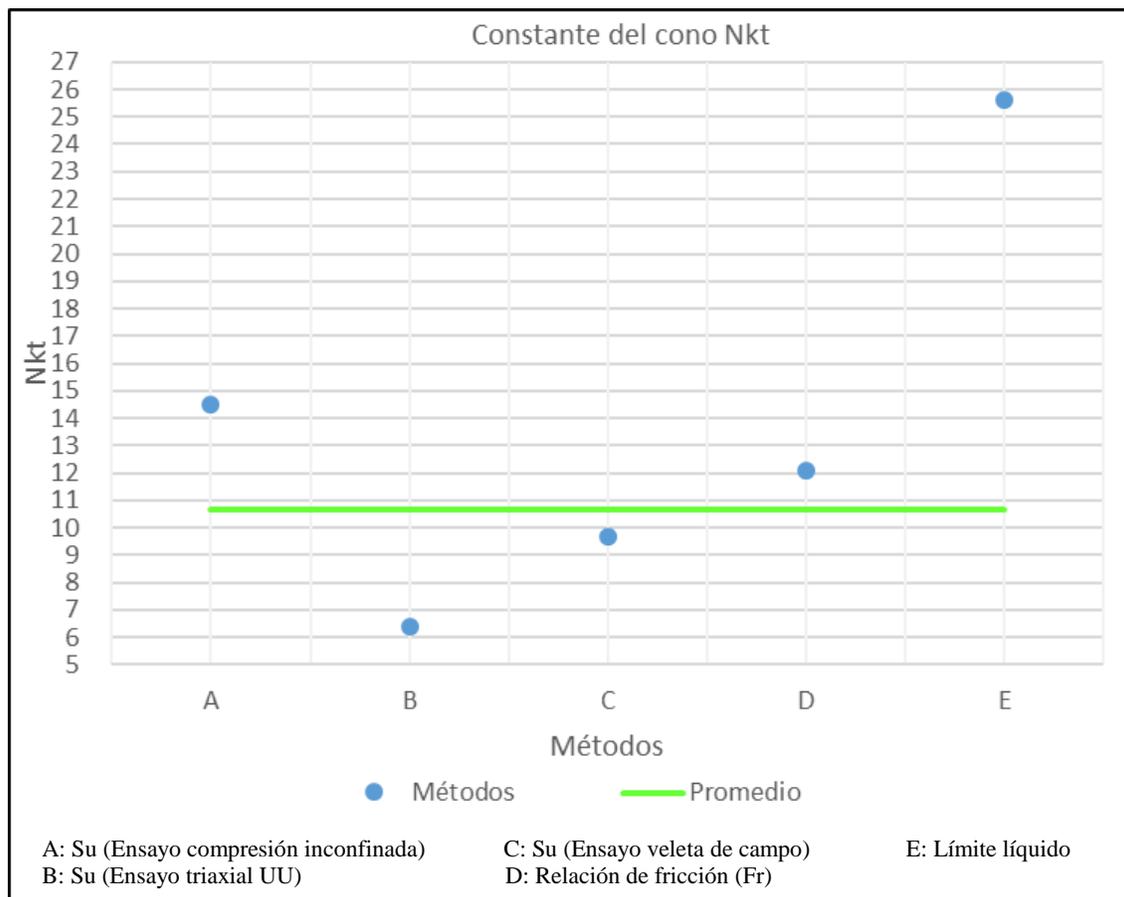


Figura 8-40. Parámetros del cono “N<sub>kt</sub>” obtenidos por los métodos A, B, C, D y E, en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

Tabla 8-43. Diferencia entre el N<sub>kt promedio</sub> con respecto al N<sub>kt</sub> determinado por cada método para el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Método	A	B	C	D	E
Diferencia	3,86	4,31	0,99	1,42	15,0

Fuente: propia.

### 8.2.7. Ecuación de correlación del parámetro del cono “Nkt” a partir del Límite Líquido en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

De la Figura 8-41 a la Figura 8-44 se grafican los parámetro del cono “Nkt” determinados con el cono propuesto, versus los límites líquidos promedio obtenidos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Los parámetros del cono “Nkt” de la Figura 8-41, la Figura 8-42 y la Figura 8-43, corresponde a los determinados a partir de la resistencia al corte no drenada hallada mediante los ensayos de compresión inconfiada, los ensayos triaxial UU, y los ensayos de veleta de campo, respectivamente.

Los parámetros del cono “Nkt” de la Figura 8-44, corresponde a los determinados a partir de la relación de fricción “Fr”.

De la Figura 8-41 a la Figura 8-44, también se encuentran graficados los parámetros del cono Nkt determinados con la Ecuación 45 desarrollada por Larsson y Mulabdic (1991), la cual fue correlacionada para el límite líquido de arcillas blandas de Suecia.

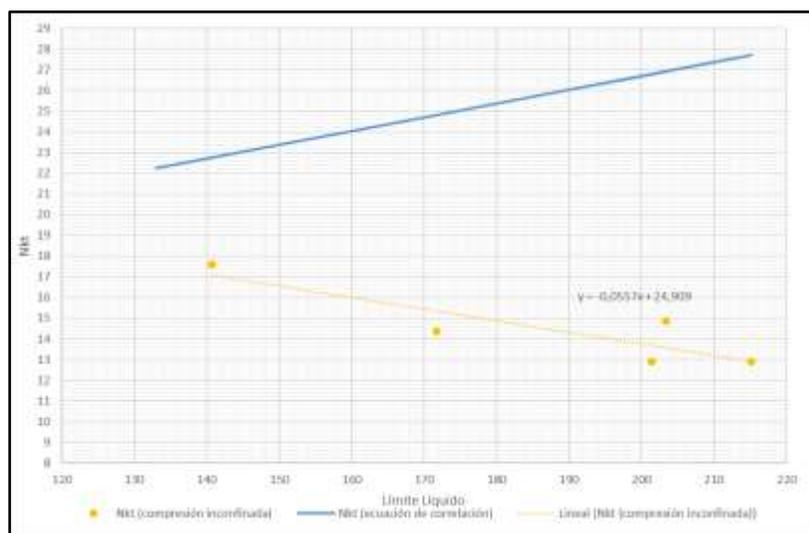


Figura 8-41. Parámetro del cono “Nkt determinado a partir del Su del ensayo de compresión inconfiada vs el límite líquido del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

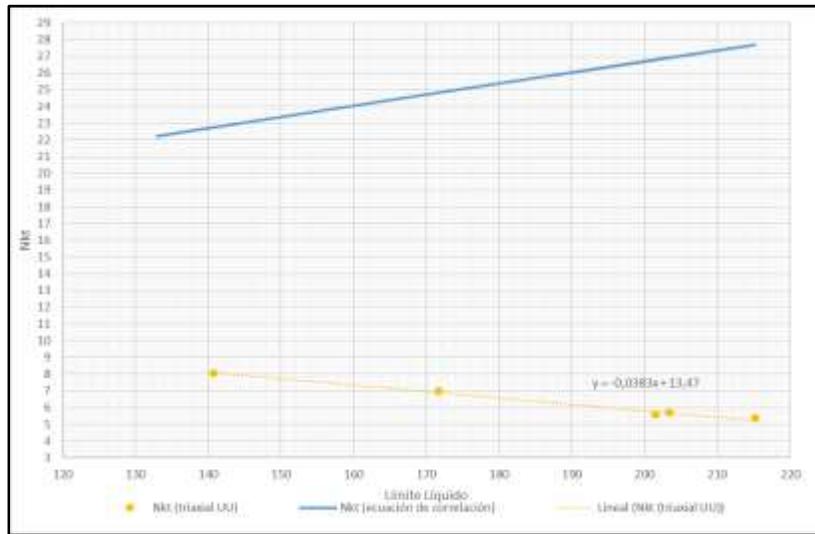


Figura 8-42. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo triaxial UU vs el límite líquido del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

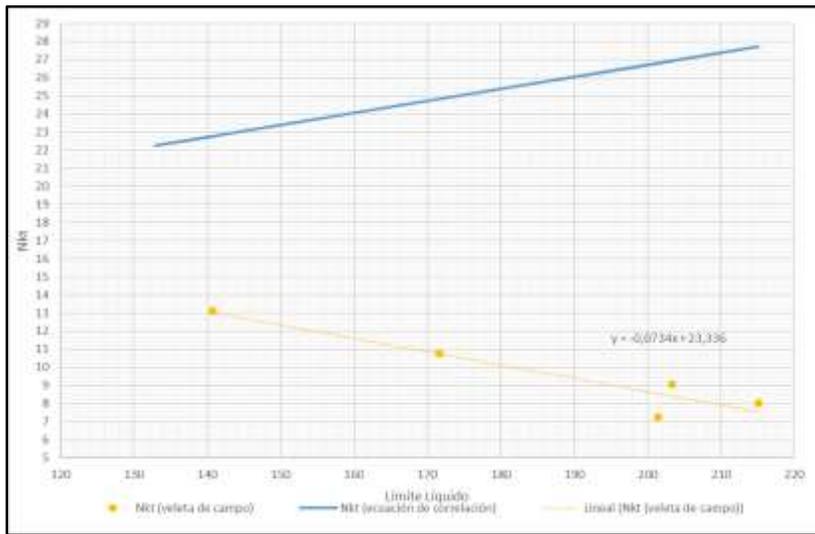


Figura 8-43. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo de veleta de campo vs el límite líquido del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

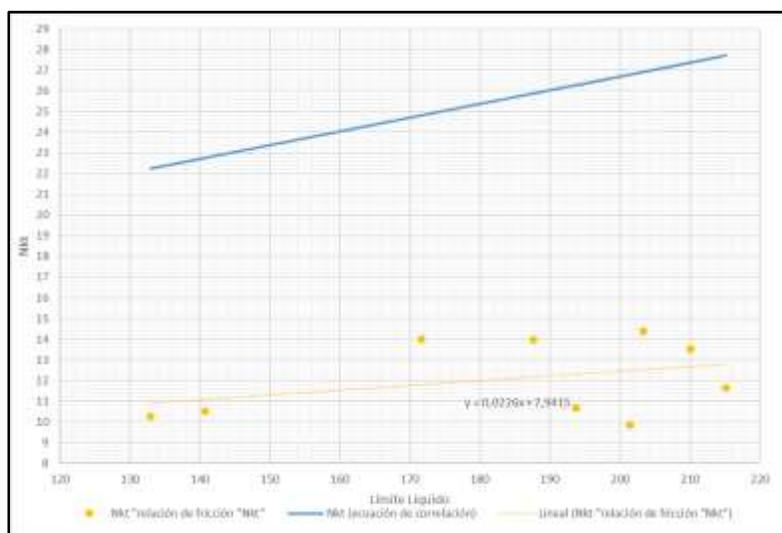


Figura 8-44. Parámetro del cono Nkt determinado a partir de la relación de fricción “Fr” vs el límite líquido del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

En la Tabla 8-44 se indican las ecuaciones de correlación obtenidas de la Figura 8-41 a la Figura 8-44, en el cual el límite líquido se ingresa en tanto por uno.

Las ecuaciones de correlación del parámetro del cono “Nkt” obtenidas mediante el cono propuesto y el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU y el ensayo de veleta de campo presentan una pendiente negativa, contrario a la ecuación obtenida mediante la relación de fricción “Fr” la cual presenta una pendiente positiva.

Tabla 8-44. Ecuaciones de correlación entre el parámetro del cono Nkt y el límite líquido del Sitio de Investigación 1 (ECI).

N	Descripción	Ecuación	R <sup>2</sup>	r
1	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo de compresión inconfiada	Nkt = 20.915-5.57LL	0.762	-0.873
2	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo triaxial UU	Nkt = 13.47-3.83LL	0.989	-0.995
3	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo de veleta de campo	Nkt = 23.336-7.34LL	0.893	-0.945
4	Nkt obtenido a partir de la relación de fricción	Nkt = 7.941+2.26LL	0.131	0.362

Fuente: propia.

A partir de las ecuaciones de correlación que presentan el mismo comportamiento con la pendiente negativa, se determina una ecuación promedio, la cual se indica a continuación.

$$N_{kt} = 20.67 - 8.66LL \quad (49)$$

El coeficiente de determinación promedio “R<sup>2</sup>” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para las ecuaciones de correlación del parámetro del cono “Nkt” determinadas con el cono propuesto y el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU, y el ensayo de veleta de campo, presentan magnitudes de 0.88 y 0.94 respectivamente, indicando que existe una dependencia lineal entre el Límite Líquido y el “Nkt”, la cual es buena (ver la Tabla 8-44).

Con la ecuación de correlación determinada anteriormente se calcula el Nkt a partir de los límites líquidos del Sitio de Investigación 2 (Fontibón), los cuales se indican en la Tabla 8-45 y Figura 8-45.

Tabla 8-45. Nkt obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del límite líquido y el cono propuesto del Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Profundidad, m	LL, %	Nkt
2,0	140,72	8,48
3,6	132,95	9,16
4,7	171,69	5,80
6,7	210,07	2,48
8,7	215,15	2,04
10,2	193,72	3,89
12,0	201,42	3,23
13,8	187,60	4,42
15,0	203,36	3,06

Fuente: propia.

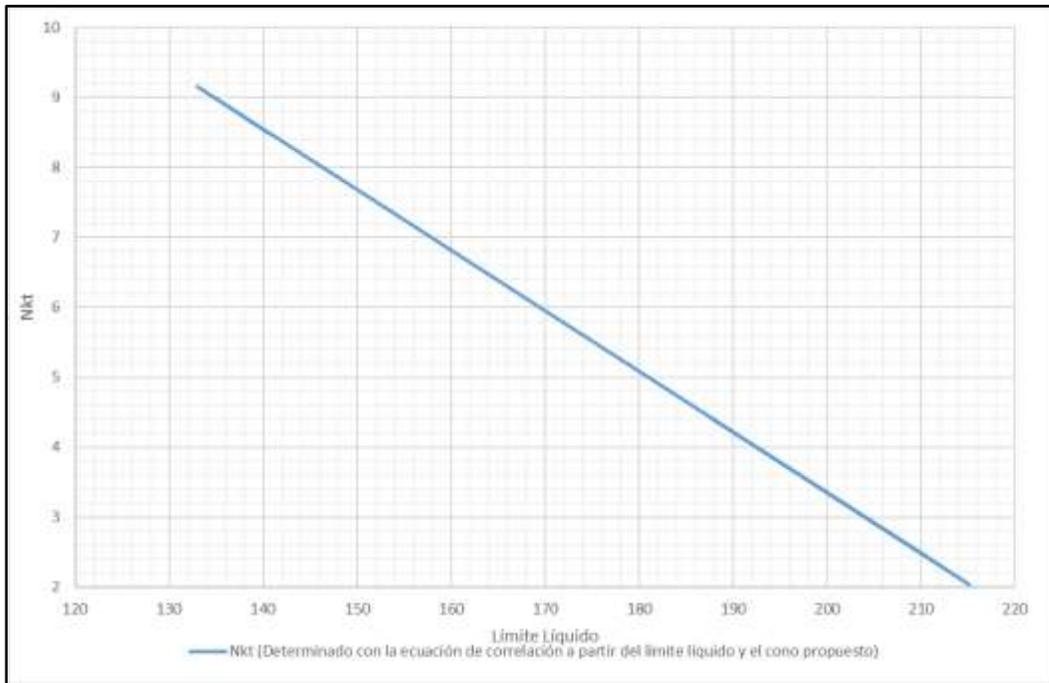


Figura 8-45. Límite Líquido vs Nkt obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del límite líquido y el cono propuesto del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

### **8.2.8. Ecuación de correlación del parámetro del cono “Nkt” a partir del Índice de Plasticidad en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).**

De la Figura 8-46 a la Figura 8-49 se grafican los parámetros del cono “Nkt” determinados con el cono propuesto, versus los Índices de Plasticidad promedio obtenidos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Los parámetros del cono “Nkt” de la Figura 8-46, la Figura 8-47 y la Figura 8-48, corresponde a los determinados a partir de la resistencia al corte no drenada hallada mediante los ensayos de compresión inconfiada, los ensayos triaxial UU y los ensayos de veleta de campo, respectivamente.

Los parámetros del cono “Nkt” de la Figura 8-49, corresponde a los determinados a partir de la relación de fricción “Fr”.

De la Figura 8-46 a la Figura 8-49, también se encuentran graficados los parámetros del cono Nkt determinados con la Ecuación 47 desarrollada por Lunne & Eide (1976) (ver la Figura 8-21).

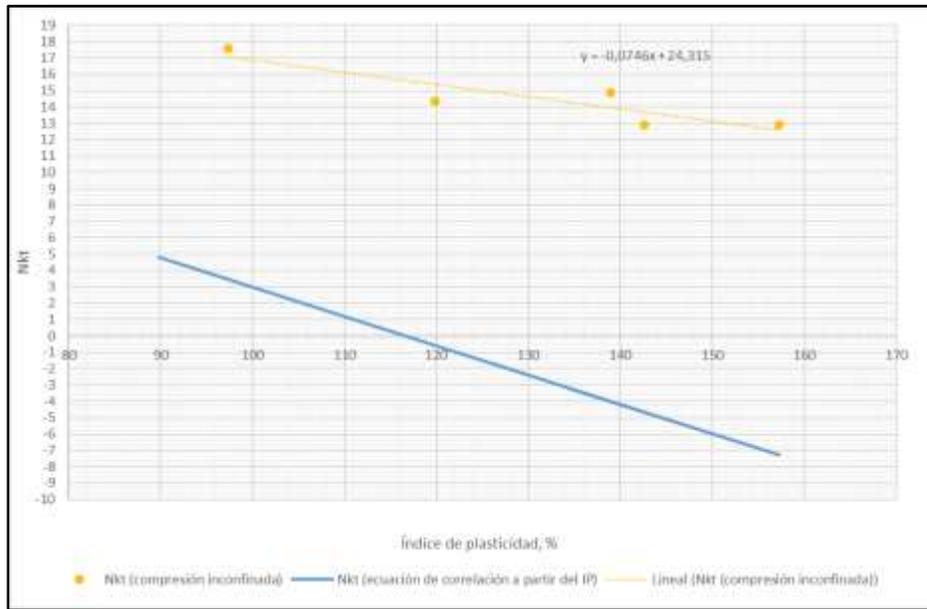


Figura 8-46. Parámetro del cono “Nkt determinado a partir del Su del ensayo de compresión inconfiada versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

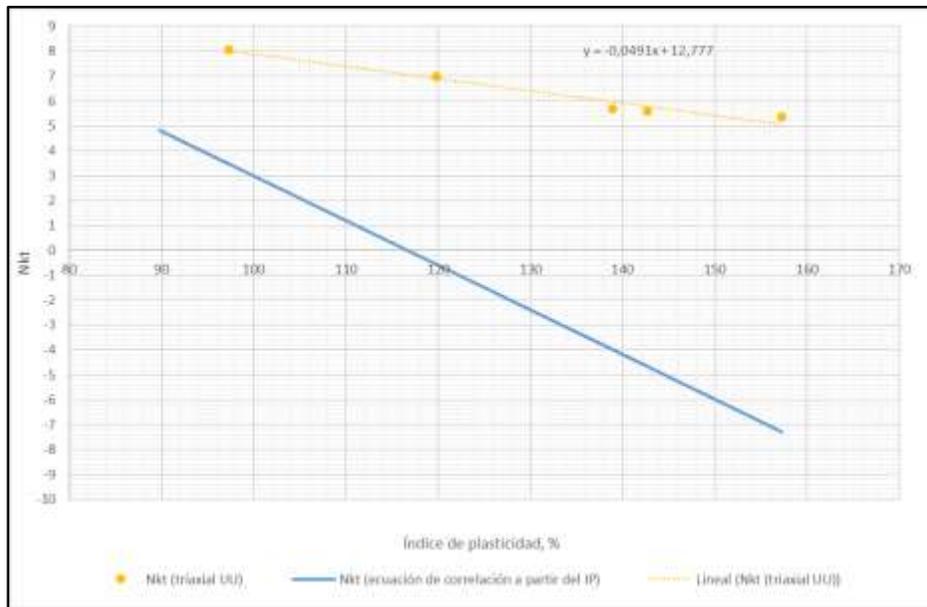


Figura 8-47. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo triaxial UU versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

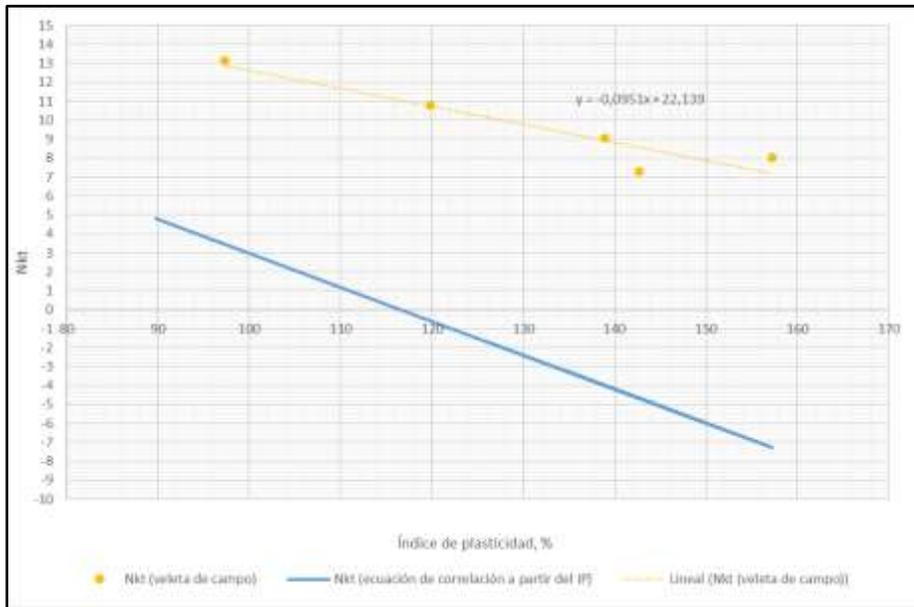


Figura 8-48. Parámetro del cono Nkt determinado a partir del Su del ensayo de veleta de campo versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

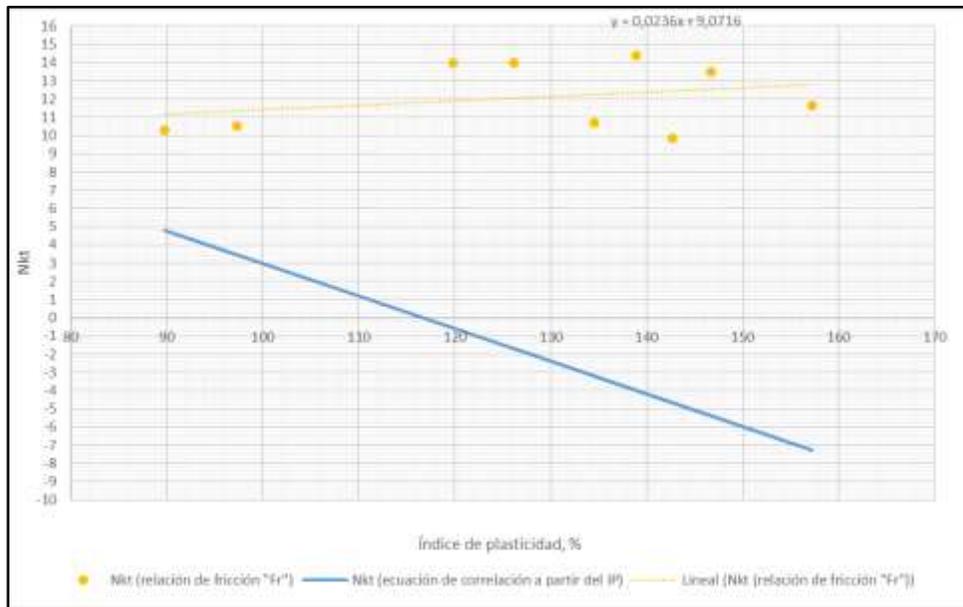


Figura 8-49. Parámetro del cono Nkt determinado a partir de la relación de fricción "Fr" versus el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

En la Tabla 8-46 se indican las ecuaciones de correlación obtenidas de la Figura 8-46 a la Figura 8-49, en el cual el Índice de Plasticidad se ingresa en tanto por uno.

Las ecuaciones de correlación del parámetro del cono “Nkt” obtenidas mediante el cono propuesto y el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU y el ensayo de veleta de campo presentan una pendiente negativa, contrario a la ecuación obtenida mediante la relación de fricción “Fr” la cual presenta una pendiente positiva.

Tabla 8-46. Ecuaciones de correlación entre el parámetro del cono Nkt y el Índice de Plasticidad del Sitio de Investigación 1 (ECI).

N	Descripción	Ecuación	R <sup>2</sup>	r
1	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo de compresión inconfiada	Nkt = 24.32-7.46IP	0.806	-0.898
2	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo triaxial UU	Nkt = 12.77-4.91IP	0.960	-0.980
3	Nkt obtenido a partir del Su del ensayo de veleta de campo	Nkt = 22.13-9.51IP	0.885	-0.941
4	Nkt obtenido a partir de la relación de fricción	Nkt = 9.07+2.36IP	0.082	0.287

Fuente: propia.

A partir de las ecuaciones de correlación que presentan el mismo comportamiento con la pendiente negativa, se determina una ecuación promedio, la cual se indica a continuación.

$$N_{kt} = 19.74 - 7.29IP \quad (50)$$

El coeficiente de determinación promedio “R<sup>2</sup>” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para las ecuaciones de correlación del parámetro del cono “Nkt” determinadas con el cono propuesto y el ensayo de compresión inconfiada, el ensayo triaxial UU, y el ensayo de veleta de campo, presentan magnitudes de 0.88 y 0.94 respectivamente, indicando que existe una dependencia lineal entre el Índice de Plasticidad y el “Nkt”, la cual es buena. (ver la Tabla 8-46).

Con la ecuación de correlación determinada anteriormente se calcula el Nkt a partir de los índices de plasticidad del Sitio de Investigación 2 (Fontibón), los cuales se indican en la Tabla 8- 47 y en la Figura 8-50.

Tabla 8- 47. Nkt obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del Índice de Plasticidad y el cono propuesto del Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Profundidad, m	IP, %	Nkt
2,0	97,31	12,65
3,6	89,77	13,20
4,7	119,86	11,00
6,7	146,74	9,04
8,7	157,25	8,28
10,2	134,53	9,93
12,0	142,64	9,34
13,8	126,12	10,55
15,0	138,94	9,61

Fuente: propia.

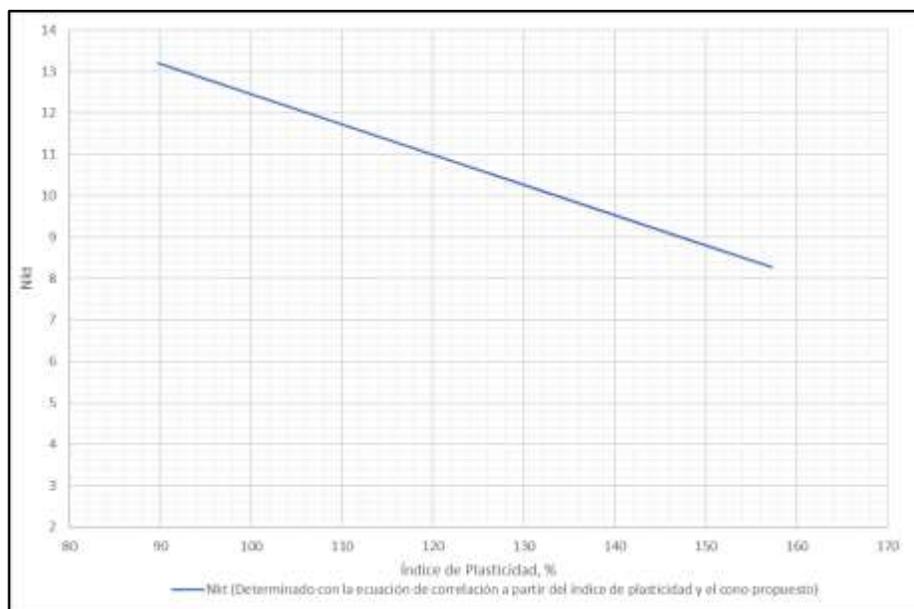


Figura 8-50. Índice de Plasticidad versus Nkt obtenido con la ecuación de correlación determinada a partir del Índice de Plasticidad y el cono propuesto del Sitio de Investigación 2 (Fontibón). Fuente: propia.

## Capítulo IX

### Conclusiones y Recomendaciones

A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de los estudios y análisis realizados en el presente documento.

#### 9.1. Información Relacionada con el Piezocono en Colombia

##### - Conclusiones

La aplicación del ensayo de penetración de cono estático en Colombia inicia con la utilización de conos mecánicos por parte de los ingenieros Víctor Romero (1960) y Luis Fernando Orozco (1981). En la actualidad, el uso del piezocono ha sido limitado debido al alto costo del equipo; sin embargo, se ha dado inicio a la caracterización e investigación del subsuelo en diferentes regiones del país, labor que han venido desarrollando ingenieros como Rodríguez E (2015), Rodríguez Granados (2013), Sarmiento & León (2016), López Ramírez & Durán Gutiérrez (2013), e instituciones de investigación como el Servicio Geológico Colombiano, La Universidad Nacional de Colombia, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, y la Universidad de los Andes.

##### - Recomendaciones

Es de resaltar que el campo de investigación del piezocono a nivel mundial es amplio, y a nivel nacional existen temas sin investigar, los cuales se recomienda sean abordados por las instituciones de investigación, universidades y la industria de la construcción.

#### 9.2. Caracterización Geotécnica del Sitio de Investigación 1 (ECI) y del Sitio de

##### Investigación 2 (Fontibón)

##### - Conclusiones

El Sitio de Investigación 1 (ECI) y el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) se encuentran ubicados en la ciudad de Bogotá, en la misma formación geológica “Q1sa” descrita por el Servicio Geológico Colombiano como Formación Sabana, la cual corresponde a depósitos de capas de arcillas, hacia los bordes se encuentran capas de arenas, arcillas arenosas, turba, y en ocasiones gravas.

De acuerdo con el decreto 523 de 2010 “Microzonificación sísmica de Bogotá”, el perfil del suelo encontrado para el Sitio de Investigación 1 (ECI) y para el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) corresponde a la zona Lacustre 200 y a la zona Lacustre 500 respectivamente.

De acuerdo con la exploración y caracterización geotécnica del Sitio de Investigación 1 (ECI) y del Sitio de Investigación 2 (Fontibón), se tiene en ambos lugares un perfil promedio conformado por arcillas de alta plasticidad de consistencia baja a media con humedades naturales altas, las cuales se encuentran entre los límites plástico y los límites líquidos, indicando que el subsuelo explorado para los dos sitios de investigación se encuentra en estado plástico.

En la Tabla 9-1 se indica el resumen de la resistencia al corte no drenada promedio obtenida en el Sitio de Investigación 1 (ECI) en el cual para una profundidad de 1.45 m a 2.90 m se tiene un  $C_u$  promedio de 51.17 kPa y luego para una profundidad de 2.90 m a 15.0 m se tiene un  $C_u$  promedio de 31.19 kPa.

Tabla 9-1. Resumen de la resistencia al corte no drenada obtenida en el Sitio de Investigación 1 (ECI).

Resistencia al corte no drenada promedio " $C_u$ ", kPa				
Profundidad, m	Ensayo de compresión inconfiada	Ensayo de veleta de campo	Ensayo triaxial UU	Promedio
1,45 - 2,90	38,13	51,99	63,38	51,17
2,90 - 15,0	23,17	28,07	42,34	31,19

Fuente: propia

En la Tabla 9-2 se indica el resumen de la resistencia al corte no drenada promedio obtenida en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) en el cual para una profundidad de 1.40 m a 3.50 m se tiene un  $C_u$  promedio de 38.03 kPa y luego para una profundidad de 3.5 m a 15.0 m se tiene un  $C_u$  promedio de 24.28 kPa.

Tabla 9-2. Resumen de la resistencia al corte no drenada obtenida en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Resistencia al corte no drenada promedio " $C_u$ ", kPa				
Profundidad, m	Ensayo de compresión inconfiada	Ensayo de veleta de campo	Ensayo triaxial UU	Promedio
1,4 - 3,5	24,83	34,34	54,94	38,03
3,5 - 15	14,28	24,18	34,37	24,28

Fuente: propia

Las resistencias al corte no drenada obtenidas mediante los ensayos de compresión inconfiada, triaxial UU y veleta de campo para el Sitio de Investigación 1 (ECI) y el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) presentaron en general el siguiente comportamiento:

- La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU es mayor a las determinadas mediante los ensayos de corte con veleta de campo y compresión inconfiada (ver la Tabla 9-1 y la Tabla 9-2).
- La resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo de compresión inconfiada es la menor con respecto a las determinadas con los ensayos de veleta de campo y triaxial UU, mostrando posibles efectos de alteración (ver la Tabla 9-1 y la Tabla 9-2).

Las menores resistencias al corte no drenada obtenidas mediante el ensayo compresión inconfiada se deben a que la aplicación de carga durante la falla de la muestra “inalterada” no simula de ninguna manera el esfuerzo de confinamiento que presenta el subsuelo en campo, mientras que la mayor resistencia al corte no drenada obtenida mediante el ensayo triaxial UU se debe a que durante la aplicación de carga se simula el esfuerzo de confinamiento al que está sometida la muestra en campo.

#### *-Recomendaciones*

Se recomienda incrementar el número de sitios de investigación en la sabana de Bogotá con el objeto de conocer el comportamiento de los depósitos Lacustres identificados en el decreto 523 de 2010 “Microzonificación Sísmica de Bogotá”.

### **9.3. Diseño y Fabricación de la Máquina que Aplica la Carga para Penetrar el Cono Propuesto**

#### *-Conclusiones*

Para el diseño de la máquina hidráulica encargada de penetrar el cono instrumentado, se utilizó software de diseño mecánico en tres dimensiones, el cual permitió modelar las condiciones de esfuerzo y deformaciones a las que es sometido el equipo, identificando que su predimensionamiento y la selección de materiales fue adecuado, dando paso a la adquisición de componentes mecánicos y materiales, para luego proceder a su fabricación y ensamblaje.

Los equipos y materiales para la fabricación de la máquina para hincar el cono propuesto se adquirieron en la ciudad de Bogotá, identificando baja oferta comercial de la unidad hidráulica con

las especificaciones definidas en el diseño. Durante el proceso mecanizado y ensamblaje que se llevó a cabo en talleres de metalmecánica en el sector del Ricaurte y en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, no se presentaron dificultades teniendo en cuenta que los equipos diseñados en este proyecto hacen parte de los mecanismos convencionales que se fabrican en esta industria.

#### *- Recomendaciones*

Consultar la viabilidad del aprovisionamiento de la unidad hidráulica en el mercado internacional, o fabricarla, adquiriendo cada componente por separado; sin embargo, tiene la desventaja que sea más robusta, siendo de mayor peso y tamaño, pero ofrece la ventaja de mayor facilidad para su mantenimiento preventivo y correctivo.

Teniendo en cuenta que los fabricantes de piezoconos a nivel internacional ofrecen equipos para hincar el cono que son automatizados y muy versátiles, se recomienda diseñar un proceso de automatización del equipo que hinca el cono propuesto, dado que el procedimiento de funcionamiento del mismo es manual.

### **9.4. Diseño y Fabricación del Cono Propuesto**

#### *- Conclusiones*

Para el diseño mecánico del cono instrumentado, se tuvieron en cuenta las dimensiones de los transductores de presión, el diámetro de la camisa, y del vástago del cilindro hidráulico, las cuales estuvieron limitados a elementos que se encuentran disponibles en el comercio en Bogotá. El ángulo en la punta del cono es de 60°, según la norma ASTM D 5778 (Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration testing of soil).

El diámetro del cono diseñado es de 60 mm, el cual no cumple con los diámetros normalizados por la norma ASTM D 5778, y que son de 35.7 mm o de 43.7 mm, dado que el diseño está limitado por las dimensiones de los sensores de presión hidráulica; es de resaltar que en el mercado se encuentran conos disponibles desde 16 mm hasta 71.4 mm de diámetro (ver la Figura 4-6 y la Tabla 4-9).

Según Vertek (2015), los conos pequeños hasta 1 cm<sup>2</sup>, en el ensayo CPT, se utilizan en laboratorio o investigaciones especializadas; mientras que los conos de mayor diámetro, ofrecen una resistencia al cono más precisa en suelos de consistencia blanda. El cono propuesto en el presente documento se encuentra dentro de los rangos indicados por Robertson & Cabal, 2010 (ver la Tabla 4-9), y su

aplicación se desarrollará en suelos de consistencia blanda, por lo que se encuentra dentro de las aplicaciones descritas por Vertek (2015).

Al ser mayor el diámetro del cono propuesto que corresponde a 60 mm, con respecto a los diámetros del piezocono convencional, los cuales son de 35.7 mm y 43.7 mm según norma ASTM D 5778, se genera afectación de la resistencia en la punta y la fricción en el fuste obtenidos con el cono desarrollado en este proyecto, presentando según Tumay M., & Sandven R. (2000) una reducción de los esfuerzos registrados al incrementar el diámetro en el piezocono, comportamiento que es analizado para los datos registrados con el cono convencional y con el cono propuesto para el Sitio de Investigación 1 (ECI) en el literal 7.1.1.

El dimensionamiento de los componentes del cono propuesto, junto con su ensamble virtual se llevó a cabo mediante un software de diseño mecánico en tres dimensiones “3D”, el cual permitió identificar la interacción entre los componentes, y posibles interferencias, realizando los ajustes necesarios para luego generar los planos de diseño, a partir de los cuales se adquirieron los materiales para continuar con la etapa de fabricación.

La adquisición de los sensores de presión hidráulica en Colombia se vio limitada debido a la baja disponibilidad comercial de transductores de tamaño reducido.

El proceso de mecanizado se llevó a cabo en el sector metalmecánico del Ricaurte en la ciudad de Bogotá, y el ensamblaje y puesta en marcha en el laboratorio de Ingeniería Civil de Universidad Distrital Francisco José de Caldas y en la carrera 104 A Bis No 23 D 12.

Al realizar el mecanizado de las piezas establecidas en los planos de diseño, se presentó dificultad al no encontrar mano de obra calificada en el momento de interpretar los planos, por tratarse de un dispositivo no convencional.

En el proceso de mecanizado de las piezas del cono propuesto establecidas en el diseño, fue necesario realizar seguimiento y orientación a dicha labor, viéndose reflejado en una adecuada fabricación de los dispositivos.

En la etapa de diseño, se seleccionaron los dispositivos para la adquisición de datos de los transductores de presión del cono propuesto, luego se procedió a adquirir y conectar los equipos de acuerdo con el diseño del circuito eléctrico, logrando un adecuado funcionamiento del dispositivo.

Una vez fabricado y ensamblado el cono instrumentado, se procede a realizar su calibración en un marco de carga con una celda de carga tipo S (ver la Figura 5-5).

Según Mensur M., Soren E., & Rolf L, (1990) en la grafica de resistencia en la punta versus presión de cámara (ver la Figura 5-9), que se realiza durante el proceso de calibracion del piezocno convencional en una camara de calibración, se registra un comportamiento curvo al inicio de la gráfica, el cual se debe a la fricción en los o-rings (anillos de caucho) al ser movilizados; para la calibración de la punta y el fuste del cono propuesto se evidencia un comportamiento similar (ver la Figura 5-7), el cual se debe principalmente a la fricción de la empaquetadura en el pistón del sistema hidráulico.

La precisión y exactitud promedio del sensor S1 que registra la presión en la punta es de 1.92% y 2.49%, respectivamente, mientras que la precisión y exactitud promedio del sensor S2, que registra la presión en la punta y la fricción en el fuste es de 2.71% y 2.86%, respectivamente (ver la Tabla 5-11), los cuales son mayores, pero cercanos, a la precisión y exactitud recomendada por la ASTM D5778-12 “Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils”, la cual corresponde a 2%.

Al ser la precisión y la exactitud del cono propuesto mayor a la recomendada por la ASTM D5778-12, se obtienen datos con el cono propuesto de resistencia en la punta y fricción en el fuste con un mayor error con respecto al cono convencional, sin embargo, el incremento del error es mínimo dado que la diferencia promedio de la precisión y la exactitud entre en cono propuesto y lo recomendado en la normas ASTM D 5778-12 es del 0.67%.

#### *- Recomendaciones*

Contactar proveedores internacionales que ofrezcan sensores tipo miniatura con rangos de presión altos, con el objeto de reducir el tamaño del cono propuesto.

La comunicación entre el transductor de presión hidráulica y el sistema de adquisición de datos se realiza mediante conductores eléctricos; con el objeto de incrementar la velocidad de comunicación y la calidad de la información, se recomienda que la transmisión sea mediante fibra óptica.

Se recomienda contactar con proveedores internacionales que ofrezcan la unidad de adquisición de tipo “datalogger”, que sea compatible con el sistema de comunicación con fibra óptica, acompañada del software de adquisición de datos diseñado para el ensayo de penetración estática de cono.

Rediseñar el cono propuesto donde se incluya el anillo y el sensor para registrar la presión de poros.

Rediseñar el cono propuesto a las dimensiones indicadas en la norma ASTM D-5778-12 “Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils” con el objeto de estandarizar el cono con los sensores hidráulicos.

### **9.5. Penetración del Cono Propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI) y en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)**

#### *- Conclusiones*

Se penetró, en el Sitio de Investigación 1 (ECI), y en el sitio de investigación 2 (Fontibón) el cono propuesto con los sensores hidráulicos, registrando la presión en la punta y la fricción en el fuste, haciendo uso de la maquina hidráulica, la cual se diseñó y fabricó para tal fin.

Al comparar el promedio de la presión en la punta de las tres penetraciones realizadas con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI), con la presión en la punta de la penetración del piezocono convencional que realizaron Sarmiento y León (2016) en el mismo sitio, se observa que excepto cerca de la superficie se presenta buena coincidencia, aunque el cono propuesto tiende a dar una resistencia en la punta menor que la correspondiente al cono convencional (ver la Figura 7-6).

Al comparar el promedio del esfuerzo en el fuste de las tres penetraciones realizadas con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 1 (ECI), con el esfuerzo en el fuste de la penetración del piezocono convencional que realizaron Sarmiento y León (2016) en el mismo sitio, se observa que excepto cerca de la superficie se presenta buena coincidencia, aunque el cono propuesto tiende a dar una resistencia menor en el fuste que la correspondiente al cono convencional (ver la Figura 7-7).

Es posible que la disminución de la presión en la punta y la fricción en el fuste del cono propuesto con respecto al cono convencional, se deba a que el diámetro no es el mismo, siendo el diámetro del cono convencional de 35.7 mm y el del cono propuesto de 60 mm.

Tumay M., & Sandven R. (2000), indican en la investigación desarrollada de penetración de cono miniatura en arcillas, que el piezocono miniatura de 2 cm<sup>2</sup> (15.9 mm de diámetro), registro un 11% más de resistencia en comparación con el estándar de 10 cm<sup>2</sup> (35.7 mm de diámetro).

La disminución de la presión en la punta y fricción en el fuste entre el cono propuesto y el piezocono convencional se encuentra en promedio en el 17%.

En la Figura 7-16 se identifican dos sectores de la gráfica del esfuerzo promedio en la punta con respecto a la profundidad, el cual fue obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). A una profundidad entre 0 a 1.5 m se encuentra el sector 1, en el cual se observa un incremento del “qc” obteniendo un valor máximo de 1.81 MPa, luego a una profundidad de 1.50 m a 15.0 m se encuentra el sector 2, en el cual se mantiene el “qc” entre una presión máxima y mínima de 0.37 MPa y 0.34 MPa, respectivamente (ver la Tabla 9-3).

Tabla 9-3. Presión en la punta máxima promedio y mínima promedio para el sector 1 y 2 obtenida con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Presión en la punta, MPa			
Sector	Profundidad, m	Máximo	Mínimo
1	0 - 1,5	1,81	0,19
2	1,5 - 15	0,37	0,34

Fuente: propia.

En la Figura 7-17 se identifican dos sectores de la gráfica de fricción en el fuste promedio con respecto a la profundidad, el cual fue obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón). A una profundidad entre 0 a 2.2 m se encuentra el sector 1, en el cual se observa un incremento de la fricción en el fuste obteniendo un valor máximo de 87.15 kPa, luego a una profundidad de 1.50 m a 15.0 m se encuentra el sector 2, en el cual se mantiene la fricción en el fuste entre un esfuerzo máximo y mínimo de 10.69 kPa y 5.36 kPa, respectivamente (ver la Tabla 9-4).

Tabla 9-4. Fricción en el fuste máximo y mínimo promedio para el sector 1 y 2 obtenido con el cono propuesto en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón).

Fricción en el fuste, kPa			
Sector	Profundidad, m	Máximo	Mínimo
1	0 - 2,2	87,15	2,37
2	2,2 - 15	10,69	5,36

Fuente: propia.

### *-Recomendaciones*

Se recomienda desarrollar investigaciones del cono miniatura que se ejecuten en cámaras de calibración en el laboratorio, generando correlaciones entre la presión en la punta y la fricción en el fuste registrados con el dispositivo y los parámetros de resistencia de los suelos densificados en la cámara, caracterizando especialmente los suelos lacustres de la sabana de Bogotá.

Teniendo en cuenta que la presión en la punta y la fricción en el fuste registrados con el cono propuesto para el Sitio de Investigación 1 (ECI) y el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) fueron adecuados, se recomienda rediseñar el cono propuesto incluyendo el registro de la presión de poros.

## **9.6. Determinación del Parámetro del Cono “Nkt” con el Cono Propuesto para el Sitio de Investigación 1 (ECI), y el Sitio de Investigación 2 (Fontibón)**

### *- Conclusiones*

El parámetro geotécnico que se analizó corresponde al parámetro de cono “Nkt”, el cual se determinó haciendo uso de las ecuaciones (41), (42) y (44), ecuaciones que hacen uso de la resistencia en la punta “qc”, la fricción en el fuste “fs” del cono propuesto, junto con la resistencia al corte no drenada “Su”, la relación de fricción “Fr” y el Límite Líquido “LL”. La resistencia al corte no drenada “Su” se determina mediante el ensayo compresión confinada, el ensayo triaxial UU y el ensayo de veleta de campo.

De los parámetros del cono “Nkt” obtenidos en el Sitio de Investigación 1 (ECI) se puede decir que:

- El menor parámetro del cono “Nkt” se obtiene a partir de la resistencia al corte no drenada por medio del ensayo triaxial UU, el cual corresponde a 7,27.
- Los parámetros promedio del cono obtenidos a partir de las resistencias al corte no drenada “Su” y la relación de fricción “Fr” se encuentran en un rango de 7.27 a 13.56.
- El valor del parámetro del cono “Nkt” que tome en el rango de 7.27 a 13.56 depende del tipo de ensayo que se use para evaluar la resistencia al corte no drenado, o si se usa la relación de fricción.
- El parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” es de 11.45 el cual se encuentra dentro del rango de 10 a 18 que corresponde a las magnitudes en las cual puede llegar a variar el “Nkt” para el cono convencional según Robertson & Cabal (2010).

- El parámetro del cono determinado a partir del límite líquido “LL” es de 23.31, el cual se aleja considerablemente de los obtenidos por medio de la resistencia al corte no drenada “Su” y la relación de Fricción “Fr”; dicho comportamiento se debe muy probablemente a que la Ecuación (44) fue desarrollada por Larsson y Mulabdic (1991), para arcillas blandas de Suecia, y no ha sido correlacionada para las arcillas blandas de Bogotá, por tal razón se descartó y no se tuvo en cuenta en el análisis.

El valor del parámetro del cono “Nkt” depende del tipo de ensayo que se use para evaluar la resistencia al corte no drenada.

A partir de los parámetros del cono “Nkt” hallados con el cono propuesto y los límites líquidos “LL”, determinados en el Sitio de Investigación 1 (ECI), se estableció la siguiente ecuación de correlación en la cual se ingresa el Límite Líquido “LL” en tanto por uno.

$$N_{kt} = 19.42 - 5.02LL \quad (51)$$

El coeficiente de determinación promedio “R<sup>2</sup>” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para la ecuación anterior presentan magnitudes de 0.17 y 0.27, respectivamente, indicando que la dependencia lineal entre el Límite Líquido y el “Nkt” es baja (ver Tabla 8-21).

A partir de los parámetros del cono “Nkt” hallados con el cono propuesto y los Índices de Plasticidad “IP”, determinados en el Sitio de Investigación 1 (ECI), se estableció la siguiente ecuación de correlación en la cual se ingresa el Índice de Plasticidad en tanto por uno.

$$N_{kt} = 17.25 - 5.69IP \quad (52)$$

El coeficiente de determinación promedio “R<sup>2</sup>” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para la ecuación anterior presentan magnitudes de 0.18 y 0.25 respectivamente, indicando que la dependencia lineal entre el Índice de Plasticidad y el “Nkt” es baja (ver Tabla 8-23).

De los parámetros del cono “Nkt” obtenidos en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón) se puede decir que:

- El menor parámetro del cono “Nkt” se obtiene a partir de la resistencia al corte no drenada por medio del ensayo triaxial UU, el cual corresponde a 6.41.

- Los parámetros promedio del cono “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ”, obtenidos a partir de las resistencias al corte no drenada “Su” y la relación de fricción “Fr” se encuentran en un rango de 6.41 a 14.52.
- El valor del parámetro del cono “Nkt” que tome en el rango de 6.41 a 14.52 depende del tipo de ensayo que se use para evaluar la resistencia al corte no drenado, o si se usa la relación de fricción.
- El parámetro del cono promedio “ $N_{kt \text{ promedio}}$ ” es de 10.66 el cual se encuentra dentro del rango de 10 a 18 que corresponde a las magnitudes en las cual puede llegar a variar el “Nkt” para el cono convencional según Robertson & Cabal (2010).
- El parámetro del cono determinado a partir del límite líquido “LL” es de 25.41, el cual se aleja considerablemente de los obtenidos por medio de la resistencia al corte no drenada “Su” y la relación de Fricción “Fr”; dicho comportamiento se debe muy probablemente a que la Ecuación (44) fue desarrollada por Larsson y Mulabdic (1991), para arcillas blandas de Suecia, y no ha sido correlacionada para las arcillas blandas de Bogotá, por tal razón se descartó y no se tuvo en cuenta en el análisis.

El valor del parámetro del cono “Nkt” depende del tipo de ensayo que se use para evaluar la resistencia al corte no drenada.

A partir de los parámetros del cono “Nkt” hallados con el cono propuesto y los límites líquidos “LL”, determinados en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón), se estableció la siguiente ecuación de correlación en la cual se ingresa el Límite Líquido “LL” en tanto por uno.

$$N_{kt} = 20.67 - 8.66LL \quad (53)$$

El coeficiente de determinación promedio “ $R^2$ ” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “r”, obtenidos para la ecuación anterior presentan magnitudes de 0.88 y 0.94 respectivamente, indicando que existe una dependencia lineal entre el Límite Líquido y el “Nkt”, la cual es buena (ver la Tabla 8-44).

A partir de los parámetros del cono “Nkt” hallados con el cono propuesto y los Índices de Plasticidad “IP”, determinados en el Sitio de Investigación 2 (Fontibón), se estableció la siguiente ecuación de correlación en la cual se ingresa el Índice de Plasticidad en tanto por uno.

$$N_{kt} = 19.74 - 7.29IP \quad (54)$$

El coeficiente de determinación promedio “ $R^2$ ” y el coeficiente de correlación de Pearson promedio “ $r$ ”, obtenidos para la ecuación de correlación anterior presentan magnitudes de 0.88 y 0.94 respectivamente, indicando que existe una dependencia lineal entre el Índice de Plasticidad y el “ $N_{kt}$ ”, la cual es buena. (ver la Tabla 8-46).

*-Recomendaciones*

Establecer más sitios de investigación para los diferentes suelos lacustres de la Sabana de Bogotá indicados en el Decreto 523 de 2010 “Microzonificación sísmica de Bogotá”, incluyendo el Sitio de Investigación 1 (ECI), con el objeto de verificar las ecuaciones de correlación del parámetro del cono con respecto al límite líquido y al índice de plasticidad, teniendo en cuenta que el coeficiente de determinación promedio “ $R^2$ ” y el coeficiente de correlación de Pearson “ $r$ ” calculado para dichas ecuaciones fue bajo.

Realizar investigaciones variando el diámetro del piezocono identificando la afectación de la presión en la punta y la fricción en el fuste para los suelos Lacustres de la Sabana de Bogotá.

## Capítulo X

### Bibliografía

Abedin, M. (1995). *The characterization of unsaturated soil behaviour from penetrometer performance and the critical state concept*. Newcastle upon Tyne: From Ph.D. Thesis University of Newcastle upon Tyne.

Ahmadi, M., & Byrne, P. (2005). *Cone tip resistance in sand: modelling, verification, and applications*. Canadian: Canadian Geotechnical Journal.

Associazione Geotecnica Italiana. (1979). *Experience on the time settlement of some Italian soft clays*. Italian: European Conference on soil mechanics and foundation Engineering.

ASTM-D5778. (2007). *Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils*. USA: ASTM.

Audureau, J. (1986). *Potencia en motores hidráulicos*. Iberica: Hydrokit.

Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., & Pasqualini, E. (1986). *Interpretation of CPTs and CPTUs*. Singapore: Nanyang Technological Institute Singapore.

Baligh, M., & Levadoux, J. (1980). *Pore pressure dissipation after cone penetration*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. Department of Civil Engineering.

Battaglio, M., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., & Maniscalco, R. (1981). *Piezometer probe test in cohesive deposits*. Louis, Italy: Conference on cone penetration testing experience.

Been, K., & Jefferies, M. (1992). *Towards systematic CPT interpretation*. Oxford: In Proceedings of the Wroth Symposium

Bishop. (1945). *Theory expansion cavity*. USA.

Bolton M. & Gui M.W. (1993). *The study of relative density and boundary effects for cone penetration test in centrifuge*. Cambridge: Cambridge University Engineering Department.

Briaud, J. L. (2013). *Geotechnical Engineering*. New Jersey: John Wiley.

- Butlanska, J., & Arroyo, M. (2014). *Multiscale analysis of cone penetration test (CPT)*. Canadian: Canadian Geotechnical Journal.
- Campanella, R., & Robertson, P. (1988). *Current status of the piezocone test*. Orlando: International symposium on penetration testing.
- Campanella et al. (1988). *Overconsolidation ratio of clays from penetration pore pressures*. JGE ASCE.
- Carlos, R. (2008). *Mediciones industriales*. Mexico: Cerrmedind.
- CEDEX. (2000). *Técnicas Geofísicas*. Madrid - España: Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Gengage Learning.
- Devincenzi, M., & Frank, N. (2004). *Ensayos Geotécnicos in situ, su ejecución e interpretación*. Girona.
- Díaz Trillos, G. (2011). *Caracterización de un sitio mediante ensayo de CPTU*. Bogotá - Colombia: Pontificia Univesdiad Javeriana.
- Dunncliff, J. (1988). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. Lexington Massachusetts: Wiley.
- F.H., K., & P.W, M. (1990). *Manual on estimating soil porperties for foundation design*. Palo Alto: Electric Power Research Institute.
- Financiera de Desarrollo Nacional, & Consorcio Metro Bog. (2017). *Estructuración técnica del tramo 1 de la primera línea del metro de Bogotá*. Bogotá: Consorcio Metro Bog.
- Franzen, J. (2006). *Cone Penetration in silt*. Rhode Island: M.Sc. Thesis University Rhode Island.
- García Nuñez, J., Días Parra, F., & Alarcón Guzmán, A. (2006). *Comportamiento dinámico de depósitos aluviales en Colombia*. Bogotá - Colombia: Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil Vol. 6(2).
- Ghionna, V., & Jamiolkowski, M. (1991). *A Critical Appraisal of Calibration Chamber Testing in Sands*. New York: International Symposium Calibration Chamber Testing.

- Gillespie, D., & Campanella, R. (1991). *Consolidation characteristics from pore pressure dissipation after piezometer cone penetration*. British Columbia Vancouver: The University British Columbia .
- Gorman, C. T., Drnevich, V. P., & Hopkins, T. C. (1975). *Measurement of in-situ shear strength. In-Situ Measurement of Soil Properties*. Virginia- USA: ASCE (American Society of Civil Engineers).
- Gutiérrez, A. (2002). *Metología con redes neuronales para la clasificación de suelos por medio de sondeos de CPT*. Bogotá - Colombia: Universidad de los Andes.
- Harman, D. (1976). A Statistical Study of static Cone Bearing Capacity, Vertical Effective Stress, and Relative Density of Dry and Saturated Fine Sands in a Large, Triaxial Test Chamber. Florida: Master of Engineering Thesis. University of Florida.
- Hers, I. (1989). *The analysis and interpretation of the cone pressuremeter in cohesive soil*. British Columbia. Vancouver: University British Columbia.
- Hottinger Bruel Kjaer. (2017). *Que son y para que sirven las galgas extensiométricas*. Puebla Mexico: Mexico.
- Huntsman, S. (1985). *Determination of in situ lateral pressure of cohesionless soils by static cone penetrometer*. California, Berkeley: University of California at Berkeley.
- Jamiolkowski, M. L. (1985). *New development in field and laboratory testing of soil*. San Francisco California: International conference on soil Mechanics and Foundation.
- Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., & Wolski, W. (1983). *Precompression and speeding up consolidation*. Helsinki: European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Kabir, M., & Lutenegeger, A. (1990). *In situ estimation of the coefficient of consolidation of clay*. Canadian: Canadian Geotechnical Journal.
- Karlsrud, K., Lunne, T., Kort, T., & Strandvik, S. (1996). *CPTU Correlations for clays*. Norway: The Norwegian Geotechnical Institute.
- Kokusho, T., Murahata, k., & Hushikida, T. (2003). *Introduction of miniature cone triaxial apparatus and correlation with liquefaction strength*. Tokyo Japan: Proceedings of the Annual Convencion of Japan Society of Civil Engineers.

- Konkol, J., & Balachowski, L. (2017). *Numerical modeling of cone penetration test in slightly overconsolidated clay with arbitrary lagrangian - Eulerian formulation*. Poland: Gdansk University of technology.
- Konrad, J. (1997). *In situ sand satate from CPT: Evaluation of a unifed approach at two CANLEX sites*. Canadian: Canadian Geotechnical Journal.
- Kumar, J., & Raju, K. (2008). *Correlation between miniature cone tip resistence and shear strength parameters of clean and silty sand using a convetnional triaxial setup*. Geotechnical Testing Journal.
- Kulhawy, F.H., and Mayne, P.H., (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*, Report EL-6800 Electric Power Research Institute, EPRI.
- Larson R., & Mulabic M. (1991). *Piezocone*. Linkoping: Swedish Geotechnical Institute.
- Leroueil S., Demers D., & La Rochelle. (1995). *Practical applications of the piezocone in Champlain sea*. Linkoping.
- Levadoux. (1986). *Consolidation after undrained piezocone penetration*. Geotech Engineering.
- López Ramírez, L., & Durán Gutiérrez, J. (2013). *Uso del piezocono (CPTU) para determinar la caracterización geotécnica de depósitos arcillosos blandos en algunos sitios del departamento de Boyacá*. Boyacá - Colombia: Seminario Internacional de ingeniería sísmica y geotecnica.
- Lunne, T., Robertson, P., & Powell, J. (1992). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. London: Blackie Academic and Professional.
- Lutenergger, A., Kabir, M., & Saye, S. (1988). *Use of penetration test to predict wick drain performance in a soft clay*. Orlando: International Simposium on penetration testing.
- M. D, B., & W, Gui M.W. (1993). *The study of relative density and boundary effects for cone penetration test in centrifuge*. Cambridge: Cambridge University Engineieering Departament.
- M.M, B., & Levadoux J.N. (1986). *Consolidation after undrained piezocone penetration*. Geotech Engineering.
- Maccaferri. (2004). *Dimensionamiento de cilindros hidráulicos*. Buenos Aires. Taringa.

Mayne P. W., & Campanella R. G. (2007). *Versatile site characterization by seismic piezocone*. Osaka: International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Mayne, P. W. (2007). *Cone Penetration Test*. Washington D.C.

Mokkelbost , K. (1988). *Application of dilatometer for pile design. Dilatometer test at four Norwegian sites*. Norwegian: Norwegian Geotechnical Institute.

Molina Mendoza, E. (2016). *Caracterización Geotécnica de la Ciudad de Barranquilla, Colombia*. Puebla - México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Mulabic, M., Eskilson, S., & Larsson, R. (1990). *Calibration of Piezocones for Investigations in Soft Soils and Demands for Accuracy of the Equipments*. Linkoping Sweden: Swedish Geotechnical Institute.

N.S., R., & T., L. (1988). *Direct correlations between piezocone test results and undrained shear strength of clay*. Orlando: Proceeding 1 International Symposium on Penetration Testing.

Narváz Segura, M. C., & Torres Romero, C. E. (2019). *Analisis geo estadístico para la obtención de un modelo Geológico - Geotécnico. Caso de Estudio Metro de Bogotá - Colombia*. Bogotá - Colombia: Universidad Santo Tomás.

Nolla, X. (2019). *Funcionamiento sensor de presión*. España: WIKA.

Norwegian Geotechnical Institute. (1988). *Contract report Norsk Hydro*. Norway: Norwegian Geotechnical Institute.

NSR. (2010). *Titulo H NSR-10*. Bogotá.

Olson, S., & Stark, T. (2003). *Yield strength ratio and liquefaction analysis of slopes and embankments*. England: Geotech Geoenviron.

Parez, L., & Bachelier, M. (1981). *Determines par penetration statique*. Stockholm: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Pournaghiazar, M., Russel, A., & Khalili, N. (2011). *Development of a new calibration chamber for conducting cone penetration test in unsaturated soils*. Canadian: Canadian Geotechnical Journal.

- Powell, J., & Quarterman, R. (1988). The interpretation of cone penetration test in clays, with particular reference to rate effects. Orlando: International Symposium on Penetration Testing.
- Quarterman, R., & Powell, J. (1988). Interpretation and use of the cone piezocone test in UK clays. Birmingham England.
- Rad N. S., & Lunne T. (1988). *Direct correlations between piezocone test results and undrained shear strength of clay*. Orlando: Proceeding 1 International Symposium on Penetration Testing.
- Roberson P.K, & Campanella R.G. (1984). *Guideline for Using CPT, CPTU*. U.S. FHWA Report.
- Robertson, P., & Cabal, K. (2010). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. California: Greeg Drilling and testing.
- Robertson, P. k. (2015). *Introduction to cone penetration testing*. Canada: Gregg.
- Robertson, P., Sully, J., Woeller, D., Lunne, J., Powell, J., & Gillespie, D. (1992). *Estimating consolidaton from piezocone tests*. U.S.A.
- Rodriguez Granados , A. (2013). *Obtención de parámetros geomecánicos con piezocono sísmico en el campus de la Universdiad Nacional sede Bogotá*. Bogotá - Colombia: Universidad Nacional sede Bogotá.
- Rodríguez Granados, E., & Sánchez Salinas , M. (2013). *Análisis comparativo de capacidad portante y asentamientos de pilotes a partir de ecuaciones semi-empíricas, modelos numéricos y ensayos CPTU*. Bogotá - Colombia: Ingeniería y Georiesgos .
- Rodriguez, E. E. (2015). *Curso de Eploración y caracterización del subsuelo con técnicas avanzadas*. Bogotá - Colombia: Ingeniería y Georiesgos.
- Rojas, C. (2008). *Mediciones industriales*. Mexico: <https://cerrmedind.blogspot.com/2008/05/18- acondicionamiento-puente-de.html>.
- Russell, D., & Khalili, N. (2002). *Drained Cavit expansion in sands exhibiting particle crushing*. International Journal for numerical analytical methods in geomechanics.
- S., L., D., D., & Rochelle, L. (1995). *Practical applications of the piezocone in Champlain sea*. Linkoping.

- Sánchez, G. (2010). *Ensayo presiométrico I*. Salamanca - España: Ingeododo.
- Sarmiento, C., & León, D. (2016). *Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Senneset, K., Janbu, N., & Svano, G. (1982). *Strength and deformation parameters from cone penetration tests*. Amsterdam: European Symposium on Penetration Testing.
- Senneset, K., Sandven, R., & Janbu, N. (1989). *Evaluation of soil parameters from piezocone test*. Washington: National Research Council.
- Sepideh Damavandinejad Monfared. (2014). *Miniature Cone Penetration Test on Loose Sand*. Ontario: The University of Western Ontario.
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). *Zonificación de estabilidad de los sectores de pomoroso y miraflores escala 1:5000 para la reubicación del casco urbano del municipio de Gramalote en Norte de Santander*. Bogotá - Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- Shuttle, D., & Jefferies, M. (1998). *Dimensionless and unbiased CPT interpretation in sand*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
- Sills, G., Almeida, M., & Danziger, F. (1988). *Coefficient of consolidation from piezocone dissipation tests in a very soft clay*. Orlando: 1 International Symposium on Penetration testing.
- T, L. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. London: E Y FN SPON.
- Tavena, F., Chapeau, C., Rochelle, P., & Roy, M. (1974). *Immediate settlements for three test embankments on champlain clay*. Canadian: Canadian Geotechnical Journal.
- Tumay M., & Sandven R. (2000). *Continuous intrusion miniature piezocone penetration test in quick soil deposits*. Norway: International society for soil mechanics and geotechnical engineering.
- Tumay, M., & Acar, Y. (1984). *Piezocone penetration testing in soft cohesive soils. In strength testing of marine sediments: laboratory and situ measurements*. U.S.A: American society for testing and Materials.

Vega Salazar, L. L. (2016). *Revisión bibliográfica de ensayos in-situ en el marco de la academia, la industria y las normativas bajo el contexto Colombiano y Norte Americano*. Bogotá: Universidad de los Andes.

Velasco, I. M. (2000). *Instrumentación electrónica*. Burgos: Universidad de Burgos.

Vertek. (2015). *Which is best for your application*. USA: VertekCPT.

Yu, & Mitchell. (1998). *Analysis of cone resistance, review of methods*. JGE ASCE.

Zavoral D.Z. (1988). *Laboratory testing evaluation of cone penetration test co-relations for geotechnical soil parameters*. Vancouver: Department of Geological Engineering. University of British Columbia. Vancouver.

**1. Fecha de Recepción:**

---



---

**Firma del Estudiante**



---

**Firma del Director del Trabajo Dirigido**

**(ESPACIO RESERVADO)**

**Fecha de presentación:** \_\_\_\_\_

**1. Aprobado:** \_\_\_\_\_ **Aplazado:** \_\_\_\_\_ **Rechazado:** \_\_\_\_\_

**Jurado 1:** \_\_\_\_\_

**Jurado 2:** \_\_\_\_\_

**Jurado 3:** \_\_\_\_\_

**1. Observaciones:**

---

---

---

---

---

**Notas:**

- El proyecto se sustentará ante un jurado