

Elaboración de cartilla para la exploración mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS), con fines académicos y enfocada hacia los estudiantes de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga.

Edgar Bernardo Vargas Díaz

Juan Camilo Mantilla Mantilla

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2017

Elaboración de cartilla para la exploración mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS), con fines académicos y enfocada hacia los estudiantes de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga.

Edgar Bernardo Vargas Díaz

Juan Camilo Mantilla Mantilla

Trabajo de grado como requisito para optar el título de ingeniero civil

Director:

Julián André Galvis Flórez

M.Sc. Ingeniería Civil

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2017

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Agradecimientos

A Dios por su infinita misericordia.

A mi esposa Daniela por su amor, comprensión y fe en mi carrera.

A mis padres Bernardo y Mary por su apoyo y consejos.

Edgar B Vargas Díaz

A mis padres José y Estella por darme esta oportunidad de formación profesional.

A mi novia Lesly y a mis amigos por su apoyo.

Juan C Mantilla Mantilla

Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Planteamiento del problema.....	10
2. Justificación	12
3. Objetivos	14
3.1 Objetivo General	14
3.2 Objetivos específicos.....	14
4. Alcance	16
5. Metodología	18
6. Marco Teórico.....	20
6.1 Exploración y Muestreo	21
6.2 Ensayo normal de penetración (SPT) con tubo partido (SS)	23
6.3 Antecedentes sobre SPT en la UPB	25
7. Resultados	26
8. Análisis de Resultados	94
9. Conclusiones	96
10. Recomendaciones	98
Referencias Bibliográficas	100

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ELABORACIÓN DE CARTILLA PARA LA EXPLORACIÓN MEDIANTE EL ENSAYO NORMAL DE PENETRACIÓN (SPT) Y MUESTREO DE SUELOS CON TUBO PARTIDO (SS), CON FINES ACADÉMICOS Y ENFOCADA HACIA LOS ESTUDIANTES DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, SECCIONAL BUCARAMANGA.

AUTOR(ES): EDGAR BERNARDO VARGAS DÍAZ
JUAN CAMILO MANTILLA MANTILLA

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): M.Sc. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

RESUMEN

El objetivo principal fue elaborar una cartilla sobre el ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS), uno de los ensayos de campo más importantes en la exploración y muestreo de la mecánica de suelos, desarrollado por el padre de la geotecnia Karl Von Terzaghi. Este documento fue elaborado con fines académicos, en el cual se encuentra de manera metodológica la realización correcta de este ensayo por medio de imágenes, y cálculos según la normatividad vigente INVIAS. Para la realización de esta cartilla, se llevó a cabo un sondeo en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, donde se tomaron los datos necesarios para corregir el número de golpes que el tubo partido iba penetrando en cada muestra extraída, a partir de allí se calculó el ángulo de fricción con expresiones dadas por diferentes autores. Los resultados de ángulo de fricción obtenidos a través de las correcciones y correlaciones del N de campo del SPT, fueron comparados con los resultados obtenidos del laboratorio de corte directo, con el fin de verificar que tanto difieren. Sin embargo, se observó que algunos resultados que arroja el ensayo normal de penetración (SPT) con tubo partido (SS) están distantes de los de laboratorio, esto podría ser por diferentes variables en el momento de ejecutar el ensayo en campo o en laboratorio. No obstante, el ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS), debe ser usado para obtener muestras del subsuelo y a través del N de campo obtener parámetros de resistencia para evaluar un pre-diseño, siempre es necesario obtener los parámetros de resistencia definitivos para diseño a través de ensayos de laboratorio.

PALABRAS CLAVES:

SPT, cuchara partida, correcciones, correlaciones, ángulo de fricción, corte directo.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ELABORATION OF A PRIMER FOR THE EXPLORATION THROUGH THE STANDARD PENETRATION TEST (SPT) AND SAMPLING OF SOILS WITH SPLIT SPOON (SS), WITH ACADEMIC PURPOSES AND FOCUSED TO THE STUDENTS OF THE UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, SECCIONAL BUCARAMANGA.

AUTHOR(S): EDGAR BERNARDO VARGAS DÍAZ
JUAN CAMILO MANTILLA MANTILLA

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: M.Sc. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

ABSTRACT

The main objective was to develop a primer about the standard penetration test (SPT) with split spoon (SS), one of the most important field tests in the exploration and sampling of soil mechanics, developed by the father of the geotechnical Karl Von Terzaghi. This document was elaborated for academic purposes, in which methodologically the correct implementation of this test is done by means of images, and calculations according to INVIAS current regulations. For the accomplishment of this primer, a test was carried out in the locations at the University, where the necessary data were taken to correct the number of blows that the split spoon was penetrating in each sample extracted from there it was calculated the friction angle with expressions given by different authors. The results of the friction angle obtained through the corrections and correlations of the SPT field N were compared with the results obtained from the direct cutting test in order to verify that they differ so much. However, it was observed that some results from the standard penetration test (SPT) with split spoon (SS) are distant from those of the laboratory, this could be due to different variables at the time of the field or laboratory test. However, the standard penetration test (SPT) with split spoon (SS) must be used to obtain samples from the subsoil and through field N to obtain resistance parameters to evaluate a pre-design, it is always necessary to obtain the parameters of resistance to design through laboratory tests.

KEYWORDS:

SPT, split spoon, corrections, correlations, friction angle, direct cut.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

La exploración y muestreo de suelos es muy importante para evaluar la cimentación de una estructura proyectada, para un estudio preliminar del suelo es usado el ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS), el cual, permite conocer parámetros de resistencia como el ángulo de fricción del subsuelo con tan solo hincar un tomamuestras y contar el número de golpes necesarios para efectuar la penetración.

Un ingeniero con su experiencia puede determinar previamente a que profundidad se podría cimentar, es decir que es posible conocer el tipo de suelo encontrado a medida que se efectúa el proceso de penetración. No obstante, es preciso enviar las muestras al laboratorio para obtener los resultados puntuales necesarios para un diseño preciso.

Este trabajo de grado está enfocado en la realización de una cartilla del ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS) con fines académicos para el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, la cual consiste en brindar una guía del correcto procedimiento y cálculo de correcciones y correlaciones de este tan importante ensayo de campo. Para ello se realizó un sondeo dentro de las instalaciones de la UPB seccional Bucaramanga, allí se tomaron muestras del sub-suelo con la cuchara partida (SS) según los parámetros que exige la norma INVIAS colombiana para su respectivo procedimiento de extracción de muestras, descripción y embalaje. En cada momento

del ensayo de campo se tomó fotos y apuntes en la cartera de campo. Seguido, se envió las muestras al laboratorio para realizarles el ensayo de corte directo necesario para compararlos con las correlaciones del SPT.

Para obtener las correlaciones de ángulo de fricción a través del N de campo corregido del SPT, se utilizó el aporte de importantes padres de la geotecnia que desarrollaron sus expresiones matemáticas para correlacionar el ángulo de fricción a través del N de campo corregido del SPT en suelos granulares.

Comprobando la efectividad de estas correlaciones mediante el ensayo normal de penetración (SPT) respecto de los resultados que se pueden obtener mediante el ensayo de laboratorio de corte directo, se decidió comparar los resultados de ángulo de fricción obtenidos de las correlaciones con los resultados obtenidos del laboratorio. Esto, se realizó como valor agregado a la cartilla.

1. Planteamiento del problema

Durante el planteamiento y ejecución de una obra o proyecto de ingeniería, es necesario contar con datos firmes y confiables acerca del sub suelo donde se cimentará la estructura, con el fin de realizar un diseño adecuado, económico y de excelente calidad.

Los estudios geotécnicos definitivos son obligatorios para todas las edificaciones urbanas y sub-urbanas de cualquier grupo de uso, y para las edificaciones en terrenos no aptos para el uso urbano (MAVDT, 2010). Por consiguiente, la exploración y muestreo son muy importantes y para ello se debe tener en cuenta el método a utilizar, ensayos posteriores respectivos y sus resultados, analizándolos competentemente y teniendo presente a que concierne cada dato.

Desde el punto de vista académico, el profesional debe ser formado con la capacidad de ejecutar esta exploración y muestreo de forma tal que, cada elemento obtenido en campo describa el área a intervenir, dado que el fin es obtener resultados consistentes y relevantes en el laboratorio. Por tanto, el profesional debe contar con las competencias necesarias para obtener muestras con excelentes propiedades y para analizarlas de forma efectiva.

El área de mecánica de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, a pesar de contar con excelentes laboratorios, equipos de alta tecnología y procesos convencionales óptimos, carece de una cartilla para la exploración mediante el ensayo

normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS), con fines académicos, que mejoren la relación entre estos procesos y el usuario de los mismos, ya sea el profesor, el estudiante o el mismo técnico de campo.

Debido a la misión educadora de la universidad, se hace necesario velar porque el estudiante cuente con los medios que fomenten el aprovechamiento de los recursos a su disposición y le doten de competencias que le permitan ser un profesional integral.

Para ello, el presente documento plantea la elaboración de una cartilla que describa uno a uno, los procesos relacionados con el trabajo en campo referente a la exploración mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS), cartilla que tendrá un aporte adicional que lo diferencia de las normas establecidas que hablan acerca del SPT: los datos de ángulo de fricción (ϕ), obtenidos en laboratorio de una muestra de suelo granular, serán comparados con los parámetros establecidos para el ensayo normal de penetración (SPT) respecto al número de golpes.

2. Justificación

Debido a la inexistencia actual de un manual de campo del área de mecánica de suelos en la UPB Seccional Bucaramanga, este proyecto plantea la redacción una cartilla que describa metodológicamente y de forma visual y ordenada el proceso de exploración geotécnica y muestreo mediante el ensayo normal de penetración (SPT) con tubo partido (SS). Esto con el fin de brindar al estudiante de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga una herramienta pedagógica que le permita guiarse para desarrollar los debidos procesos requeridos en una exploración y muestreo para suelos granulares, de manera correcta y fácil de entender, y de analizar los resultados obtenidos.

La cartilla será enfocada para que el estudiante de Ingeniería Civil UPB Seccional Bucaramanga, tenga el conocimiento específico sobre el procedimiento de ensayo normal de penetración (SPT) con tubo partido (SS); como se debe hacer, qué resultados se deben obtener y que correlaciones emplear para la adecuada interpretación de los datos.

Esta cartilla estará disponible en versión física dentro del laboratorio de mecánica de suelos de la UPB seccional Bucaramanga y en versión digital en la plataforma virtual Moodle como “En Curso: Mecánica de Suelos”. De esta manera, tendrá fácil acceso para la comunidad UPB seccional Bucaramanga que necesiten de esta.

La exploración mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido a realizar, va a estar regida por la norma vigente INV E-111-13, NSR 10 Capítulo H y ASTM D-1586, por tanto, la metodología utilizada será confiable.

El tipo de equipo requerido para la investigación sub-superficial depende de diferentes factores, entre los que se pueden mencionar el tipo de material que se encuentre, la profundidad hasta la cual se debe llevar la exploración, la naturaleza del terreno y el uso que va a tener la información obtenida (INVIAS, 2013).

Por otra parte, las imágenes disponibles en esta cartilla, referentes al ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS), serán actuales y tomadas en campo, de forma tal que el estudiante tenga un referente real y disponible en cuanto a recursos a utilizar.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Crear un documento en formato de cartilla que oriente a los estudiantes de la UPB Seccional Bucaramanga, sobre el proceso correcto para realizar una exploración mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS).

3.2 Objetivos específicos

- Recopilar información necesaria sobre exploración mediante ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo con tubo partido (SS).
- Realizar el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido, competente con la norma correspondiente vigente INV E-100 y NSR 10 Título H, mediante un sondeo realizado dentro de las instalaciones del campus universitario.
- Diseñar la cartilla de acuerdo con las normas implicadas, tanto de normatividad técnica como de presentación de publicaciones (normas para presentación de cartilla). Usando graficas de procesos en campo y tablas correspondientes a resultados de laboratorio, para la búsqueda de una pedagogía ilustrativa.

- Comparar ángulo de fricción obtenido en el laboratorio de corte directo con el ángulo de fricción calculado y basado en correlaciones existentes a partir de la ejecución del ensayo normal de penetración (SPT).
- Aportar a la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, los resultados del presente trabajo, para su uso en futuros proyectos en la zona del sondeo.

4. Alcance

Elaboración de una cartilla para la exploración mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS) con fines académicos, y enfocado hacia los estudiantes de la UPB Seccional Bucaramanga.

Para ello, se realizará una exploración y muestreo de un depósito de suelo granular, este proceso y la metodología utilizada, será documentada, por medio de instrucciones e ilustraciones, en orden, desde la perforación y toma de muestras en campo hasta el análisis comparativo de resultados obtenidos del laboratorio, usando procesos y herramientas convencionales, conformando así la cartilla.

El proceso de exploración y muestreo del suelo se hará por medio de un sondeo utilizando el ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS).

Como valor agregado, los datos de ángulo de fricción (ϕ), obtenidos posteriormente en el análisis en laboratorio de las muestras tomadas en campo, será comparado con los parámetros establecidos para el ensayo normal de penetración (SPT) respecto al número de golpes.

A través de la elaboración de la cartilla se pretende profundizar de forma clara y dinámica, el uso, el porqué, para que, cuando y como se debe utilizar el ensayo normal de penetración (SPT)

con cuchara partida (SS) y todo el proceso que conlleva una exploración y muestreo con este método. Esto con el fin de aprovechar este recurso y fomentarlo en la comunidad UPB seccional Bucaramanga, dado que la utilización de este ensayo es común en muchos países debido a la rapidez y facilidad de obtención de parámetros de resistencia de un suelo.

Dicha cartilla, estará disponible para ser usada por los estudiantes y profesores del curso de mecánica de suelos, disponible en formato físico y en formato digital a través de la plataforma educacional Moodle.

5. Metodología

En primera instancia se investigó a fondo, usando fuentes confiables, tal como las normas INV E-100 y NSR 10 Título H, normas técnicas colombianas, ensayos, publicaciones, libros y manuales de mecánica de suelos. Esto, para tener claro los conceptos necesarios, referentes a exploración y muestreo de suelos mediante el ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS).

Acorde a una planeación, se identificó la ubicación dentro de las instalaciones del campus universitario de la UPB seccional Bucaramanga del lugar donde se hizo la toma de muestras y ensayos de campo. Donde se realizó el ensayo de campo, como lo fue un sondeo manual mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y el muestreo de suelos con tubo partido (SS).

Durante la exploración se identificó que no había nivel freático presente en el depósito de suelo sondeado, seguido del muestreo, se describió las muestras de acuerdo a sus espesores, color, humedad y consistencia mediante chequeo visual, para así determinar el perfil estratigráfico del terreno.

Así mismo, se planeó la conservación y transporte de las muestras de suelo para enviarlas a analizar al laboratorio. Esto con el fin de determinar los parámetros de resistencia respecto al ángulo de fricción interno del suelo mediante el ensayo de corte directo.

Seguido se procedió a la ejecución de lo planeado anteriormente, para esto, se realizó la exploración y muestreo de un depósito de suelo, desde la toma de muestras en campo hasta la obtención de resultados en el laboratorio mediante los procesos anteriormente mencionados.

Posteriormente, usando los resultados obtenidos en el laboratorio se compararon estos con los parámetros de resistencia de suelo relacionados con el número de golpes del SPT.

Finalmente, dichos procesos fueron documentados en una cartilla. En esta cartilla se explicó a fondo el funcionamiento y proceso de la exploración y muestro mediante el ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS), se dejó claro para que sirve, cómo y con qué herramientas se debe realizar, y cuando debe hacerse, se llevó un proceso fotográfico aclarando la metodología a seguir.

6. Marco Teórico

Para el establecimiento de un proyecto de construcción de cualquier tipo de obra civil, agrícola, pecuaria o forestal, es imperativo obtener datos cuantitativos del suelo y de la roca del lugar sobre el que se fundamentará dicho proyecto.

El muestreo y la identificación de materiales del subsuelo implican técnicas simples y complejas, acompañadas de procedimientos e interpretaciones diferentes, las cuales están influenciadas por las condiciones geológicas y geográficas, por el propósito de la investigación y por los conocimientos, la experiencia y el entrenamiento del ingeniero (INVIAS, 2013) Facilitar la obtención de estos datos, es el objetivo principal de una investigación exploratoria, con pruebas de campo y de laboratorio incluidas.

La investigación del subsuelo comprende el estudio y el conocimiento del origen geológico, la exploración del subsuelo (apiques, trincheras, perforación, sondeos y otros) y los ensayos y pruebas de campo y laboratorios necesarios para identificar y clasificar los diferentes suelos y rocas y cuantificar las características físico-mecánicas e hidráulicas del sub-suelo (MAVDT, 2010).

La obtención apropiada de las muestras del suelo para la realización de las pruebas correspondientes, son una etapa previa de carácter imprescindible para lograr resultados de

laboratorio óptimos. El profesional encargado debe alcanzar un claro entendimiento acerca de los problemas que podrían presentarse con el lugar donde se realizará la obra. Esto, a partir de información preliminar suficiente y veraz acerca del suelo, basado en pruebas clasificatorias tales como granulometrías, humedad, plasticidad, sistema de clasificación AASHTO, etc.

Profesiones afines a la Ingeniería Geotécnica, como la Geología, son fundamentales para obtener información general y sumamente importante sobre el suelo, información previa que será de gran utilidad para el profesional en mecánica de suelos gestor del muestreo.

6.1 Exploración y Muestreo

La exploración de terreno suministra datos acerca de las condiciones del subsuelo del lugar, así como también proporciona muestras del suelo para inspección, para clasificación, para ensayo de resistencia y/o deformación (Bowles, 1982, pág. 73). La exploración es un proceso necesario para conocer las propiedades del suelo, para ello existen los métodos directos de exploración o métodos intrusivos y los métodos indirectos. Los métodos directos de exploración son las excavaciones a través de la perforación de pozos a cielo abierto; métodos superficiales como trinchera y apiques; sondeos como método manual de perforación; y métodos mecánicos de exploración profunda. Los métodos indirectos de exploración corresponden a ensayos intrusivos in situ y métodos geofísicos no intrusivos.

El objetivo de los métodos de exploración es obtener muestras del suelo que nos darán la orientación para definir el tratamiento y/o uso del suelo a explorar.

La investigación de suelos y rocas subyacentes a la superficie requiere la toma de muestras representativas y de calidad tal, que permitan determinar la clasificación del suelo o el tipo mineralógico de la roca, o ambos, así como las propiedades de ingeniería pertinentes al diseño propuesto (INVIAS, 2013). Los tipos de muestra de suelos son: muestra alterada, la cual es representativa del suelo, conserva su humedad natural y composición mineral, sin conservar la estructura y condiciones propias de cuando estaba en el terreno; y la muestra inalterada que aparte de conservar la humedad y composición mineral natural, también conserva su estructura original.

Se deben obtener muestras representativas de suelo o de roca, o de ambos, de cada material encontrado que sea de importancia para el diseño y la construcción. El tamaño y el tipo de las muestras dependen de los ensayos que se vayan a efectuar o del porcentaje de partículas gruesas en la muestra, así como de las limitaciones del equipo de ensayo por emplear (INVIAS, 2013).

Para el manejo adecuado de las muestras de suelo se debe evitar su contaminación con agentes extraños, para evitar la pérdida de sus propiedades, esto a través de una correcta manipulación, embalaje, etiquetado y transporte.

Según INVIAS en la norma INVE 100, para el proceso de exploración y muestreo se deben llevar a cabo los siguientes procedimientos y ensayos:

- Investigación de suelos y rocas para propósitos de Ingeniería.
- Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual).
- Conservación y transporte de muestra de suelo.

- Toma de muestras inalteradas de suelo en superficie.
- Obtención de muestras de suelo mediante tubos de pared delgada.
- Preparación en seco de muestras de suelo por vía seca para análisis granulométrico y determinación de las constantes físicas.
- Perforaciones con brocas y muestreo para investigación en el sitio.
- Muestreo de suelos con tubo partido de pared gruesa y revestimiento de anillos.
- Ensayo Normal de penetración SPT y muestreo de suelos con tubo partido.
- Exploración y muestreo de suelos mediante barrena.
- Conservación y Transporte de núcleos de roca.

6.2 Ensayo normal de penetración (SPT) con tubo partido (SS)

El ensayo normal de penetración (SPT), fue desarrollado en los años 20 por el Ingeniero Checo, Karl Von Terzaghi, conocido como el padre de la Ingeniería Geotécnica. Este procedimiento es, entre todos los exploratorios preliminares, quizá el que rinde mejores resultados en la práctica y proporciona más útil información entorno al subsuelo y no solo en lo referente a descripción; probablemente es también el más ampliamente usado para esos fines (Juarez Badillo & Rico Rodriguez, 1993, pág. 620).

Este ensayo permite conocer el comportamiento mecánica través de la compacidad de los estratos en suelos puramente friccionantes. Para suelos plásticos el ensayo revela una idea aproximada sobre la resistencia a la compresión simple.

Una de las ventajas principales de este ensayo de exploración, es que a su vez proporciona el proceso de muestreo, al contar con un equipo muestreador (cuchara o tubo partido) que almacena tomas alteradas mientras el equipo penetra el suelo. El tubo partido o penetrómetro va enroscado al extremo de la tubería de perforación.

La prueba consiste en hacerlo penetrar a golpes dado por un martinete de 63.5 kg (140 lb) que cae desde 76 cm (30 pulgadas), contando el número de golpes necesario para lograr una penetración de 15 cm (6 pulgadas). El martinete, hueco y guiado por la misma tubería de perforación, es elevado manualmente, o por un cable que pasa por la polea del trípode y dejado caer desde la altura requerida contra un ensanchamiento de la misma tubería de perforación hecho al efecto (Juarez Badillo & Rico Rodriguez, 1993, pág. 621). Cada vez que la penetración haya avanzado 45 cm (18 pulgadas), la tubería de penetración junto con el muestreador deben ser retirados del sondeo, para poder desenroscar el tubo partido (SS) del extremo y así extraer la muestra que se encuentra dentro.

El número de golpes por pie mencionado en el párrafo anterior (últimos 30 cm), se conoce como el N de campo, si este número es pequeño, el tubo ha penetrado de manera fácil en el suelo, se puede inferir que el terreno es blando para este caso, entre mayor sea este número, más consistente y de mejor calidad será el suelo.

El proceso de sondeo termina cuando se haya alcanzado la profundidad requerida o cuando se presente la condición de rechazo, para ello debe ocurrir una de las siguientes causales:

- Cuando se han alcanzado 50 golpes en 15 centímetros (6 pulgadas) de profundidad.

- Cuando en un avance (18 pulgadas) se han acumulado 100 golpes.
- Cuando no se observa penetración del suelo dados los primeros 10 golpes, esta condición es conocida como rechazo.

6.3 Antecedentes sobre SPT en la UPB

En la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, existen dos antecedentes de tipo trabajo de grado con la dirección del M.Sc. Gerardo Bautista García, relacionados con el ensayo normal de penetración (SPT).

En dichos trabajos de grado se evidencia la importancia de este ensayo: “El ensayo de penetración estándar es muy utilizado, para determinar la resistencia del suelo a la penetración, mediante el número de golpes con una pesa y una caída libre según la norma INVE 111 y al tiempo, permite obtener una muestra representativa para su clasificación” (Jaimes Espinel & Rojas Moreno, 2006, pág. 10).

“Vale la pena aclarar que el ensayo de penetración estándar de ninguna manera reemplaza a los ensayos de laboratorio, necesario para determinar las propiedades físicas de los diferentes suelos, pero si le puede dar al ingeniero de suelos una idea preliminar del tipo de suelo encontrado al correlacionar sus resultados con curvas de calibración previamente elaboradas en el sector que se está estudiando” (Bautista Gracia & Lozano Monsalve, 2004, pág. 6).

7. Resultados

Cartilla para la exploración mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS)

Edgar Bernardo Vargas Díaz

Estudiante Ingeniería Civil

Tecnólogo en Supervisión de Obras Civiles

Juan Camilo Mantilla Mantilla

Estudiante Ingeniería Civil

Universidad Pontificia Bolivariana

Seccional Bucaramanga

2017

Cartilla para la exploración mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS)

Edgar Bernardo Vargas Díaz

Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Pontificia Bolivariana

Tecnólogo en Supervisión de Obras Civiles. Universidad de Santander

Juan Camilo Mantilla Mantilla

Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Pontificia Bolivariana

© Universidad Pontificia Bolivariana

Reservados todos los derechos

Primera edición: enero 2017

Diseño, diagramación e impresión:

Edgar Vargas y Camilo Mantilla

Contacto: 3177009474 – 3167405808

Bucaramanga – Colombia

edgar.vargas.2013@upb.edu.co

juan.mantillam@upb.edu.co

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio, sin autorización escrita de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

Impreso en Colombia

A Dios por su infinita misericordia

A mi esposa Daniela por su amor, comprensión y fe en mi carrera

A mis padres Bernardo y Mary por su apoyo y consejos

Edgar B Vargas Díaz

A mis padres José y Estella por permitirme esta oportunidad de formación profesional

A mi novia Lesly y a mis amigos por su apoyo

Juan C Mantilla Mantilla

Contenido

	Pág.
1. Generalidades.....	36
2. Normatividad colombiana.....	38
3. Ensayo normal de penetración (SPT) con tubo partido (SS)	39
3.1 Definición.....	39
3.2 Equipo	40
3.2.1 Equipo de Perforación	40
3.2.2 Tuberías de perforación	42
3.2.3 Tomamuestras de tubo partido	42
3.2.4 Martillo y Yunque	44
3.2.5 Sistema de caída	45
3.3 Procedimiento de campo	47
3.3.1 Paso 1.....	47
3.3.2 Paso 2.....	49
3.3.3 Paso 3.....	50
3.3.4 Paso 4.....	51
3.3.5 Paso 5.....	52
3.3.6 Paso 6.....	53
3.3.7 Paso 7.....	54
3.3.8 Paso 8.....	54
3.3.9 Paso 9.....	55
3.3.10 Paso 10.....	56
3.3.11 Paso 11.....	56
3.3.12 Paso 12.....	57
3.3.13 Paso 13.....	59

3.3.14 Paso 14.....	60
3.3.15 Paso 15.....	61
3.3.16 Paso 16.....	61
3.3.17 Paso 17.....	62
3.3.18 Paso 18.....	62
3.3.19 Paso 19.....	62
4. Correcciones y correlaciones	64
4.1 Teoría de corrección del n campo	64
4.1.1 Energía del martillo	64
4.1.2 Corrección por confinamiento.....	65
4.1.3 Corrección del n de campo	66
4.2 Teoría de correlación del SPT.....	68
4.2.1 Ángulo de fricción interna del suelo [ϕ']	69
5. Aplicación de campo.....	71
5.1 Cartera de campo del sondeo	72
5.2 Aplicación de corrección de n de campo	75
5.2.1 Procedimiento de corrección del n de campo.....	75
5.2.1.1 Paso 1	75
5.2.1.2 Paso 2.....	75
5.2.1.3 Paso 3.....	78
5.2.1.4 Paso 4.....	78
5.2.1.5 Paso 5.....	79
5.2.1.6 Paso 6.....	79
5.2.1.7 Paso 7.....	79
5.2.1.8 Paso 8.....	79
5.2.2 Corrección del N de campo del sondeo	81
5.3 Aplicación correlación ángulo de fricción [ϕ'].....	83
5.3.1 Procedimiento de correlación ángulo de fricción [ϕ'].....	83
5.3.1.1 Correlación de Peck.....	83
5.3.1.2 Correlación de Peck, Hanson y Thornburn	84
5.3.1.3 Correlación de Kishida	84

5.3.1.4 Correlación de Shioi y Fukui	85
5.3.2 Correlación ángulo de fricción [ϕ] del sondeo	85
6. Resultados ensayos de laboratorio	86
6.1 Clasificación de las muestras	86
6.2 Resultados ensayo de corte directo	90
7. Comparación de ángulo de fricción [ϕ]	91

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Dibujo esquemático de equipo SPT con SS.	40
Figura 2. Herramienta manual posteadora.	41
Figura 3. Herramientas de mano.	41
Figura 4. Tubería de perforación.	42
Figura 5. Muestreador de tubo partido.	43
Figura 6. Muestreador de tubo partido abierto.	43
Figura 7. Esquema tomamuestras de tubo partido.	44
Figura 8. Martinete: Martillo tipo dona y Yunque.	44
Figura 9. Esquema de tipos de martinete.	45
Figura 10. Trípode del sistema de caída.	46
Figura 11. Perno y cadena del sistema de caída.	46
Figura 12. Motor para sistema de caída.	47
Figura 13. Ubicación de los sondeos.	48
Figura 14. Lugar de los sondeos dentro de la UPB Bucaramanga.	48
Figura 15. Montaje del trípode.	49
Figura 16. Unión punta, muestreador y primera tubería de perforación.	49
Figura 17. Ensamble SPT.	50
Figura 18. Retiro de capa vegetal.	50
Figura 19. Excavación con herramienta manual posteadora.	51
Figura 20. Excavación inicial.	51
Figura 21. Muestra tomada de la excavación inicial.	52
Figura 22. Hincado de muestreador y tubería de perforación.	52
Figura 23. Marca del nivel 0.	53
Figura 24. Tres marcas cada 6 pulgadas.	53

Figura 25. Enroscado del martinete a la tubería de perforación.	54
Figura 26. Se marcan otras 18 pulgadas cada 6 pulgadas.	55
Figura 27. Desenroscado del martinete.	56
Figura 28. Retiro de la tubería de perforación enroscada al muestreador.	57
Figura 29. Desenroscado del muestreador de la tubería de perforación.	58
Figura 30. Desenroscado de la punta del muestreador.	58
Figura 31. Abertura de la cuchara partida (Split Spoon - SS).	59
Figura 32. Muestra embalada y etiquetada.	60
Figura 33. Adición de tubería de perforación.	60
Figura 34. Unión martinete con tubería de perforación adicionada.	61
Figura 35. Equipo para el Ensayo de Corte Directo.	63
Figura 36. Perfil estratigráfico de la muestra 5 del sondeo.	75
Figura 37. N de campo y N_C de campo corregido en varios sistemas de energía vs. profundidad del sondeo.	82
Figura 38. Gráfico de ángulo de fricción vs. profundidad de la muestra 5, comparando el ángulo de fricción del resultado de laboratorio con el de diferentes autores de correlaciones de SPT.	92

Lista de Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Calculo de factor de golpes N_s referidos a un sistema de energía estándar.....	65
Ecuación 2. Calculo de la corrección de N de campo por presión de sobrecarga.	66
Ecuación 3. Expresión para corregir el N de campo.....	67
Ecuación 4. Expresión correlación ϕ' , de Peck.	83
Ecuación 5. Expresión correlación ϕ' , de Peck, Hanson y Thornburn.	84
Ecuación 6. Expresión correlación ϕ' , de Kishida.....	84
Ecuación 7. Expresión correlación ϕ' , de Shioi y Fukui (1982).....	85

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Factores n_i para corrección del N de campo.	68
Tabla 2. Expresiones utilizadas para calcular ϕ' equivalente a partir del SPT.	69
Tabla 3. Expresión utilizada para calcular ϕ' equivalente a partir del SPT.	70
Tabla 4. Cartera de campo - Perfil estratigráfico del sondeo.	72
Tabla 5. N de campo del sondeo, corregido al 70% de energía.	81
Tabla 6. Resumen N de campo del sondeo, corregido a varios porcentajes de energía.	81
Tabla 7. ϕ' correlacionado con N_C del sondeo 1 por medio de varias expresiones.	85
Tabla 8. Clasificación de la muestra 1-2.	86
Tabla 9. Clasificación de la muestra 3.	87
Tabla 10. Clasificación de la muestra 4.	88
Tabla 11. Clasificación de la muestra 5.	89
Tabla 12. Resultados corte directo CU, muestra 5.	90
Tabla 13. Comparación ángulo de fricción correlacionado del SPT con ángulo de fricción obtenido en el ensayo de corte directo, para la muestra 5.	91

1. Generalidades

La exploración y muestreo de suelos es un proceso mediante el cual se obtiene datos cuantitativos del suelo y de la roca del lugar sobre el que se fundamentará un proyecto de construcción de cualquier tipo de obra civil, agrícola, pecuaria o forestal.

Por tanto, es de vital importancia, utilizar un método que permita obtener muestras apropiadas y suficientemente descriptivas del suelo para así poder conocerlo mediante pruebas clasificatorias tales como granulometrías, humedad, plasticidad, sistema de clasificación AASHTO, etc.

Para este fin, el proceso más adecuado, que involucra al mismo tiempo la exploración y muestreo para suelos granulares, recibió definitivamente su nombre: ensayo de penetración estándar, desde 1947 por parte del reconocido Ingeniero y padre de la mecánica de suelos, Karl Von Terzaghi, a partir de estudios previos que datan desde el año 1902, a cargo de diferentes investigadores. Posteriormente, sólo a partir del 1967 la American Standard Testing Method (ASTM), le dio al ensayo de penetración estándar, la categoría de norma – ASTM D1586, estandarizando de esta manera su uso.

Aunque este procedimiento es denominado “standard”, el ensayo de penetración tiene muchas variantes debido la configuración del equipo, lo cual repercute directamente en los resultados y cálculos, entre estas variables se encuentran:

- Equipos fabricados por diferentes tipos de empresas.
- El tipo de martillo que se utiliza para hincar, puede ser tipo dona o de seguridad.
- El control de la altura de la caída del martillo.
- Si hay o no revestimiento interno en las paredes del muestreador, generalmente no se usa.
- El diámetro de perforación y las medidas tomadas al tubo de perforación.

2. Normatividad colombiana

Ensayo Normal de Penetración (SPT) y Muestreo de Suelos con Tubo Partido, es el nombre que recibe en Colombia mediante el INV E – 111 – 13 de las normas de ensayo avaladas por el Instituto Nacional de Vías INVIAS.

Este es el procedimiento conocido como ensayo normal de penetración (*Standard Penetration Test – SPT*), el cual consiste en conducir un muestreador de tubo partido dentro del suelo para obtener muestras alteradas representativas con fines de identificación, y medir la resistencia del suelo a la penetración del muestreador (INVIAS, 2013).

3. Ensayo normal de penetración (SPT) con tubo partido (SS)

Este ensayo es ampliamente usado en proyectos de exploración geotécnica y sirve para obtener muestras alteradas en suelos granulares, dichas muestras son necesarias para realizar ensayos posteriores en el laboratorio sobre contenido de humedad e identificación del suelo. Así mismo, a través de este ensayo, y sin necesidad de otros ensayos posteriores se puede tener una importante idea sobre las propiedades del suelo, como lo son el ángulo de fricción y cohesión interna (parámetros de resistencia del suelo), mediante la correlación del número de golpes necesarios en el sondeo.

3.1 Definición

El ensayo normal de penetración (SPT - Standard Penetration Test) y muestreo de suelos con tubo partido (SS - Split Spoon), es un tipo de prueba necesario para explorar y extraer una muestra de suelo natural alterada en suelos granulares donde se planea construir una obra civil. Dicho ensayo consiste en contar el número necesario de veces que debe dejarse caer un peso sobre un yunque para lograr penetrar el suelo 18 pulgadas y obtener una muestra del sub-suelo, repitiendo este proceso hasta lograr la profundidad del sondeo requerida según el tipo de construcción proyectada.

3.2 Equipo

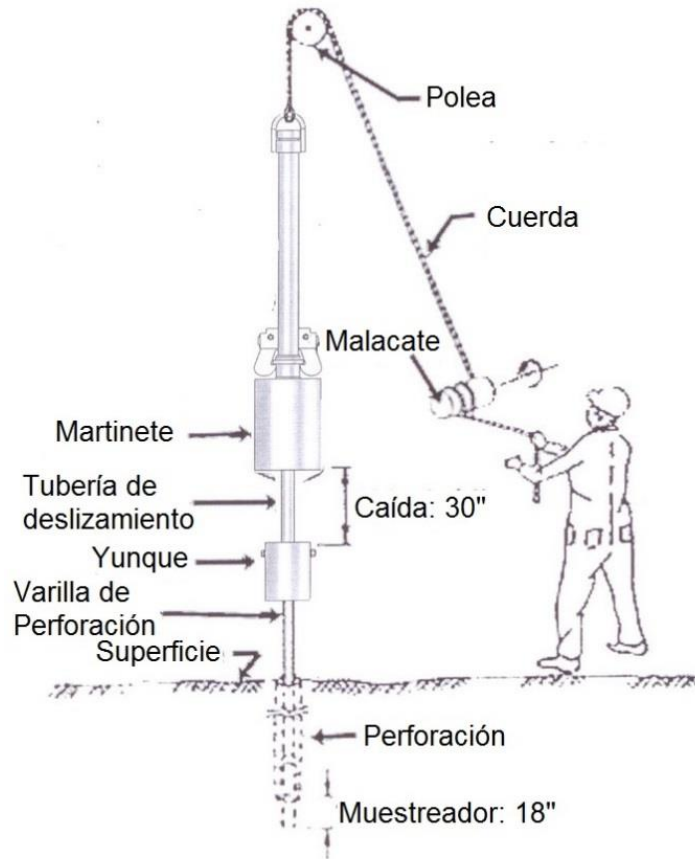


Figura 1. Dibujo esquemático de equipo SPT con SS.

Fuente: Traducción propia modificada de: Google. Penetrómetros estáticos. Recuperado de:

<http://nubr.co/FRYihW>

3.2.1 Equipo de Perforación

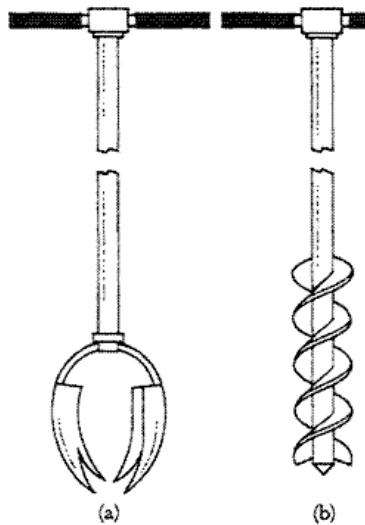
Es permitido el uso de cualquier equipo de perforación, siempre y cuando, este realice un orificio adecuado simultáneamente con el muestreo, antes de insertar el tomamuestras, de tal manera, que el suelo no sea alterado antes de la penetración del tubo muestreador. Los equipos

de perforación más usados son los de tipo broca, y los de tipo herramienta de mano como barrena posteadora o helicoidal.



Figura 2. Herramienta manual posteadora.

Fuente: Fotografía de autoría propia.



- (a) Barrena posteadora para hoyos.
- (b) Barrena Helicoidal.

Figura 3. Herramientas de mano.

Fuente: Blog del ingeniero Civil. (5 de diciembre de 2010) Herramientas de mano. Recuperado de: http://ingenieriaciviltips.blogspot.com.co/2010_12_01_archive.html

3.2.2 Tuberías de perforación

Son tubos de acero de perforación de junta lisa, usados para unir el tomamuestras con el martinete.



Figura 4. Tubería de perforación.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.2.3 Tomamuestras de tubo partido

Cuchara partida (SS – Split spoon) o tubo partido, es un elemento hueco de acero templado de 18 pulgadas de longitud, el cual almacena en su interior la muestra de suelo durante a la penetración.



Figura 5. Muestreador de tubo partido.

Fuente: Fotografía de autoría propia.



Figura 6. Muestreador de tubo partido abierto.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

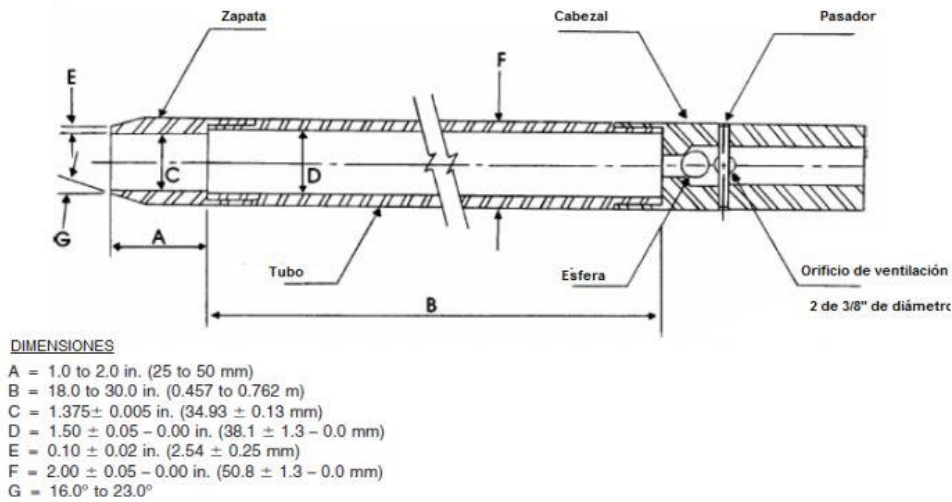


Figura 7. Esquema tomamuestras de tubo partido.

Fuente: Norma de ensayo INV E – 111 – 13

3.2.4 Martillo y Yunque

El martillo es una masa metálica rígida y sólida, la cual pesa 63.5kg (140 lb). Este tiene un hueco dispuesto para ser guiado por la tubería de perforación y así cuenta con una caída libre de 76 cm (30 pulgadas) sobre un yunque dispuesto para recibir el golpe del martillo y así transmitir la energía necesaria para penetrar el suelo.



Figura 8. Martinete: Martillo tipo dona y Yunque.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

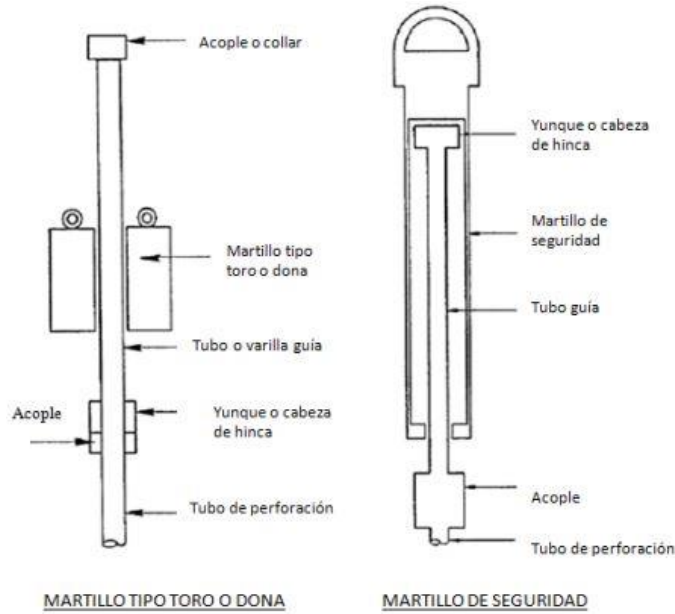


Figura 9. Esquema de tipos de martinete.

Fuente: Norma de ensayo INV E – 111 – 13

3.2.5 Sistema de caída

Se pueden emplear diferentes tipos de sistemas, siempre y cuando, el proceso de izado no provoque penetración del tomamuestras en el suelo cuando se está enganchando y levantando el martillo. Algunos de estos sistemas pueden ser: malacate-cable o sistemas automáticos y semiautomáticos.



Figura 10. Trípode del sistema de caída.

Fuente: Fotografía de autoría propia.



Figura 11. Perno y cadena del sistema de caída.

Fuente: Fotografía de autoría propia.



Figura 12. Motor para sistema de caída.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3 Procedimiento de campo

A continuación, se plantea un proceso debidamente descrito paso a paso para desarrollar correctamente el ensayo normal de penetración estándar SPT con cuchara partida SS.

3.3.1 Paso 1

Se realiza la ubicación y replanteo del sitio de los sondeos. primero que nada, se establece el lugar donde se llevara a cabo la perforación para extraer las muestras, retirando la maleza de la

zona de excavación. En esta imagen se observa el campus universitario UPB donde se ejecutará el ensayo SPT.



Figura 13. Ubicación de los sondeos.

Fuente: Fotografía aérea tomada de Google Earth ©

En la siguiente imagen se muestra el lugar donde se realizará el sondeo, donde a futuro será posiblemente un paso peatonal para la comunidad UPB.



Figura 14. Lugar de los sondeos dentro de la UPB Bucaramanga.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.2 Paso 2

Ubicación del motor del sistema de caída, montaje del trípode, conexión del muestreador con el primer tubo de perforación y tener a mano el martinete (martillo y yunque).



Figura 15. Montaje del trípode.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

En la siguiente imagen se ve la unión del tubo muestreador (SS) junto con la tubería de perforación que se hincará en el momento de ejecutar el ensayo SPT.



Figura 16. Unión punta, muestreador y primera tubería de perforación.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

En la siguiente figura, se observa debidamente ensamblado la tubería de perforación, el muestreador y su punta, el sistema de yunque y martillo, y finalmente la guía sobre la que está el sistema de martinete, la cual irá sujeta al trípode.



Figura 17. Ensamble SPT.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.3 Paso 3

Descapote y limpieza del lugar de los sondeos, en este proceso se retira la capa vegetal superficial.



Figura 18. Retiro de capa vegetal.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.4 Paso 4

Usando la herramienta manual posteadora, se excava la profundidad necesaria para posicionar el muestreador. Este material excavado corresponde a la muestra 1 del sondeo.



Figura 19. Excavación con herramienta manual posteadora.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

Con la ayuda de la herramienta manual posteadora se excava y se extrae material quitando material orgánico, raíces y capa vegetal.



Figura 20. Excavación inicial.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

El material extraído en esta primera perforación, se almacena en una bolsa, como muestra.



Figura 21. Muestra tomada de la excavación inicial.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.5 Paso 5

Se hincan la tubería de perforación conectada al muestreador, de tal manera que el muestreador quede dentro de la excavación, como se muestra en el ítem 3.3.4.



Figura 22. Hincado de muestreador y tubería de perforación.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.6 Paso 6

Se toma el primer tubo de perforación y se marca un origen o punto 0.



Figura 23. Marca del nivel 0.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

Seguido se marcan tres partes de 6 pulgadas completando 18 pulgadas en total.



Figura 24. Tres marcas cada 6 pulgadas.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.7 Paso 7

Se enrosca el martinete con el primer tubo de perforación.



Figura 25. Enroscado del martinete a la tubería de perforación.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.8 Paso 8

Se procede a dar los golpes, dejando caer la pesa de 140 lb desde una altura de 30 pulgadas sobre el yunque. Seguidamente se inicia el conteo del número de veces necesarias que cae el martillo para que la tubería de perforación penetre el subsuelo cada 6 pulgadas previamente marcadas.

3.3.9 Paso 9

Cuando la tubería penetre las primeras 18 pulgadas, se debe tener el registro del número de golpes necesario que requirió. A continuación, se le debe volver a hacer tres marcas a la tubería de perforación cada 6 pulgadas, es decir se marcan otras 18 pulgadas.



Figura 26. Se marcan otras 18 pulgadas cada 6 pulgadas.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.10 Paso 10

Se procede a seguir dejando caer el martillo sobre el yunque, y de igual modo a contar y registrar el número de veces (número de golpes) necesarias que esto sucede, para penetrar el suelo cada 6 pulgadas, hasta obtener las nuevas 18 pulgadas de profundidad marcadas en el ítem anterior. Estas segundas 18 pulgadas, corresponden al avance de la perforación. De este modo, la tubería hasta este punto lleva perforado 36 pulgadas.

3.3.11 Paso 11

Ahora se desmonta el martinete y se procede a retirar toda la tubería de perforación que ha entrado en el suelo, para así poder retirar el muestreador (cuchara partida – SS), el cual se encuentra enroscado en la punta y ya está lleno con la muestra a obtener.



Figura 27. Desenroscado del martinete.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

Con ayuda de la cadena del trípode, sujeta a la tubería de perforación, se extrae todo el conjunto, es decir, la tubería de perforación junto con el muestreador, usando la manivela o el motor según sea el equipo que se esté utilizando.



Figura 28. Retiro de la tubería de perforación enroscada al muestreador.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.12 Paso 12

Se desenrosca el muestreador de la tubería de perforación, luego, se desenrosca la punta del muestreador para poder abrir la cuchara partida y así poder proceder a la extracción de la muestra.



Figura 29. Desenroscado del muestreador de la tubería de perforación.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

Se desenrosca la punta del tubo muestreador y se golpea suavemente para poder abrir el muestreador y así, obtener la muestra de suelo contenida.



Figura 30. Desenroscado de la punta del muestreador.

Fuente: Fotografía de autoría propia.



Figura 31. Abertura de la cuchara partida (Split Spoon - SS).

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.13 Paso 13

Se extrae la muestra de la cuchara partida envolviéndola con sumo cuidado de tal manera que no se afecten la humedad ni ninguna propiedad natural contenida en dicha muestra. Durante este proceso, se observa la muestra y se le da una descripción basada en su textura y color. Luego de esto se procede a etiquetarla indicando el número del sondeo, el número de muestra, la profundidad y se señala la punta de la muestra (la parte más profunda). No obstante, el número de etiqueta se debe registrar en la cartera de campo donde se está registrando el número de golpes para así tener claro a que profundidades y a que sondeo pertenece cada muestra obtenida.



Figura 32. Muestra embalada y etiquetada.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.14 Paso 14

Ahora, se vuelve a cerrar el muestreador enroscándole la punta, se conecta la tubería de perforación usada anteriormente y este conjunto se coloca nuevamente dentro del sondeo, se le adiciona una nueva tubería de perforación de tal manera está sobresalga sobre el nivel 0.



Figura 33. Adición de tubería de perforación.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.15 Paso 15

Ahora se enrosca el martinete y se le añaden las tres marcas cada 6 pulgadas a la nueva tubería de perforación que sobresale del suelo



Figura 34. Unión martinete con tubería de perforación adicionada.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

3.3.16 Paso 16

Se repite el mismo procedimiento a partir del ítem 3.3.8, las veces necesarias hasta completar la profundidad del sondeo requerida, e ir obteniendo la cantidad de muestras de suelo resultantes. La profundidad total del sondeo necesaria según el tipo de construcción, se encuentra consignada en la Norma de Diseño Sismo resistente NSR-10 en el título H.

3.3.17 Paso 17

Se obtienen las muestras del subsuelo y se consigna en la cartera de campo la realización de una descripción por observación de dicha muestra, esta descripción de la muestra de suelo se hace de acuerdo la Norma de Ensayos de Materiales para Carreteras INV E – 13 del Instituto Nacional de Vías INVIAS en la sección 100 I.N.V.E – 102.

3.3.18 Paso 18

Se transportan las muestras debidamente embaladas y etiquetadas, con el mayor de los cuidados, llevándolas de esta manera al laboratorio de suelos. La conservación y transporte de muestras de suelos, de forma apropiada, se encuentra consignada en la Norma de Ensayos de Materiales para Carreteras INV E – 13 del Instituto Nacional de Vías INVIAS en la sección 100 I.N.V.E – 104.

3.3.19 Paso 19

Se ejecuta el ensayo correspondiente en el laboratorio de suelos. Dicho ensayo se encuentra consignado en la Norma de Ensayos de Materiales para Carreteras INV E – 2013 del Instituto Nacional de Vías INVIAS en la sección 100, norma INVE -154. Para fines del presente proyecto, el laboratorio a realizársele a las muestras es el Ensayo de Corte Directo. Así mismo y de manera previa, en laboratorio se aplicará lo concerniente para obtener la clasificación del suelo.



Figura 35. Equipo para el Ensayo de Corte Directo.

Fuente: Fotografía de autoría propia.

4. Correcciones y correlaciones

4.1 Teoría de corrección del n campo

4.1.1 Energía del martillo

El tipo de martillo y el procedimiento usado en los golpes en el ensayo de penetración Standard (SPT), afecta directamente la energía de hincado del tomamuestras. Por esta razón, cuando el SPT se va a correlacionar con los parámetros del suelo, es necesario tener en cuenta todos los procedimientos de campo usados en el sondeo. Por tanto, diversos estudios como los de Kovacs y Salomone en 1982, o Schmertmann en 1978, se encaminaron a estudiar las variables que afectan directa e indirectamente la energía que recibe el tomamuestras a momento de la penetración.

La energía efectiva entregada por el martillo, es denominada, relación de energía ER. Para el martillo corto macizo, también conocido como martillo tipo Donut, esta relación de energía corresponde al 45% de la energía teórica de 475 J. En el caso del martillo de seguridad, esta relación es del 60%. Dado lo anteriormente mencionado, se deduce que, en el mismo suelo, el martillo de seguridad requeriría un menor número de golpes que el martillo tipo donut, indicando así una resistencia más baja del suelo para el caso del martillo de seguridad y una más alta para el martillo tipo donut. Por esto, en varios países, se usan martillos con rendimientos similares al

de seguridad y se usa relación de energía del 60%, no obstante, en 1988, Bowles sugirió un 70% como relación de energía. En Colombia se utiliza una relación del 45%. Obteniendo N golpes en un ensayo de penetración estándar (SPT) usando un sistema cuya relación de energía sea conocida, se puede utilizar la siguiente expresión, si se quiere calcular los golpes N_S referidos a un sistema que tenga relación de energía estándar ER_S .

$$N_S = \frac{ER}{ER_S} * N$$

Ecuación 1. Calculo de factor de golpes N_S referidos a un sistema de energía estándar.

Fuente: DELGADO VARGAS, Manuel. Pág. 71.

Por ejemplo, para el caso donde en campo se utilizó el martillo tipo *donut*, y se debe referir a la energía del sistema de martillo de seguridad que Bowles planteó, la expresión quedaría:

$$N_S = \frac{45}{70} * N = 0,64 * N$$

De la anterior expresión, obtenemos que el factor de corrección por energía del martillo para este caso es de 0,64.

4.1.2 Corrección por confinamiento.

Los métodos de investigación del subsuelo que implican ensayos de penetración, resultan de gran utilidad, ya que gracias a estos se han obtenido correlaciones de validez general entre los

resultados de laboratorio y los resultados de campo, respecto a diferentes tipos de suelo. Gracias a esto, se puede relacionar en forma directa los resultados de ensayos obtenidos en campo (*in situ*) con propiedades físicas del suelo. Dando como resultado, una herramienta esencial a la hora de diseñar sistemas de cimentación y fundaciones. En 1998, para corregir el valor de N tomado en campo, de acuerdo a variaciones o influencias de diversos factores de divergencia, Bowles sugirió, de manera sencilla la siguiente corrección por presión de sobrecarga:

$$C_N = \left(\frac{p''}{p'} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 2. Cálculo de la corrección de N de campo por presión de sobrecarga.

Fuente: DELGADO VARGAS, Manuel. Pág. 73.

Donde p'' corresponde a una presión de referencia de sobrecarga de 95,76 Kpa, y p' es una presión efectiva vertical en unidad de Kpa que depende de la profundidad del estrato y el peso específico del tipo de suelo.

4.1.3 Corrección del n de campo

Dado los factores mencionados en los ítems anteriores y otros que se nombraran a continuación, es necesario corregir el N obtenido en campo, para poder aplicar las correlaciones necesarias para hallar a través de estas expresiones matemáticas que aplican el N de campo del ensayo de penetración estándar (SPT), el ángulo de fricción interno del suelo. Con la siguiente expresión se podrá corregir el N de campo:

$$N_C = N * C_N * n_1 * n_2 * n_3 * n_4$$

Ecuación 3. Expresión para corregir el N de campo.

Fuente: BOWLES, Joseph E. Pág. 158.

Dónde: N_C : Número de golpes en campo corregido.

N: Número de golpes en campo.

C_N : Corrección de N por presión de sobrecarga.

n_1 : Factor de corrección por energía del martillo ($\frac{ER}{ER_S}$).

n_2 : Factor por longitud de varilla.

n_3 : Factor por revestimiento interno del tomamuestras.

n_4 : Factor por diámetro de la perforación.

No obstante, el objetivo de usar la anterior expresión, es decir, hallar N_C , es con el fin de corregir el N tomado en campo, este valor de N tomado en campo, es el que se obtiene de sumar el número de golpes necesarios para hincar el tomamuestras a la profundidad de 12 pulgadas con la de 18 pulgadas.

El valor de C_N se explica en el ítem 5.1.2. Por su parte el valor de n_1 corresponde al factor que resulta de la expresión $\frac{ER}{ER_S}$, tomada de la *Ecuación 1* del ítem 5.1.1.

Para los valores de n_2 , n_3 , n_4 , es necesario utilizar la siguiente tabla:

Tabla 1. Factores n_i para corrección del N de campo.

Corrección de longitud de varilla, n_2 :

Longitud:	> 10 m	$n_2 =$	1,00	N es demasiado alto para $L < 10$ m
	6-10 m	=	0,95	
	4-6 m	=	0,85	
	0-4 m	=	0,75	

Corrección del muestreador, n_3 :

	Sin revestimiento	$n_3 =$	1,00	Valor base
Con revestimiento:	Arena densa, arcilla	=	0,80	N es demasiado alto con revestimiento
	Arena suela	=	0,90	

Corrección del diámetro de la perforación, n_4 :

Diámetro de la perforación: *	60-120 mm	$n_4 =$	1,00	Valor base, N es muy pequeño
	150 mm	=	1,05	Cuando el hueco es muy grande
	200 mm	=	1,15	

* $n_4 = 1,00$ para todos los diámetros cuando se usa tubería hueca como muestreador.

Fuente: BOWLES, Joseph E. Pág. 159.

4.2 Teoría de correlación del SPT

Las correlaciones del Ensayo normal de penetración (SPT), corresponden a parámetros de las propiedades del suelo, tales como el ángulo de fricción, que se pueden hallar al relacionarlas con el número de golpes en campo corregidos (N_c). Estos parámetros de las propiedades del suelo, son de fundamental importancia para el diseño de cimentaciones y fundaciones, por tanto, el hecho de que se puedan obtener mediante el número de golpes corregidos (N_c) del SPT, hace que el uso del SPT sea de gran importancia en la Geotecnia ya que permite que mientras se efectúe un sondeo, también se pueda realizar el muestreo del subsuelo y a su vez se obtenga estos datos sumamente importantes para conocer el suelo que se está explorando.

4.2.1 Ángulo de fricción interna del suelo [ϕ']

El ángulo de fricción ϕ' es el parámetro más importante y más común en la geotecnia, dado que es usado para el diseño de la mayor parte de las estructuras geotécnicas. Este parámetro de suelo, es la medida de la resistencia cortante debida de la fricción mecánica directa que existe entre las partículas del suelo. Por tanto, el ángulo de fricción, también se emplea para caracterizar de forma importante al suelo y puede ser hallado mediante el ensayo de corte directo en laboratorio, pero también como ha sido mencionado anteriormente, mediante correlaciones con ensayos de campo, como el caso del SPT.

Para hallar el ángulo de fricción del suelo, existen varias expresiones, formuladas por diferentes autores. Estos autores, basados en el ensayo normal de penetración (SPT), relacionaron este ángulo, con los diferentes valores de número de golpes en campo corregido (N_C). Algunas de las expresiones más destacadas son:

Tabla 2. *Expresiones utilizadas para calcular ϕ' equivalente a partir del SPT.*

<i>Autor</i>	<i>Expresión</i>	<i>Descripción</i>
Peck	$\phi'_{eq} = 28,5 + 0,25 * N_{45}$	Donde N_{45} es el número de golpes corregido con referencia a una energía del 45%.
Peck, Hanson y Thornburn	$\phi'_{eq} = 26,25 * (2 - e^{-\frac{N_{45}}{62}})$	
Kishida	$\phi'_{eq} = 15 + \sqrt{20 * N_{72}}$	Donde N_{72} es el número de golpes corregido con referencia a una energía del 72%.

Fuente: MONTENEGRO, Luis. Pag. 42.

Tabla 3. *Expresión utilizada para calcular ϕ' equivalente a partir del SPT.*

<i>Autor</i>	<i>Expresión</i>	<i>Descripción</i>
Shioi y Fukui (1982)	$\phi'_{eq} = \sqrt{18 * N_{70}} + 15$	Donde N_{70} es el número de golpes corregido con referencia a una energía del 70%.



Fuente: BOWLES, Joseph E. Pág. 163.



5. Aplicación de campo


Para la elaboración de esta cartilla, se tomó información de un sondeo realizados empleando el ensayo normal de penetración SPT, a continuación, se presentan la información de este sondeo mediante el perfil estratigráfico con la descripción del suelo recuperado de las muestras tomadas con la cuchara partida SS.

5.1 Cartera de campo del sondeo

Tabla 4. Cartera de campo - Perfil estratigráfico del sondeo.

M	Profundidad [M]		Tipo	Golpes			N Campo	Descripción De La Muestra	Imagen De La Muestra
	Desde	Hasta		6"	12"	18"			
1	0	0,5	BOLSA	NA	NA	NA	NA	<p>Espesor de la capa vegetal: 40 cm material plástico con presencia de material color habano con pintas rojizas. Humedad media y consistencia baja.</p> 	
2	0,5	0,95	SPT	0	1	1	2	<p>Espesor capa vegetal los primeros 12 cm, a partir de allí hay cambio de material. Suelo con intercalación de materiales, colores habanos con rojizo a los 15 cm, después de esta longitud se evidencia cambios en el tamaño de la partícula. Se observa un cambio de material a 1</p> 	

M	Profundidad [M]		Tipo	Golpes			N Campo	Descripción De La Muestra	Imagen De La Muestra
	Desde	Hasta		6"	12"	18"			
								metro de profundidad del sondeo con una arena gris fina con blanco.	
3	0,95	1,4	SPT	1	3	2	5	Arena con presencia de gravas color marrón, después se encuentra un lente de suelo residual, seguido un suelo marrón con pintas rojizas. A los 1,25 metros se encuentra una arena limosa gris. En el extremo inferior se encuentra un material granular de color marrón. Humedad media.	
NA	1,4	1,85	AVANCE	2	4	6	NA	NA	NA
4	1,85	2,3	SPT	9	14	15	29	Material arcilloso altamente cohesivo. Por tanto, esta muestra no se utilizó para ser correlacionada en esta cartilla.	
NA	2,3	2,75	AVANCE	23	20	20	NA	NA	NA

<i>M</i>	<i>Profundidad [M]</i>		<i>Tipo</i>	<i>Golpes</i>			<i>N Campo</i>	<i>Descripción De La Muestra</i>	<i>Imagen De La Muestra</i>
	<i>Desde</i>	<i>Hasta</i>		<i>6"</i>	<i>12"</i>	<i>18"</i>			
5	2,75	3,2	SPT	20	26	24	50	<p>Arena limosa café poco consistente con alta humedad hasta los 3,2 m. Seguido, lente de espesor de 5 cm de arena de color habano. A 3,25 m arena café oscuro. A 3,35 m arena blanca. A 3,4 m arena rojiza de poca humedad y alta consistencia. Últimos 10 cm de roca arenosa con presencia de cristales de cuarzo.</p>	
NA	3,2	3,65	AVANCE	22	27	23	50	Rechazo.	NA

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Aplicación de corrección de n de campo

5.2.1 Procedimiento de corrección del n de campo

Para efectos académicos y a modo de ejemplo, será indicado el proceso de la corrección del N de campo, tomando aleatoriamente la muestra 5 del sondeo, para una energía referida del 70%:

5.2.1.1 Paso 1

$N = 50$: N de campo tomado de la *Tabla 4*.

5.2.1.2 Paso 2

p' [Kpa]: Presión efectiva vertical en unidad de Kilopascales, para realizar el procedimiento de su cálculo se debe conocer la profundidad de la muestra y los pesos específicos de los estratos de suelos implicados.

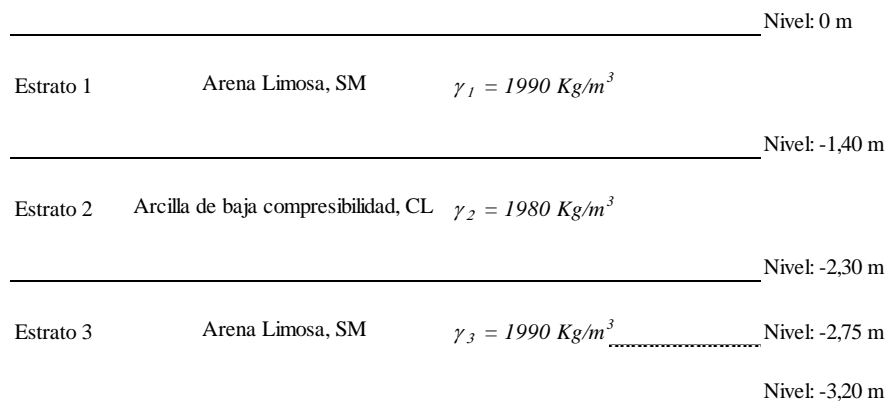


Figura 36. Perfil estratigráfico de la muestra 5 del sondeo.

Fuente: Elaboración propia.

Del *Título 6.1* de la presente cartilla, tomamos los datos de clasificación del suelo tomados del laboratorio, y de la *Tabla 4* del presente capítulo, tomamos los datos de profundidad. Datos necesarios para dibujar el perfil estratigráfico anterior.

Entonces, $\frac{3,20\text{ m} + 2,75\text{ m}}{2} = 2,975\text{ m}$, con esta expresión se conoce a que profundidad se encuentra la media de la muestra 5.

Seguido, $2,975\text{ m} - 2,30\text{ m} = 0,675\text{ m}$, con esta expresión se obtiene, la profundidad de la media de la muestra 4 con respecto al estrato 2.

Dado esto, para obtener la presión efectiva vertical (p'_3) del estrato 3, se debe obtener el producto entre el peso específico (γ_3) y la profundidad de la media de la muestra 5 respecto del estrato 2.

$$\text{Entonces, } p'_3 = 1990 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0,675\text{ m}$$

$$\text{Se obtiene, } p'_3 = 1343,25 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

Seguido, $2,30\text{ m} - 1,40\text{ m} = 0,9\text{ m}$, con esta expresión se obtiene, la profundidad del estrato 2.

Luego, se procede a calcular la presión efectiva vertical (p'_2) que ejerce el estrato 2, para ello, se calcula el producto del peso específico (γ_2) y la profundidad del estrato 2.

Entonces,
$$p'_2 = 1980 \frac{Kg}{m^3} * 0,90 \text{ m}$$

Se obtiene,
$$p'_2 = 1782 \frac{Kg}{m^2}$$

Luego, se procede a calcular la presión efectiva vertical (p'_1) que ejerce el estrato 1, para ello, se calcula el producto del peso específico (γ_1) y la profundidad del estrato 1.

Entonces,
$$p'_1 = 1990 \frac{Kg}{m^3} * 1,40 \text{ m}$$

Se obtiene,
$$p'_1 = 2786 \frac{Kg}{m^2}$$

Por tanto, para obtener p' , se suma p'_1 , p'_2 y p'_3

Entonces,
$$p' = 2786 \frac{Kg}{m^2} + 1782 \frac{Kg}{m^2} + 1343,25 \frac{Kg}{m^2}$$

Se obtiene,
$$p' = 5911,25 \frac{Kg}{m^2}$$

No obstante, se debe obtener la presión efectiva vertical p' en unidad de Kpa, por tanto, se procede a hacer la conversión, conociendo que 1 Kg/m^2 equivale a $0,00980665 \text{ Kpa}$.

Entonces,
$$p' = 5911,25 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} * \frac{0,00980665 \text{ Kpa}}{1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}}$$

Se obtiene,
$$p' = 57,97 \text{ Kpa}$$

5.2.1.3 Paso 3

$$C_N = \left(\frac{p''}{p'}\right)^{\frac{1}{2}}$$
: Corrección por confinamiento, expresión tomada de la *Ecuación 2*.

Remplazando en p'' el valor constante de 95,76 Kpa,

Se obtiene,
$$C_N = \left(\frac{95,76 \text{ Kpa}}{p'}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Ahora, en la expresión anterior, se reemplaza el valor de p' .

Entonces,
$$C_N = \left(\frac{95,76 \text{ Kpa}}{57,97 \text{ Kpa}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Se obtiene,
$$C_N = 1,29$$

5.2.1.4 Paso 4

$$n_1 = \frac{ER}{ER_S}$$
: Factor corrección por energía de martillo, fragmento de la *Ecuación 1*.

Reemplazando, $n_1 = \frac{45}{70}$

Entonces, $n_1 = 0,64$

5.2.1.5 Paso 5

$n_2 = 0,75$: Factor de corrección por longitud de varilla, tomado de la *Tabla 1*, usando longitud de 3,25 m tomada de la *Tabla 4*.

5.2.1.6 Paso 6

$n_3 = 1,00$: Factor de corrección por muestreador, tomado de la *Tabla 1*, usando muestreador sin revestimiento.

5.2.1.7 Paso 7

$n_4 = 1,00$: Factor de corrección por diámetro de perforación, tomado de la *Tabla 1*, usando muestreador de diámetro 50,8 mm.

5.2.1.8 Paso 8

$N_C = N * C_N * n_1 * n_2 * n_3 * n_4$: N de campo corregida, expresión tomada de la *Ecuación 1*.

Reemplazando $N_{70} = 50 * 1,29 * 0,64 * 0,75 * 1 * 1$

Entonces $N_{70} = 30,96$

Aproximando $N_{70} = 31$

5.2.2 Corrección del N de campo del sondeo

Tabla 5. N de campo del sondeo, corregido al 70% de energía.

N ₇₀ SONDEO																								
M	N	FC. Presión de Sobrecarga								FC. Energía Martillo			FC. Long. Varilla		FC. Muestreador		FC. Diám. Perf.		N _{Cprev}	N ₇₀				
		De [m]	A [m]	Med [m]	p'' [Kpa]	Clasificación Suelo *	γ [Kg/m ³]	p' [Kg/m ²]	p' [Kpa]	C _N	ER [%]	ER _s [%]	n ₁	PRF [m]	n ₂	REV	n ₃	Ø [mm]			n ₄			
2	2	0,50	0,95	0,725	95,76	Arena Limosa SM	1990	1443	14,15	2,60	45	70	0,64	0,95	0,75	SIN	1	50,8	1	2,51	3			
3	5	0,95	1,40	1,175		Arena Limosa SM	1990	2338	22,93	2,04			na	1,40					na	na	na	na	na	na
4	29	1,85	2,30	na	Arcilla de baja compresibilidad CL	1980	na	na	na	na		na	na	2,30	na		na		na	na	na	na	na	na
5	50	2,75	3,20	2,975	Arena Limosa SM	1990	5911	57,97	1,29	70		0,64	3,20	0,75	1		1		1	30,98	31			

* Datos de clasificación de suelo tomados de resultados de laboratorio mencionados en el capítulo 6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Resumen N de campo del sondeo, corregido a varios porcentajes de energía.

N _C SONDEO											
M	N	C _N	n ₁ (45)	n ₁ (70)	n ₁ (72)	n ₂	n ₃	n ₄	N ₄₅	N ₇₀	N ₇₂
2	2	2,60	1,00	0,64	0,63	0,75	1	1	4	3	3
3	5	2,04				0,75			8	5	5
5	50	1,29				0,75			49	31	31

Fuente: Elaboración propia.

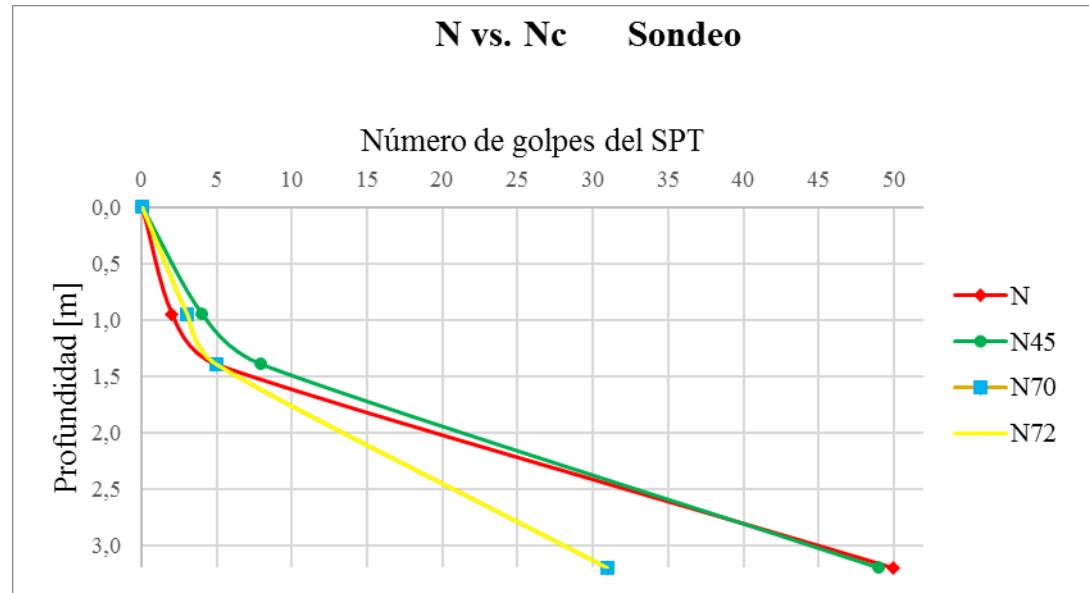


Figura 37. N de campo y N_C de campo corregido en varios sistemas de energía vs. profundidad del sondeo.

Fuente: Elaboración propia.

5.3 Aplicación correlación ángulo de fricción [ϕ']

5.3.1 Procedimiento de correlación ángulo de fricción [ϕ']

Para efectos académicos, será indicado el proceso de la correlación del ángulo de fricción [ϕ'], a través de las cuatro expresiones más destacadas, tomando nuevamente como ejemplo la muestra 5 del sondeo.

5.3.1.1 Correlación de Peck

$$\phi'_{eq} = 28,5 + 0,25 * N_{45}$$

Ecuación 4. Expresión correlación ϕ' , de Peck.

Fuente: Tabla 2.

Donde, $N_{45} = 49$: N de campo corregido con referencia a una energía del 45%, tomado de la *Tabla 6*.

Reemplazando, $\phi'_{eq} = 28,5 + 0,25 * 49$

Entonces, $\phi'_{eq} = 40,75^\circ$

5.3.1.2 Correlación de Peck, Hanson y Thornburn

$$\phi'_{eq} = 26,25 * (2 - e^{-\frac{N_{45}}{62}})$$

Ecuación 5. Expresión correlación ϕ' , de Peck, Hanson y Thornburn.

Fuente: Tabla 2.

Donde, $N_{45} = 49$: N de campo corregido con referencia a una energía del 45%, tomado de la *Tabla 6*.

Reemplazando, $\phi'_{eq} = 26,25 * (2 - e^{-\frac{49}{62}})$

Entonces, $\phi'_{eq} = 40,59^\circ$

5.3.1.3 Correlación de Kishida

$$\phi'_{eq} = 15 + \sqrt{20 * N_{72}}$$

Ecuación 6. Expresión correlación ϕ' , de Kishida.

Fuente: Tabla 2.

Donde, $N_{72} = 31$: N de campo corregido con referencia a una energía del 72%, tomado de la *Tabla 6*.

Reemplazando, $\phi'_{eq} = 15 + \sqrt{20 * 31}$

Entonces, $\phi'_{eq} = 39,90^\circ$

5.3.1.4 Correlación de Shioi y Fukui

$$\phi'_{eq} = \sqrt{18 * N_{70}} + 15$$

Ecuación 7. Expresión correlación ϕ' , de Shioi y Fukui (1982).

Fuente: Tabla 3.

Donde, $N_{70} = 31$: N de campo corregido con referencia a una energía del 70%, tomado de la Tabla 6.

Reemplazando, $\phi'_{eq} = \sqrt{18 * 31} + 15$

Entonces, $\phi'_{eq} = 38,62^\circ$

5.3.2 Correlación ángulo de fricción [ϕ'] del sondeo

Tabla 7. ϕ' correlacionado con N_c del sondeo 1 por medio de varias expresiones.

ϕ' SONDEO								
M	N	N_c			$\phi' [^\circ]$			
		N_{45}	N_{72}	N_{70}	Peck $f_{(N45)}$	Peck, Hanson y Thomburn $f_{(N45)}$	Kishida $f_{(N72)}$	Shioi y Fukui $f_{(N70)}$
2	2	4	3	3	29,50	27,89	22,75	22,35
3	5	8	5	5	30,50	29,43	25,00	24,49
5	50	49	31	31	40,75	40,59	39,90	38,62

Fuente: Elaboración propia.

6. Resultados ensayos de laboratorio

6.1 Clasificación de las muestras

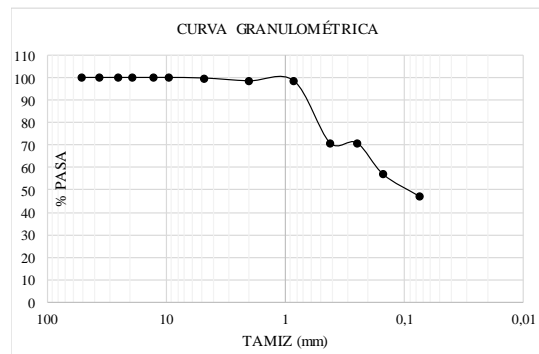
Tabla 8. Clasificación de la muestra 1-2.

MUESTRA 1 - 2	
Profundidad Muestra	0 - 0,95 m
Peso Muestra Seco (g)	587,37
Peso Muestra Lavado Tamiz No 200 (g)	327

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Suelo Retenido (g)	Peso Retenido Parcial (%)	Peso Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50,800	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,100	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,400	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,050	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,700	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,520	0,00	0,00	0,00	100,00
No 4	4,750	1,48	0,25	0,25	99,75
10	2,000	7,42	1,26	1,51	98,49
20	0,840	0,00	0,00	1,51	98,49
40	0,420	161,43	27,48	28,99	71,01
60	0,250	0,00	0,00	28,99	71,01
100	0,149	83,26	14,18	43,17	56,83
200	0,074	57,43	9,78	52,95	47,05
Pasa 200	-	276,35	47,05	100,00	0,00
		587,37	100,00		

G-Grava (%)	0,25
S-Arena (%)	52,70
F-Finos (%)	47,05

Suelo	S
-------	---



Límite Líquido LL	36,43 %	Clasificación S.U.C.S. SM Arena Limosa
Límite Plástico LP	26,51 %	
Índice Plasticidad IP	9,92 %	

Fuente: QUINTANA, Laura; SOTO, Nelson. 2017.

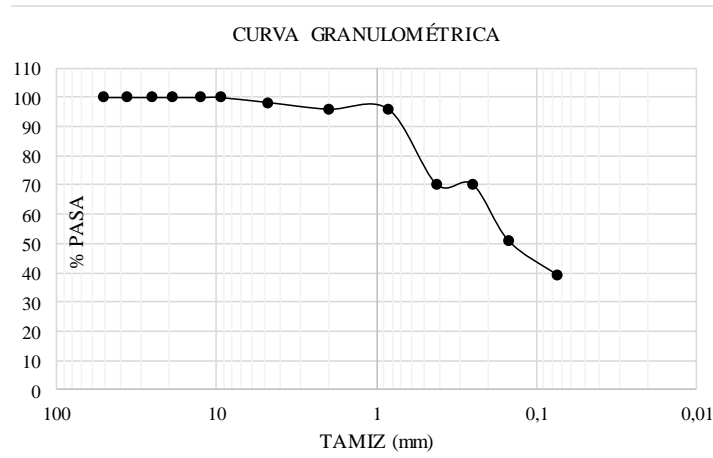
Tabla 9. Clasificación de la muestra 3.

MUESTRA 3	
Profundidad Muestra	0,95 - 1,4 m
Peso Muestra Seco (g)	328,88
Peso Muestra Lavado Tamiz No 200 (g)	205,65

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Suelo Retenido (g)	Peso Retenido Parcial (%)	Peso Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50,800	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,100	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,400	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,050	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,700	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,520	0,00	0,00	0,00	100,00
No 4	4,750	5,59	1,70	1,70	98,30
10	2,000	7,49	2,28	3,98	96,02
20	0,840	0,00	0,00	3,98	96,02
40	0,420	84,31	25,64	29,62	70,38
60	0,250	0,00	0,00	29,62	70,38
100	0,149	63,37	19,27	48,89	51,11
200	0,074	38,60	11,74	60,63	39,37
Pasa 200	-	129,52	39,38	100,00	0,00
		328,88	100,00		

G-Grava (%)	1,70
S-Arena (%)	58,93
F-Finos (%)	39,37

Suelo	S
-------	---



Límite Líquido LL	43,40 %	Clasificación S.U.C.S. <i>SM</i> <i>Arena Limosa</i>
Límite Plástico LP	30,85 %	
Índice Plasticidad IP	12,55 %	

Fuente: QUINTANA, Laura; SOTO, Nelson. 2017.

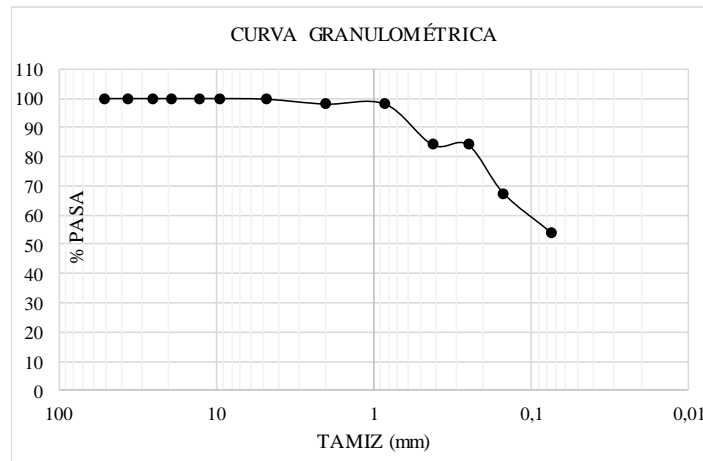
Tabla 10. Clasificación de la muestra 4.

MUESTRA 4	
Profundidad Muestra	1,85 - 2,3 m
Peso Muestra Seco (g)	349,17
Peso Muestra Lavado Tamiz No 200 (g)	167,9

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Suelo Retenido (g)	Peso Retenido Parcial (%)	Peso Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50,800	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,100	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,400	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,050	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,700	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,520	0,00	0,00	0,00	100,00
No 4	4,750	0,80	0,23	0,23	99,77
10	2,000	5,86	1,68	1,91	98,09
20	0,840	0,00	0,00	1,91	98,09
40	0,420	48,98	14,03	15,94	84,06
60	0,250	0,00	0,00	15,94	84,06
100	0,149	58,13	16,65	32,59	67,41
200	0,074	47,41	13,58	46,17	53,83
Pasa 200	-	187,99	53,84	100,00	0,00
		349,17	100,00		

G-Grava (%)	0,23
S-Arena (%)	45,94
F-Finos (%)	53,83

Suelo	F
-------	---



Límite Líquido LL	32,30 %	Clasificación S.U.C.S. <i>CL</i> <i>Arcilla Baja Compresibilidad</i>
Límite Plástico LP	23,15 %	
Índice Plasticidad IP	9,15 %	

Fuente: QUINTANA, Laura; SOTO, Nelson. 2017.

Tabla 11. Clasificación de la muestra 5.

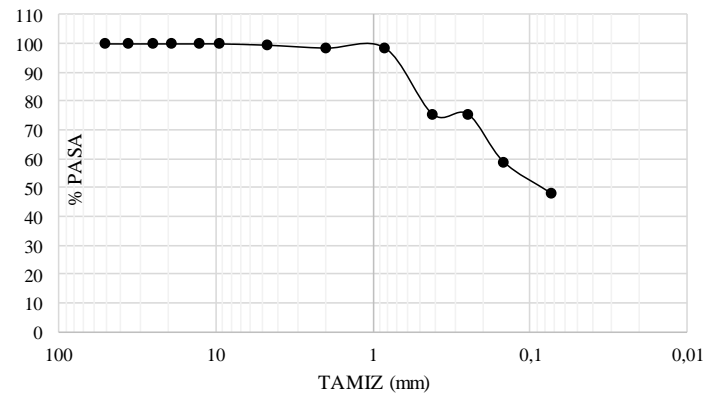
MUESTRA 5	
Profundidad Muestra	2,75 - 3,2 m
Peso Muestra Seco (g)	646,16
Peso Muestra Lavado Tamiz No 200 (g)	350,25

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Suelo Retenido (g)	Peso Retenido Parcial (%)	Peso Retenido Acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50,800	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,100	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,400	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,050	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,700	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,520	0,00	0,00	0,00	100,00
No 4	4,750	2,83	0,44	0,44	99,56
10	2,000	6,64	1,03	1,47	98,53
20	0,840	0,00	0,00	1,47	98,53
40	0,420	148,83	23,03	24,50	75,50
60	0,250	0,00	0,00	24,50	75,50
100	0,149	107,15	16,58	41,08	58,92
200	0,074	71,40	11,05	52,13	47,87
Pasa 200	-	309,31	47,87	100,00	0,00
		646,16	100,00		

G-Grava (%)	0,44
S-Arena (%)	51,69
F-Finos (%)	47,87

Suelo	S
-------	---

CURVA GRANULOMÉTRICA



Límite Líquido LL	39,50 %	Clasificación S.U.C.S. <i>SM</i> <i>Arena Limosa</i>
Límite Plástico LP	26,53 %	
Índice Plasticidad IP	12,97 %	

Fuente: QUINTANA, Laura; SOTO, Nelson. 2017.

6.2 Resultados ensayo de corte directo

Tabla 12. *Resultados corte directo CU, muestra 5.*

CORTE DIRECTO CD: MUESTRA 5	
<i>Ángulo de Fricción ϕ' [°]</i>	19,87

Fuente: QUINTANA, Laura; SOTO, Nelson. 2017.

7. Comparación de ángulo de fricción [ϕ']

Dado que se conocen los valores de ángulo de fricción interna, obtenidos mediante el proceso de corrección y correlación del N de campo del ensayo normal de penetración SPT. Y así mismo, se cuenta con el resultado de laboratorio de la muestra tomada con la cuchara partida SS del SPT donde a través del ensayo de laboratorio de corte directo, se obtuvo también el ángulo de fricción interna de la muestra 5 del sondeo realizado en campo. El presente capítulo, plantea la comparación de estos datos, es decir, comparar el ángulo de fricción interna tomado del SPT con el ángulo de fricción interna tomado del Laboratorio. Esto, como valor agregado de la presente cartilla.

En la siguiente tabla, se aprecia la comparación de los ángulos de fricción correlacionados del SPT mediante diferentes autores con el ángulo de fricción obtenido en el ensayo de corte directo de laboratorio para la muestra 5 del sondeo.

Tabla 13. Comparación ángulo de fricción correlacionado del SPT con ángulo de fricción obtenido en el ensayo de corte directo, para la muestra 5.

COMPARACIÓN ÁNGULO DE FRICCIÓN ϕ' MUESTRA 5							
Muestra			SPT ϕ' [°]				LAB ϕ' [°]
M	Tipo de Suelo	Prof [m]	Peck $f_{(N45)}$	Peck, Hanson y Thornburn $f_{(N45)}$	Kishida $f_{(N72)}$	Shioi y Fukui $f_{(N70)}$	Ensayo de Corte Directo CD
5	Arena Limosa SM	3,20	40,75	40,59	39,90	38,62	19,87

Fuente: Elaboración Propia.

Dado las anteriores comparaciones, a continuación, se expresan gráficamente, respecto del ángulo de fricción versus las profundidades de la muestra 5 tomadas usando el ensayo normal de penetración SPT con cuchara partida SS:

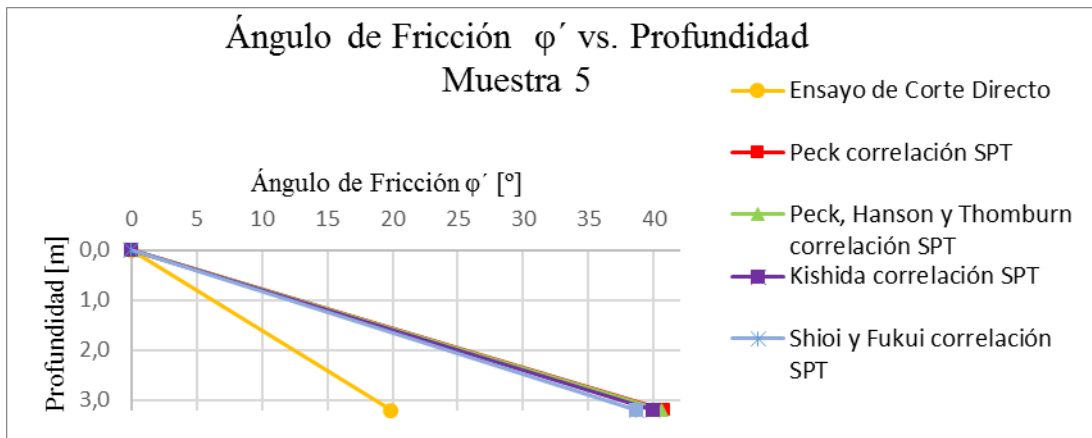


Figura 38. Gráfico de ángulo de fricción vs. profundidad de la muestra 5, comparando el ángulo de fricción del resultado de laboratorio con el de diferentes autores de correlaciones de SPT.

Fuente: Elaboración Propia.

Final de la Cartilla

8. Análisis de Resultados

Dada la elaboración de la cartilla para la exploración mediante el ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (SS), con fines académicos y enfocada hacia los estudiantes de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, realizada dentro del capítulo de resultados anterior, es posible en el presente capítulo, hablar acerca de lo que muestran los resultados obtenidos de: las correcciones del N de campo de ensayo SPT con SS; las correlaciones a través de diferentes autores con respecto al N de campo corregido y el ángulo de fricción; el valor de ángulo de fricción interna como resultado del ensayo de laboratorio de corte directo, y así mismo, la comparación de este resultado obtenido en laboratorio con los obtenidos de las correlaciones con el N de campo corregido del SPT.

Mediante la corrección del N de campo del SPT, se observa que a medida que la energía del martillo de referencia es mayor, se hace menor el N corregido. Esto comprueba lo expuesto en el numeral 4.1.1 (*Energía del martillo*) de la cartilla.

Se observa que el factor de corrección por confinamiento C_N disminuye a medida que aumenta el N de campo o el N_c de campo corregido, esto debido a que la presión efectiva vertical p' , depende directamente de la profundidad de la muestra, y se sabe que a mayor profundidad mayor número de golpes es necesario realizar.

Es evidente que todos los factores de corrección, son bastante relevantes a la hora de corregir el N de campo. Esto garantiza, que este proceso de corrección del N de campo procura cubrir los diferentes eventos que influyen directamente en el proceso de exploración y muestreo, como el martillo utilizado, la profundidad de la muestra tomada, el revestimiento del muestreador, el diámetro del muestreador, la presión vertical del suelo, el peso específico de cada estrato, etc.

Todas las expresiones planteadas por los distintos autores estudiados en la cartilla que tratan la correlación del ángulo de fricción interna del suelo a través del N de campo del SPT corregido, tienen en común que dichas expresiones matemáticas parten de un ángulo de fricción base para suelos friccionantes, el cual, es atenuado o aumentado según sea el caso respectivamente, por la disminución o el incremento del N de campo corregido utilizado y la referencia de energía de dicha corrección.

El resultado de laboratorio de corte directo respecto del ángulo de fricción interna del suelo, no es concordante con los ángulos de fricción interna del suelo obtenidos a través de las correlaciones con el N de campo del SPT corregido. Comparando los ángulos de fricción obtenidos a través de las correlaciones de SPT de diferentes autores con los resultados de los ángulos de fricción del ensayo de laboratorio de corte directo. Se observa en la gráfica de la *figura 38* de la cartilla, que a pesar de que todas las correlaciones tienen una tendencia similar, no sucede lo mismo con la tendencia del ángulo de fricción obtenido en laboratorio. No obstante, es necesario aclarar, que los resultados de laboratorio en el presente trabajo de grado, son resultados citados de otro trabajo de grado y no de obtención propia.

9. Conclusiones

- A mayor energía transmitida por el martillo al suelo, durante el proceso de hincado, es necesario aplicar menos golpes en el ensayo de penetración standard.
- A mayor profundidad del sondeo, mayor es el número de golpes que debe aplicarse en el ensayo normal de penetración SPT, Por tanto, al aumentar la profundidad, el factor de confinamiento C_N disminuye, debido a que la presión efectiva vertical p' aumenta. No obstante, pueden presentarse casos en los que a profundidades mayores se encuentren estratos de suelos blandos.
- El procedimiento para el cálculo de la corrección del N de campo, tiene en cuenta numerosos factores que influyen sobre el proceso *in situ* del sondeo, el hecho de que se contemple el mayor número posible de variables a la hora de corregir los datos de campo, genera confiabilidad en el uso del ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS).
- A mayor número de golpes del martillo en el hincado de la tubería de muestreo en el ensayo normal de penetración SPT, mayor es el ángulo de fricción del suelo.

- Dado la influencia directa de la presión de confinamiento en el cálculo de las correcciones del N de campo del SPT, podría concluirse que el ángulo de fricción interna del suelo aumenta a medida que aumenta la profundidad. Pero esto no es del todo cierto, ya que este comportamiento también depende de las propiedades de los materiales que componen los estratos, es decir, resultaría mejor afirmar que el ángulo de fricción interna del suelo es mayor cuando el N de campo es mayor. De esta manera, si en un sondeo a una profundidad mayor se encuentra un estrato de suelo con compresibilidad alta, podría disminuir la cohesión por la suavidad del suelo, pero también disminuiría el N de campo al penetrar con más facilidad este estrato, a pesar que estaría aumentando la profundidad.
- El resultado de ángulo de fricción interna del suelo, obtenido mediante el ensayo en laboratorio de corte directo, no fue concordante con lo que se esperaría de este suelo, y tampoco lo fue con los ángulos de fricción interna del suelo obtenidos mediante las correlaciones con el N de campo corregido del SPT. Dichos ángulos de fricción interna del suelo obtenidos a través de correlaciones, si fueron concordantes entre sí y con lo que se esperaría del tipo de suelo donde se realizó el sondeo.
- El ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS), es un procedimiento de campo fundamental, no sólo para obtener muestras del sub-suelo, sino también para evaluar en etapa de pre-diseño las condiciones de resistencia del suelo de fundación mediante las correlaciones obtenidas del N de campo corregido del SPT. No obstante, a la hora de diseñar es fundamental trabajar con parámetros de resistencia obtenidos directamente de ensayos de laboratorio.

10. Recomendaciones

- Para ejecutar correctamente el ensayo normal de penetración SPT con cuchara partida SS, es necesario utilizar equipos debidamente contruidos y calibrados, de tal manera que acaten correctamente la normatividad I.N.V. E - 111 - 2013 correspondiente. Respetando todos los aspectos y parámetros necesarios como el dimensionamiento, el tipo de material y las partes correctas del equipo.
- Para ejecutar correctamente el ensayo normal de penetración SPT con cuchara partida SS, es imperante realizar correctamente el procedimiento en campo, en cuanto a procedimiento, toma de datos y procesos de muestreo. Esto, de acuerdo con la normatividad I.N.V. E - 111 – 2013.
- Es recomendable evitar procesos manuales para ejecutar los golpes con el martinete, debido a que estos procesos no solo resultan irresponsables en cuanto a seguridad laboral, sino que también aumenta deliberadamente los factores que influncian en una incorrecta obtención de datos de campo.
- El manejo correcto y claro de la toma de los datos en campo y la seguridad de estos documentos son de sumamente importantes para conseguir un correcto procesamiento de datos en oficina.

- Se recomienda contemplar todas las variables y factores influyentes en la exploración y muestreo, para lograr una correcta corrección de datos, como es el caso de la obtención del número de golpes de campo corregido NC.
- Se recomienda el uso del ensayo de campo estudiado en este trabajo de grado, el ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS), para la exploración del suelo tras corregir y correlacionar el N de campo y obtener resultados importantes y confiables para conocer el suelo y evaluar en fase de pre-diseño un proyecto de fundación. Para etapa de diseño de un proyecto es necesario contar con los resultados de ensayos tomados en laboratorio. No obstante, el ensayo normal de penetración (SPT) con cuchara partida (SS), también es bastante útil y práctico para el proceso de muestreo del suelo.

Referencias Bibliográficas

- Bautista Gracia, & Lozano Monsalve. (2004). *Construcción de un equipo para realizar el ensayo de penetración estándar y su calibración en un sector de la meseta de Bucaramanga y su área metropolitana. Trabajo de grado*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Bowles, J. E. (1982). *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. McGraw-Hill.
- Bowles, J. E. (2001). *Foundation Analysis and Design. Fifth Edition*. McGraw-Hill .
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Quinta Edición* . Limusa Grupo Noriega Editores.
- Delgado Vargas, M. (2013). *Ingeniería de Fundaciones, Fundamentos e introducción al análisis geotécnico. Sexta Reimpresión*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- INVIAS. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INV E-100*.
- Jaimes Espinel, & Rojas Moreno. (2006). *Construcción de un equipo manual para realizar el ensayo de penetración estándar y su calibración. Proyecto de grado*. Floridablanca: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Juarez Badillo, & Rico Rodriguez. (1993). *Mecánica de Suelos, Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Limusa Grupo Noriega Editores.
- MAVDT. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR 10. Titulo H - Estudios Geotécnicos*. .

Montenegro, L. (2014). *Calibración del método de parámetros de Resistencia con SPT en suelos de la región llanera colombiana. Universidad Nacional de Colombia Trabajo Final de Maestría .*

Quintana, L., & Soto, N. (2017). *Elaboración del mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo por medio del fracture grouting Trabajo de grado. Universidad Pontificia Bolivariana .*