

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		i(103)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	BRAYAN ORLANDO CALDERON PACHECHO ANDRIAN JOSUE ARROYO ARRIETA		
FACULTAD	INGENIERIAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERIA CIVIL		
DIRECTOR	ROMEL JESUS GALLARDO AMAYA		
TÍTULO DE LA TESIS	ESTADO DEL ARTE SOBRE LAS CORRELACIONES ENTRE LOS VALORES DEL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR (SPT) Y LOS PARAMETROS DEL SUELO		
RESUMEN (70 palabras aproximadamente)			
<p>MONOGRAFIA DE COMPILACION REFERENTE A LAS CORRELACIONES QUE ACTUALMENTE SON EMPLEADAS PARA CORRELACIONAR LOS VALORES DEL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR (N_1 Y N_{60}) CON LOS PARAMETROS DEL SUELO: CONSISTENCIA, DENSIDAD RELATIVA, ANGULO DE FRICCION, RESISTENCIA AL CORTE, ENTRE OTROS.</p> <p>EL DESARROLLO DE ESTA MONOGRAFIA PERMITE LA DIFUSION DE ESTAS CORRELACIONES BRINDADO UN APOYO DE BUSQUEDA DE INFORMACION PARA LOS ESTUDIANTES E INGENIEROS GEOTECNISTAS.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 104	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 0	CD-ROM: 1



ESTADO DEL ARTE SOBRE LAS CORRELACIONES ENTRE LOS VALORES DEL
ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT) Y LOS PARÁMETROS DEL SUELO

Autores

BRAYAN ORLANDO CALDERÓN PACHECO

ANDRIAN JOSUÉ ARROYO ARRIETA

Trabajo de grado modalidad monografía para optar el título de Ingeniero Civil

Director

MSc. ROMEL JESÚS GALLARDO AMAYA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Marzo, 2021

Nota

El Comité Curricular del Plan de Estudios de Ingeniería Civil, según consta en el Acta No. 00025 de fecha 25 de junio de 2020, acordó asignar como jurados de la presente monografía a los docentes **Javier Andrés Martínez Ortega** y **Agustín Armando Macgregor Torrado**.

Agradecimientos

Los autores de esta monografía expresan su cordial agradecimiento al MSc. Romel Jesús Gallardo Amaya, por la dirección del trabajo, su apoyo y colaboración permanente durante toda la investigación.

Así mismo agradecen a todas aquellas personas que de una u otra manera aportaron en este trabajo: amigos, compañeros y docentes, así como aquellos profesionales que brindaron su ayuda, especialmente al Ing. Luis Miguel Duarte Vergara por su acompañamiento y colaboración en todas las etapas del proyecto.

Finalmente agradecen a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por brindar los conocimientos y las herramientas necesarias para desarrollar este trabajo.

Brayan Orlando Calderón Pacheco

Andrian Josué Arroyo Arrieta

Dedicatoria

Dedico esta victoria a la memoria de mi madre, como homenaje póstumo a sus esfuerzos y valentía , esa que la caracterizó y que tuvo para enfrentar la vida y hacer de mi un hombre de bien, lo que hoy se ve reflejado en mi triunfo, mi madre sacrificó muchos de sus sueños para convertirse en la artífice de los míos y hoy puedo cumplir uno de mis mayores anhelos, sin duda alguna sé que desde donde está se siente orgullosa de mí, no ha sido fácil seguir en este camino sin su presencia y sin su bendición pero tengo la seguridad de que su compañía espiritual sigue a mi lado y no me desampara, sé que desde el cielo me ilumina para seguir adelante con mis proyectos.

Hoy más que nunca quiero agradecer a Dios pues todo lo que soy es un reflejo de su gran amor, le agradezco por haberme dado la mejor mamá del mundo, quien luchó hasta el último momento por verme como todo un ingeniero civil.

Al culminar mi etapa universitaria quiero agradecer a mi esposa, mi hermano, a los docentes y familiares que me sirvieron de apoyo y guía para alcanzar mi meta.

Brayan Orlando Calderón Pacheco

Tabla de contenido

Introducción.....	xv
Capítulo 1. Generalidades	1
1.1 Título de la monografía	1
1.2 Planteamiento del problema	1
1.3 Objetivo	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Metodología.....	4
Capítulo 2. Métodos de exploración del suelo	6
2.1 Métodos directos	7
2.1.1 Perforación por rotación.	8
2.1.2 Apiques.....	9
2.1.3 Ensayo de Penetración Estática - CPT.	10
2.1.4 Dilatómetro Plano de Marchetti - DMT.	11
2.1.5 Ensayo Presiométrico - PMT.....	12
2.1.6 Ensayo de Veleta - VST.	13
2.1.7 Ensayo de Penetración Estándar - SPT.	14
2.2 Métodos indirectos	25
Capítulo 3. Correcciones al valor N obtenido del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) 27	
3.1 Correcciones por energía.....	27

3.1.1 Corrección por eficiencia del martillo E_M	28
3.1.2 Corrección por longitud de las barras o varillas E_1	31
3.1.3 Corrección por diámetro de la perforación E_D	32
3.1.4 Corrección por diámetro interno del muestreador E_s	33
3.2 Correcciones por nivel freático	33
3.3 Correcciones por presión de confinamiento o sobrecarga efectiva	34
3.4 Ejemplo de corrección de datos de un ensayo SPT	37

Capítulo 4. Correlaciones entre los valores del ensayo SPT y distintos parámetros del suelo

.....	46
4.1 Consistencia.....	47
4.2 Densidad Relativa (D_r).....	48
4.3 Ángulo de fricción interna (ϕ).....	49
4.4 Resistencia al corte no drenado (S_u)	51
4.5 Velocidad de onda de corte (V_s)	53
4.6 Módulo de Young o confinado (E_s)	56
4.7 Módulo de corte o rigidez ($G_{m\acute{a}x}$)	59

Capítulo 5. Principales correlaciones del ensayo SPT obtenidas en Colombia y en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander.....

5.1 Correlaciones propuestas en Colombia	62
5.1.1 Correlación 1.	62
5.1.2 Correlación 2.	63
5.1.3 Correlación 3.	63
5.1.4 Correlación 4.	64
5.1.5 Investigaciones con correlaciones fallidas.	65

5.2 Correlaciones propuestas en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander.....	66
Conclusiones.....	68
Referencias	72
Apéndices	76

Lista de tablas

Tabla 1. Eficiencia del martillo recomendada por cada país.....	30
Tabla 2. Corrección por longitud de las barras o varillas.....	32
Tabla 3. Corrección por diámetro de la perforación.....	32
Tabla 4. Corrección por diámetro del muestreador	33
Tabla 5. Expresiones para calcular el factor de corrección C_N	36
Tabla 6. Resultado del ensayo SPT	38
Tabla 7. Valor de los factores de corrección para obtener el valor de N_{60}	39
Tabla 8. Valores obtenidos de la corrección por energía	40
Tabla 9. Esfuerzos efectivos calculados para cada una de las profundidades consideradas en el ensayo SPT en campo	42
Tabla 10. Valores del factor de corrección obtenidas para cada una de las expresiones de la tabla 5.....	43
Tabla 11. Valores N_1 calculados	44
Tabla 12. Consistencia de arcillas y limos de acuerdo al valor de N_{60}	47
Tabla 13. Consistencia de arenas y gravas de acuerdo al valor de N_{60}	47
Tabla 14. Correlaciones entre la densidad relativa (D_r) y el ensayo SPT.....	48
Tabla 15. Correlaciones entre el ángulo de fricción interna (ϕ) y en ensayo SPT	49
Tabla 16. Correlaciones entre la resistencia al corte no drenado (S_u) y el ensayo SPT	52
Tabla 17. Correlaciones entre la velocidad de onda de corte (V_s) y el ensayo SPT	54
Tabla 18. Correlaciones entre el Módulo de Young o confinado (E_s) y el ensayo SPT	57
Tabla 19. Correlaciones entre el Módulo de corte o rigidez ($G_{máx}$) y el ensayo SPT	60

Lista de figuras

Figura 1. Perforación por rotación con barrena helicoidal. Obtenido en: Soilmeccolombia, 2020. Link: https://www.soilmeccolombia.com/pilotes-barrena-continua	9
Figura 2. Apique efectuado con herramientas manuales. Obtenido de: Herrera & Castilla, 2012.....	10
Figura 3. Equipo para la realización de un ensayo CPT. Obtenido en: Herrera & Castilla, 2012.....	11
Figura 4. Dilatómetro. Obtenido de: Portal Ondac, 2020. Link: https://portal.ondac.com/601/w3-article-64580.html	12
Figura 5. Esquema general de la realización del ensayo presiométrico. Obtenido en: Ingeododo, Link: https://ingeododo.com/2018/09/02/ensayo-presiometrico-i/	13
Figura 6. Equipo principal para ejecutar el ensayo VST. Obtenido en: Tecprosa, 2020. Link: http://www.scptu.com/Equipo/Veleta.aspx	14
Figura 7. Perforación inicial antes de insertar el muestreador. Obtenido de Alva, 2016....	17
Figura 8. Muestreador de tubo partido estandarizado. Obtenido de I.N.V. E - 111.....	18
Figura 9. Martillo para ensayo SPT. Obtenido de Alva, 2016.	19
Figura 10. Esquema general del ensayo SPT. Obtenido de Alva, 2016.	21
<i>Figura 11. Perfil stratigráfico</i>	78
Figura 12. Presentación inicial del software NovoSPT. Autores, 2021.	79
Figura 13.....	80
Figura 14. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Gibbs y Holtz, 1957	81
Figura 15. Factores de corrección mostrados por el software NovoSPT para una profundidad de 5 m	82
Figura 16. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Peck y Bazaraa, 1969.....	83
<i>Figura 17. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Peck, Hanson y Thornburn, 1974</i>	84
<i>Figura 18. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Seed, 1976</i>	85

<i>Figura 19.</i> Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Tokimatsu y Yoshimi, 1983.....	86
<i>Figura 20.</i> Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Liao y Whitman, 1986.....	87
<i>Figura 21.</i> Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Samson et al., 1986.....	88

Lista de apéndices

Apéndice A. Perfil estratigráfico del estudio de suelos realizado en el trabajo de maestría efectuado en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander	77
Apéndice B. Corrección del valor N del ensayo SPT empleando el software NovoSPT	79

Introducción

El Ensayo de Penetración Estándar SPT (Standard Penetration Test), es el ensayo in situ más extendido para el reconocimiento geotécnico en suelos o rocas muy alteradas. Fue propuesto por un sondista de la compañía Raymond Concrete Pile Co., especialista en la fabricación de pilotes, quien en el año 1927 le propuso a Karl Terzaghi contabilizar el número de golpes que se requerían para hincar 1 pie (aproximadamente 30 cm) del muestreador que se empleada en ese entonces. La facilidad con la que se realiza el ensayo y los bajos costos en equipos, transporte y personal, han hecho del ensayo SPT el ensayo in situ por excelencia (Herrera & Castilla, 2012).

La alta difusión del ensayo SPT y su rápida normalización (primera publicación en el año 1967) llevaron a que en números países se realizaran una gran cantidad de ensayos que con el tiempo permitió la formulación de correlaciones que permitieran predecir determinados parámetros del suelo, sin embargo, es tal la cantidad de correlaciones existentes que se hace necesario sintetizar aquellas que han demostrado ser más adecuadas (ASTM D1586-11, 2014; Carmona, 2014).

Esta situación hizo necesario realizar una compilación de la información existente referente a las correlaciones entre los valores del Ensayo de Penetración Estándar SPT y los parámetros del suelo, principalmente: consistencia, densidad relativa, ángulo de fricción, resistencia al corte no drenado, velocidad de onda de corte, módulo de Young y módulo de corte.

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Título de la monografía

El presente trabajo consiste en una monografía de compilación titulada: *Estado del arte sobre las correlaciones entre los valores del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y los parámetros del suelo.*

1.2 Planteamiento del problema

El Ensayo de Penetración Estándar, SPT, por sus siglas en inglés, consiste en un procedimiento en el cual un penetrómetro o toma muestras es hincado en el suelo mediante golpes con un martillo con peso aproximado de 63,5 Kg a una altura de 76 cm. Se registran los golpes necesarios para producir una penetración de 12 pulgadas (aproximadamente 30 cm) en el suelo del toma muestras estándar de 45 cm de longitud. Este resultado es denominado como el valor N del ensayo. El ensayo también permite obtener una muestra alterada del terreno para determinar sus propiedades en laboratorio (Terzaghi & Peck, 1973; Tomlinson, 1971).

Este ensayo se recomienda para suelos granulares, en los cuales el resultado N se ve alterado a causa de la presión de sobrecarga efectiva, por lo que debe ser ajustado o corregido aplicando el llamado factor de corrección, obteniendo así un nuevo valor para N. Este valor de N

ha sido correlacionado por diferentes autores con varios parámetros del suelo granular, principalmente con el ángulo de fricción interno y con la densidad relativa del suelo. Sin embargo, estas correlaciones son a menudo empíricas y ofrecen resultados aproximados, condicionados a la homogeneidad del suelo (Peck, Hanson, & Thornburn, 1983; Sowers & Sowers, 1972; Das, 2015).

En el caso de suelos cohesivos, el valor N solo debe ajustarse para las condiciones de campo, siendo al igual que en los suelos granulares, correlacionado con determinados parámetros, especialmente con la consistencia y con la resistencia a la compresión inconfina, sin embargo, las correlaciones generalmente no ofrecen resultados confiables (Das, 2015; González, 1999).

Otros autores han establecido correlaciones entre este valor (N) y otros parámetros del suelo como el módulo de deformabilidad, el módulo de elasticidad o módulo de Young, el módulo de corte dinámico y el módulo confinado. Estas correlaciones son utilizadas con el fin de realizar un reconocimiento preliminar de las condiciones del suelo, sin embargo, es tan amplia la variedad de suelos existentes que actualmente se cuenta con un gran número de correlaciones obtenidas para suelos en zonas específicas o para determinados tipos de suelos, sin contar con los factores que ocasionan imprecisiones durante el ensayo y que puedan conllevar a la obtención de correlaciones erróneas (Peck, Hanson, & Thornburn, 1983; Sowers & Sowers, 1972; Das, 2015).

Por lo anterior, se hizo necesario realizar una compilación de la información existente referente a las correlaciones entre el valor N del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y los parámetros del suelo mencionados, de tal forma que se pueda establecer la pertinencia de su utilización y las similitudes y diferencias que presenten entre ellas.

1.3 Objetivo

Desarrollar una monografía de Compilación, donde se recopila la información existente sobre las distintas correlaciones disponibles entre los valores del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y distintos parámetros del suelo que facilitan los procesos de reconocimiento geotécnico.

1.4 Justificación

El Ensayo de Penetración Estándar (SPT) es considerado como uno de los métodos de exploración geotécnica que mayor información relevante suministra sobre las condiciones del suelo, además de proporcionar muestras del mismo para efectuar ensayos de inspección, clasificación, resistencia y/o deformación (Bowles, 1982; Berry & Reid, 1998).

La utilización y normalización del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) se dio a finales de la década de los años treinta en el Siglo XX, y debido a su simplicidad ha sido utilizado en todo tipo de suelos, incluso en rocas blandas o meteorizadas. Sin embargo, se ha demostrado que

ofrece mayor confiabilidad para suelos granulares, siendo los parámetros de las arenas las primeras en correlacionarse con el valor N del ensayo (Herrera & Castilla, 2012; López, 2003).

Si bien es cierto que las correlaciones son establecidas para determinados suelos y en condiciones particulares, el procedimiento empleado para realizar el ensayo que permite obtener los valores de N, pueden hacer que dichos valores se vean afectados ya sea por una excesiva alteración de las muestras, una falta de reconocimiento de las condiciones más desfavorables del suelo, o por una inadecuada organización al realizar el ensayo. Estas condiciones reducen la confiabilidad de las correlaciones presentadas (Terzaghi & Peck, 1973; Pérez, s.f.).

Con esta monografía se sintetizan las correlaciones propuestas hasta la fecha entre el valor N del Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y los parámetros del suelo ya mencionados, para analizar las restricciones que poseen y las condiciones específicas en las que deben ser utilizadas, así como aquellos factores comunes que deben considerarse con el fin de obtener resultados apropiados que permitan conocer la condición real del suelo.

1.5 Metodología

En este trabajo se presentó una propuesta metodológica enfocada en sintetizar y analizar la información concerniente al Ensayo de Penetración Estándar (SPT), centrada principalmente en las correlaciones entre el valor N obtenido del ensayo y los parámetros del suelo donde se ha

demostrado cierta relación entre los datos, al mismo tiempo que se analizaron las diferencias y similitudes entre los diferentes autores para suelos similares en diferentes puntos geográficos, así como los factores que han demostrado causar una afectación en los datos del ensayo. El trabajo se desarrolló en las siguientes etapas:

Etapa 1. Revisión Bibliográfica.

Etapa 2. Selección de bibliografía relevante de calidad: artículos, papers en Journals, trabajos de grado y páginas web.

Etapa 3. Recopilación de información relevante.

Etapa 4. Desarrollo de capítulos.

La etapa 4 consistió en el desarrollo de los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Generalidades.

Capítulo 2. Métodos de exploración del suelo

Capítulo 3. Correcciones al valor N obtenido del Ensayo de Penetración Estándar (SPT).

Capítulo 4. Correlaciones entre los valores del ensayo SPT y distintos parámetros del suelo.

Capítulo 5. Principales correlaciones del ensayo SPT obtenidas en Colombia y en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander.

Capítulo 2. Métodos de exploración del suelo

Para construir cualquier tipo de estructura, es necesario conocer las propiedades físicas y la disposición de los materiales que conforman el subsuelo que soportara dicha estructura. Los procesos y métodos que son aplicados para lograr tal propósito se denominan en conjunto como exploración del suelo (Peck, Hanson, & Thornburn, 1983).

La exploración del suelo brinda información del terreno que permite lo siguiente (Das, 2015):

- Evaluación de la capacidad de carga de la cimentación.
- Estimación del asentamiento probable de una estructura.
- Selección del tipo y la profundidad de cimientos adecuados para una estructura dada.
- Determinación de los problemas potenciales de cimentación (por ejemplo, suelo colapsable, suelo expansivo, rellenos sanitarios, entre otros).
- Predicción de la presión lateral de tierra sobre estructuras tales como muros de contención, pilotes y cortes apuntalados.
- Determinación de la ubicación del nivel freático.
- Establecimiento de métodos de construcción para condiciones cambiantes del subsuelo.

En forma general, la exploración del suelo puede dividirse en una serie de pasos, tres (3) específicamente. El primero de ellos es la *recopilación de información preliminar*, donde se determina el tipo de estructura que se construirá, su uso general y las condiciones medio ambientales a las que se verá sometido. El segundo paso es el *reconocimiento*, donde se realiza la inspección visual del sitio para identificar aspectos como: topografía, estratificaciones visibles, vegetación existente, y marcas generadas por estructuras cercanas. Por último, el tercer paso es la *investigación del sitio (suelo)*, donde se realiza la recolección de muestras de suelo para su posterior observación y sometimiento a pruebas de laboratorio (Das, 2015).

Para efectuar el último paso descrito en el párrafo anterior, existe una gran variedad de métodos que permiten por un lado, sondear el terreno, y por otro, obtener muestras. La elección del método depende de la naturaleza del material y del objeto del programa de exploración. Es así como se distinguen dos grupos de métodos de exploración del suelo: los directos y los indirectos. El presente capítulo se centra en detallar los aspectos generales concernientes a estos dos grupos, con especial énfasis en el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) (Peck, Hanson, & Thornburn, 1983).

2.1 Métodos directos

Los métodos directos de exploración del suelo incluyen todas las técnicas existentes con las cuales es posible acceder al subsuelo y hacer observaciones directas, además de permitir la obtención de muestras, éstas pueden ser alteradas o inalteradas, y sirven para conocer las

propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo. En este conjunto de métodos se incluyen aquellos que permiten estimar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, a partir de correlaciones empíricas, como es el caso del ensayo SPT (Herrera & Castilla, 2012; SIAPA, 2014).

A continuación se describen los métodos directos de exploración del suelo:

2.1.1 Perforación por rotación.

La perforación por rotación consiste en transmitir movimientos de avance y giro a un dispositivo de corte por medio de varillas. Dependiendo del dispositivo de corte, la utilización o no de fluidos de perforación, los tipos de fluidos y el método de circulación de los fluidos, se distinguen varios tipos de perforaciones por rotación: con coronas de perforación, con circulación directa, con aire, y con barrena helicoidal. En la Figura 1 se observa una perforación por rotación con barrena helicoidal (IHOBE S.A., 2010).



Figura 1. Perforación por rotación con barrena helicoidal. Obtenido en: Soilmeccolombia, 2020.
Link: <https://www.soilmeccolombia.com/pilotes-barrena-continua>

2.1.2 Apiques.

Los apiques son excavaciones de poca profundidad (generalmente menores de 4 m), que se realizan principalmente para obtener muestras alteradas e inalteradas en el terreno para su posterior ensayo en laboratorio, a la vez que permite una observación directa del terreno, su estratigrafía, y la identificación del nivel freático. Estas excavaciones pueden ser realizadas manualmente, empleando palas, picos, entre otras herramientas, o mecánicas, con ayuda de retroexcavadoras. En la Figura 2 se observa un apique excavado manualmente (Herrera & Castilla, 2012).



Figura 2. Apique efectuado con herramientas manuales. Obtenido de: Herrera & Castilla, 2012.

2.1.3 Ensayo de Penetración Estática - CPT.

El Ensayo de Penetración Estática CPT (por sus siglas en inglés, Cone Penetration Test), consiste en emplear una punta cónica e hincarla en el suelo a presión a una velocidad constante para medir el esfuerzo que se requiere para la penetración del cono. Con este ensayo se logra principalmente: evaluar los parámetros geotécnicos de las capas atravesadas, determinar el perfil estratigráfico y calcular la capacidad portante del terreno y los asentamientos frente a solicitaciones externas. En la figura 3 se observa el equipo empleado para realizar este ensayo (Devincenzi & Frank, 2004).



Figura 3. Equipo para la realización de un ensayo CPT. Obtenido en: Herrera & Castilla, 2012.

2.1.4 Dilatómetro Plano de Marchetti - DMT.

El ensayo de Dilatómetro Plano de Marchetti (DMT) consiste en hincar en el terreno, ya sea mediante penetración estática o dinámica, una paleta plana de acero inoxidable la cual posee una fina membrana metálica circular, que se expande horizontalmente en el suelo mediante gas a presión. Al igual que con el ensayo CPT, con la prueba DMT se logra determinar el perfil estratigráfico del terreno, evaluar los parámetros geotécnicos de las capas atravesadas, y calcular

la capacidad portante del terreno y los asentamientos frente a sollicitaciones externas (Devincenzi & Frank, 2004).



Figura 4. Dilatómetro. Obtenido de: Portal Ondac, 2020. Link: <https://portal.ondac.com/601/w3-article-64580.html>

2.1.5 Ensayo Presiométrico - PMT.

El Ensayo Presiométrico PMT (por sus siglas en inglés, Pressuremeter Test), consiste en introducir una sonda dentro de una perforación realizada con anterioridad, con el propósito de medir la variación de volumen o deformaciones volumétricas, además de las presiones que se requieren para lograr dichas deformaciones. En el ensayo se introduce la sonda, se aumenta la presión y se registran los datos del volumen inyectado. En la Figura 5 se observa el esquema general de este ensayo (Devincenzi & Frank, 2004).

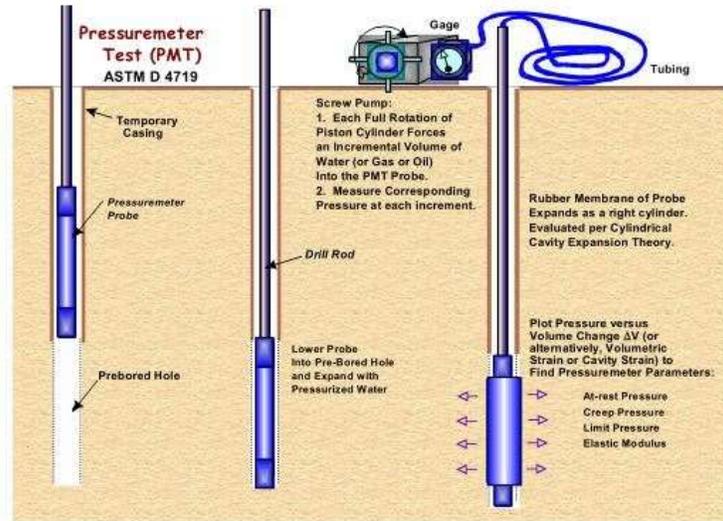


Figura 5. Esquema general de la realización del ensayo presiométrico. Obtenido en: Ingeododo, Link: <https://ingeododo.com/2018/09/02/ensayo-presiometrico-i/>

2.1.6 Ensayo de Veleta - VST.

El Ensayo de Veleta, molinete o scisométrico VST (por sus siglas en inglés, Vane Test), es empleado para obtener la resistencia al corte sin drenar y la sensibilidad de los suelos cohesivos saturados. El procedimiento consiste en hincar en el suelo una veleta o molinete, el cual está conformado por cuatro placas de acero ortogonales unidas a un varillaje, el cual se hace girar hasta alcanzar la rotura del terreno. En la Figura 6 se observa la pieza principal para efectuar este ensayo (Devincenzi & Frank, 2004).



Figura 6. Equipo principal para ejecutar el ensayo VST. Obtenido en: Tecprosa, 2020. Link: <http://www.scptu.com/Equipo/Veleta.aspx>

2.1.7 Ensayo de Penetración Estándar - SPT.

El Ensayo de Penetración Estándar (SPT, por sus siglas en inglés, Standard Penetration Test) fue inicialmente utilizado como método de muestreo en América del Norte, sus orígenes se remontan al año 1902, cuando el Coronel Charles R. Gow inició perforaciones utilizando muestreadores hincados, de 1 pulgada (25 mm) de diámetro, el cual era hincado al suelo mediante un martillo de 110 lb (50 kg), todo ello con el propósito de reducir los costos de excavación manual de los Caissons requeridos en las estructuras construidas (Devincenzi & Frank, 2004; Carmona, 2014).

Posteriormente, este método de extracción de material fue modificado con el fin de extraer muestras de suelo, para ello se aumentó a 2 pulgadas (50 mm) el diámetro de los muestreadores, siendo hincados en el suelo mediante una masa de 125 lb (62,5 kg) de peso que cae desde una altura de 30 pulgadas (760 mm). Esta fue la primera descripción oficial del método (Carmona, 2014).

Una empresa especializada en la realización de este ensayo fue la Raymond Concrete Pile Co., la cual contaba entre sus trabajadores con el sondista G.F.A. Fletcher; este le propuso a Karl Terzaghi contabilizar el número de golpes necesarios para hincar 1 pie (aprox. 30 cm) con el fin de analizar si existía relación con las propiedades del suelo. Después de años de ensayos, Terzaghi, junto con Peck, en el año 1948, publicaron los resultados de sus estudios en el libro *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*, en la cual destacaron correlaciones entre el valor N del ensayo y la densidad relativa de las arenas. Cabe destacar que en este libro se utilizó por primera vez la expresión *Ensayo de Penetración Estándar (SPT)* (Devincenzi & Frank, 2004; Carmona, 2014).

Por esta publicación, el ensayo SPT fue paulatinamente empleado por otras empresas e instituciones, entre ellas la Corps of Engineers y el US Bureau of Reclamation, lo que conllevó a la necesidad de una normalización formal del ensayo. Fue hasta el año 1958 en el que la American Standard Testing Method (ASTM) publicó un documento nombrado “Tentative Method for Penetration Test and Split barrel Sampling of soils”, sin embargo, solo hasta el año 1967 alcanzó la categoría de norma (ASTM D1586-11, 2014; Carmona, 2014).

En la actualidad, la norma más actualizada es la ASTM D1586 – 11 *Prueba de Penetración Estándar (SPT) y muestreo de suelos en barril dividido*. En Colombia, el ensayo SPT puede aplicarse según lo indicado en esta norma, sin embargo, debe seguirse primordialmente lo indicado por el Instituto Nacional de Vías en la I.N.V. E – 111 *Ensayo de*

Penetración Normal (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012).

2.7.1 Equipo requerido para el ensayo.

2.7.1.1 Equipo de perforación.

Hace referencia al equipo utilizado para obtener un agujero limpio y estable, antes de insertar el muestreador, y que garantice que el ensayo de penetración se efectuó sobre suelos esencialmente inalterados. Los métodos aceptados son: por perforación de orificio abierto, empleando broca de espiral continua con vástago vacío, por perforación con lavado, y empleando broca de espiral continua con vástago sólido (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012).

La perforación inicial se realiza hasta la profundidad que se considere pertinente para cada caso de estudio, buscando en todo momento que el material por ensayar no se encuentre alterado. En la figura 7 se observa la perforación de orificio abierto efectuada en un ensayo SPT (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012).



Figura 7. Perforación inicial antes de insertar el muestreador. Obtenido de Alva, 2016.

2.7.1.2 Varilla (tubería) para muestreo.

Son tubos de perforación de acero, los cuales cuentan con uniones que permiten conectar el muestreador de tubo partido al cabezote y la guía, sobre los cuales cae la pesa (martillo). El tubo debe tener un diámetro exterior de 41,2 mm (1 5/8”) y un diámetro interior de 28,5 mm (1 1/8”) (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012).

2.7.1.3 Muestreador de tubo partido.

Consiste en el dispositivo con el cual se extrae el material (suelo) del terreno. Debe poseer una punta de acero endurecido y reemplazable. Sus dimensiones se encuentran estandarizadas y

deben ser iguales o muy próximas a las mostradas en la figura 8 (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012).

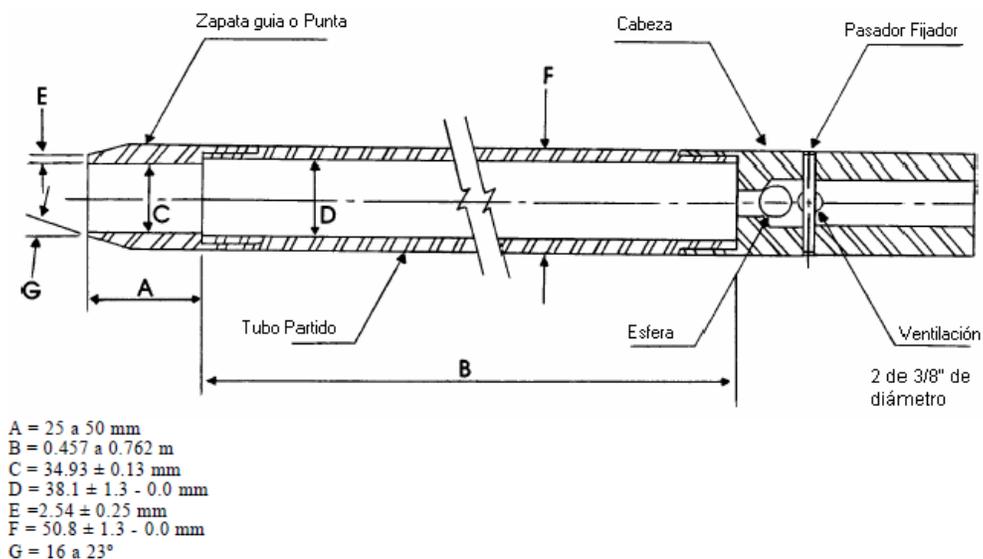


Figura 8. Muestreador de tubo partido estandarizado. Obtenido de I.N.V. E - 111.

2.7.1.4 Martinete o equipo de hincado.

Está conformado principalmente por los siguientes elementos:

Martillo: El martillo debe pesar $63,5 \pm 1 \text{ kg}$ (140 ± 2 libras) y deberá ser de masa sólida y rígida. Este martillo golpea el cabezote que protege el muestreador de tubo partido. En la figura 9 se observa este elemento (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012).



Figura 9. Martillo para ensayo SPT. Obtenido de Alva, 2016.

Sistema de caída del martillo: Se permite el empleo de: malacate o tambor, cable de recorrido, semiautomático, o sistema automático de caída del martillo (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012).

2.7.1.5 Equipo accesorio.

Es usual durante el ensayo requerir: marcadores, recipientes para muestras, parafina, hojas y elementos de medición, por lo que deben ser incluidos dentro de los elementos necesarios para la realización del ensayo (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012).

2.7.2 Procedimiento de ensayo.

El Ensayo de Penetración Estándar puede resumirse en dos etapas:

Etapa 1: Consiste en realizar las perforaciones que permitan abrir un agujero en el suelo, con alguno de los métodos mencionados anteriormente. Del material extraído pueden tomarse muestras para llevar a cabo una inspección visual, o para efectuar ensayos de humedad, clasificación y demás ensayos que se consideren necesarios (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012; Sowers & Sowers, 1972).

Etapa 2: Se retiran los equipos utilizados en la etapa 1, y se procede a instalar los elementos necesarios para efectuar el ensayo. El muestreador de tubo partido es introducido hasta el fondo del agujero uniéndolo a las barras para el sondeo. En la figura 10 se observa el esquema general del ensayo (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012; Sowers & Sowers, 1972).

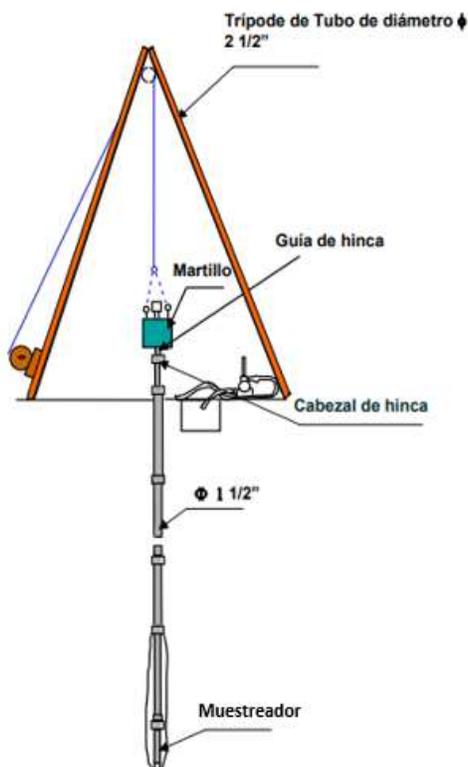


Figura 10. Esquema general del ensayo SPT. Obtenido de Alva, 2016.

El procedimiento de ensayo consiste en dejar caer el martillo (peso de $63,5 \pm 1$ kg) desde una altura de 76 cm (aprox. 30 plg), el número de veces necesario para hincar el muestreador de tubo partido en el suelo. Primero se hincan 15 cm en suelo, pero sin registrar el número de golpes (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012; Sowers & Sowers, 1972).

Después se hincan 30 cm en incrementos de 15 cm (2 intervalos). Se registra el número de golpes para cada intervalo. La suma de los golpes para estos dos intervalos se denomina como resistencia a la penetración estándar, N , del suelo. Obtenida esta profundidad de penetración se saca el muestreador a la superficie, se abre y se extrae el material para posteriores ensayos de

laboratorio y caracterización. El procedimiento puede ser realizado hasta la profundidad que se considere necesaria, ya sea continuamente, o a intervalos de 0,75 a 1,5 m (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012; Bowles, 1982).

2.7.3 Condiciones para detener el ensayo.

Existen terrenos muy resistentes en los cuales no es posible penetrar el muestreador, generándose el denominado *rechazo*, así que simplemente se registra la penetración realizada y el número de golpes correspondiente. La prueba debe darse por finalizada cuando se presente alguna de las siguientes condiciones (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012):

- Cuando se aplican 50 golpes para un tramo (intervalo) de 15 cm.
- Cuando se aplican 100 golpes en total.
- Cuando no se observa penetración alguna para 10 golpes.

2.7.4 Ventajas y limitaciones del ensayo.

El Ensayo de Penetración Estándar (SPT) es clasificado dentro de los ensayos geotécnicos in situ, siendo su principal objetivo la caracterización mecánica de las distintas capas que componen el subsuelo a través de parámetros (N) medidos en el propio medio natural (Devincenzi & Frank, 2004).

Este método de exploración del suelo, solo permite obtener muestras de suelo alteradas (lo que en sí ya representa una desventaja), siendo uno de los métodos de mayor facilidad de ejecución y menor costo. Se recomienda principalmente para suelos donde predomine la fracción arena, siendo poco adecuado para suelos constituidos por arcillas blandas y limos (Carmona, 2014).

Existen una gran cantidad de factores que puede afectar los resultados del ensayo SPT, sin embargo, entre los principales se encuentran los siguientes (Carmona, 2014):

- *Preparación y calidad del sondeo inicial (etapa 1):* El sondeo debe realizarse de tal manera que se garantice la representatividad del ensayo, y se presente la mínima alteración posible de las capas inferiores, las cuales serán propiamente ensayadas (Devincenzi & Frank, 2004; Carmona, 2014).

Por otra parte, al aumentar la profundidad del ensayo, se hace necesario en algunos casos, entubar las paredes del agujero inicial con tubería de revestimiento o agregando lodos bentoníticos (Devincenzi & Frank, 2004; Carmona, 2014).

- *Longitud del varillaje y diámetro del sondeo:* Entre mayor sea la profundidad de la capa ensayada, mayor será la longitud del varillaje insertado, por tanto, aumenta el peso que es transmitido al muestreador. Así mismo, el diámetro del orificio o

agujero se considera como un factor de modificación de los resultados del ensayo (Devincenzi & Frank, 2004; Carmona, 2014).

- *Dispositivo de golpeo:* Existen dos dispositivos básicos para realizar este procedimiento, el primero es el manual, con cuerdas y poleas, y el segundo, el de desenganche automático del martillo. En la actualidad, es aconsejable el uso de dispositivos automáticos, debido a que la repetitividad del golpeo y la altura de caída del martillo se garantizan con este tipo de dispositivos. En el caso de los dispositivos manuales, ocurren afectaciones debidas al estado de las cuerdas, el número de vueltas de la cuerda en las poleas, la longitud de la cuerda, el grado de humedad y la pericia del operador (Devincenzi & Frank, 2004; Carmona, 2014).
- *Otros factores:* los resultados del ensayo SPT se pueden ver afectados por las condiciones en las que se encuentre el muestreador, si presenta superficies oxidadas o abolladas, puede conducir a una modificación en el rozamiento de las capas de suelo atravesadas. También puede alterar los resultados del ensayo: la posición del nivel freático, obstáculos que alteren la caída libre del martillo, descuido en el número de golpes o en la medida de la penetración, el tiempo transcurrido entre la perforación inicial y la ejecución del ensayo SPT propiamente dicho, entre otros factores (Carmona, 2014).

2.2 Métodos indirectos

Los métodos indirectos de exploración del suelo incluyen las técnicas que permiten conocer las propiedades del suelo, o de los materiales que conforman sus diferentes niveles o estratos, sin acceder directamente en él. Dentro de este grupo se distinguen cuatro tipos: gravimétricos, magnéticos, sísmicos y eléctricos (Herrera & Castilla, 2012; SIAPA, 2014).

Los ensayos gravimétricos permiten medir las distintas variaciones o anomalías que se presentan en un perfil estratigráfico respecto al campo gravitatorio terrestre, de esta manera se detectan cavidades, rellenos o yacimientos. Por su parte los ensayos magnéticos miden anomalías respecto a un campo magnético, siendo empleado principalmente para investigaciones mineras (Herrera & Castilla, 2012; SIAPA, 2014).

En el caso de los ensayos sísmicos, estos permiten medir las variaciones de la velocidad de propagación de ondas de choque a través del suelo, se mide la refracción y reflexión sísmica, además de permitir la estimación de espesores de recubrimiento, profundidad de niveles freáticos, entre otros (Herrera & Castilla, 2012; SIAPA, 2014).

Por último, los ensayos eléctricos permiten llevar a cabo mediciones de la resistividad, a partir de la inducción de corriente eléctrica, de esta manera se miden los campos de potencial eléctrico, se obtienen las propiedades eléctricas de las rocas y del agua: resistividad,

conductividad, actividad electroquímica o constante dieléctrica, entre otras aplicaciones (Herrera & Castilla, 2012; SIAPA, 2014).

Capítulo 3. Correcciones al valor N obtenido del Ensayo de Penetración Estándar (SPT)

Como se detalló en el capítulo anterior, existen muchos factores que conllevan a una alteración de los resultados del ensayo SPT, por lo que tanto la ASTM D1586-11 como la I.N.V. E-111, no establecen un estimativo de la precisión ni tolerancias para este ensayo, basados en las experiencias obtenidas hasta la fecha en diversos estudios, donde se ha constatado que pueden presentarse variaciones del 100% para los valores de N aun en terrenos adyacentes (ASTM D1586-11, 2014; I.N.V. E - 111, 2012).

Los factores ya mencionados hacen necesario aplicar las denominadas *correcciones* al resultado (N) del ensayo SPT. Estas correcciones pueden categorizarse en tres tipos: por energía, por nivel freático, y por presión de confinamiento o sobrecarga efectiva. El presente capítulo se centra en detallar estas correcciones (Ordóñez & Salinas, 2019; Collazos, et al., 2006).

3.1 Correcciones por energía

La energía transmitida durante el ensayo se ve afectada específicamente por los siguientes factores: eficiencia del martillo, la longitud de las barras o varillas, el diámetro de la perforación y el diámetro interno del muestreador. Cuando se aplican las correcciones por energía se obtiene el valor N_{60} , cuya ecuación se representa a continuación (Ordóñez & Salinas, 2019; Atala, 2011).

$$N_{60} = \frac{NE_M E_1 E_D E_S}{0.60} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

N_{60} : Número de penetración estándar corregido por energía.

N : Número de penetración estándar obtenido en campo.

E_M : Eficiencia del martillo.

E_1 : Corrección por longitud de las barras o varillas.

E_D : Corrección por diámetro de la perforación.

E_S : Corrección por diámetro interno del muestreador.

A continuación se detallan cada uno de los términos de la ecuación 1.

3.1.1 Corrección por eficiencia del martillo E_M .

Por medio de la ecuación 2 se puede calcular la energía teórica que es transmitida por el martillo (Das, 2015):

$$E_T = Wh \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

E_T : Energía teórica transmitida por el martillo.

W: Peso del martillo.

h: Altura de caída del martillo.

Dado que el peso estándar del martillo es de 63,5 kilogramos, y la altura de caída libre es de 76 cm (0,76 m), si se reemplazan estos valores en la ecuación 2 se obtiene el siguiente resultado (Atala, 2011; Ordóñez & Salinas, 2019):

$$E_T = 63,5 \text{ kg} * 9,807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,76 \text{ m} = 474,5 \text{ J}$$

Este valor representa la energía teórica transmitida por el martillo, sin embargo, estudios realizados por Schertmann, 1978, y Kovacs y Salomone, 1982, mencionados por Sherif y Rose, 2001, indican que la energía entregada a las varillas durante la prueba SPT puede variar de aproximadamente el 30% al 80% del máximo teórico (Sherif & Rose, 2001; Schmertmann & Palacios, 1979).

Esta variación en la energía entregada llevo a que en Estados Unidos se expresara el valor N para una relación energética promedio de 60%, de ahí el termino N_{60} . El valor E_M , puede ser calculado a partir de la siguiente expresión (Atala, 2011):

$$E_M = \frac{E_I}{E_T} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

E_M : Eficiencia del martillo (Relación de energía entregada a la barra).

E_I : Energía real entregada a la cabeza de golpeo.

E_T : Energía teórica transmitida por el martillo.

En el año 1990, investigaciones realizadas por Clayton se centraron en determinar la eficiencia del martillo adecuada a emplearse, encontrando variaciones en este valor para cada uno de los países estudiados. En la Tabla 1 se recopilan los resultados publicados por este autor (Atala, 2011; Alva, 2016).

Tabla 1

Eficiencia del martillo recomendada por cada país

País	Eficiencia del Martillo E_M
Argentina	0.45
Brasil	0.72
China	0.50 – 0.60
Colombia	0.5
Japón	0.78 – 0.85
Reino Unido	0.73
Estados Unidos	0.45 – 0.60
Venezuela	0.43

Nota: Obtenido de Átala, 2011.

3.1.2 Corrección por longitud de las barras o varillas E1.

La longitud de las barras o varillas afectan o inciden en el valor de N, debido a que el peso de éstas aumenta con la profundidad al añadirse varillaje suplementario. Por esta razón, se hace necesario emplear un valor de corrección (E_1), el cual depende de la profundidad del sondeo, y que puede ser calculado mediante la ecuación 4. Para profundidades iguales o menores a 3 m se recomienda emplear un valor de 0.75 (Devincenzi & Frank, 2004).

$$E_M = \frac{1}{0.989860781 + \frac{4.31663223}{Z^2}} \quad \text{Para } Z > 3 \text{ m} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde Z es la profundidad del sondeo.

Es común generalizar los valores de E_1 de acuerdo a rangos de longitud de las barras o varillas, esto con el fin de facilitar los cálculos, como se muestra en la tabla 2. Sin embargo, la mayoría de softwares especializados en la corrección de los valores del ensayo SPT emplean la ecuación mostrada anteriormente (Devincenzi & Frank, 2004; Chris & Howie, 2006).

Tabla 2

Corrección por longitud de las barras o varillas

Longitud del varillaje	Factor de corrección E_1
> 10 m	1
6 a 10 m	0.95
4 a 6 m	0.85
< 4 m	0.75

Nota: Valores recomendados por Youd et al, 2001 y aceptados por la National Center for Earthquake Engineering Research. Obtenido de Devincenzi & Frank, 2004.

3.1.3 Corrección por diámetro de la perforación E_D .

Esta corrección aunque puede ser utilizada para cualquier ensayo realizado, es aconsejable principalmente para suelos granulares, ya que la influencia del diámetro de la perforación tiende a ser despreciable en suelos cohesivos. En la tabla 3 se resumen este tipo de correcciones (Devincenzi & Frank, 2004; Décourt, 1989).

Tabla 3

Corrección por diámetro de la perforación

Diámetro de perforación	Factor de corrección E_D
60 - 120 mm	1
150 mm	1.05
200 mm	1.15

Nota: Valores recomendados. Obtenido de Devincenzi & Frank, 2004.

3.1.4 Corrección por diámetro interno del muestreador ES.

El muestreador estándar o normalizado debe poseer un diámetro interno constante de 35 mm (1 3/8") incluyendo el tubo portamuestras. Cuando no se emplea un portamuestras interno, el diámetro interior del muestreador es de 38 mm (1 1/2"). Para este último caso, la fricción desarrollada por el suelo contra la pared interior del muestreador disminuye. Esta situación hace necesario realizar una corrección debido a la variación del diámetro del muestreador. En la tabla 4 se muestran los valores de este tipo de corrección (Atala, 2011; Devincenzi & Frank, 2004).

Tabla 4

Corrección por diámetro del muestreador

Condición	Factor de corrección E_s
Con tubo muestreador	1
Sin tubo muestreador	1.1 - 1.2

Nota: Valores recomendados. Obtenido de Devincenzi & Frank, 2004.

3.2 Correcciones por nivel freático

Esta corrección debe realizarse en suelos constituidos de arenas limosas que se encuentren por debajo del nivel freático. Para el caso de arenas gruesas o con gravas, la saturación del terreno no afecta los resultados. La siguiente expresión fue propuesta por Terzaghi y Peck, 1967, para aplicar esta corrección (Devincenzi & Frank, 2004; Herrera & Castilla, 2012):

$$N_{NF} = 15 + \frac{N_{60} - 15}{2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

N_{NF} : Valor corregido de N por nivel freático.

N_{60} : Número de penetración estándar corregido por energía.

La ecuación 5 se recomienda para aquellos casos en los que se obtenga un $N_{60} > 15$, ya que en estos casos se produce un debilitamiento de la resistencia al corte bajo los efectos de las presiones intersticiales en exceso que se producen al momento de aplicar el golpeo durante el ensayo (Devincenzi & Frank, 2004; Batilas, Athanasopoulos, & Pelekis, 2016).

3.3 Correcciones por presión de confinamiento o sobrecarga efectiva

Para aplicar esta corrección se emplea el denominado factor de corrección C_N , el cual se define como la relación entre la resistencia SPT medida a una presión vertical efectiva dada en un nivel y la resistencia medida a un nivel de presión estándar (Atala, 2011; Chris & Howie, 2006).

Cuando se aplica este tipo de corrección, se obtiene el valor N_I y se calcula a partir de N_{60} expresándose con la siguiente ecuación:

$$N_1 = C_N N_{60}$$

Ecuación 6

Donde:

N_1 : Valor corregido de N_{60} por presión de confinamiento o sobrecarga efectiva.

C_N : Factor de corrección.

N_{60} : Valor N corregido por energía.

Los primeros en indicar la necesidad de corregir el valor del ensayo SPT por la presión de confinamiento o sobrecarga efectiva fue Gibbs y Holtz, en el año 1957. Así mismo, estos fueron los primeros en sugerir una expresión para calcular el factor de corrección C_N , sin embargo, posteriormente diversos investigadores propusieron expresiones para calcular este factor. En la tabla 5 se resumen las expresiones más importantes para calcular el valor de C_N (Das, 2015; Bowles, 1982).

Tabla 5

Expresiones para calcular el factor de corrección C_N

Autor	Factor de corrección C_N	Unidad de los esfuerzos por sobrecarga efectiva σ'_o
Gibbs & Holtz, 1957	$C_N = \frac{50}{10 + \sigma'_o}$	psi
Peck & Bazarra, 1969	$C_N = \frac{4}{1 + 2(\sigma'_o)} \quad (\text{para } \sigma'_o \leq 1.5)$	kpsf
	$C_N = \frac{4}{3.25 + 0.5(\sigma'_o)} \quad (\text{para } \sigma'_o > 1.5)$	kpsf
Peck, Hanson & Thornburn, 1974	$C_N = 0.77 * \log \frac{20}{\sigma'_o}$	kg/cm ²
Seed, 1976	$C_N = 1 - 1.25 * \log \frac{\sigma'_o}{98.07}$	kPa
Tokimatsu & Yoshimi, 1983	$C_N = \frac{1.7}{0.7 + \frac{\sigma'_o}{98.07}}$	kPa
Liao & Whitman, 1986	$C_N = \sqrt{\frac{98.07}{\sigma'_o}}$	kPa
Samson et al., 1986	$C_N = \sqrt{\frac{95.76}{\sigma'_o}}$	kPa

Nota: Expresiones recomendadas para calcular el factor de corrección C_N . Adaptado de Das, 2005.

Cuando se determina el valor del factor de corrección C_N se debe prestar especial cuidado a las unidades en que deben ser reemplazados los esfuerzos efectivos para cada expresión

mostrada en la tabla 5. Se recomienda limitar el valor del factor de corrección C_N , considerándose generalmente la siguiente condición (Devincenzi & Frank, 2004; Das, 2015):

$$0.4 \leq C_N \leq 1.7$$

Es usual que se presenten valores mayores a 1.7, sin embargo, y como se detallara más adelante, se debe restringir los valores del factor de corrección C_N a la condición mostrada.

3.4 Ejemplo de corrección de datos de un ensayo SPT

A continuación se presenta una descripción del procedimiento necesario para corregir los datos de un ensayo SPT. Para ello se toman los resultados del estudio de suelos realizado en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, en el trabajo de maestría titulado: *Aplicación del método de los factores de valuación en los fenómenos de remoción en masa del barrio San Fermín, municipio de Ocaña y selección de obras de mitigación*. El perfil estratigráfico completo se muestra en el Apéndice A (Gallardo, 2014).

En la tabla 6 se muestran los resultados del ensayo SPT realizado en la investigación referida:

Tabla 6

Resultado del ensayo SPT

Profundidad (m)	Estrato suelo	Clasificación suelo S.U.C.S.	Condición	Valor N en campo
0,5				7
1,0				7
1,5	1	CL	No saturado	10
2,0				15
2,5				14
3,0				22
3,5			No saturado	25
4,0				28
4,5	2	SC		18
5,0			Saturado	24
5,5				21
6,0				33
6,5	3	CL	Saturado	22
7,0				28
7,5				17
8,0	4	SC	Saturado	38
8,5				37
9,0				42

Nota: Adaptado de Gallardo, R., 2014.

El nivel freático de este perfil estratigráfico se encuentra a una profundidad de 4.3 m.

La primera corrección que debe realizarse para los valores N obtenidos en campo, es la relacionada con la energía, cuya ecuación y consideraciones se describen en el numeral 3.1 del presente capítulo. Antes de aplicar la ecuación 1, para hallar el valor de N_{60} , se hace necesario

definir los valores de los 4 términos a considerar en la ecuación, los cuales se definen en la tabla

7.

Tabla 7

Valor de los factores de corrección para obtener el valor de N_{60}

Corrección por	Valor
Eficiencia del martillo E_M	0.5 (Colombia)
Longitud de las barras o varillas E_1	Para $Z \leq 3$ m: 0.75
	Para $Z > 3$ m: Ecuación 4
Diámetro de la perforación E_D	1.05 (150 mm)
Diámetro interno del muestreador E_s	1 (con tubo muestreador)

Nota: Autores, 2021.

Definidos los valores de cada uno de los términos de la ecuación 1, se puede realizar la corrección por energía. En la tabla 8 se presentan los resultados de esta corrección.

Tabla 8

Valores obtenidos de la corrección por energía

Profundidad (m)	Estrato suelo	Clasificación suelo S.U.C.S.	Condición	Valor de N en campo	Correcciones				Número de penetración estándar corregido por energía N ₆₀
					Por eficiencia del martillo E _M	Por longitud de varillas E ₁	Por diámetro de la perforación E _D	Por diámetro interno del muestreador E _S	
0.5				7	0.5	0.75	1.05	1	5
1.0				7	0.5	0.75	1.05	1	5
1.5	1	CL	No saturado	10	0.5	0.75	1.05	1	7
2.0				15	0.5	0.75	1.05	1	10
2.5				14	0.5	0.75	1.05	1	9
3.0				22	0.5	0.75	1.05	1	14
3.5			No saturado	25	0.5	0.75	1.05	1	16
4.0				28	0.5	0.79	1.05	1	19
4.5	2	SC		18	0.5	0.83	1.05	1	13
5.0			Saturado	24	0.5	0.86	1.05	1	18
5.5				21	0.5	0.88	1.05	1	16
6.0				33	0.5	0.90	1.05	1	26
6.5	3	CL	Saturado	22	0.5	0.92	1.05	1	18
7.0				28	0.5	0.93	1.05	1	23
7.5				17	0.5	0.94	1.05	1	14
8.0	4	SC	Saturado	38	0.5	0.95	1.05	1	31
8.5				37	0.5	0.95	1.05	1	31
9.0				42	0.5	0.96	1.05	1	35

Nota: Autores, 2021.

Obtenidos los valores de N_{60} del ensayo, se debe considerar continuar con la corrección por nivel freático, cuya ecuación y condiciones se describen en el numeral 3.2 del presente capítulo. Sin embargo, para el perfil estratigráfico que se está considerando en este ejemplo no existe presencia de arenas limosas por debajo del nivel freático, por lo que no se hace necesario aplicar esta corrección.

Se procede de esta manera a realizar directamente la corrección por presión de confinamiento o sobrecarga efectiva, cuya ecuación y condiciones se describen en el numeral 3.3 del presente capítulo. Para realizar esta corrección se hace necesario calcular inicialmente los esfuerzos efectivos a cada una de las profundidades en las que se registró lecturas durante el ensayo SPT. Los esfuerzos efectivos calculados se muestran en la Tabla 9.

Hallados los esfuerzos efectivos se procede a calcular el factor de corrección C_N . Como se mostró en la tabla 5, existen varias expresiones para obtener este valor, en la tabla 10 se muestran los resultados de los factores de corrección calculados con estas expresiones.

Calculados los factores de corrección C_N se procede a calcular el valor N_1 empleando la ecuación 6, en la tabla 11 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 9

Esfuerzos efectivos calculados para cada una de las profundidades consideradas en el ensayo SPT en campo

Profundidad (m)	Estrato suelo	Espesor subdivisión (m)	Clasificación suelo S.U.C.S.	Peso Unitario (kN/m ³)	Peso Unitario del agua (kN/m ³)	Esfuerzo Total (kN/m ² - kPa)	Esfuerzo de agua intersticial (kN/m ² - kPa)	Esfuerzo efectivo				
								kN/m ² - kPa	kg/cm ²	psi	kpsf	
0.5		0.5				9.10	0.00	9.10	0.09	1.32	0.19	
1.0		0.5				18.20	0.00	18.20	0.19	2.64	0.38	
1.5	1	0.5	CL	18.2	-	No saturado	27.30	0.00	27.30	0.28	3.96	0.57
2.0		0.5				36.40	0.00	36.40	0.37	5.28	0.76	
2.5		0.5				45.50	0.00	45.50	0.46	6.60	0.95	
3.0		0.5				54.30	0.00	54.30	0.55	7.87	1.13	
3.5		0.5		17.6	-	No saturado	63.10	0.00	63.10	0.64	9.15	1.32
4.0		0.5				71.90	0.00	71.90	0.73	10.43	1.50	
4.5	2	0.5	SC				81.34	4.90	76.44	0.78	11.08	1.60
5.0		0.5		18.87	9.8	Saturado	90.77	9.80	80.97	0.83	11.74	1.69
5.5		0.5					100.21	14.70	85.51	0.87	12.40	1.79
6.0		0.5					109.64	19.60	90.04	0.92	13.06	1.88
6.5	3	0.5	CL	18.8	9.8	Saturado	119.04	24.50	94.54	0.96	13.71	1.97
7.0		0.5					128.44	29.40	99.04	1.01	14.36	2.07
7.5		0.5					137.69	34.30	103.39	1.05	14.99	2.16
8.0	4	0.5	SC	18.5	9.8	Saturado	146.94	39.20	107.74	1.10	15.62	2.25
8.5		0.5					156.19	44.10	112.09	1.14	16.25	2.34
9.0		0.5					165.44	49.00	116.44	1.19	16.88	2.43

Nota: Los esfuerzos efectivos se convierten en las unidades que se requieren para calcular los factores de corrección C_N. Autores, 2021.

Tabla 10

Valores del factor de corrección obtenidas para cada una de las expresiones de la tabla 5

Profundidad (m)	Estrato suelo	Clasificación suelo S.U.C.S.	Condición	Factor de corrección C_N										
				Esfuerzo efectivo				Gibbs y Holtz, 1957	Peck y Bazarra, 1969	Peck, Hanson y Thornburn, 1974	Seed, 1976	Tokimatsu y Yoshimi, 1983	Liao y Whitman, 1986	Samson et al., 1986
				kN/m ² - kPa	kg/cm ²	psi	kpsf							
0.5				9.100	0.093	1.320	0.190	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
1.0				18.20	0.19	2.64	0.38	1.70	1.70	1.56	1.70	1.70	1.70	1.70
1.5	1	CL	No saturado	27.30	0.28	3.96	0.57	1.70	1.70	1.43	1.69	1.70	1.70	1.70
2.0				36.40	0.37	5.28	0.76	1.70	1.59	1.33	1.54	1.59	1.64	1.62
2.5				45.50	0.46	6.60	0.95	1.70	1.38	1.26	1.42	1.46	1.47	1.45
3.0				54.30	0.55	7.87	1.13	1.70	1.22	1.20	1.32	1.36	1.34	1.33
3.5				63.10	0.64	9.15	1.32	1.70	1.10	1.15	1.24	1.27	1.25	1.23
4.0				71.90	0.73	10.43	1.50	1.70	1.00	1.11	1.17	1.19	1.17	1.15
4.5	2	SC	Saturado	76.44	0.78	11.08	1.60	1.70	0.99	1.09	1.14	1.15	1.13	1.12
5.0				80.97	0.83	11.74	1.69	1.70	0.98	1.07	1.10	1.11	1.10	1.09
5.5				85.51	0.87	12.40	1.79	1.70	0.97	1.05	1.07	1.08	1.07	1.06
6.0				90.04	0.92	13.06	1.88	1.70	0.95	1.03	1.05	1.05	1.04	1.03
6.5	3	CL	Saturado	94.54	0.96	13.71	1.97	1.70	0.94	1.01	1.02	1.02	1.02	1.01
7.0				99.04	1.01	14.36	2.07	1.70	0.93	1.00	0.99	0.99	1.00	0.98
7.5				103.39	1.05	14.99	2.16	1.70	0.92	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96
8.0	4	SC	Saturado	107.74	1.10	15.62	2.25	1.70	0.91	0.97	0.95	0.95	0.95	0.94
8.5				112.09	1.14	16.25	2.34	1.70	0.90	0.96	0.93	0.92	0.94	0.92
9.0				116.44	1.19	16.88	2.43	1.70	0.90	0.94	0.91	0.90	0.92	0.91

Nota: Se calcularon los esfuerzos efectivos en las unidades que deben ser consideradas para ser reemplazadas en las ecuaciones de la Tabla 5. Autores, 2021.

Tabla 11

Valores N_1 calculados

Profundidad (m)	Estrato suelo	Clasificación suelo S.U.C.S.	Condición	Valor corregido de N_{60} por presión de confinamiento o sobrecarga efectiva (N_1)								
				Valor N_{60} corregido por nivel freático	Gibbs y Holtz, 1957	Peck y Bazarra, 1969	Peck, Hanson y Thornburn, 1974	Seed, 1976	Tokimatsu y Yoshimi, 1983	Liao y Whitman, 1986	Samson et al., 1986	
0.5				5	9	9	9	9	9	9	9	
1.0				5	9	9	8	9	9	9	9	
1.5	1	CL	No saturado	7	12	12	10	12	12	12	12	
2.0				10	17	16	13	15	16	16	16	
2.5				9	15	12	11	13	13	13	13	
3.0				14	24	17	17	18	19	19	19	
3.5			No saturado	16	27	18	18	20	20	20	20	
4.0				19	32	19	21	22	23	22	22	
4.5	2	SC		13	22	13	14	15	15	15	15	
5.0			Saturado	18	31	18	19	20	20	20	20	
5.5				16	27	15	17	17	17	17	17	
6.0				26	44	25	27	27	27	27	27	
6.5	3	CL	Saturado	18	31	17	18	18	18	18	18	
7.0				23	39	21	23	23	23	23	23	
7.5				14	24	13	14	14	14	14	13	
8.0	4	SC	Saturado	31	53	28	30	29	29	30	29	
8.5				31	53	28	30	29	29	29	29	
9.0				35	60	31	33	32	32	32	32	

Nota: Autores, 2021.

Se puede observar en las tablas 10 y 11 que excepto por los resultados con la expresión de Gibbs y Holtz, 1957, los factores de corrección y los valores de N_1 no presentan grandes diferencias entre los valores. La importancia del valor N_1 radica en que es el dato que generalmente se correlaciona con las propiedades del suelo, por lo que es de vital importancia realizar un proceso de corrección adecuado, y dada las diferentes opciones que existen para determinar, por ejemplo, el factor de corrección, se debe considerar cada una de las alternativas para seleccionar la más adecuada (Das, 2015; Devincenzi & Frank, 2004).

Actualmente existen diversos softwares que facilitan y agilizan la corrección de los valores del ensayo SPT, entre ellos, uno de los más destacados es el software NovoSPT, desarrollado por la empresa canadiense Novo Tech Software, empresa especializada en el desarrollo de soluciones de software para ingeniería geotécnica. El uso de este software demostró que las correcciones realizadas fueron correctas. En el apéndice B se muestran los resultados obtenidos con el software (Novo Tech Software, 2020).

Capítulo 4. Correlaciones entre los valores del ensayo SPT y distintos parámetros del suelo

El Ensayo de Penetración Estándar es el método de prueba in situ más utilizado para el reconocimiento geotécnico por lo que actualmente se dispone de una gran experiencia sobre su uso. Al disponerse de una gran cantidad de información sobre resultados obtenidos con este ensayo, distintos autores e investigadores han planteado correlaciones a partir de estos valores y distintas características del suelo (Carmona, 2014; Atala, 2011).

Los valores del ensayo SPT que comúnmente se correlacionan con las características del suelo son los términos N_1 y N_{60} . El uso de las correlaciones debe considerarse como una aproximación a las características reales del suelo, por lo que se recomienda que su uso este sustentado en la experiencia, ya que los resultados obtenidos suelen emplearse para la solución de problemas de cimentaciones, estabilidad de taludes y en vías (Carmona, 2014; Akpila, 2013).

En el presente capítulo se expondrán las propiedades del suelo que actualmente cuentan con correlaciones planteadas a partir de los datos del ensayo SPT, así como las consideraciones que deben tenerse en cuenta para ser empleadas.

4.1 Consistencia

Se define como la propiedad que indica la facilidad relativa con la que un suelo puede ser deformado. En las tablas 12 y 13 se muestran las consistencias aproximadas del suelo según el valor de N_{60} obtenido del ensayo SPT (Hoyos, 2001).

Tabla 12

Consistencia de arcillas y limos de acuerdo al valor de N_{60}

Valor de N_{60}	Consistencia
< 2	Muy blanda
2 - 4	Blanda
4 - 8	Medianamente compacta
8 - 15	Compacta
15 - 30	Muy compacta
> 30	Dura

Nota: Terzaghi & Peck, 1948.

Tabla 13

Consistencia de arenas y gravas de acuerdo al valor de N_{60}

Valor de N_{60}	Consistencia
0 - 4	Muy suelta
4 - 10	Suelta
10 - 30	Medianamente densa
30 - 50	Densa
> 50	Muy densa

Nota: Terzaghi & Peck, 1948.

4.2 Densidad Relativa (D_r)

La densidad relativa es la medida que indica la compactación de un suelo. Puede ser determinada a partir de la relación de vacíos, o mediante la densidad del suelo. En la tabla 14 se muestran las correlaciones propuestas hasta la fecha entre la densidad relativa y los resultados obtenidos con el ensayo SPT. Es de resaltar que estas correlaciones se limitan a arenas y gravas (Hoyos, 2001).

Tabla 14

Correlaciones entre la densidad relativa (D_r) y el ensayo SPT

Autor	Correlación	Unidad de los esfuerzos verticales totales	Recomendada en
Gibbs & Holtz, 1957	$D_r = 100 * \sqrt{\frac{N_{60}}{\left(\frac{12 * \sigma_v}{47.88} + 17\right)}}$	kPa	Arenas y gravas
Meyerhof, 1957	$D_r = 20.41 * \sqrt{\frac{N_{60}}{\left(\frac{\sigma_v}{98} + 0.708\right)}}$	kPa	Arenas y gravas
Skempton 1986	$D_r = 12.4 * \sqrt{N_{60}}$	-	Arenas gruesas
Yoshida et al., 1988	$D_r = 25 * \sigma_v^{-0.12} * N_{60}^{0.46}$	-	Arenas y gravas
Cubrinovski & Ishihara, 1999	$D_r = 100 * \sqrt{\frac{N_1}{39}}$	-	Todas las arenas

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 14

Autor	Correlación	Unidad de los esfuerzos verticales totales	Recomendada en
Idriss & Boulanger, 2003	$D_r = 100 * \sqrt{\frac{N_1}{46}}$	-	Arenas y gravas

Nota: Autores, 2021.

4.3 Ángulo de fricción interna (ϕ)

Es el ángulo que corresponde al ángulo cuya tangente es el coeficiente promedio de fricción entre las partículas de un suelo. En la tabla 15 se muestran las correlaciones planteadas hasta la fecha entre este ángulo y los resultados del ensayo SPT (Hoyos, 2001).

Tabla 15

Correlaciones entre ángulo de fricción interna (ϕ) y el ensayo SPT

Autor	Correlación	Recomendada en
	$\phi = \sqrt{12 * N_{60}} + 22.8$	
Ayuthaya	$\phi = \sqrt{12 * N_1} + 22.4$	Todo tipo de suelo
	$\phi = \sqrt{12 * N_{60}} + 22$	
Chonburi	$\phi = \sqrt{12 * N_1} + 23.4$	Todo tipo de suelo
Peck et al., 1953	$\phi = 27 + \sqrt{0.3 * N_{60}}$	Todo tipo de suelo

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 15

Autor	Correlación	Recomendada en
	$\phi = \sqrt{12 * N_{60}} + 25$	Suelos angulares y bien gradados
Dunham, 1954	$\phi = \sqrt{12 * N_{60}} + 20$	Suelos angulares y uniformes
	$\phi = \sqrt{12 * N_{60}} + 15$	Suelos redondos y uniformes
Meyerhof, 1959	$\phi = 28 + 0.15 * D_r$	Dr debe ser calculado con la ecuación de Yoshida, 1988
Ohsaki et al., 1959	$\phi = \sqrt{20 * N_{60}} + 15$	Todo tipo de suelo
Peck, Hanson & Thornburn, 1974	$\phi = 53.881 - 27.6034 * e^{-0.0147 * N_1}$	Todo tipo de suelo
	$\phi = 27.1 + 0.3 * N_1 - 0.00054 * N_1^2$	
Wolff, 1989	$\phi = 27.1 + 0.3 * N_{60} - 0.00054 * N_{60}^2$	Todo tipo de suelo
JRA, 1990	$\phi = \sqrt{15 * N_{60}} + 15$	Para $N_{60} > 5$
	$\phi = 30 + \frac{N_{60}}{3}$	Arenas finas
Terzaghi, Peck & Mesri, 1996	$\phi = 28 + \frac{N_{60}}{4}$	Agrenas gruesas

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 15

Autor	Correlación	Recomendada en
	$\phi = 44 + \frac{10 * D_r}{100} - \left(7 + \frac{2 * D_r}{100}\right) * \log \frac{\sigma'_v}{100}$	Gravas con $C_u > 4$
Duncan, 2004	$\phi = 34 + \frac{10 * D_r}{100} - \left(3 + \frac{2 * D_r}{100}\right) * \log \frac{\sigma'_v}{100}$	Arenas con $C_u < 6$
	$\phi = 39 + \frac{10 * D_r}{100} - \left(3 + \frac{2 * D_r}{100}\right) * \log \frac{\sigma'_v}{100}$	Arenas con $C_u > 6$

Nota: Autores, 2021.

4.4 Resistencia al corte no drenado (Su)

Es la resistencia del suelo que se obtiene cuando se aplican cargas hasta la rotura o falla en condiciones no drenadas, es decir, cuando las cargas aplicadas que ocasionan la rotura o falla son aplicadas sobre una muestra de suelo a una velocidad superior a la del drenaje del mismo. En la tabla 16 se muestran las correlaciones publicadas hasta la fecha entre esta propiedad y los resultados del ensayo SPT (Hoyos, 2001).

Tabla 16

Correlaciones entre la resistencia al corte no drenado (S_u) y el ensayo SPT

Autor	Correlación	Recomendada en
Meyerhof, 1956	$S_U = 20 * N_{60}$	Arcillas y limos
Terzaghi & Peck, 1967	$S_U = 6.3 * N_{60}$	Arcillas y limos
Sanglerat, 1972	$S_U = 12.5 * N_{60}$	Arcillas
Hara et al., 1974	$S_U = 29 * N_{60}^{0.72}$	Arcillas y limos
Peck et al., 1974	$S_U = 6 * N_1$	Arcillas y limos
Stroud, 1974	$S_U = 4.5 * N_{60}$	Arcillas
Stroud & Butler, 1975	$S_U = 4 * N_{60}$	Arcillas y limos con $N_{60} > 5$
Reese, Touma & O'Neill, 1976	$S_U = 7 * N_{60}$	Arcillas y limos
	$S_U = 150 * \frac{N_{60}}{60}$	Arenas arcillosas (SC) y limos (M)
Sowers, 1979	$S_U = 275 * \frac{N_{60}}{60}$	Arcillas (CL)
	$S_U = 500 * \frac{N_{60}}{60}$	Arcillas (CH)
Nixon, 1982	$S_U = 12 * N_{60}$	Arcillas y limos
Bowles, 1988	$S_U = 2.5 * N_{60}$	Arcillas y limos
Ajayi & Balogun, 1988	$S_U = 1.39 * N_{60} + 74.2$	Arcillas y limos

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 16

Autor	Correlación	Recomendada en
Decourt, 1989	$S_U = 10.5 * N_{60}$	Arcillas y limos
Ghahramani & Behpoor, 1989	$S_U = 7.5 * N_{60}$	Arcillas y limos con $N_{60} \leq 25$
Kulhawy & Mayne, 1990	$S_U = 6 * N_{60}$	Arcillas y limos
Hatef & Keshavarz, 2004	$S_U = 4.1 * N_{60} + 42.09$	Arcillas y limos
Hettiarachchi & Brown, 2009	$S_U = 4.1 * N_{60}$	Arcillas y limos

Nota: Autores, 2021.

4.5 Velocidad de onda de corte (Vs)

La velocidad de onda de corte es un parámetro geofísico que permite clasificar los suelos y las rocas, especialmente sus características estáticas y dinámicas, siendo utilizado principalmente para la estratificación del suelo. En la tabla 17 se muestran las correlaciones publicadas hasta la fecha entre esta propiedad y los resultados del ensayo SPT (Hoyos, 2001).

Tabla 17

Correlaciones entre la velocidad de onda de corte (V_s) y el ensayo SPT

Autor	Correlación	Recomendada en
Kanai et al., 1966	$V_s = 19 * N_{60}^{0.6}$	Todo tipo de suelos
Shibata, 1970	$V_s = 31.7 * N_{60}^{0.54}$	Todo tipo de suelos
Imai & Yoshimura, 1970	$V_s = 76 * N_{60}^{0.33}$	Todo tipo de suelos
Ohba & Toriuma, 1970	$V_s = 84 * N_{60}^{0.31}$	Todo tipo de suelos
Ohta et al., 1972	$V_s = 87.2 * N_{60}^{0.36}$	Arenas
Fujiwara, 1972	$V_s = 92.1 * N_1^{0.337}$	Todo tipo de suelos
Ohsaki & Iwazaki, 1973	$V_s = 81.4 * N_{60}^{0.39}$	Arenas y gravas
	$V_s = 59 * N_{60}^{0.47}$	Todo tipo de suelos
Imai et al., 1975	$V_s = 89.9 * N_{60}^{0.341}$	Todo tipo de suelos
	$V_s = 91 * N_{60}^{0.337}$	Suelos del período cuaternario y aluviones del Pleistoceno
Imai, 1977	$V_s = 80.6 * N_{60}^{0.331}$	Arenas
	$V_s = 80.2 * N_{60}^{0.292}$	Arcillas
Schmertmann, 1978	$V_s = 15 * N_{60}$	Arenas
	$V_s = 100 * N_{60}^{0.3333}$	Arcillas
JRA, 1980	$V_s = 80 * N_{60}^{0.3333}$	Arenas

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 17

Autor	Correlación	Recomendada en
Seed & Idriss, 1981	$V_S = 56 * N_{60}^{0.5}$	Todo tipo de suelos
Sykora & Stokoe, 1983	$V_S = 100.5 * N_{60}^{0.29}$	Arenas
Okamoto et al., 1989	$V_S = 125 * N_{60}^{0.3}$	Arenas del Pleistoceno
	$V_S = 144.43 * N_{60}^{0.31}$	Arcillas
Lee, 1990	$V_S = 105.64 * N_{60}^{0.32}$	Limos
	$V_S = 57.4 * N_{60}^{0.49}$	Arenas
Yokota et al., 1991	$V_S = 121 * N_{60}^{0.27}$	Todo tipo de suelos
Sisman, 1995	$V_S = 32.8 * N_1^{0.51}$	Todo tipo de suelos
	$V_S = 107.6 * N_1^{0.36}$	Todo tipo de suelos
Athanasopoulos, 1995	$V_S = 76.55 * N_1^{0.445}$	Arcillas
	$V_S = 22 * N_{60}^{0.85}$	Todo tipo de suelos
Jafari et al., 1997	$V_S = 63.8 * N_1^{0.292}$	Todo tipo de suelos
Kiku et al., 2001	$V_S = 90 * N_1^{0.309}$	Todo tipo de suelos
	$V_S = 90.82 * N_1^{0.319}$	Arenas
Hasancebi & Ulusay, 2007	$V_S = 97.89 * N_1^{0.269}$	Arcillas

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 17

Autor	Correlación	Recomendada en
Alfaro, 2007	$V_S = 99.783 * N_1^{0.383}$	Todo tipo de suelos
	$V_S = 58 * N_1^{0.39}$	Todo tipo de suelos
	$V_S = 73 * N_1^{0.33}$	Arenas
Dikmen, 2008	$V_S = 60 * N_1^{0.36}$	Limos
	$V_S = 44 * N_1^{0.48}$	Arcillas

Nota: Autores, 2021.

4.6 Módulo de Young o confinado (Es)

Hace referencia a la relación entre el esfuerzo y la deformación lineal unitaria en el intervalo elástico de los materiales que se deforman de acuerdo con la ley de Hooke, al ser sometidos a fuerzas compresivas o de tracción. También suele ser denominado como módulo de elasticidad. En la tabla 18 se muestran las correlaciones publicadas hasta la fecha entre esta propiedad y los resultados del ensayo SPT (Hoyos, 2001).

Tabla 18

Correlaciones entre el Módulo de Young o confinado (E_s) y el ensayo SPT

Autor	Correlación	Recomendada en
	$E_s = \frac{100 * (43 + 11.8 * N_{60})}{1000}$	Arenas y gravas
Mezenbach, 1961	$E_s = \frac{100 * (24 + 5.3 * N_{60})}{1000}$	Arenas limosas
	$E_s = \frac{100 * (12 + 5.8 * N_{60})}{1000}$	Limos
Chaplin, 1963	$E_s = (44 * N_{60})^{0.75} * \frac{95.76}{1000}$	Arenas
Farrent, 1963	$E_s = \frac{7.5 * \frac{8}{9} * N_{60} * 95.76}{1000}$	Arenas
	$E_s = \frac{5 * (N_{60} + 15) * 95.76}{1000}$	Arenas
Webb, 1969	$E_s = \frac{3.33 * (N_{60} + 5) * 95.76}{1000}$	Arenas arcillosas
	$E_s = \frac{4 * (N_{60} + 12) * 95.76}{1000}$	Todo tipo de suelos
Trofimenkov, 1974	$E_s = 350 * \log N_{60} * \frac{98.067}{1000}$	Arenas
Denver, 1982	$E_s = 7 * \sqrt{N_{60}}$	Arenas
Skempton, 1986	$E_s = 4.8 + 1.25 * N_{60}$	Todo tipo de suelos

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 18

Autor	Correlación	Recomendada en
Ghahramani & Behpoor, 1989	$E_S = \frac{N_{60} * 170}{1000}$	Arcillas con $N_{60} \leq 25$
	$E_S = \frac{5 * N_{60} * 100}{1000}$	Arenas con finos
Kulhawy & Mayne, 1990	$E_S = \frac{10 * N_{60} * 100}{1000}$	Arenas normalmente consolidadas
	$E_S = \frac{15 * N_{60} * 100}{1000}$	Arenas sobreconsolidadas
Papadopoulos, 1992	$E_S = \frac{(75 + 8 * N_{60}) * 100}{1000}$	Arenas
	$E_S = \frac{6000 * N_{60}}{1000}$	Arenas normalmente consolidadas
Bowles, 1996	$E_S = \frac{18500 * \log N_{60}}{1000}$	Arenas normalmente consolidadas
	$E_S = \frac{250 * (N_{60} + 15)}{1000}$	Arenas saturadas
	$E_S = \frac{1200 * (N_{60} + 6)}{1000}$	Arenas con gravas

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 18

Autor	Correlación	Recomendada en
AASHTO, 1996	$E_S = \frac{400 * N_1}{1000}$	Limos
	$E_S = \frac{700 * N_1}{1000}$	Arenas
	$E_S = \frac{1000 * N_1}{1000}$	Arenas gruesas
	$E_S = \frac{1200 * N_1}{1000}$	Gravas

Nota: Autores, 2021.

4.7 Módulo de corte o rigidez ($G_{\text{máx}}$)

Hace referencia a la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria del suelo en el rango de comportamiento elástico bajo esfuerzos de cortante. En la tabla 18 se muestran las correlaciones publicadas hasta la fecha entre esta propiedad y los resultados del ensayo SPT (Hoyos, 2001).

Tabla 19

Correlaciones entre el Módulo de corte o rigidez ($G_{máx}$) y el ensayo SPT

Autor	Correlación	Recomendada en
Imai & Yoshimura, 1970	$G_{máx} = 9810 * N_{60}^{0.78}$	Suelos mixtos
Ohba & Toriumi, 1970	$G_{máx} = 11960 * N_{60}^{0.62}$	Arenas y arcillas aluviales
	$G_{máx} = 11940 * N_{60}^{0.78}$	Todo tipo de suelo
Ohsaki & Iwasaki, 1973	$G_{máx} = 11770 * N_{60}^{0.8}$	Todo tipo de suelo
	$G_{máx} = 13730 * N_{60}^{0.71}$	Suelos cohesivos
	$G_{máx} = 6370 * N_{60}^{0.94}$	Arenas
Hara et al., 1974	$G_{máx} = 15490 * N_{60}^{0.668}$	Suelos aluviales
Wroth et al., 1979	$G_{máx} = 100 * 120 * N_{60}^{0.8}$	Todo tipo de suelo
Randolph, 1981	$G_{máx} = 1000 * N_{60}$	Todo tipo de suelo
	$G_{máx} = 14120 * N_{60}^{0.68}$	Todo tipo de suelo
Imai & Tonouchi, 1982	$G_{máx} = 17260 * N_{60}^{0.607}$	Arcillas aluviales
	$G_{máx} = 12260 * N_{60}^{0.611}$	Arenas aluviales
Seed et al., 1983	$G_{máx} = 6220 * N_{60}$	Todo tipo de suelo
Seed, Idriss & Arango, 1983	$G_{máx} = 6500 * N_{60}$	Todo tipo de suelo

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 18

Autor	Correlación	Recomendada en
Kramer, 1996	$G_{máx} = 15560 * N_{60}^{0.68}$	Arenas y gravas
Anbazhagan & Sitharam, 2010	$G_{máx} = 24280 * N_{60}^{0.55}$	Limos arenosos
	$G_{máx} = 29170 * N_1^{0.57}$	Arenas limosas con arcillas
Anbazhagan, Parihar & Tashmi, 2012	$G_{máx} = 15090 * N_1^{0.74}$	Arenas y gravas
<i>Nota:</i> Autores, 2021.		

Capítulo 5. Principales correlaciones del ensayo SPT obtenidas en Colombia y en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander

Al igual que en otros países del mundo, en Colombia se ha buscado correlacionar los resultados del ensayo SPT con los parámetros del suelo de determinadas zonas geográficas del país, en el presente capítulo se muestran las correlaciones más importantes propuestas en el país hasta la fecha.

5.1 Correlaciones propuestas en Colombia

5.1.1 Correlación 1.

Mediante la investigación titulada “CORRELACIÓN ENTRE EL VALOR N DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR Y VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE PARA ARCILLAS EN BOGOTÁ – COLOMBIA”, se llevaron a cabo ensayos de SPT para correlacionar los resultados con los valores de velocidad de onda de corte (V_s) disponibles (Alfaro, 2007). Resultado de la investigación el autor propuso la siguiente correlación:

$$V_s = 99.783 * N_{60}^{0.383}$$

Ecuación 7

La ecuación 7 queda limitada a las arcillas producto de meteorización de arcillolitas de la Formación Bogotá (Alfaro, 2007).

5.1.2 Correlación 2.

En la investigación titulada “CALIBRACIÓN DEL MÉTODO DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA CON SPT EN SUELOS DE LA REGIÓN LLANERA COLOMBIANA”, se llevaron a cabo ensayos de SPT y ensayos de corte directo para correlacionar los valores de N_1 con el ángulo de fricción interna (ϕ). Los ensayos fueron realizados en los departamentos de Meta y Casanare. Como resultado de este estudio se propuso la siguiente correlación, la cual está limitada a suelos arcillosos y arenosos (Montenegro, 2014).

$$\Phi = 12.785 + \sqrt{25.858 * N_1} \quad \text{Ecuación 8}$$

5.1.3 Correlación 3.

El coeficiente de balasto (K_s) es un parámetro que se define como la relación entre la presión que actúa en un punto y el asiento que produce dicha presión, asociándose con la rigidez del terreno. Es un valor importante que permite determinar el asentamiento que producen las construcciones en el suelo, así como la distribución de esfuerzos en ciertos elementos de cimentación (Pantoja & Suárez, 2015).

La importancia de este coeficiente llevó a la realización de la investigación titulada “ESTUDIO SOBRE LA RELACIÓN ENTRE EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR Y EL COEFICIENTE DE BALASTO (K) PARA SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS EN LA ZONA DE EXPANSIÓN URBANA DE CERRITOS-PEREIRA”. En esta investigación se llevaron a cabo ensayos en el sector de expansión urbana llamado Cerritos en la ciudad de Pereira, Risaralda. Como resultado de este trabajo se propuso la siguiente correlación para obtener el coeficiente de balasto (K_s) (Pantoja & Suárez, 2015):

$$K_s = -0.1317 * N_{45}^3 + 8.6153 * N_{45}^2 - 166.24N_{45} + 1009.2 \quad \text{Ecuación 9}$$

La correlación descrita en la ecuación 9 se recomienda para suelos similares a la zona de estudio, los cuales fueron clasificados como limosos (ML). La profundidad de los ensayos SPT fue de 1.5 m. Por otra parte se debe considerar que se consideró una eficiente del martillo de 0.45 (45%) (Pantoja & Suárez, 2015).

5.1.4 Correlación 4.

En el año 2018, la Universidad Nacional de Huancavelica del Perú, realizó una investigación en suelos colombianos, titulada: “CORRELACIÓN EMPÍRICA ENTRE LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS S (V_s) Y EL RESULTADO DEL

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN ESTÁNDAR, APLICADO A LOS SUELOS DEPARTAMENTO DEL HUILA, PUTUMAYO Y CASANARE - COLOMBIA”.

Como resultado de esta investigación se propuso una correlación entre los resultados del ensayo SPT y la velocidad de onda de corte (V_s) para suelos de los departamentos donde se realizó el estudio (Trujillo, 2018):

$$V_s = 65.034 * N_{60}^{0.4735} \quad \text{Ecuación 10}$$

5.1.5 Investigaciones con correlaciones fallidas.

Las cuatro investigaciones mostradas anteriormente permitieron obtener correlaciones que fueron propuestas como adecuadas para los casos específicos de cada estudio, sin embargo, en Colombia se han llevado a cabo numerosos estudios que han buscado correlacionar los valores del Ensayo de Penetración Estándar con las propiedades del suelo en otras zonas del país, pero cuyos resultados obtenidos no hicieron posible la obtención de correlaciones confiables, a continuación se muestran los títulos de algunas de esas investigaciones:

- ESTIMACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA Y COHESIÓN NO DRENADA A PARTIR DE CORRELACIONES BASADAS EN ENSAYOS IN SITU PARA SUELOS DEL PIEDEMONTA DE LOS CERROS ORIENTALES DE BOGOTÁ D.C..

- VALIDACIÓN DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT), MEDIANTE CORRELACIONES CON ENSAYO DE CONO DE PENETRACIÓN HOLANDÉS (CPT) Y EL DILATÓMETRO DE MARCHETTI (DMT) EN SUELOS RESIDUALES COHESIVOS. CASO: ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUÍA.
- CORRELACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE CBR DE CAMPO Y EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN ESTÁNDAR SPT EN CONDICIONES NORMALES, EN SUELOS COHESIVOS LOCALIDAD DE SUBA CIUDAD DE BOGOTÁ, D.C..

5.2 Correlaciones propuestas en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander

En la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, hasta la fecha se han realizado dos investigaciones que han buscado correlacionar los valores del Ensayo de Penetración Estándar (SPT), con los valores de la Prueba de Penetración Dinámica con el cono tipo Peck (Gelvis & Ortiz, 2012) (Sánchez & Pinto, 2013)

La primera investigación fue realizada en el año 2012 y se tituló: “DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE GOLPES (N) DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT), Y EL NÚMERO DE GOLPES (N_c) DE LA PRUEBA

DE PENETRACIÓN DINÁMICA CON EL CONO TIPO PECK (CP)”. Los ensayos de SPT y CP fueron realizados en suelos granulares, específicamente los clasificados como SM, característicos de la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, y pertenecientes a las zonas correspondientes al Complejo Ígneo Intrusivo-Extrusivo (Jci) y que han sido producto de la meteorización de las granodioritas. Resultado de este trabajo se propusieron correlaciones entre el ensayo SPT y el de CP, además, de correlaciones entre los valores de peso unitario, densidad relativa y el número de golpes N del ensayo de SPT (Gelvis & Ortiz, 2012).

La segunda investigación fue llevada a cabo en el año 2013 bajo el título: “DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE GOLPES (N) DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT), Y EL NÚMERO DE GOLPES (N_c) DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN DINÁMICA CON EL CONO TIPO PECK (CP), CASO DE ESTUDIO, SUELOS COHESIVOS”. Los suelos cohesivos fueron clasificados como “CL” (de 0.0 a 4.5 m de profundidad) y como “SC” (de 4.5 a 6 m de profundidad) pertenecientes a la Formación Algodonal (de origen sedimentario, Tpa). Resultado de esta investigación se propusieron correlaciones entre el número de golpes de los ensayos SPT y CP, además de correlaciones entre el número de golpes N del SPT con varias propiedades del suelo estudiado: peso unitario, resistencia a la compresión, resistencia al corte no drenado, ángulo de fricción interno y cohesión (Sánchez & Pinto, 2013).

Conclusiones

El desarrollo de esta monografía permitió concluir lo siguiente:

En la actualidad existen dos conjuntos de métodos de exploración del suelo: los directos (perforación por rotación, apiques, CPT, DMT, PMT, VST, y SPT) e indirectos (gravimétricos, magnéticos, sísmicos y eléctricos). De entre todos estos ensayos el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) es el más empleado para el reconocimiento geotécnico “in situ” del suelo. Su procedimiento de ensayo esta estandarizado en la norma ASTM D1586, y para Colombia en la I.N.V. E-111. Este ensayo destaca al permitir la obtención de muestras de suelo alteradas, que posteriormente sirven para hallar las propiedades del suelo en laboratorio, facilitar la caracterización mecánica de las distintas capas que componen el subsuelo, y estimar los parámetros del suelo estudiado a través de correlaciones entre éstas y los valores N (N_1 y N_{60}) contabilizados durante el ensayo.

La mayor desventaja del ensayo SPT es que no existe un estimativo de la precisión ni tolerancias para sus resultados, esto según la experiencia obtenida hasta la fecha en diversos estudios, por tal razón, la veracidad de los resultados está determinada en la correcta aplicación del procedimiento de ensayo, la pericia de los operadores de los equipos, y en una interpretación objetiva de los datos (número de golpes N).

El número de golpes (N) obtenidos directamente del ensayo SPT, debe ser corregido de tres formas: por energía, por nivel freático, y por presión de confinamiento o sobrecarga efectiva. Para aplicar la corrección por energía se deben considerar aspectos como: eficiencia del martillo, longitud de las barras o varillas, diámetro de la perforación y diámetro del muestreador, de esta forma se obtiene el valor de N_{60} . Para la corrección por nivel freático debe considerarse el tipo de suelo que se encuentra por debajo del nivel freático, pues esta corrección es solo recomendada para suelos constituidos principalmente por arenas limosas, siendo despreciable para el caso de arenas gruesas o con gravas, además que se debe cumplir la condición de $N_{60} > 15$. Con la última corrección, por presión de confinamiento o sobrecarga efectiva, se obtiene el término N_1 . Para ello se debe calcular previamente el denominado factor de corrección C_N , para lo cual existen varias expresiones. El valor de C_N debe estar limitado a la condición $0.4 \leq C_N \leq 1.7$

Actualmente existe una gran cantidad de correlaciones propuestas entre los valores del ensayo SPT y distintos parámetros del suelo, con el fin de realizar una aproximación a las condiciones del suelo. Entre los parámetros o propiedades del suelo con correlaciones publicadas como adecuadas por diferentes autores se encuentran: consistencia, densidad relativa (D_r), ángulo de fricción (ϕ), resistencia al corte no drenado (S_u), velocidad de onda de corte (V_s), módulo de Young o confinado (E_s) y el módulo de corte o rigidez (G_{\max}). Para utilizar estas correlaciones deben considerarse las recomendaciones hechas por cada autor, pues comúnmente estas correlaciones están condicionadas al tipo de suelo estudiado.

La importancia del ensayo SPT ha conllevado a que se desarrollen softwares especializados en corregir los resultados de campo (N). En esta monografía se empleó el software NovoSPT, desarrollado por la empresa canadiense Novo Tech Software, con el cual se demostró que las correcciones realizadas en el ejemplo ilustrado en el capítulo 3 fueron correctas. Además, este software permite correlacionar los resultados del ensayo con las propiedades del suelo, lo cual la convierte en una herramienta de gran provecho para los estudios de reconocimiento geotécnico.

En Colombia diversas investigaciones han buscado correlacionar los valores del ensayo SPT con los parámetros del suelo en las condiciones específicas de determinadas zonas del país. De esta manera se han propuesto correlaciones para calcular la velocidad de onda de corte (V_s), el ángulo de fricción interna (ϕ) y el coeficiente de balasto (K_s). Así se han hecho intentos para correlacionar los resultados del ensayo SPT con otras características del suelo (CBR) así como con otros ensayos in situ o directos (CPT, DMT) pero sin obtener resultados positivos o aceptables.

Para el caso específico de la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, se han llevado a cabo dos investigaciones en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, las cuales han estado centradas en correlacionar los valores del Ensayo de Penetración Estándar (SPT), con los valores de la Prueba de Penetración Dinámica con el cono tipo Peck (CP), además de correlacionar propiedades del suelo como el peso unitario, densidad relativa, resistencia a la compresión,

resistencia al corte no drenado, ángulo de fricción interna y cohesión, con el número de golpes del ensayo (N).

De forma general se concluye con esta recopilación de información, que el uso de correlaciones entre los valores del ensayo SPT y los parámetros del suelo (consistencia, densidad relativa (D_r), ángulo de fricción (ϕ), resistencia al corte no drenado (S_u), velocidad de onda de corte (V_s), módulo de Young o confinado (E_s) y el módulo de corte o rigidez ($G_{m\acute{a}x}$), es adecuada ya que existe una gran cantidad de información que ha permitido validar estas correlaciones, sin embargo, para su uso deben tenerse presente las limitaciones de cada correlación y las condiciones en las que debe ser aplicada. Así mismo es importante resaltar que el uso de estas correlaciones no reemplaza totalmente los ensayos adicionales que deben realizarse en el suelo, pues lo que permiten es obtener una aproximación de las condiciones reales del suelo.

Referencias

- Akpila, S. (2013). Comparison of standard penetration test methods on bearing capacity of shallow foundations on sand. *Scientific Journal of Pure and Applied Sciences*, 72-78.
- Alfaro, A. (2007). Correlación entre el valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para arcillas en Bogotá - Colombia. *Épsilon*(8), 13-23.
- Alva, J. (2016). *Exploración geotécnica*. Post grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- ASTM D1586-11. (2014). *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. ASTM.
- Atala, C. (2011). *Estudio experimental sobre correlaciones en suelos granulares finos (arenas) compactados, usando equipos de penetración*. Trabajo de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Batilas, Athanasopoulus, & Pelekis. (2016). SPT Energy Measurements: Manual vs. Automatic Hammer Release. *Geotechnical and Geological Engineering*.
- Berry, P., & Reid, D. (1998). *Mecánica de suelos*. Bogotá D.C.: McGraw-Hill.
- Bowles, J. (1982). *Propiedades geofísicas de los suelos* (Primera ed.). Bogotá D.C., Colombia: McGraw-Hill.
- Carmona, J. (2014). *Estudio de resultados ensayo de penetración estándar (SPT) para el factor de corrección (CN) y el ángulo de fricción (ϕ) del suelo usando diferentes tipos de correlaciones*. Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Chris, G., & Howie, J. (2006). Review of Standard Penetration Test Short Rod Corrections. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1633-1640.
- Collazos, et al. (2006). *Ensayo de Penetración Estándar (SPT)*. Conferencia, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

- Das, B. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (Cuarta ed.). Ciudad de México: Cengage Learning.
- Décourt, L. (1989). *The Standard Penetration Test, state of the art report*. Engenheiros Consultores Ltd., Sao Paulo, Brazil.
- Devincenzi, M., & Frank, N. (2004). *Ensayos geotécnicos in situ. Su ejecución e interpretación*. Ensayo, IGEOEST, Girona, España.
- Gallardo, R. (2014). *Aplicación del método de los factores de valuación en los fenómenos de remoción en masa del barrio San Fermín, municipio de Ocaña y selección de obras de mitigación*. Trabajo de maestría, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia.
- Gelvis, C., & Ortiz, D. (2012). *Determinación de la correlación entre el número de golpes (N) del Ensayo de Penetración Estándar (SPT), y el número de golpes (Nc) de la prueba de penetración dinámica con el cono tipo peck (Cp)*. Tesis de pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Norte de Santander.
- González, Á. (1999). *Estimativos de parametros efectivos de resistencia con el SPT*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Herrera, H., & Castilla, J. (2012). *Utilización de técnicas de sondeos en estudios geotécnicos*. E.T.S de Ingenieros de Minas de Madrid, Madrid, España.
- Hoyos, F. (2001). *Geotecnica. Diccionario básico*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- I.N.V. E - 111. (2012). *Ensayo de penetración normal (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido*. Instituto Nacional de Vías.
- IHOBE S.A. (2010). *Guía metodológica. Toma de muestras*. Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

- López, R. (2003). *Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo normal de penetración*. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.
- Montenegro, L. (2014). *Calibración del método de parámetros de resistencia con SPT en suelos de la región llanera colombiana*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Novo Tech Software. (2020). *NovoTech software*. Obtenido de NovoTecha Software:
<https://novotechsoftware.com/>
- Ordóñez, M., & Salinas, C. (2019). *Correlación entre el Ensayo de Penetración Estándar (SPT) y la resistencia a la compresión simple, en los suelos de comportamiento "cohesivos" en la zona de Racar, en la ciudad de Cuenca*. Trabajo de pregrado, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.
- Pantoja, P., & Suárez, J. (2015). *Estudio sobre la relación entre el ensayo de penetración estándar y el coeficiente de balasto (K) para suelos derivados de cenizas volcánicas en la zona de expansión urbana de cerritos-Pereira*. Tesis de pregrado, Universidad Libre Seccional Pereira, Pereira, Colombia.
- Peck, Hanson, & Thornburn. (1983). *Ingeniería de cimentaciones* (Segunda ed.). Ciudad de México, México: Editorial Limusa.
- Pérez, J. (s.f.). *Reconocimiento de suelos*. Master, E.T.S.A. de La Coruña, La Coruña, España.
- Sánchez, L., & Pinto, E. (2013). *Determinación de la correlación entre el número de golpes (N) del Ensayo de Penetración Estándar (SPT), y el número de golpes (Nc) de la prueba de penetración dinámica con el cono tipo peck (Cp), caso de estudio, suelos cohesivos*. Tesis de pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Norte de Santander.
- Schmertmann, J., & Palacios, A. (1979). Energy Dynamics of SPT. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 900-927.

- Sherif, M., & Rose, W. (2001). *Standard Penetration Test (SPT) Correction*. Final Report, Maryland Department Of Transportation State Highway Administration, Maryland, United States.
- SIAPA. (2014). *Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades. Geotecnia*.
- Sowers, G., & Sowers, G. (1972). *Introducción a la Mecánica de Suelos y cimentaciones* (Primera ed.). Ciudad de México: Limusa Wiley S.A.
- Terzaghi, K., & Peck, R. (1973). *Mecánica de suelos en la Ingeniería Práctica* (Segunda ed.). Barcelona, España: El Ateneo S.A.
- Tolga, T. (2014). *Overburden Stress Normalization and Rod Length Corrections for the Standard Penetration Test (SPT)*. Tesis de doctorado, University of California, Berkeley, United States.
- Tomlinson, M. (1971). *Diseño y construcción de cimientos*. Bilbao, España: Ediciones URMO.
- Trujillo, M. (2018). *Correlación empírica entre la velocidad de propagación de las ondas S (V_s) y el resultado del ensayo de resistencia a la penetración estándar, aplicado a los suelos departamento del Huila, Putumayo y Casanare - Colombia*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú.
- Wazoh, H., & Mallo, S. (2014). Standard Penetration Test in Engineering Geological Site Investigations - A Review. *The International Journal Of Engineering And Science*.
- Youd, T., & Steidl, J. (2008). SPT Hammer Energy Ratio versus Drop Height. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 397-400.

Apéndices

Continuación figura 11:

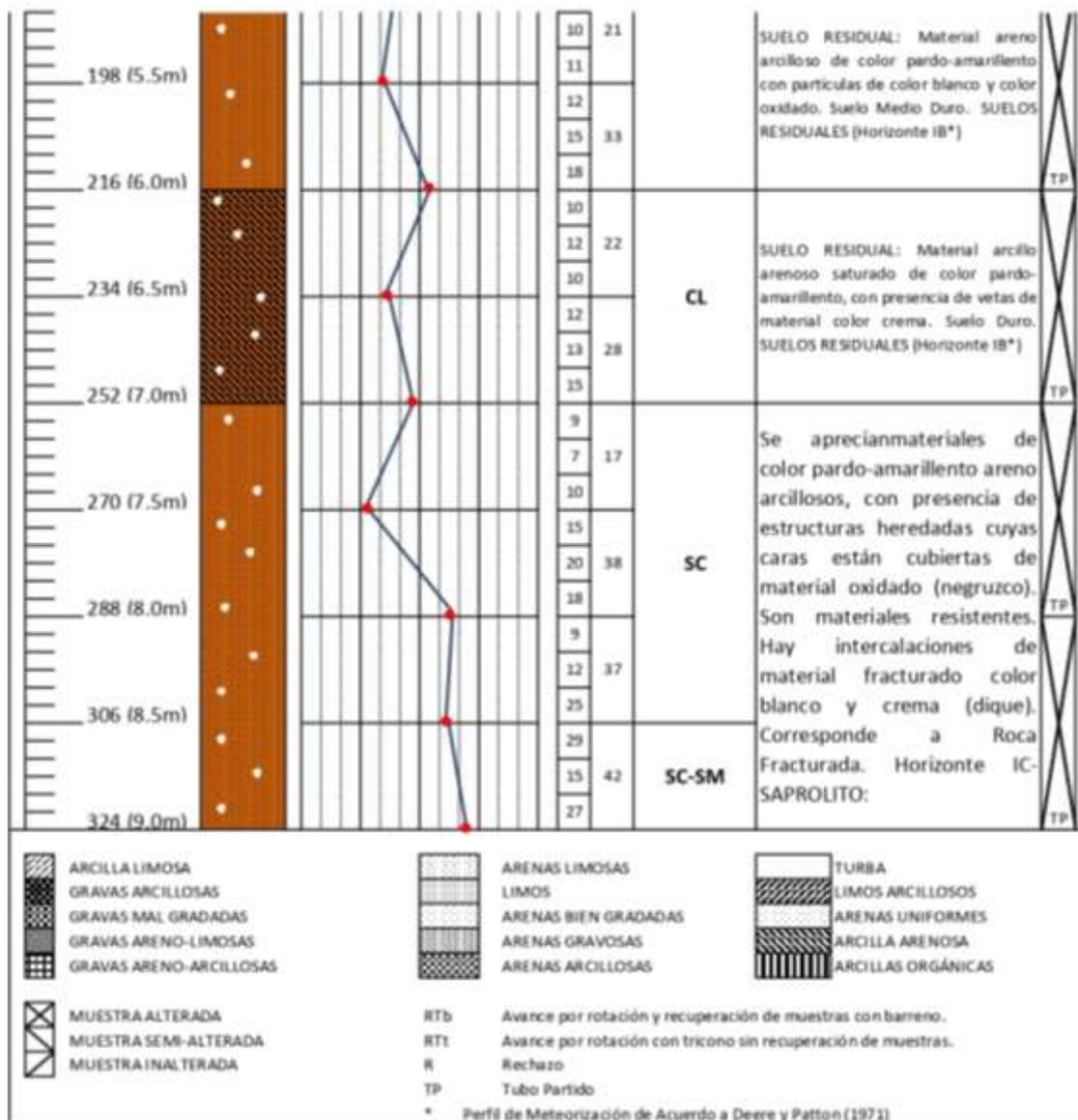


Figura 11. Perfil estratigráfico. Obtenido de Gallardo, R., 2014. *Aplicación del método de los factores de valuación en los fenómenos de remoción en masa del barrio San Fermin, municipio de Ocaña, y selección de obras de mitigación.* Tesis de maestría. Página 318.

Apéndice B. Corrección del valor N del ensayo SPT empleando el software NovoSPT

El software NovoSPT puede ser descargado en el link:

<https://novotechsoftware.com/geotechnical-software/spt-correlations-software/>. En la figura 12 se muestra la presentación del software NovoSPT:

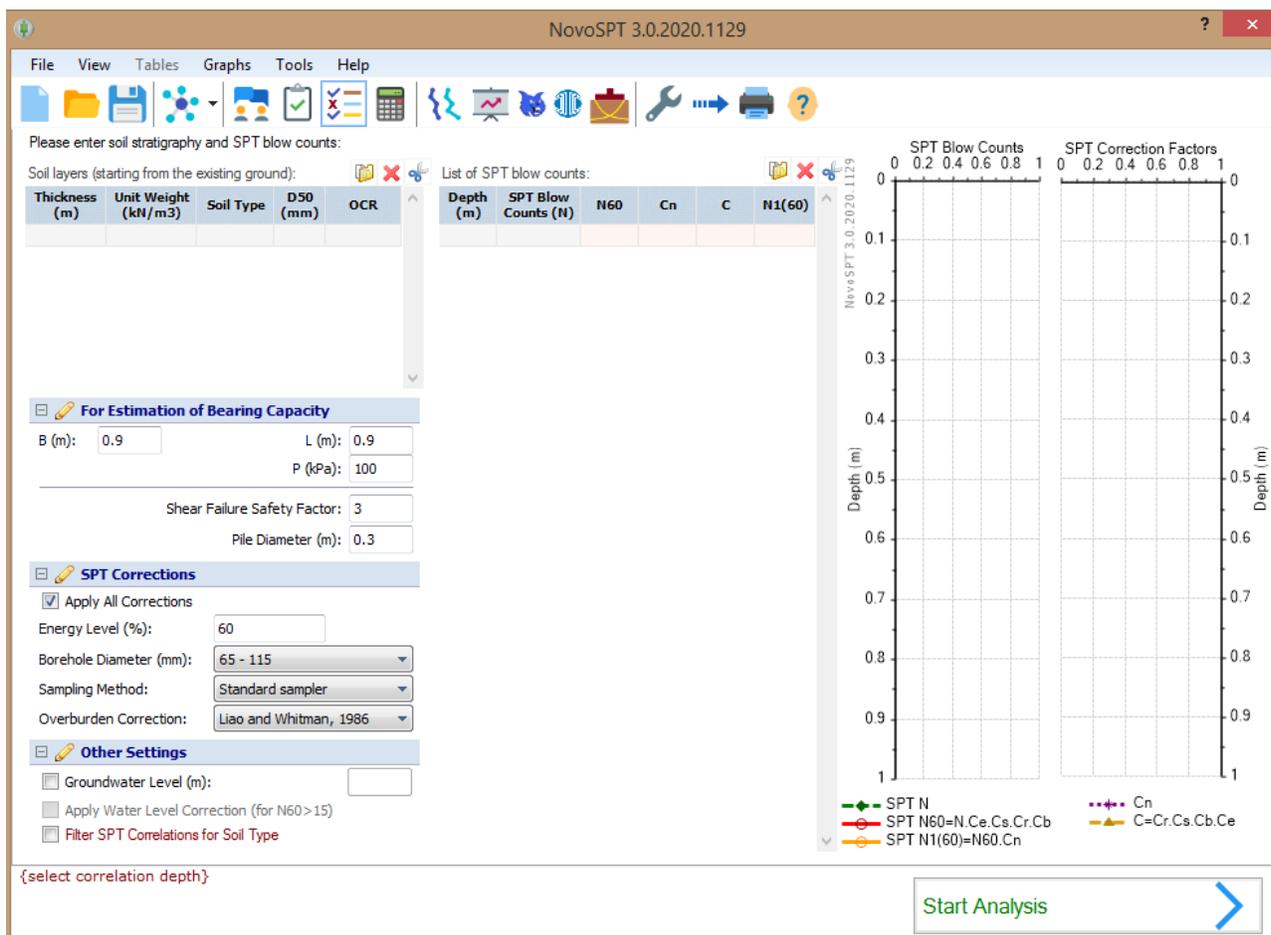


Figura 12. Presentación inicial del software NovoSPT. Autores, 2021.

Para iniciar la corrección con el software se hizo necesario insertar en las tablas del programa los datos correspondientes a los siguientes valores: grosor de capa de suelo (Thickness), peso unitario correspondientes (Unit Weight), tipo de suelo (soil type), profundidad

(Depth, correspondiente a cada profundidad donde se registró el valor de N), y el valor de N – golpes contados (Blow Counts).

También se hizo necesario especificar los valores para la corrección por energía, los cuales se especificaron en la tabla 7 del capítulo 3, sin embargo, en el programa se consideran de forma distinta, en la tabla 13 se muestra correspondencia entre los valores mostrados en la tabla 7 del capítulo 3, y los insertados en el software:

Figura 13

Criterios de corrección insertados en el software NovoSPT

Corrección por	Valor	Valor usado en NovoSPT	
Eficiencia del martillo E_M	0.5 (Colombia)	50	En porcentaje
Longitud de las barras o varillas E_L	Para $Z \leq 3$ m: 0.75 Para $Z > 3$ m: Ecuación 4	El programa no pide este valor	El programa tiene insertadas las condiciones: Para $Z \leq 3$ m: 0.75 Para $Z > 3$ m: Ecuación 4
Diámetro de la perforación E_D	1.05 (150 mm)	150	El software solo pide insertar el diámetro correspondiente.
Diámetro interno del muestreador E_s	1 (con tubo muestreador)	Standard Sampler (Muestreador estándar)	El software solo permite escoger dos opciones. Esta es la opción correspondiente al valor $E_s = 1$.

Nota: Autores, 2021.

Por último se debe insertar en la profundidad del nivel freático en la opción Groundwater level (Nivel de agua subterránea).

Insertados todos los valores descritos, el software se encarga de calcular el valor de N_1 correspondiente a cada ecuación con la que se calcula el factor de corrección C_N . Para observar los valores de cada expresión se debe seleccionar la expresión correspondiente en la lista desplegable de la opción Overburden Correction (Corrección por sobrecarga). En la figura 14 se muestra los resultados arrojados por el programa para el caso específico de la expresión dada por Gibbs y Holtz, 1957.

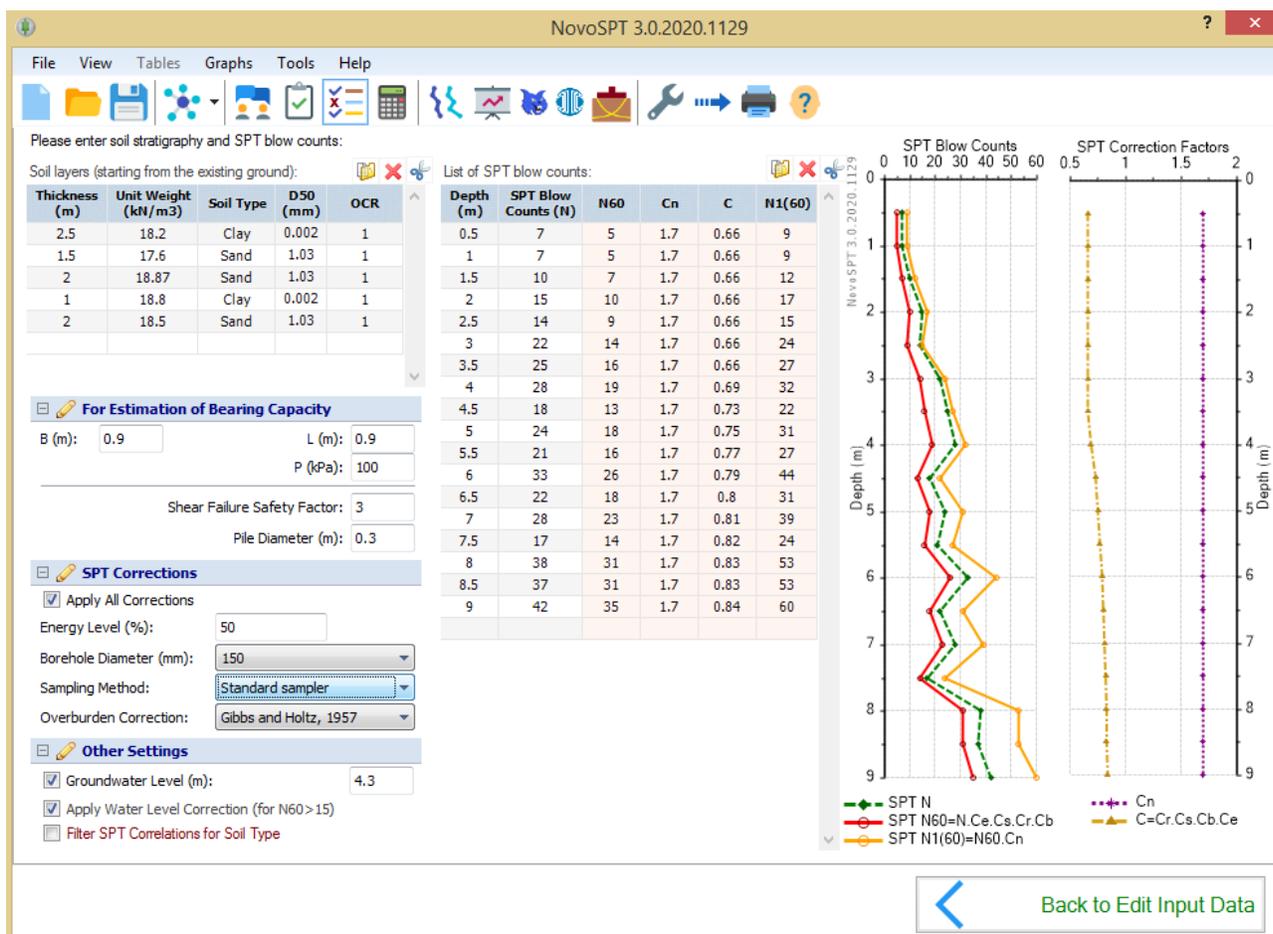


Figura 14. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Gibbs y Holtz, 1957

Es de resaltar que el software internamente hace la conversión de unidades correspondiente a la expresión con la cual se va a calcular el factor de corrección C_N . Es posible observar los

factores de corrección para las diferentes expresiones incluidas en el programa, sin embargo, solo es posible ver en pantalla el resultado para la profundidad seleccionada. En la figura 15 se muestra los factores de corrección a una profundidad de 5 m.

Select Soil Parameter to Correlate: **Overburden Correction Factor (C_N)** (9 correlations found)

View Correlations For Depth: **5** Z=5 m, Effective Stress = 83.9 kPa, N₆₀=18, N₁₍₆₀₎~31 after Gibbs and Holtz, 1957

Select a Correlation to View the Equation

Overburden Correction Factor (C _N)	Clay	Silt	Sand	Grav.	Comments	Ref#	Variable
<input checked="" type="checkbox"/> Canadian Foundation Engineering Manual,	1.05	✓	✓	✓	4th Edition	17	N ₆₀
<input checked="" type="checkbox"/> Gibbs and Holtz, 1957	1.7	✓	✓	✓	equation by Teng, 1962		N ₆₀
<input checked="" type="checkbox"/> Liao and Whitman, 1986	1.08	✓	✓	✓		51	N ₆₀
<input checked="" type="checkbox"/> Peck and Bazaraa, 1969	0.97	✓	✓	✓			N ₆₀
<input checked="" type="checkbox"/> Peck, Hanson and Thornburn, 1974	1.05	✓	✓	✓		51	N ₆₀
<input checked="" type="checkbox"/> Samson et al., 1986	1.07	✓	✓	✓			N ₆₀
<input checked="" type="checkbox"/> Seed, 1976	1.08	✓	✓	✓		51	N ₆₀
<input checked="" type="checkbox"/> Skempton, 1986	1.08	✓	✓	✓		51	N ₆₀
<input checked="" type="checkbox"/> Tokimatsu and Yoshimi, 1983	1.09	✓	✓	✓			N ₆₀

Figura 15. Factores de corrección mostrados por el software NovoSPT para una profundidad de 5 m

De las figuras 16 a la 21, se muestran los resultados obtenidos con cada una de las expresiones consideradas en este trabajo para calcular el factor de corrección C_N . Es de añadir que el software NovoSPT considera 2 expresiones adicionales dadas por: Canadian Foundation Engineering Manual, 2006, y Skempton, 1986.

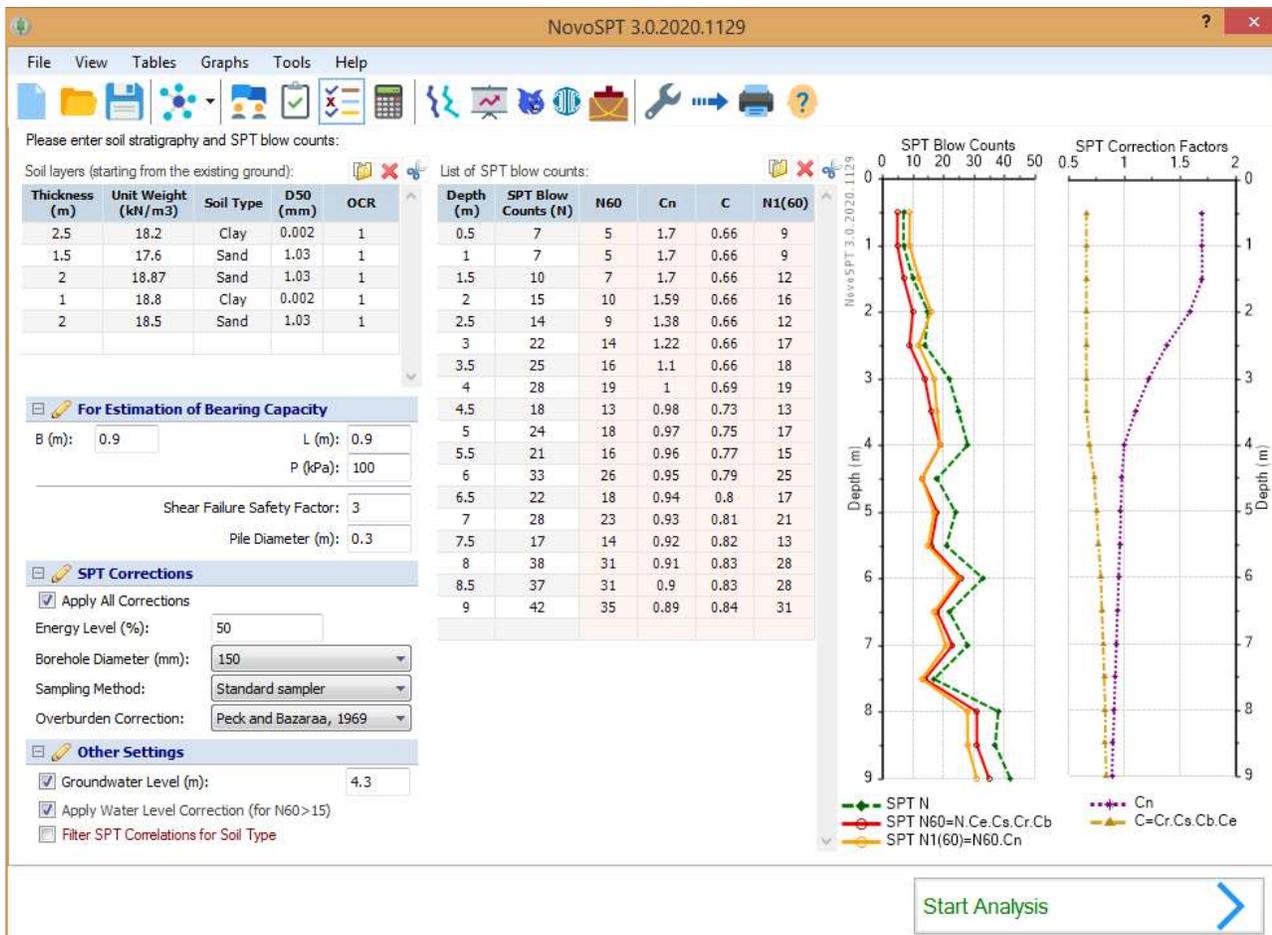


Figura 16. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Peck y Bazaraa, 1969

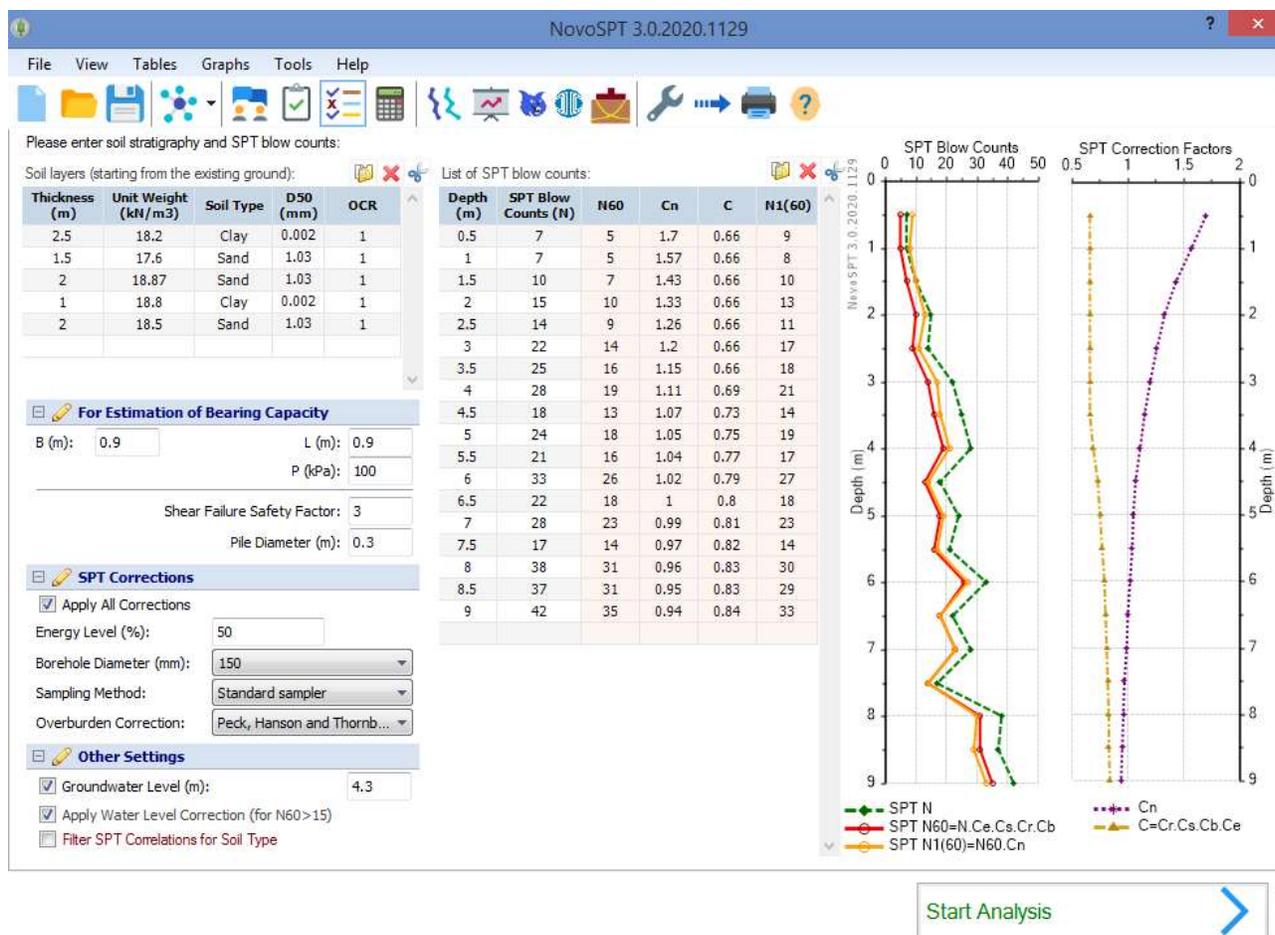


Figura 17. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Peck, Hanson y Thornburn, 1974

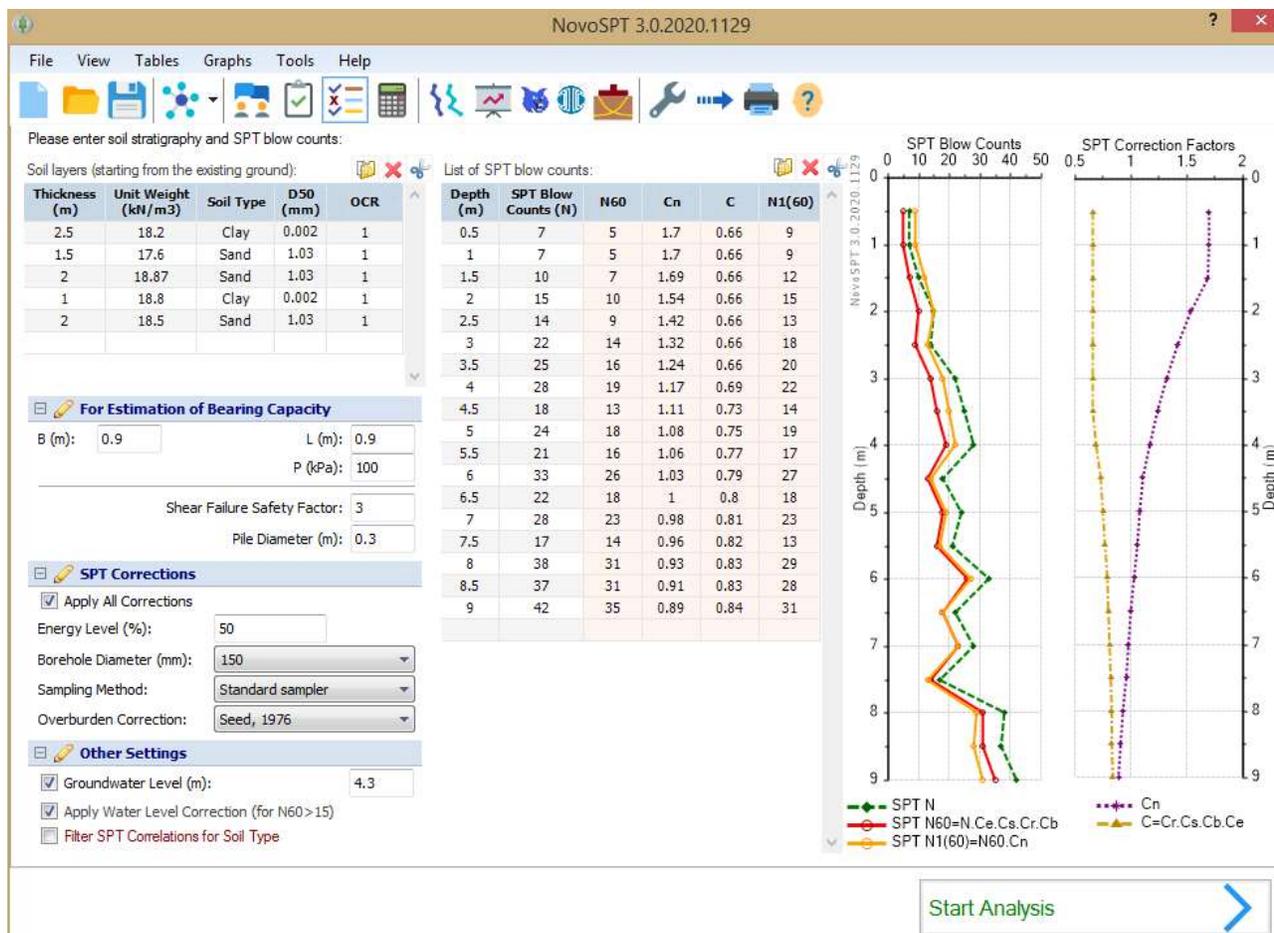


Figura 18. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Seed, 1976

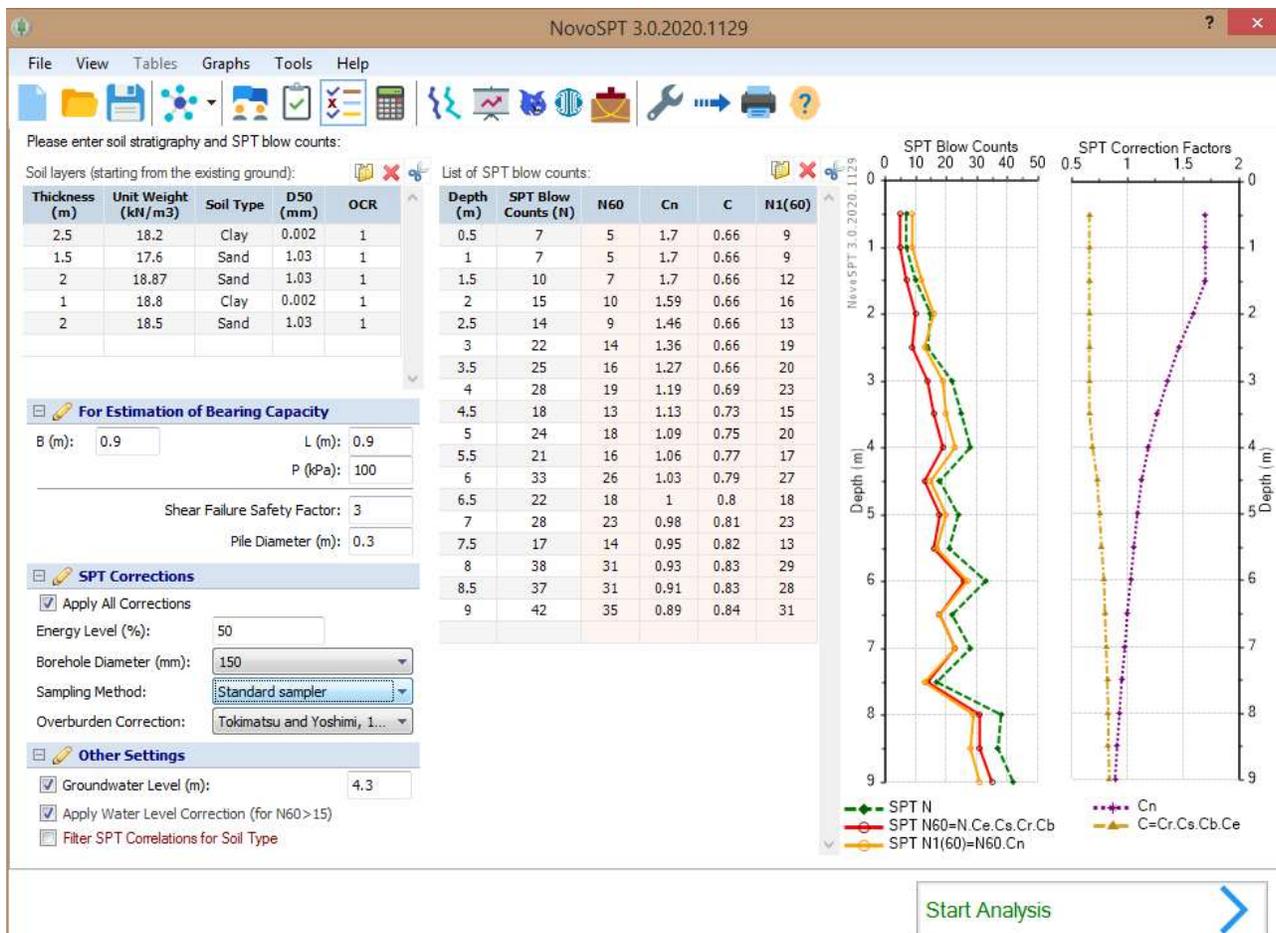


Figura 19. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Tokimatsu y Yoshimi, 1983

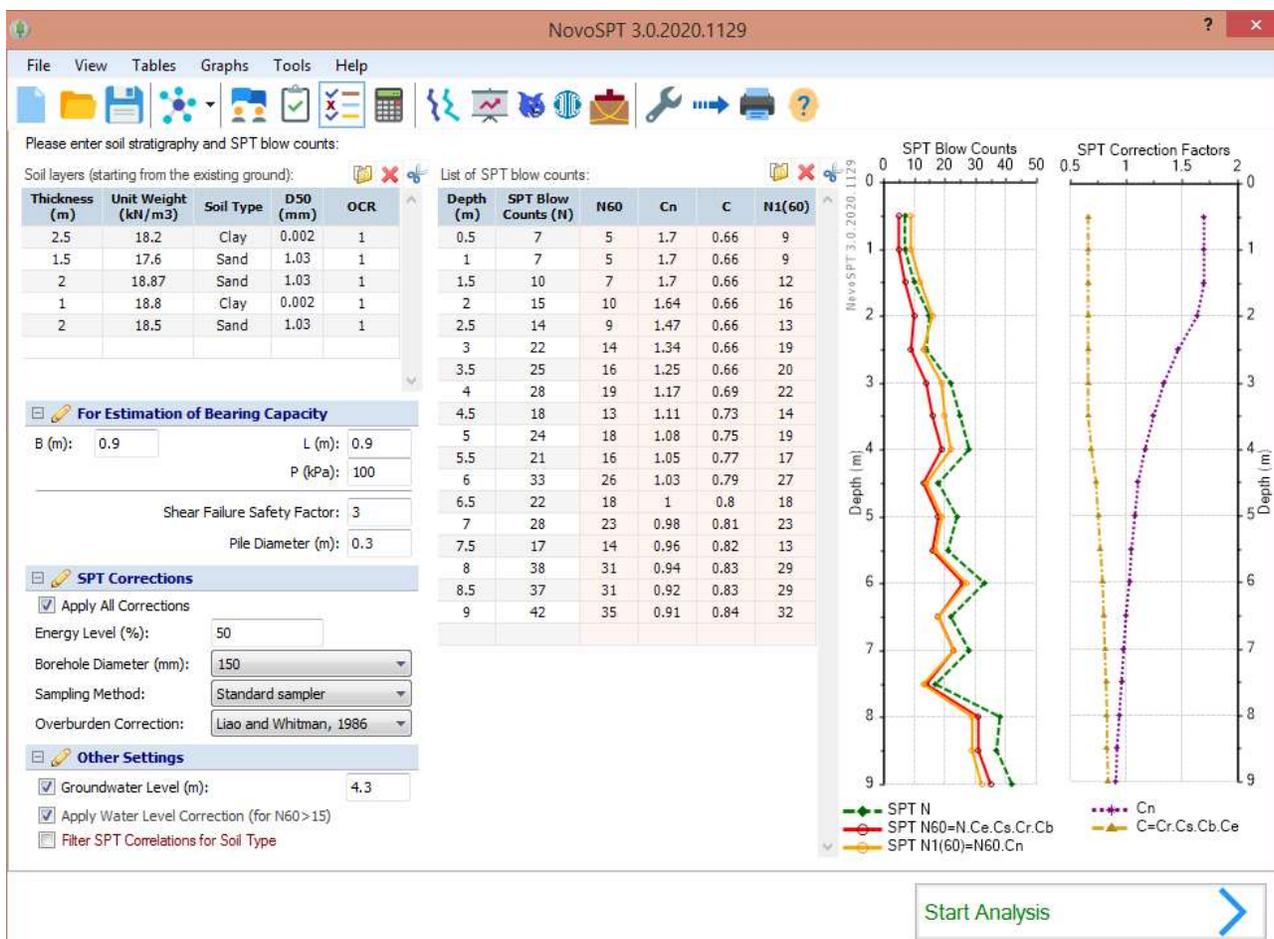


Figura 20. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Liao y Whitman, 1986

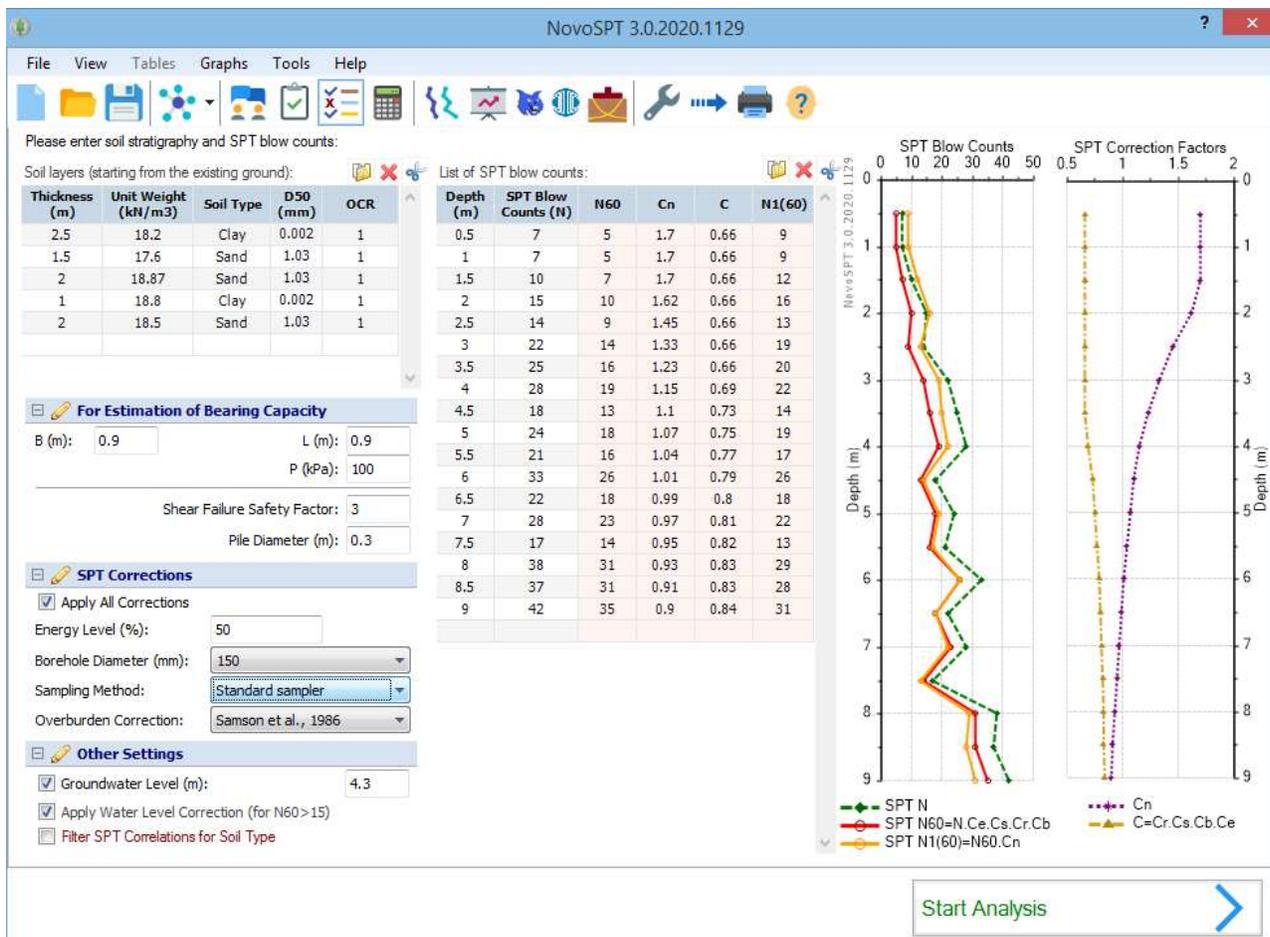


Figura 21. Resultados obtenidos con el software NovoSPT para la expresión dada por Samson et al., 1986