

**Evaluación de metodologías SPT y
CPTu, para la comparación de
resultados de campo y laboratorio que
permitan fundamentar futuras
decisiones de la empresa Asesorías
Geotec S.A.**

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

Evaluación de metodologías SPT y CPTu, para la comparación de resultados de campo y laboratorio que permitan fundamentar futuras decisiones de la empresa Asesorías Geotec S.A.

Llevado a cabo por el estudiante:

Thalman Solano Sebastián

Carné: 2016249542

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador el miércoles 31 de agosto de 2022 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

MILTON ANTONIO SANDOVAL QUIROS (FIRMA)
Firmado digitalmente por MILTON ANTONIO SANDOVAL QUIROS (FIRMA)
Fecha: 2022.09.05 08:31:13 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MBA
Rep/Director de la Escuela

WILLIAM ALONSO POVEDA MONTOYA (FIRMA)
Firmado digitalmente por WILLIAM ALONSO POVEDA MONTOYA (FIRMA)
Fecha: 2022.09.05 11:15:06 -06'00'

Ing. Alonso Poveda Montoya
Profesor Guía

IVANNIA MARIA SOLANO AGUILAR (FIRMA)
Firmado digitalmente por IVANNIA MARIA SOLANO AGUILAR (FIRMA)
Fecha: 2022.09.05 18:51:35 -06'00'

Ing. Ivannia Solano Aguilar, MSc.
Profesor Lector

IRVING JORHANY PIZARRO MARCHENA (FIRMA)
Firmado digitalmente por IRVING JORHANY PIZARRO MARCHENA (FIRMA)
Fecha: 2022.09.05 11:47:23 -06'00'

Dr. Ing. Irving Pizarro Marchena
Profesor Observador

Cartago, 28 de agosto, 2022

CARTA DE REVISIÓN DE ESTILO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN**

Estimados señores:

Por este medio yo, Raquel Hernández Castro incorporada al Colegio de Licenciados y Profesores en Letras, Filosofía, Ciencias y Artes, Costa Rica, con el número de código 030130, portadora de la cédula de identidad **110260883**, hago constar que revisé y corroboré la incorporación de los cambios al Proyecto final de graduación: **Evaluación de metodologías SPT y CPTu, para comparación de resultados de campo y laboratorio que permitan fundamentar futuras decisiones de la empresa Asesorías Geotec S.A.** Para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción que pertenece al estudiante, Sebastián Thalmann Solano, cédula:305050944. Se le han realizado al documento las correcciones en relación con la ortografía, acentuación, puntuación, concordancia gramatical, coherencia y cohesión en la estructura de los párrafos y otros aspectos morfosintácticos y relativos a los vicios de dicción.

En espera de que la revisión cumpla con los requerimientos del INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA, se suscribe atentamente,



Licda.

Código No.

030130

Abstract

This project presents a study carried out as part of the internship at the company Asesorías Geotec S.A. Presenting a comparison between the results obtained under the methodology of the SPT and CPTu field tests, this for 3 different types of soils. The development of this project pursued the objective of generating technical knowledge for the company.

Three field tests of each methodology were carried out for each of the soils under analysis. Processing the results through specialized software and applying laboratory tests to the soil samples obtained, in order to obtain the final results used as comparison points. These results were contrasted with direct results of special laboratory tests to verify their accuracy.

The results of this project mostly describe the same behavior, obtaining, for most of the comparison points, higher and more accurate values under the CPTu methodology, with the results obtained from the SPT being more conservative.

Keywords: SPT, CPTu, soils, cohesion, friction angle.

Resumen

Este proyecto expone un estudio realizado como parte de la práctica profesional dirigida en la empresa Asesorías Geotec S.A. En este se presenta una comparativa entre los resultados obtenidos bajo las metodologías de los ensayos de campo SPT y CPTu, para 3 tipos distintos de suelos. El desarrollo de este proyecto, persiguió el objetivo de generarle conocimiento técnico para la empresa.

Se realizaron tres ensayos de campo de cada metodología, para cada uno de los suelos analizados. Procesados los resultados por medio de *software* especializados y aplicando ensayos de laboratorio a las muestras de suelo obtenidas, para así obtener los resultados finales de los puntos de comparación utilizados. Por su parte, estos fueron contrastados con resultados directos de ensayos especiales de laboratorio, para comprobar la exactitud de los mismos.

Los resultados de este proyecto, describen en su mayoría el mismo comportamiento, obteniéndose, para la mayoría de los puntos de comparación, valores mayores y más exactos bajo la metodología CPTu, siendo los resultados obtenidos del SPT más conservadores.

Palabras claves: SPT, CPTu, suelos, cohesión, ángulo de fricción.

**Evaluación de metodologías SPT y
CPTu, para la comparación de
resultados de campo y laboratorio que
permitan fundamentar futuras
decisiones de la empresa Asesorías
Geotec S.A.**

SEBASTIAN THALMANN SOLANO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Agosto del 2022

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN**

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a la empresa Asesorías Geotec S.A. por brindarme la oportunidad de realizar mi práctica profesional dirigida y desarrollar este proyecto. A todos los trabajadores de la misma, que en múltiples ocasiones me brindaron recomendaciones y criterios para solucionar los problemas encontrados. Los técnicos y personal de laboratorio que siempre mostraron el afán de ayudar y encontrar la manera de cumplir con lo planteado. Especial agradecimiento al Ingeniero Francisco Rojas Quesada, quien me brindó todo el apoyo técnico y logístico necesario para plantear y desarrollar este proyecto, así como un gran interés en los resultados y conclusiones del mismo.

De igual manera, quisiera agradecer al Ingeniero Alonso Poveda Montoya quien cumplió el papel de profesor guía durante el desarrollo de este proyecto, mostró la disposición para resolver mis consultas y realizar recomendaciones, que me permitieron encaminar el proyecto de la manera correcta.

Índice

Índice de figuras	2
Índice de cuadros	3
Resumen ejecutivo	4
Introducción	6
Objetivos	8
Alcances y limitaciones	9
Marco teórico	10
Metodología	41
Resultados	46
Análisis de los resultados	59
Conclusiones	66
Recomendaciones	68
Referencias	69
Apéndices	71

Índice de figuras

1.	Muestreador al partido, SPT.	11
2.	Martillo de percusión, SPT.	11
3.	Equipo completo, SPT.	12
4.	Equipo completo, SPT.	13
5.	Equipo completo, SPT.	14
6.	Partes de un cono CPTu.	15
7.	Cono CPTu.	15
8.	Equipo de empuje CPTu.	16
9.	Equipo de empuje CPTu.	17
10.	Resultados de campo, ensayo CPTu.	18
11.	Carta de plasticidad.	21
12.	Sistema de clasificación SUCS.	22
13.	Gráfica normalizada de clasificación según el comportamiento mecánico (SBT).	23
14.	Tubo de pared delgada (Shelby).	24
15.	Envolvente de falla de Mohr y criterio de rotura de Mohr-Coulomb.	25
16.	Correlaciones de q_u con N_{60} para suelos cohesivos de distintas plasticidades.	26
17.	Círculo de Mohr, prueba de compresión inconfiada.	27
18.	Equipo y muestra de compresión inconfiada.	28
19.	Muestra de suelo luego de la falla, compresión inconfiada.	29
20.	Clasificación de los suelos con base en su sensibilidad.	30
21.	Círculo de Mohr, prueba de corte directo en arena.	32
22.	Diagrama de corte directo.	32
23.	Equipo de corte directo.	33
24.	Equipo de corte directo.	34
25.	Parámetros geomecánicos del perfil de suelo, <i>software</i> CPeT-IT.	37
26.	Factores de forma, profundidad e inclinación.	39
27.	Superposición de curvas de cohesión total, arcilla expansiva de Palmares.	55
28.	Superposición de curvas de cohesión total, limo haloisítico de Cinchona.	56
29.	Errores relativos de las capacidades admisibles de carga.	64

Índice de cuadros

1.	Tabla CPT normalizada de tipo de comportamiento de suelo (SBTn).	36
2.	Ensayos aplicados a las muestras de SPT.	42
3.	Profundidad de perforaciones [m].	46
4.	N_{60} , arena limpia de Esterillos.	46
5.	N_{60} , arcilla expansiva de Palmares.	47
6.	N_{60} , limo haloisítico de Cinchona.	47
7.	Clasificación de suelos, arena limpia de Esterillos.	48
8.	Clasificación de suelos, arcilla expansiva de Palmares.	49
9.	Clasificación de suelos, limo haloisítico de Cinchona.	50
10.	Peso unitario [kN/m^3], arena limpia de Esterillos.	51
11.	Peso unitario [kN/m^3], arcilla expansiva de Palmares.	51
12.	Peso unitario [kN/m^3], limo haloisítico de Cinchona.	52
13.	Ángulo de fricción efectivo [$^{\circ}$], arena limpia de Esterillos.	52
14.	Cohesión total [kPa], arcilla expansiva de Palmares.	53
15.	Cohesión total [kPa], limo haloisítico de Cinchona.	53
16.	Parámetros geomecánicos directos.	54
17.	Capacidad admisible de carga [ton/m^2], arena limpia de Esterillos.	57
18.	Capacidad admisible de carga [ton/m^2], arcilla expansiva de Palmares.	57
19.	Capacidad admisible de carga [ton/m^2], limo haloisítico de Cinchona.	58
20.	Capacidad admisible de carga [ton/m^2], según parámetros geomecánicos directos.	58

Resumen Ejecutivo

Actualmente, en el campo de la construcción e ingeniería a nivel nacional, existe una división de ideas muy grande en relación con la fiabilidad de los resultados obtenidos al realizar estudios geotécnicos bajo las metodologías SPT y CPTu. La empresa Asesorías Geotec S.A., cuenta actualmente solo con el equipo y personal necesario para ejecutar ensayos de SPT. Este proyecto tiene la intención de que la empresa pueda adquirir un criterio técnico sobre el tema.

El proyecto se desarrolló siguiendo el objetivo de evaluar las metodologías SPT y CPTu bajo las mismas condiciones, para comparar de esta manera, las características de interés y parámetros geomecánicos como, N_{60} , clasificación de suelos, peso unitario, ángulo de fricción, cohesión del suelo y la capacidad admisible de carga del mismo. Esto para 3 tipos distintos de suelos, con la intención de abarcar en el análisis la variación de resultados entre tipos de suelos.

Para cumplir con este objetivo, se inició el análisis con la ejecución de los ensayos de campo SPT y CPTu, realizando 3 perforaciones por ensayo para cada uno de los suelos analizados. Estos corresponden a una arena limpia ubicada en Esterillos de Puntarenas, una arcilla expansiva de Palmares de Alajuela y un limo haloisítico de Cinchona de Alajuela. Adicionalmente a estos ensayos, se obtuvo muestras de suelo por medio de ensayos SPT con la utilización de liners y por medio de tubos Shelby, esto para los suelos, arcilla expansiva y limo haloisítico, en el caso de la arena limpia se obtuvo una muestra de material superficial.

Con los resultados y las muestras de campo del SPT, se procedieron a realizar los ensayos de laboratorio de granulometría, límites de consistencia, peso unitario y clasificación SUCS, necesarios para obtener los parámetros de interés. Adicionalmente se aplicaron las correlaciones al número de golpes, necesarias para obtener el parámetro N_{60} y los parámetros geomecánicos. Paralelamente se procesaron los resultados de campo del ensayo CPTu con la ayuda del *software* CPeT-IT, con el cual se aplicaron las correlaciones y correcciones necesarias para obtener todos los parámetros de interés y geomecánicos, realizando en este caso una homologación de la información, para reducir los resultados a tramos de 45 cm y facilitar la comparación con los resultados del SPT. Este proceso se repitió para cada uno de los 3 suelos analizados.

Las muestras adicionales de suelo obtenidas en campo, se utilizaron para realizar ensayos especiales de laboratorio, con la intención de obtener parámetros geomecánicos de manera directa que sirvieran como punto de contraste a los resultados obtenidos bajo cada una de las metodologías. En las muestras de la arcilla expansiva y el limo haloisítico, se aplicaron ensayos de compresión inconfiada, para obtener los parámetros de cohesión total en todo el perfil de los suelos, realizando los ensayos tanto a las muestras obtenidas mediante el SPT como a las de tubo Shelby, la intención de esto fue comprobar la baja sensibilidad del suelo al ensayar muestras alteradas e inalteradas, esto permitió justificar la utilización de muestras alteradas para los ensayos de compresión, debido a la imposibilidad de obtener muestras de suelo inalteradas de

todo el perfil de suelo hasta la profundidad final de estudio.

Por otra parte, para la muestra de arena limpia, se aplicó el ensayo de corte directo para obtener el parámetro de ángulo de fricción efectivo, este ensayo se aplicó únicamente a la muestra superficial de suelo obtenida, a causa de la misma limitante, para obtener muestras inalteradas de todo el perfil de suelo, sin embargo, los resultados de clasificación obtenidos con ambas metodologías, permitieron establecer este resultado como equivalente para todo el perfil del suelo.

En cuanto a los resultados obtenidos, tanto para el parámetro N_{60} , la cohesión, el ángulo de fricción y la capacidad admisible de carga, la diferencia entre metodología fue muy grande, siendo los resultados determinados bajo la metodología de CPTu, mayores y más cercanos a los resultados determinados de manera directa. En el caso específico del peso unitario, los resultados obtenidos en ambas metodologías tuvieron muy poca variación, pudiendo ser considerados como equivalentes.

El parámetro de clasificación de suelos SBT, que utiliza el CPTu, presentó resultados favorables en la arena limpia y el limo haloisítico, en el cual la mayor parte de los tramos presentaban resultados equivalentes a la clasificación SUCS, que fue utilizada como el punto de referencia.

Los resultados de este proyecto describen en su mayoría un mismo comportamiento, obteniéndose bajo la metodología CPTu, los resultados más cercanos a los valores reales determinados de manera directa. Siendo los resultados obtenidos del SPT, en la mayoría de los casos mucho menores y siguen una tendencia muy conservadora.

Introducción

La determinación y caracterización de las propiedades geotécnicas de los suelos es de vital importancia para el adecuado diseño geotécnico, y por ende para la adecuada construcción de cualquier obra de ingeniería civil, por esta razón, a nivel mundial se emplean distintas metodologías y ensayos que permiten un estudio geotécnico específico tanto del sitio como de muestras obtenidas en este (Trillos, 2011). Los resultados de estos ensayos permiten conocer las características de los suelos en sitio y su comportamiento, así como su análisis bajo condiciones específicas.

Los ensayos invasivos in situ más comunes para la caracterización de suelos, son el ensayo de penetración con cono eléctrico o CPT, el ensayo de penetración con piezocono o CPTu, el ensayo de penetración estándar o SPT, el dilatómetro de placa plana o DMT y el ensayo de rigidez de Vane o VST (Schneid, 2005). Si nos enfocamos en el diseño de obras de pequeño o mediano impacto y en territorio nacional, la lista de ensayos antes descrita se reduce cuantiosamente, principalmente por el costo y la complejidad que representan algunos de estos. El ensayo de campo más utilizado es el ensayo de penetración estándar o SPT, esto debido a su bajo costo y facilidad de ejecución, en comparación con otros ensayos (Sáenz, 2015). Con el mismo fin, se encuentra el ensayo de piezocono o CPTu, el cual en los últimos años ha adquirido cada vez más uso y ha demostrado ser una alternativa viable.

Sin embargo, en el campo de la construcción e ingeniería a nivel nacional, existe una división de ideas con posiciones opuestas en relación con la fiabilidad de los resultados obtenidos con estas metodologías, muchas personas se inclinan hacia una u otra por razones empíricas relacionadas con el costo de los proyectos, según el resultado de los ensayos, y sin un fundamento técnico que respalde su decisión (F. Rojas, comunicación personal, 13 de septiembre de 2021). Esto conlleva a que, en muchos casos, la elección del método de ensayo dependa de la persona que lo solicita y no de las características o condiciones del suelo a analizar.

La empresa Asesorías Geotec S.A., se encarga de brindar entre otros, el servicio de consultoría y soluciones integrales en el área de la geología e ingeniería geotécnica. Sin embargo, cuenta actualmente solo con el equipo y personal necesario para ejecutar ensayos de SPT, por lo que ocasionalmente pierde clientes, los cuales persisten en que el estudio geotécnico se realice con el ensayo CPTu.

Durante el desarrollo de la práctica profesional dirigida en dicha empresa, se planteó y desarrolló este estudio que compara los resultados obtenidos al aplicar ambas metodologías en distintos tipos de suelos, contrastando estos con resultados directos obtenidos por medio de ensayos especiales de laboratorio. Se utiliza el concepto de metodología, para referirse a todo el conjunto de actividades que involucra la obtención de resultados finales, a partir de los resultados de los ensayos de campo SPT y CPTu.

El resultado de este estudio, permitió a la empresa conocer la variación de resultados que se obtienen en los distintos suelos, al aplicar las metodologías SPT y CPTu bajo las mismas condiciones. Así como incorporar nuevos métodos, correlaciones y conocimientos dentro de la estructura de trabajo ya establecida. Esto permitirá a la empresa tomar decisiones ante las exploraciones que realice en el futuro, así como plantear la posibilidad de adquirir o no el equipo y conocimiento necesario para brindar el servicio de ensayos CPTu a sus clientes.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar las metodologías de investigación de campo SPT y CPTu para la comparación de características de interés, parámetros geomecánicos y capacidades de carga, que permitan tomar decisiones para las exploraciones futuras que realice la empresa Asesorías Geotec S.A.

Objetivos específicos

- Realizar ensayos SPT y CPTu en tres suelos con características geotécnicas diferentes, con la finalidad de obtener parámetros de interés por medio ensayos de laboratorio y correlaciones a los resultados de campo.
- Obtener los parámetros geomecánicos de cohesión y ángulo de fricción de manera directa, con el fin de contrastar los resultados obtenidos en las correlaciones en las metodologías SPT y CPTu.
- Determinar para cada uno de los suelos, a diferentes desplantes y para cada metodología, la capacidad admisible de carga siguiendo la metodología de Meyerhof.
- Comparar las características de interés, parámetros geomecánicos y capacidades de carga, obtenidas bajo las metodologías SPT y CPTu para cada tipo de suelo.

Alcances y limitaciones

Los alcances y limitaciones presentados durante el desarrollo del presente proyecto se describen a continuación.

Alcances

- Este estudio se delimita al análisis de las metodologías comparadas en 3 tipos distintos de suelos.
- La información de los ensayos de campo se delimita a la ejecución y análisis de 3 perforaciones por metodología para cada tipo de suelo.
- Se delimitan los puntos de comparación entre las metodologías, según los intereses de la empresa Asesorías Geotec S.A., en los siguientes parámetros:
 - Factor N_{60} .
 - Clasificación de suelo.
 - Peso unitario.
 - Cohesión.
 - Ángulo de fricción.
 - Capacidad admisible de carga.

Limitaciones

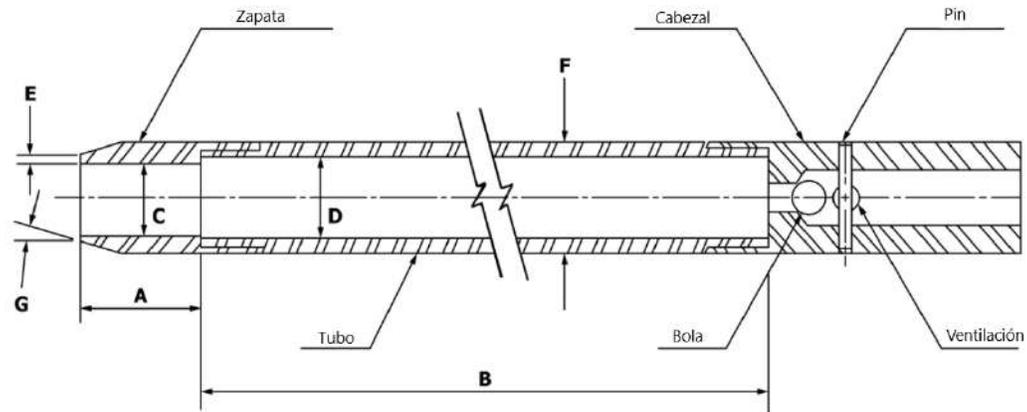
- La obtención de muestras de suelo inalteradas de todo el perfil estratigráfico estudiado fue imposible debido a las grandes implicaciones y complejidad de realizar excavaciones de 5 metros de profundidad.
- Como propuesta inicial, se contemplaba la aplicación de ensayos triaxiales para la determinación directa de la cohesión de los suelos, esto no fue posible, por la falta de disponibilidad de los equipos en Lanamme UCR, durante el periodo de ejecución de este proyecto.

Marco Teórico

En esta sección se desarrolla una investigación bibliográfica, con la intención de brindar un sustento teórico que permita abarcar los objetivos antes descritos, se definen algunos conceptos fundamentales de la mecánica de suelos y la geotécnica, así como del desarrollo y particularidades de los ensayos comparados.

Generalidades del ensayo SPT

El ensayo de penetración estándar o SPT por sus siglas en inglés, es un ensayo de campo que determina la fuerza necesaria para hincar un muestreador de acero en el suelo, dicha fuerza es correlacionada para obtener la capacidad soportante del suelo. Al mismo tiempo, se obtienen muestras alteradas de suelo que son ensayadas en un laboratorio para obtener propiedades índice que permitan caracterizar el perfil de suelo de la zona en estudio. El procedimiento de este ensayo está normado según la American Society for Testing and Materials (ASTM) D1586, la cual lo describe como el hincado de un muestreador al partido de 50 mm de diámetro, como se puede observar en la figura 1, con un martillo de 63.5 kg de peso, como se puede observar en la figura 2, desde una altura de 750 mm, la resistencia del suelo a la penetración del muestreador se relaciona con el valor N, el cual es el número de golpes del martillo requeridos para hincar el muestreador en un intervalo de profundidad de 0.15 a 0.45 m, en tramos de 0.15 m, cada intervalo de 0.45 m se recupera el muestreador para obtener las muestras de suelo de esa respectiva profundidad y se repite el hincado hasta llegar a la profundidad de estudio deseada (ASTM, 2018). En las figuras 3, 4 y 5 se evidencia el equipo completo siendo utilizado en perforaciones.



A = 25 mm a 50 mm
 B = 457 mm a 762 mm
 C = 34.93 mm ± 0.13 mm
 D = 38.1 mm ± 1.3 mm
 E = 2.54 mm ± 0.25 mm
 F = 50.8 mm ± 1.3 mm
 G = 16° a 23°

Figura 1. Muestreador al partido, SPT.
Fuente: ASTM, 2018.



Figura 2. Martillo de percusión, SPT.
Fuente: ASTM, 2018.



Figura 3. Equipo completo, SPT.



Figura 4. Equipo completo, SPT.



Figura 5. Equipo completo, SPT.

Generalidades del ensayo CPTu

El ensayo de penetración con piezocono o CPTu por sus siglas en inglés, es un ensayo que permite determinar directamente en campo parámetros de esfuerzo que pueden ser correlacionados con el comportamiento mecánico del suelo, así como permitir una caracterización del mismo. El procedimiento de este ensayo está normado según ASTM D5778, la cual lo describe como el empuje vertical por medio de un pistón hidráulico de un cono en el suelo a una velocidad constante de 20 mm/s, el cono está compuesto por 2 partes, la punta y el fuste, como

se puede observar en la figura 6, estas partes están equipadas con instrumentación que mide la fuerza de resistencia ejercida por el suelo a la hora de penetrar el cono, esta fuerza es dividida por el área conocida del instrumento, para así, obtener un esfuerzo de resistencia por punta llamado q_c y un esfuerzo de fricción del fuste llamado f_s . En el punto de unión de la punta y el fuste del cono, se encuentra un transductor de presión que permite medir la presión de poro inducida durante el avance del instrumento, dicho parámetro es conocido como U_2 (ASTM, 2020).

El cono es empujado hasta la profundidad de estudio deseada por un equipo como el presentado en las figuras 8 y 9, durante el avance del cono, este realiza mediciones de los 3 parámetros antes descritos en intervalos de profundidad no mayores a los 50 mm, esta información es graficada y mostrada por la computadora del equipo como se muestra en la figura 10, permitiendo cierto nivel de interpretación de resultados directamente en campo.

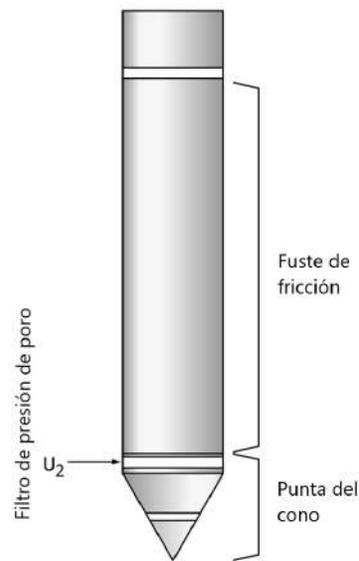


Figura 6. Partes de un cono CPTu.
Fuente: ASTM, 2020.



Figura 7. Cono CPTu.



Figura 8. Equipo de empuje CPTu.



Figura 9. Equipo de empuje CPTu.

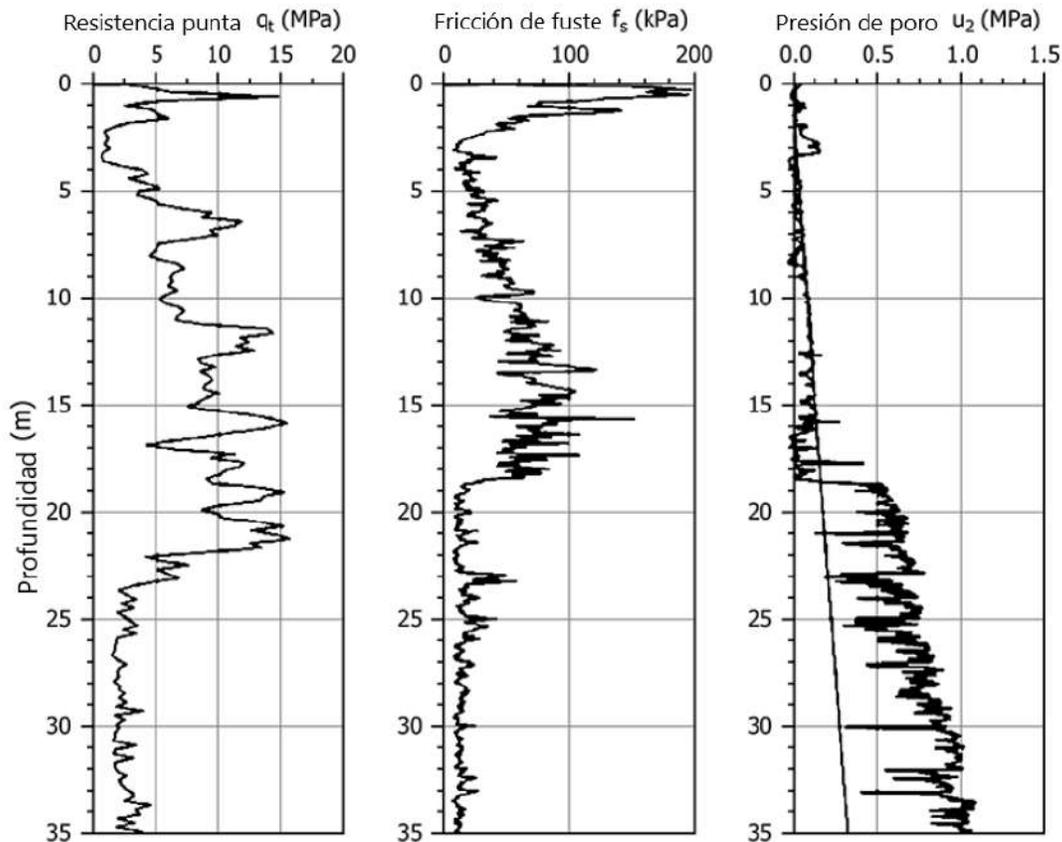


Figura 10. Resultados de campo, ensayo CPTu.
Fuente: ASTM, 2020.

Parámetros de interés

A continuación se describen los parámetros que son utilizados inicialmente como punto de comparación entre las metodologías analizadas en este proyecto, estos parámetros son obtenidos mediante ensayos de laboratorio realizados a las muestras de suelo obtenidas en el ensayo SPT y mediante correlaciones a los resultados de campo.

Parámetro iniciales de capacidad de carga N_{60}

N_{60} es uno de los parámetros iniciales que se utilizan para determinar la capacidad de carga de un suelo mediante la metodología SPT, es una representación normalizada de la energía requerida para hincar el muestreador en el suelo.

A partir de los datos de campo obtenidos de la metodología SPT, se determinan los valores de N_m , que representan la suma de los valores de N de los últimos 30 cm de cada tramo de 45 cm, es decir, el número de golpes requeridos para hincar el muestreador los últimos 30 cm de

cada tramo de 45 cm, esta representación de energía es normalizada obteniendo el coeficiente N_{60} , el cual considera las características del equipo utilizado y las alteraciones en la energía que estas puedan tener sobre los valores de N (ASTM, 2011).

La ecuación que fue utilizada para la determinación de N_{60} y los factores en ella varían dependiendo de características del equipo y del suelo ensayado así como del criterio del profesional en ingeniería que la utiliza. En este proyecto, la ecuación 1 representa la forma en la que este coeficiente es calculado en la empresa Asesorías Geotec S.A.

$$N_{60} = \frac{N_m \cdot ER_i \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S}{60\%} \quad (1)$$

Donde:

- N_{60} : Número de golpes normalizado según el equipo.
- N_m : Número de golpes de últimos 30 cm.
- ER_i : Relación de energía del equipo de perforación.
- C_N : Factor de corrección por confinamiento efectivo.
- C_E : Factor de proporción de energía, dependiente del martillo.
- C_B : Factor de de diámetro de perforación.
- C_R : Factor de longitud de barra.
- C_S : Factor de corrección por muestreador no estándar.

Debido al generalizado uso de la metodología SPT alrededor de mundo, gran cantidad de diseños se han realizado siguiendo un procedimiento igual o similar al descrito anteriormente, relacionando la capacidad de carga de los suelos con el valor de N_{60} . Con la intención de comparar estos resultados con la metodología CPTu, se crean correlaciones numéricas como la descrita en la ecuación 8, que pretenden aproximar N_{60} utilizando el parámetro inicial de q_c y el índice I_c del CPTu, y con esto poder relacionar ambas metodologías en la determinación de la capacidad de carga de los suelos (Jefferies y Davies, 1993).

Cabe destacar que Jefferies y Davies (1993), sugirieron que la utilización de una correlación para estimar el valor de N_{60} a partir de los resultados del CPTu, puede brindar resultados más certeros que los obtenidos al utilizar el procedimiento original para la estimación de N_{60} descrito anteriormente y representado en la ecuación 1, esto por causa de la pobre repetibilidad que posee la metodología SPT.

Peso unitario

También conocido como peso específico, es una relación entre la masa de una muestra de suelo y el volumen que esta ocupa, es decir es el peso de una unidad de volumen del suelo (Serquén, 2020). El peso unitario puede ser determinado de la muestra natural de suelo, de la muestra de suelo seca o solo de las partículas solidas que componen el suelo. Normalmente es expresado en unidades de kgf/m^3 y el procedimiento para determinarlo está normado según el ensayo ASTM D7263. La ecuación 2 representa el peso unitario total del suelo.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \quad (2)$$

Donde:

- γ_m : Peso unitario total del suelo.
- W_m : Peso total del suelo.
- V_m : Volumen total del suelo.

Clasificación de suelos

La clasificación de un suelo es uno de los parámetros más importantes para poder estimar gran cantidad de características geotécnicas. "Los suelos con propiedades similares pueden ser clasificados en grupos y subgrupos en función de las características mecánicas y su comportamiento para la ingeniería. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada" (Das, 2013).

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, es un sistema de clasificación ampliamente utilizado a nivel mundial, está normado según ASTM D2487, la cual divide al suelo en 3 grandes grupos; suelos de grano gruesos, suelos de grano fino y suelos altamente orgánicos, estos grupos son luego subdivididos en un total de 15 subgrupos básicos, cada uno de estos subgrupos tiene asignado un símbolo de grupo y un nombre el cual clasifica al suelo en estudio, para poder clasificar un suelo con este sistema se requiere conocer la distribución granulométrica del mismo así como el límite líquido e índice de plasticidad de este (ASTM, 2017).

Con los resultados de distribución granulométrica del suelo, se crea una curva de distribución granulométrica de donde se obtienen los coeficientes C_u y C_c , los cuales describen el comportamiento de la curva, complementariamente se clasifica el suelo en la carta de plasticidad, como se puede observar en la figura 11, según los resultados del ensayo de límites de consistencia, con esta información es posible clasificar el suelo con el sistema SUCS siguiendo las indicaciones descritas en la figura 12 (Serquén, 2020).

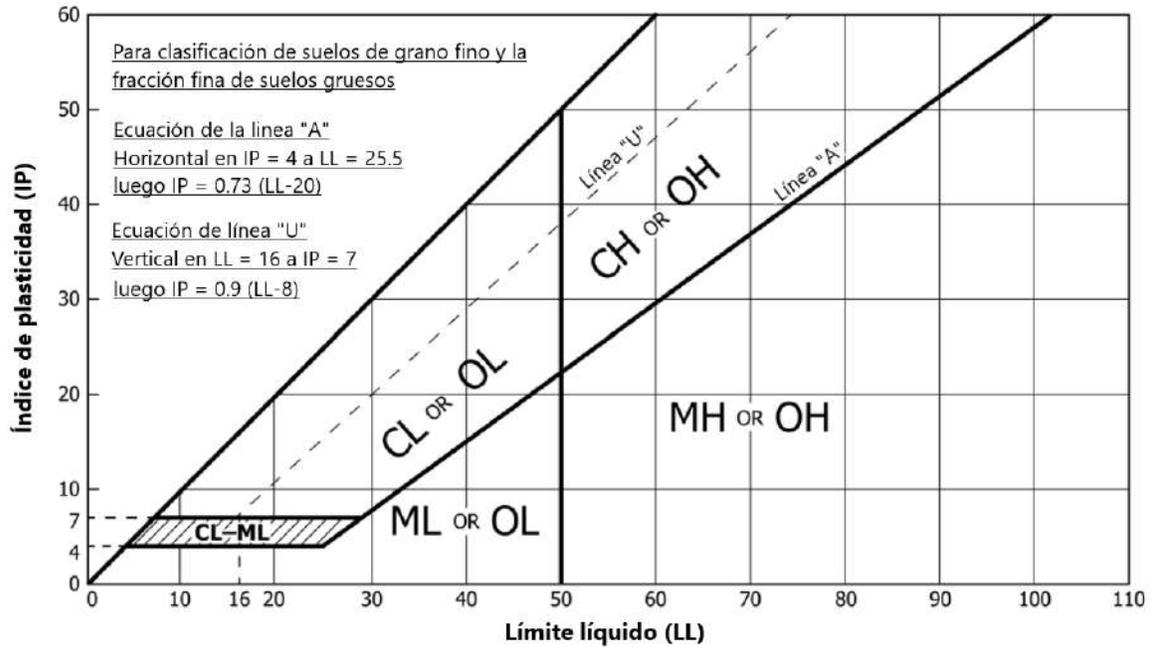


Figura 11. Carta de plasticidad.
Fuente: ASTM, 2017.

Divisiones mayores		Símbolo de grupo	Nombres típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares		
Suelos de grano grueso (más del 50% del material es mayor en tamaño que tamiz N° 200)	Gravas (Más de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz N° 4)	GW	Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino.	$C_v = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}^2/(D_{10} * D_{60}) < 3$		
		GP	Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino.	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW.		
	Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	GM	$\frac{d}{u}$	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $I_p < 4$	A los materiales sobre la línea A con $4 < I_p < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo.
		GC		Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcillosas.	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $I_p > 7$	
Arenas (Más del 50% de la fracción gruesa es menor que el tamiz N° 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino.	$C_v = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = 1 < D_{30}^2/(D_{10} * D_{60}) < 3$		
		SP	Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino.	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW.		
	Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	SM	$\frac{d}{u}$	Arenas limosas, mezclas arena-limo.	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o $I_p < 4$	Si el material está en la zona sombreada con $4 \leq I_p \leq 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo.
		SC		Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Límites de Atterberg por encima de la línea A o $I_p > 7$	
Suelos de grano fino (más del 50% del material pasa el tamiz N° 200)	Limo y arcillas (límite líquido $\omega_L < 50$)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad.	<ol style="list-style-type: none"> Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. Dependiendo del porcentaje de fino (fracción menor que el tamiz N° 200) Los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% - GW, GP, SW, SP Más del 12% - GM, GC, SM, SC De 5 a 12% - Casos de frontera que requieren doble símbolo. 		
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arenas limosas, arcillas magras.			
		OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
	Limo y arcillas (límite líquido > 50)	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos.			
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.			
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos.			
	Suelos altamente orgánicos	Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos.			

Figura 12. Sistema de clasificación SUCS.

Fuente: Serquén, 2020.

Con respecto a la clasificación de acuerdo al Soil Behaviour Type o SBT, ya a que el ensayo no obtiene muestras de suelo que pueden ser ensayadas en un laboratorio, toda la información

debe ser correlacionada con los parámetros medidos en campo. Por esta razón, no es de esperar que la metodología CPTu proporcione predicciones precisas del tipo de suelo en función de las características físicas, como la distribución granulométrica, sino más bien que proporcione una guía de las características mecánicas del suelo como la resistencia, rigidez, compresibilidad (Robertson y Cabal, 2015).

Existen distintos métodos de clasificación de suelo según el comportamiento mecánico en relación con los resultados del CPTu, sin embargo el método más utilizado y aceptado a nivel internacional es el propuesto por Robertson, el cual se basa en un gráfico como el mostrado en la figura 13 el cual de acuerdo con los parámetros de campo corregidos, clasifica el suelo en 9 tipos. Con la intención de simplificar esta clasificación, se creó el Soil Behavior Type index o I_c , con el cual se puede llegar a la misma clasificación de una manera más directa, la forma de determinar el índice de comportamiento de suelo se representa en la ecuación 10 y su clasificación en el cuadro 1.

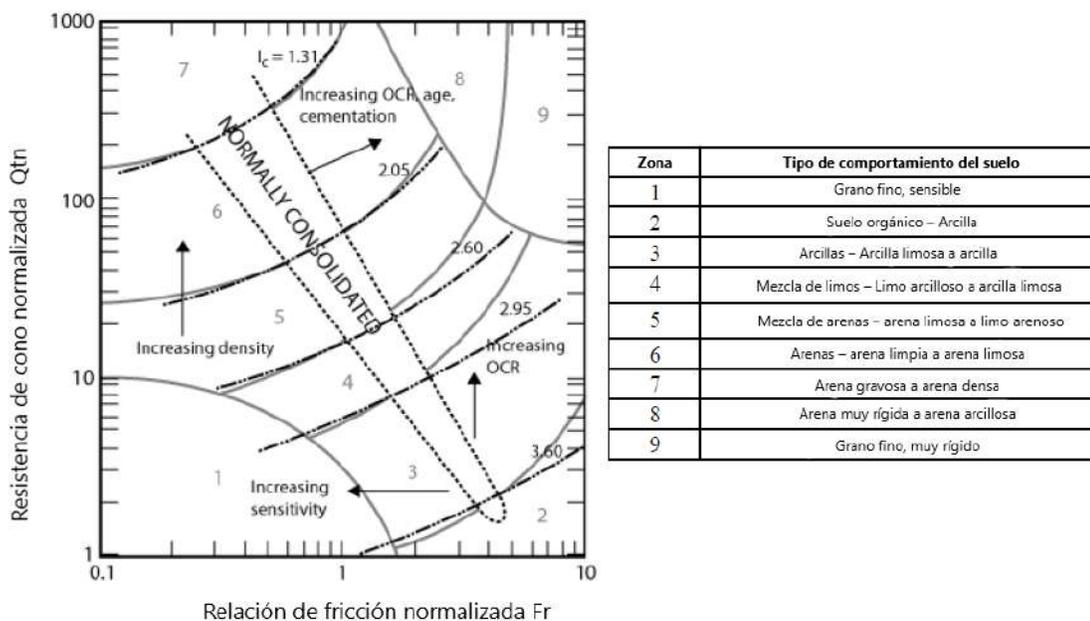
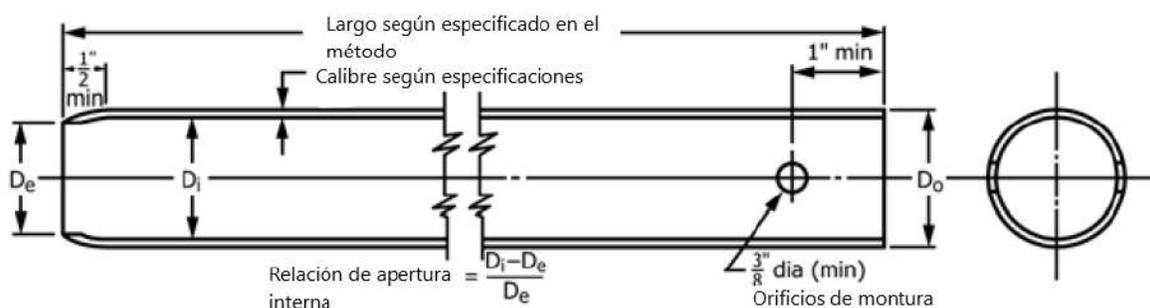


Figura 13. Gráfica normalizada de clasificación según el comportamiento mecánico (SBT).
Fuente: Robertson y Cabal, 2015.

Aunque con esta clasificación se pueda conocer el comportamiento mecánico del suelo en el sitio en estudio, algunos autores recomiendan que si no existe experiencia previa de ensayos CPTu en el ambiente geológico específico, se deben obtener muestras representativas para verificar el tipo de suelo por medio de ensayos de laboratorio, por otra parte, si se dispone de experiencia significativa en CPTu y los gráficos se han evaluado con base en esta experiencia, es posible no requerir de muestras (Robertson y Cabal, 2015).

Generalidades del muestreo con tubo Shelby

Para la ejecución de ciertos ensayos de laboratorio, es necesario contar con muestras de suelo inalteradas, las cuales conservan de la mejor manera posible las condiciones del suelo en sitio, uno de los métodos utilizados para obtener estas muestras de suelo, es mediante un tubo de pared delgada, comúnmente conocido como tubo Shelby. El procedimiento para la obtención de muestras de suelo utilizando este equipo, está normado según ASTM D1587, esta norma lo describe como el empuje vertical, sin rotación y a una velocidad constante, de un tubo de pared delgada, como el que se observa en la figura 14, de manera que se introduzca perpendicularmente a la superficie del suelo realizando mediciones del avance, llegado a la profundidad final de muestreo, se retira el tubo intentando minimizar las alteraciones a la muestra (ASTM, 2015). Las dimensiones del tubo a utilizar son dependientes del ensayo al cual se destinarán las muestras de suelo obtenidas.



$$\text{Relación de área} = (D_o^2 - D_i^2) / D_i^2$$

Figura 14. Tubo de pared delgada (Shelby).

Fuente: ASTM, 2015.

Parámetros geomecánicos

En la mecánica de suelos, la resistencia al esfuerzo cortante constituye la característica fundamental a la que se liga la capacidad de los suelos para adaptarse a las cargas que actúan en ellos, esta capacidad está definida por el ángulo de fricción y la cohesión entre las partículas y se determina a partir del criterio de falla Mohr Coulomb que se representa en la ecuación 3 y en la figura 15 (Aguilar, 2018a).

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan(\phi) \quad (3)$$

Donde:

- τ_f : Esfuerzo cortante sobre el plano de falla.
- c : Cohesión del suelo.
- σ : Esfuerzo normal sobre el plano de falla.
- ϕ : Ángulo de fricción del suelo.

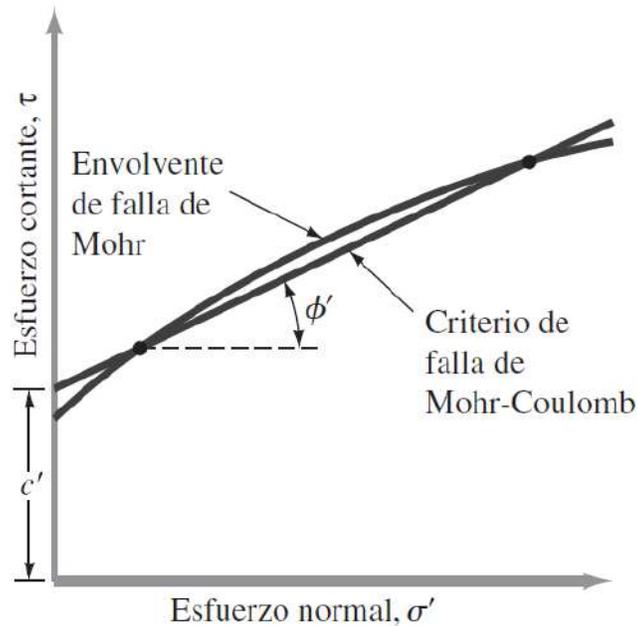


Figura 15. Envolvente de falla de Mohr y criterio de rotura de Mohr-Coulomb.
Fuente: Das, 2013.

Cohesión total

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas del suelo, en mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al corte producida por la cementación entre las partículas. En suelos granulares en los que no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y a estos suelos se les denomina suelos friccionantes o no cohesivos (Aguilar, 2018a). Para efectos de este proyecto, el termino cohesión hace referencia a la resistencia no drenada C_u del suelo.

La cohesión total, se presenta en un análisis bajo una condición no drenada, es decir, al actuar una carga sobre el suelo, el cambio de carga ocurre más rápido que el flujo del agua, debido a esto, el agua dentro de los poros no puede desplazarse y se produce un exceso de presión de poro, se analiza el suelo bajo este estado cuando la condición crítica de diseño de la

estructura se presenta a corto plazo (Aguilar, 2018b).

Para la metodología SPT, hay distintas correlaciones que designan valores de cohesión total de acuerdo con N_{60} , para concepto de este proyecto, se emplea el método utilizado en la empresa Asesorías Geotec S.A., el cual se basa en un gráfico que recopila distintas correlaciones de distintos autores, para distintos tipos de suelos y plasticidades, la figura 16 representa este gráfico, es importante recalcar que el resultado que se obtiene de este gráfico es resistencia a la compresión inconfiada, q_u , por lo que este valor debe ser dividido entre 2 para obtener el parámetro de cohesión total.

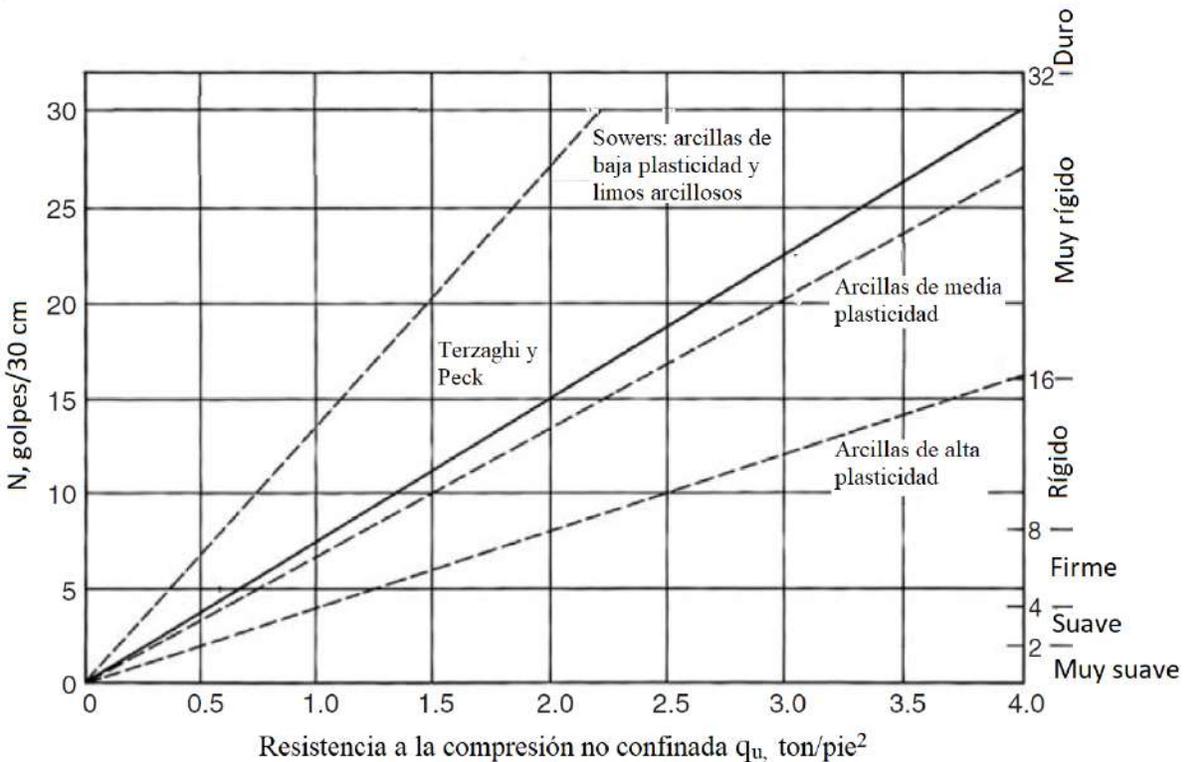


Figura 16. Correlaciones de q_u con N_{60} para suelos cohesivos de distintas plasticidades. Fuente: Hunt, 2005.

La cohesión total se obtiene de manera directa realizando ensayos de compresión inconfiada, el procedimiento de este ensayo esta normado según ASTM D2166, la cual lo describe como la falla de muestras de suelo cilíndricas bajo una carga axial sin ningún confinamiento lateral, paralelamente se realizan mediciones de carga, deformación axial y tiempo en lapsos pertinentes hasta alcanzar la falla de la muestra, la resistencia a la compresión inconfiada, q_u , es definida como la carga axial al momento de la falla dividida entre la sección transversal de cilindro intacto (ASTM, 2016).

Como se puede evidenciar en la figura 17, el esfuerzo cortante determinado a partir del ensayo de compresión inconfiada está únicamente regido por la cohesión total del suelo y está definido de acuerdo con la ecuación 4. En las figuras 18 y 19 se evidencian el equipo de compresión inconfiada y una muestra de suelo luego de la falla.

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = c_u \quad (4)$$

Donde:

- τ_f : Esfuerzo cortante sobre el plano de falla.
- σ_1 : Esfuerzo principal mayor total.
- q_u : Resistencia a la compresión inconfiada.
- c_u : Cohesión total.

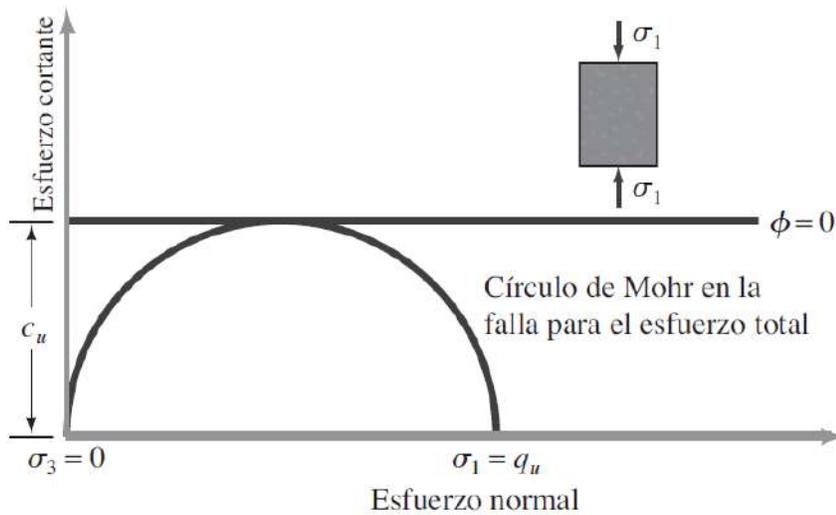


Figura 17. Círculo de Mohr, prueba de compresión inconfiada.
Fuente: Das, 2013.



Figura 18. Equipo y muestra de compresión inconfiada.



Figura 19. Muestra de suelo luego de la falla, compresión inconfiada.

Al realizar ensayos de compresión inconfiada a muestras alteradas, para suelos arcillosos, la resistencia a la compresión inconfiada se reduce en gran medida al ensayar especímenes alterados, sin ningún cambio de humedad, esta propiedad se conoce como sensibilidad del suelo y se define de acuerdo con la ecuación 5 (Das, 2013), en la figura 20 se representa la clasificación del suelo de acuerdo con su sensibilidad.

$$S_t = \frac{q_u(\text{inalterado})}{q_u(\text{alterado})} \quad (5)$$

Donde:

- S_t : Grado de sensibilidad del suelo.
- $q_u(\text{inalterado})$: Resistencia a la compresión inconfiada, muestra inalterada.
- $q_u(\text{alterado})$: Resistencia a la compresión inconfiada, muestra alterada.

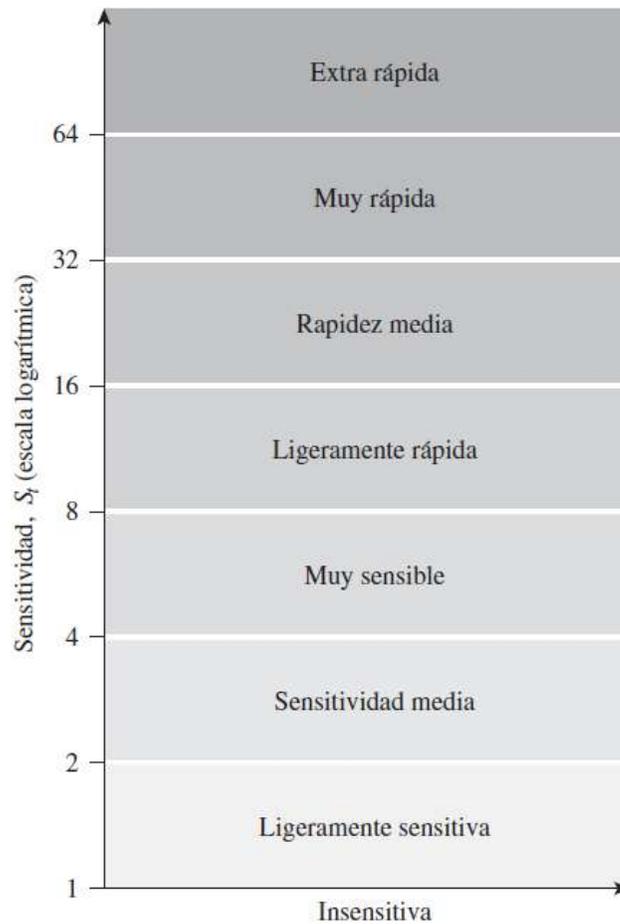


Figura 20. Clasificación de los suelos con base en su sensibilidad.
Fuente: Das, 2013.

Ángulo de fricción efectivo

El ángulo de fricción es una propiedad de los materiales granulares, es la representación matemática del coeficiente de rozamiento y es directamente dependiente de las características físicas de las partículas, de tal modo que entre mayor sea su tamaño y angularidad, mayor será el ángulo de fricción (Aguilar, 2018a). Todos los suelos poseen fricción, sin embargo, los suelos arcillosos poseen fricción muy baja por lo cual son clasificados como suelos cohesivos y el ángulo de fricción definido como 0.

Bajo la metodología SPT, el ángulo de fricción efectivo se obtiene de acuerdo a una serie de correlaciones empíricas que dependen del número de golpes normalizado N_{60} , la selección de la correlación a utilizar es dependiente del criterio del profesional responsable de acuerdo con las características del suelo analizado. Para concepto de este proyecto, la ecuación 6 representa la forma en la que este parámetro es calculado en la empresa Asesorías Geotec S.A.

$$\phi' = 15 + \sqrt{20 \cdot N_{60}} \quad (6)$$

Donde:

- ϕ' : Ángulo de fricción efectivo.
- N_{60} : Número de golpes normalizado según el equipo.

El ángulo de fricción efectivo se obtiene de manera directa realizando ensayos de corte directo, el procedimiento de este ensayo esta normado según ASTM D3080, la cual lo describe como la colocación del espécimen de prueba en el equipo de corte directo, como se puede observar en la figura 22, aplicando un esfuerzo normal predeterminado mientras se permite la saturación o el drenado de la muestra, permitir la consolidación del espécimen bajo el esfuerzo normal, luego de lo cual se libera la parte superior de la caja de corte permitiendo el corte lateral de la muestra a una tasa de deformación constante, al tiempo que se realizan mediciones de fuerza de corte, desplazamiento lateral relativo y desplazamiento normal, el esfuerzo cortante, τ , se define como la fuerza de corte máxima dividida entre la sección transversal del espécimen (ASTM, 2011).

Como se puede evidenciar en la figura 21, el esfuerzo cortante determinado a partir del ensayo de corte directo está regido tanto por la cohesión como por el ángulo de fricción del suelo y está definido de acuerdo con la ecuación 7, es importante recalcar que para arenas limpias la cohesión tiende a ser 0 como se evidencia en la figura 21, en este caso teniendo el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal efectivo, se obtiene el ángulo de fricción despejando la ecuación 7. En las figuras 23 y 24 se evidencian el equipo de corte directo utilizado.

$$\tau' = c' + \sigma' \cdot \tan(\phi') \quad (7)$$

Donde:

- τ' : Esfuerzo cortante efectivo sobre el plano de falla.
- σ' : Esfuerzo normal efectivo.
- ϕ' : Ángulo de fricción efectivo.
- c' : Cohesión efectiva.

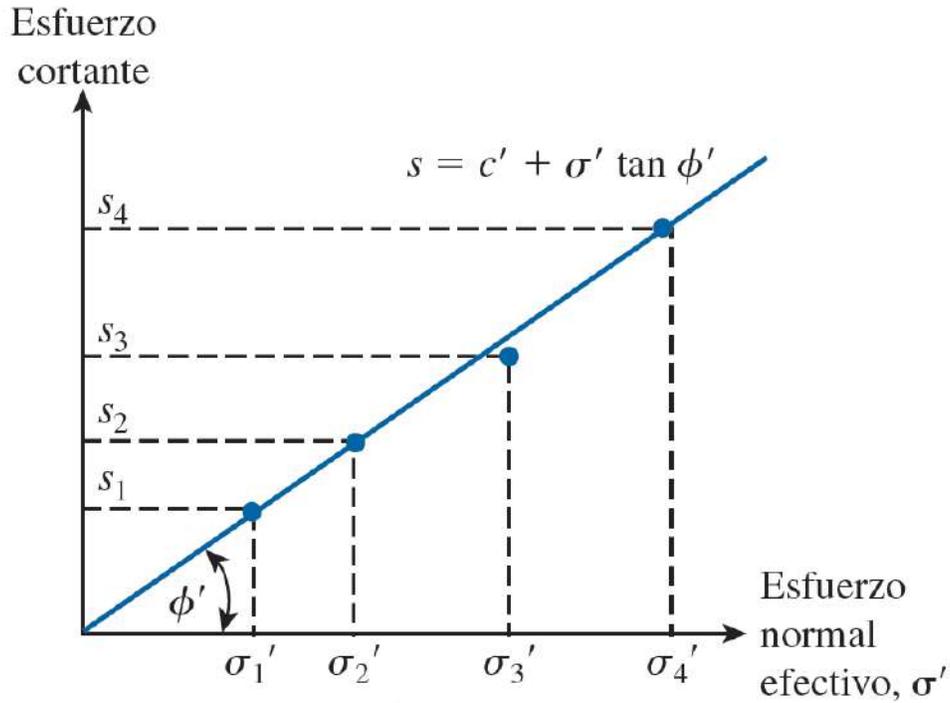


Figura 21. Circulo de Mohr, prueba de corte directo en arena.
Fuente: Das, 2012.

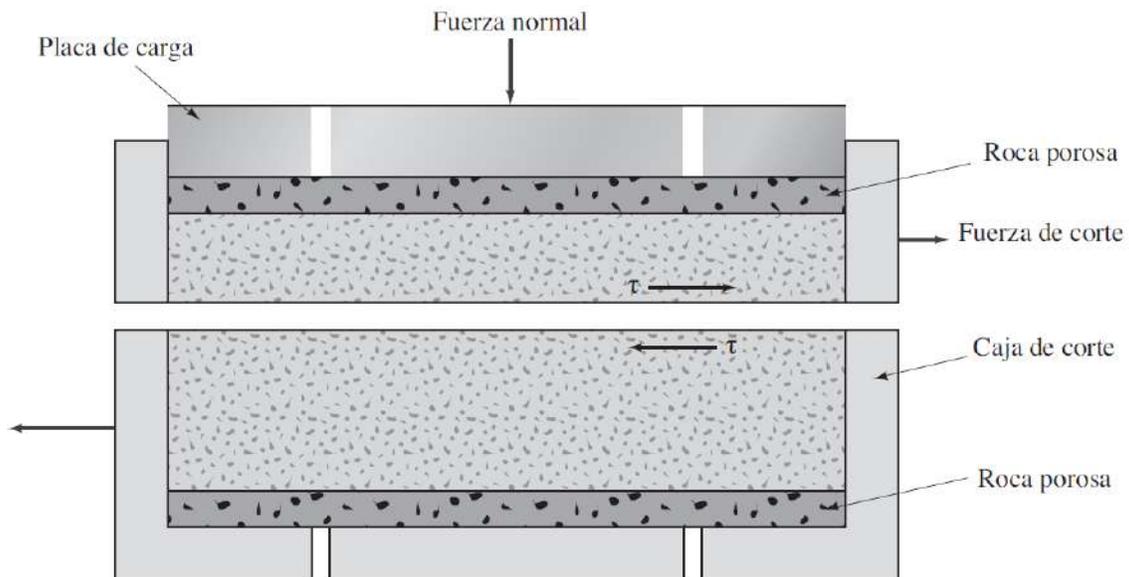


Figura 22. Diagrama de corte directo.
Fuente: Das, 2013.

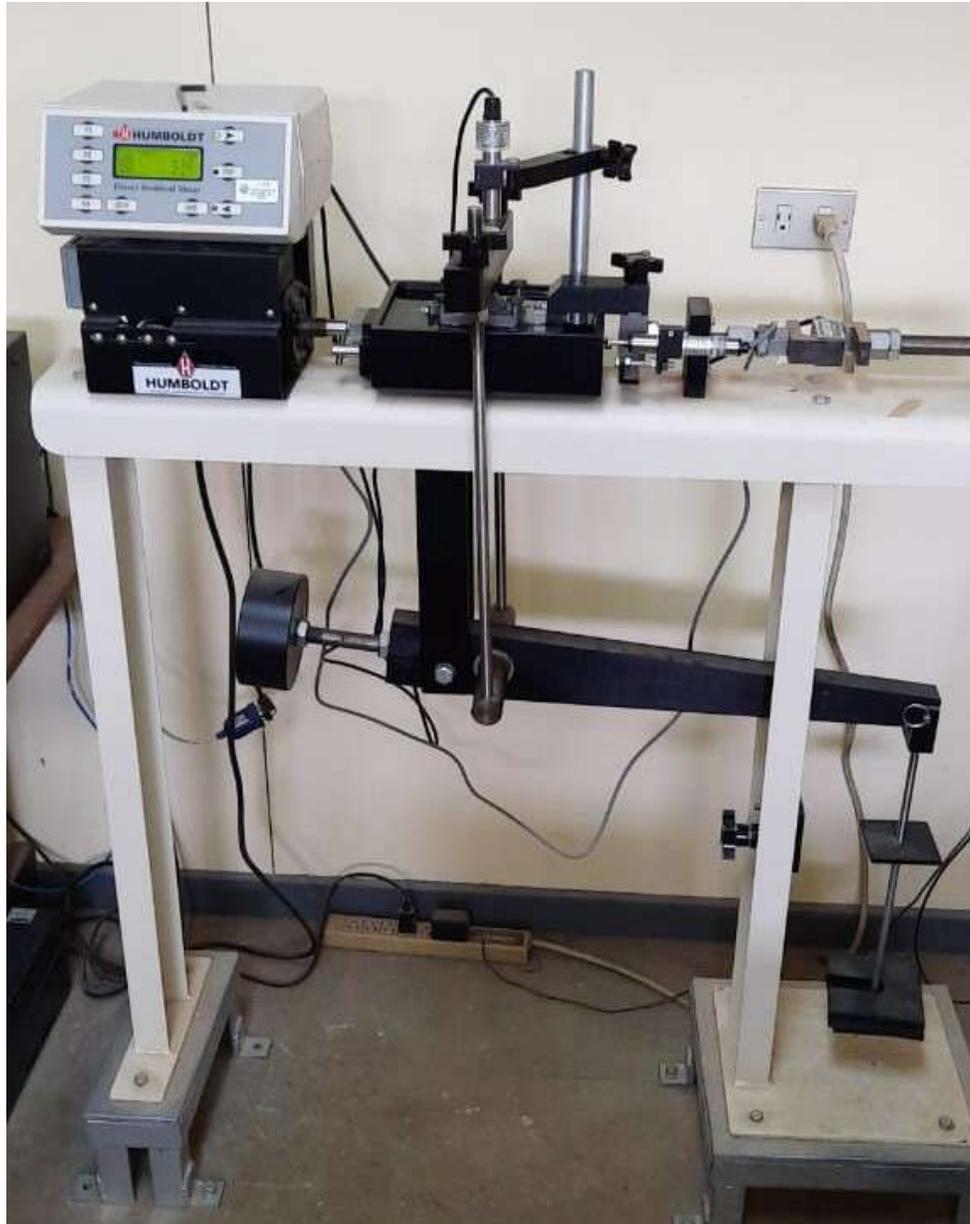


Figura 23. Equipo de corte directo.

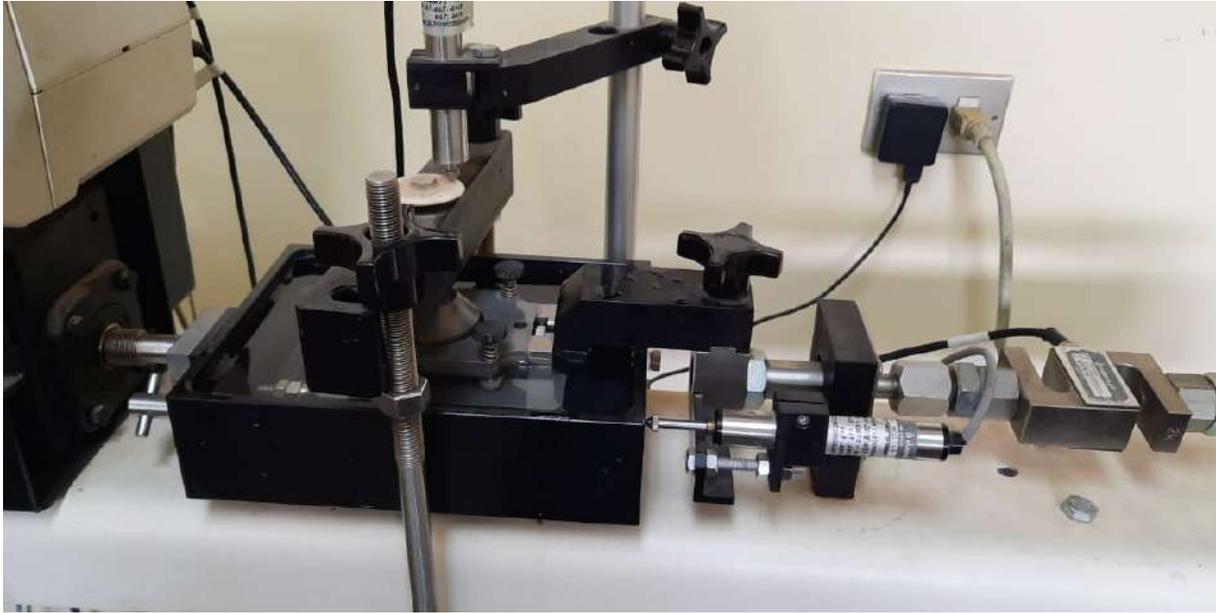


Figura 24. Equipo de corte directo.

Procesamiento de datos de CPTu

Existen diversos *software* que permiten el procesamiento de los datos de campo del ensayo de CPTu, uno de los más reconocidos y utilizados a nivel internacional es el CPeT-IT de la empresa GeoLogismiki, esta herramienta toma los datos de campo y realiza una interpretación básica en cuanto al Soil Behaviour Type o SBT, así como muchos otros parámetros geomecánicos que describen el suelo, esto basado en las correlaciones publicadas así como las últimas actualizaciones de las mismas (GeoLogismiki, 2018). A continuación se enlistan los parámetros de interés y parámetros geomecánicos comparados, así como las correlaciones utilizadas y determinadas con este *software*, estas correlaciones siguen las recomendaciones de la Guía para Pruebas de Penetración con Cono para Ingeniería Geotécnica de Robertson y Cabal, 2015:

- SPT N_{60} .

La aproximación de este parámetro se obtiene mediante la correlación propuesta por Robertson en el 2012, la cual lo describe como:

$$N_{60} = \left(\frac{q_t}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1,1268 - 0,2817 \cdot I_c}} \quad (8)$$

Donde:

- N_{60} : Número de golpes normalizado.
- q_t : Resistencia de cono corregida.

- p_a : Presión atmosférica.
 - I_c : Índice de comportamiento del suelo.
- Peso unitario del suelo.
Para la determinación del peso unitario del suelos se utilizó la correlación propuesta por Robertson en el 2010, la cual se describe como:

$$\gamma = \gamma_w \cdot (0,27 \cdot \log(R_f) + 0,36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1,236) \quad (9)$$

Donde:

- γ : Peso unitario del suelo.
 - γ_w : Peso unitario del agua.
 - R_f : Relación de fricción.
 - p_a : Presión atmosférica.
 - q_t : Resistencia de cono corregida.
- I_c , SBT.
La clasificación de suelo según el comportamiento mecánico o SBT, es determinada según el índice de comportamiento de suelo o I_c para el cual, Robertson establece la siguiente ecuación y clasificación:

$$I_c = ((3,47 - \log(Q_t))^2 + (\log(F_r) + 1,22)^2)^{0,5} \quad (10)$$

Donde:

- I_c : Índice de comportamiento de suelo.
- Q_t : Resistencia de cono normalizada.
- F_r : Relación de fricción normalizada.

Con el resultado de I_c , se procede a clasificar el suelo según el cuadro 1.

Cuadro 1. Tabla CPT normalizada de tipo de comportamiento de suelo (SBTn).

Zona	Tipo de comportamiento de suelo	I_c
1	Grano fino, sensible	N/A
2	Suelo orgánico – Arcilla	> 3.6
3	Arcillas – Arcilla limosa a arcilla	2.95 – 3.6
4	Mezcla de limos – Limo arcilloso a arcilla limosa	2.60 – 2.95
5	Mezcla de arenas – arena limosa a limo arenoso	2.05 – 2.6
6	Arenas – arena limpia a arena limosa	1.31 – 2.05
7	Arena gravosa a arena densa	< 1.31
8	Arena muy rígida a arena arcillosa	N/A
9	Grano fino, muy rígido	N/A

Fuente: Robertson y Cabal, 2015.

- Resistencia al corte no drenada.

Esta correlación aproxima la resistencia al corte no drenada para suelos cohesivos, la constante N_{kt} , tiene valores típicos entre 10 - 18, siendo creciente con el aumento de la plasticidad del suelo y decreciente con el aumento de la sensibilidad del mismo.

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (11)$$

Donde:

- S_u : Resistencia al corte no drenada, cohesión total.
- q_t : Resistencia de cono corregida.
- σ_v : Esfuerzo de sobrecarga vertical.
- N_{kt} : Factor cono para arcillas.

- Ángulo de fricción efectivo.

La correlación propuesta por Kulhawy y Mayne en 1990, aproxima el ángulo de fricción efectivo, donde la constante ϕ'_{cv} , depende de la mineralogía del suelo y tiene valores típicos entre 33 - 40, para arenas de cuarzo y arenas feldespáticas y carbonatadas, respectivamente.

$$\phi' = \phi'_{cv} + 15,84 \cdot \log(Q_t) - 26,88 \quad (12)$$

Donde:

- ϕ' : Ángulo de fricción efectivo.
- ϕ'_{cv} : Ángulo de fricción de estado crítico.
- Q_t : Resistencia de cono normalizada.

Los resultados de las correlaciones y del procesamiento de información del *software* CPeT-IT es presentado de manera tabulada y gráfica de forma que se crean perfiles del suelo con los parámetros de interés como el mostrado en la figura 25. Estos resultados son el producto final de este ensayo y son los que permiten generar una estimación de las características del perfil estratigráfico del suelo así como del comportamiento mecánico que tendrá el mismo.

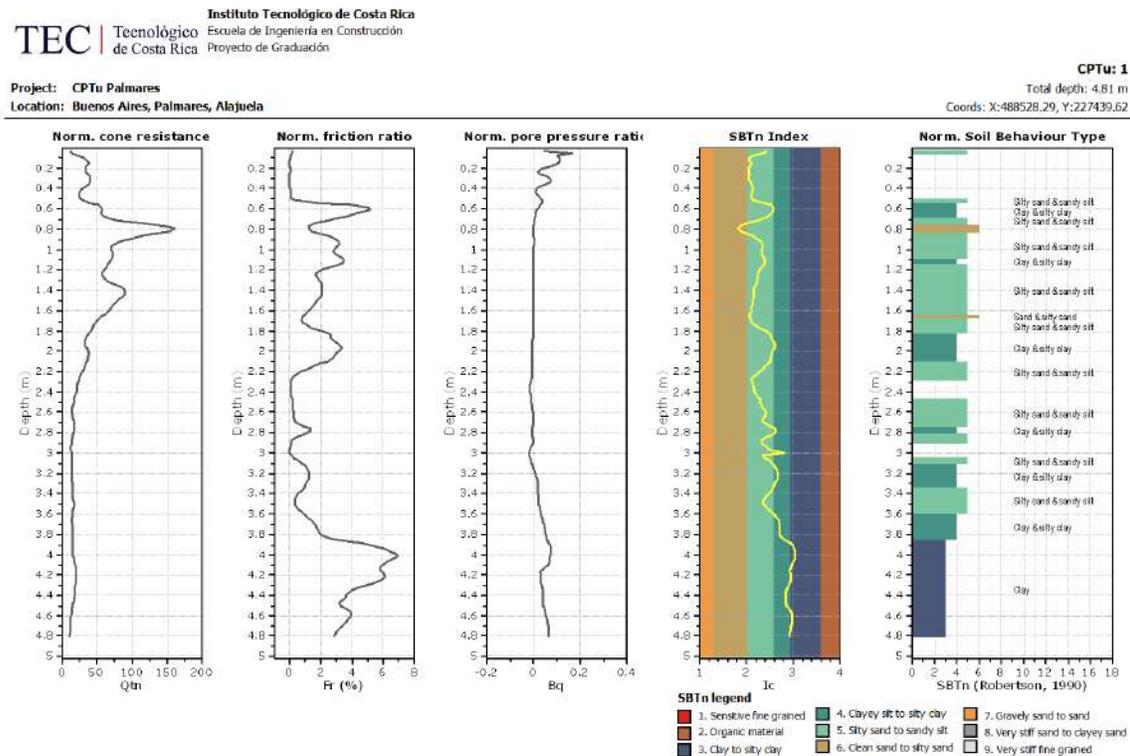


Figura 25. Parámetros geomecánicos del perfil de suelo, *software* CPeT-IT.
Herramienta computacional: CPeT-IT.

Capacidad admisible de carga del suelo

La metodología de Meyerhof permite determinar la capacidad de carga última tomando en cuenta la resistencia cortante a lo largo de la superficie de falla en el suelo por encima del fondo de la cimentación, además de que considera la posibilidad de cargas inclinadas; esta metodología se basa en la ecuación 13 (Das, 2012).

$$q_u = C \cdot N_c \cdot F_{cs} \cdot F_{cd} \cdot F_{ci} + q \cdot N_q \cdot F_{qs} \cdot F_{qd} \cdot F_{qi} + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot F_{\gamma s} \cdot F_{\gamma d} \cdot F_{\gamma i} \quad (13)$$

Donde:

- q_u : Capacidad de carga última.
- C : Cohesión.
- q : Esfuerzo efectivo al nivel del fondo de la cimentación.
- γ : Peso específico del suelo.
- B : Ancho de la cimentación.
- N_c, N_q, N_γ : Factores de capacidad de carga.
- $F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$: Factores de forma.
- $F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$: Factores de profundidad.
- $F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$: Factores de inclinación de carga.

Los factores que conforman la ecuación 13 son de origen empírico y sus ecuaciones se representan en las ecuaciones 14, 15 y 16 y en la figura 26.

Factores de capacidad de carga.

$$N_q = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan(\phi')} \quad (14)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot(\phi') \quad (15)$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan(\phi') \quad (16)$$

Donde:

- ϕ' : Ángulo de fricción efectivo.

Factor	Relación	Referencia
Forma	$F_{cs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right)\left(\frac{N_q}{N_c}\right)$ $F_{qs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan \phi'$ $F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \left(\frac{B}{L}\right)$	DeBeer (1970)
Profundidad	si; $\frac{D_f}{B} \leq 1$ Para $\phi = 0$: $F_{cd} = 1 + 0.4 \left(\frac{D_f}{B}\right)$ $F_{qd} = 1$ $F_{\gamma d} = 1$ Para $\phi' > 0$: $F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \text{sen } \phi')^2 \left(\frac{D_f}{B}\right)$ $F_{\gamma d} = 1$ si; $\frac{D_f}{B} > 1$ Para $\phi = 0$: $F_{cd} = 1 + 0.4 \underbrace{\tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)}_{\text{radianes}}$ $F_{qd} = 1$ $F_{\gamma d} = 1$ Para $\phi' > 0$: $F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \phi'}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \text{sen } \phi')^2 \underbrace{\tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)}_{\text{radianes}}$ $F_{\gamma d} = 1$	Hansen (1970)
Inclinación	$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ}\right)^2$ $F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi'}\right)$ <p>β = inclinación de la carga sobre la cimentación respecto a la vertical</p>	Meyerhof (1963); Hanna y Meyerhof (1981)

Figura 26. Factores de forma, profundidad e inclinación.

Fuente: Das, 2012.

Para determinar la capacidad admisible de carga se utiliza la ecuación 17.

$$q_{adm} = \frac{q_u}{F.S.} \quad (17)$$

Donde:

- q_{adm} : Capacidad de carga admisible.
- q_u : Capacidad de carga última.
- $F.S.$: Factor de seguridad.

Metodología

En esta sección se describe la metodología para el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos del proyecto, esto de acuerdo con una organización cronológica de las actividades realizadas.

Realización de ensayos SPT y CPTu en tres suelos con características geotécnicas diferentes, con la finalidad de obtener parámetros de interés por medio ensayos de laboratorio y correlaciones a los resultados de campo

Determinación de los terrenos ensayados

Como primer punto, se realizó un proceso de discusión con la intención de definir los 3 tipos de suelos con características geotécnicas diferentes que se consideraban adecuados para utilizar dentro de la comparativa del proyecto, esto comprende una arena limpia, una arcilla expansiva de alta plasticidad y un limo haloisítico de baja resistencia. Luego, se ubicaron los territorios del país que presentan esta clase de suelos, esto de acuerdo con mapas de zonificación geológica y el conocimiento del Ingeniero Francisco Quesada. En estos territorios, se buscaron terrenos de clientes de la empresa Asesorías Geotec S.A. que permitieran utilizarlos para el estudio, se consiguió un terreno en playa Esterillos en el cantón de Parrita de Puntarenas, uno en Buenos Aires, Palmares, Alajuela y el último en Cinchona, Alajuela, Alajuela. Las ubicaciones de estos terrenos se evidencian en el apéndice 1.

Por otra parte, el tipo de suelo presente en estos terrenos fue comprobado mediante ensayos de laboratorio, se adjuntan los resultados en el apéndice 3.

Ensayos de campo de SPT y CPTu

Para cada uno de los terrenos antes mencionados, se aplicaron los ensayos de campo SPT y CPTu siguiendo la normativa respectiva descrita en el marco teórico, estos ensayos fueron aplicados por el equipo y operarios de las empresas Asesorías Geotec S.A. e INSUMA S.A. respectivamente. En cada uno de estos terrenos se realizaron 3 perforaciones de cada ensayo, las ubicaciones de estas perforaciones se representan en las figuras y el cuadro del apéndice 2. Estas ubicaciones representan una perforación SPT y una perforación CPTu cada una, las perforaciones en cada ubicación se realizaron a una separación medida de 1 metro, sin embargo por simplicidad se considera una sola ubicación para ambas perforaciones.

La profundidad de aplicación de los ensayos buscaba un máximo de 5 metros, sin embargo en muchos casos los equipos presentaban rechazo en el avance, en el cuadro 3 se muestran las profundidades alcanzadas. Además, es importante mencionar que en ninguna de las perforaciones realizadas se encontró nivel freático, por lo cual este no fue contemplado en el análisis. Todos los ensayos de campo fueron realizados durante el periodo comprendido entre el 10 de marzo y el 5 de mayo del año 2022.

Obtención de parámetros de interés

Durante la ejecución de los ensayos de campo de SPT, se obtuvieron muestras de suelo alteradas, las cuales fueron ensayadas en el laboratorio de la empresa Asesorías Geotec S.A., de acuerdo con la lista de ensayos y la normativa descrita en el cuadro 2. Estos ensayos permitieron obtener los parámetros de clasificación de suelo y peso unitario para el perfil de suelo de cada perforación. Adicionalmente, de acuerdo al número de golpes N , se correlacionaron los parámetros de N_{60} , cohesión total y ángulo de fricción efectivo de los suelos, esto siguiendo el proceso descrito en la sección de marco teórico.

Cuadro 2. Ensayos aplicados a las muestras de SPT.

Ensayos	Normativa seguida
Contenido de humedad	ASTM D2216
Granulometría	ASTM D6913
Límites de consistencia	ASTM D4318
Lavado en N°200	ASTM D1140
Clasificación SUCS	ASTM D2487
Peso unitario	ASTM D7263

A partir de los resultados del ensayo de campo de CPTu, el *software* de procesamiento de datos utilizado, en este caso CPeT-IT, aplicó las correlaciones y correcciones a la información para generar directamente los parámetros de interés del perfil de los suelos ensayados, el *software* fue configurado para determinar la homologación de la información a tramos de 45 cm, esto con la intención de facilitar la comparación con los resultados de la metodología SPT.

Obtención de los parámetros geomecánicos de cohesión y ángulo de fricción de manera directa

Selección de ensayos especiales utilizados

Para la determinación de manera directa de los parámetros geomecánicos de cohesión total y ángulo de fricción efectivo, se utilizaron los ensayos de compresión inconfiada y corte directo, esto siguiendo la normativa descrita en la sección de marco teórico. Estos ensayos fueron

realizados en los laboratorios de la empresa Asesorías Geotec S.A. y del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica (CIVCO), respectivamente.

El ensayo de corte directo es una opción muy viable para determinar el ángulo de fricción efectivo de una arena limpia, por otra parte, el ensayo de compresión confinada es viable para determinar la cohesión total en arcillas de alta densidad como la presente en el terreno de Palmares, no del mismo modo para limos de baja resistencia como el presente en el terreno de Cinchona, sin embargo, esto es una de las limitantes del proyecto dado el difícil acceso a ensayos triaxiales CD.

Determinación de cohesiones totales

Como se mencionó anteriormente, los parámetros de cohesiones totales fueron obtenidos mediante ensayos de compresión confinada con el equipo y técnicos de la empresa Asesorías Geotec S.A.

Estos ensayos fueron aplicados a los suelos clasificados como arcilla expansiva y limo haloisítico presentes en los terrenos de Palmares y Cinchona respectivamente. Las muestras de suelo utilizadas en estos ensayos se obtuvieron de la siguiente manera. Debido a la imposibilidad de obtener muestras de suelo inalteradas de todo el perfil estratigráfico, en los 2 suelos ensayados, muestras a 5 metros de profundidad, se optó por ensayar muestras de suelo alteradas obtenidas mediante ensayos SPT utilizando liners en los muestreadores para disminuir la alteración, al mismo tiempo que se obtuvieron muestras de suelo inalteradas mediante tubos Shelby de los primeros 135 cm de profundidad de los 2 suelos analizados, esto por medio de la excavación de calicatas.

Se ensayaron y compararon los resultados de muestras alteradas e inalteradas, se obtuvieron variaciones de la resistencia a la compresión confinada muy pequeñas, al mismo tiempo, se determinó la sensibilidad de estos suelos, siguiendo el procedimiento descrito en la sección de marco teórico, de acuerdo al cual los mismo están en un rango de insensitivos a ligeramente sensitivos, por lo tanto se consideró aceptable el ensayar las muestras alteradas obtenidas mediante el ensayo SPT. En total, para cada tramo de 45 cm se ensayaron 2 muestras de suelo obtenidas mediante SPT y 2 muestras de suelo obtenidas mediante tubos Shelby, lo cual permitió obtener un volumen de información suficientemente representativo.

Determinación de ángulo de fricción efectivo

El ángulo de fricción efectivo fue determinado mediante el ensayo de corte directo, el cual fue aplicado por el equipo y técnicos del laboratorio del CIVCO.

Este ensayo se aplicó únicamente para la arena limpia presente en el terreno de Esterillos, realizándose un solo ensayo de corte directo, debido a la homogeneidad en el perfil de suelo

presente en sitio y verificado con los resultados de SPT y CPTu, la muestra de suelo utilizada se obtuvo a una profundidad de 40 cm, esto con la intención de evitar contaminantes y material orgánico. Las muestras utilizadas en las fallas fueron remoldeadas según la densidad natural de la arena en sitio.

Determinación de la capacidad admisible de carga siguiendo la metodología de Meyerhof

La capacidad admisible de carga fue determinada siguiendo la metodología de Meyerhof descrita en la sección de marco teórico, esto utilizando un supuesto de cimentación rectangular de $1 m^2$ de base y un factor de seguridad de 3. Por otra parte, para el cálculo en la arena limpia presente en el terreno de Esterillos, se utilizó un valor de cohesión de 0, mientras que en la arcilla expansiva de Palmares y el limo haloisítico de Cinchona, se asumió un ángulo de fricción igual a 0, la razón fue buscar un diseño conservador ya que son suelos con características o muy granulares o muy cohesivas.

Se construyó un perfil de capacidades admisibles de carga para cada perforación de cada suelo analizado, y para ambas metodologías en comparación. Para el caso de las perforaciones CPTu, como se puede observar en la sección de resultados, debido a limitantes de la metodología, existe un faltante de datos de peso unitario, cohesión y ángulo de fricción, sin los cuales se imposibilita determinar la capacidad de carga, para solventarlo, se definieron estos valores de acuerdo a criterio ingenieril tomando en cuenta los parámetros de tramos de suelo con la misma clasificación de suelos SBT.

Comparación de las características de interés, parámetros geomecánicos y capacidades de carga, obtenidas bajo las metodologías SPT y CPTu para cada tipo de suelo

Los parámetros de interés fueron comparados entre ambas metodologías, se determinó, para los resultados numéricos, la diferencia porcentual entre los parámetros del mismo tramo de la misma perforación, obteniendo de esta manera, perfiles con las diferencias porcentuales entre las metodologías, esto para cada suelo analizado. La intención de este análisis fue obtener un resultado comparable en todos los tramos, para así obtener un promedio de la diferencia porcentual de cada parámetro de interés, de cada uno de los suelos. Adicional a esto, se determinó la desviación estándar de cada promedio, de modo que se pueda conocer su variabilidad.

Por otra parte, el parámetro de clasificación de suelo, fue comparado teniendo como punto de referencia la clasificación obtenida bajo la metodología SPT, considerando esta como la clasificación real, ya que sigue un sistema de clasificación complejo basado en resultados de ensayos de laboratorio aplicado a muestras de suelo, no una serie de correlaciones a resultados

de campo como la metodología CPTu. Basado en esto, los resultados de clasificación del CPTu se analizaron respecto a su semejanza con los del SPT, considerándose favorable para la metodología la mayor semejanza de los resultados.

De igual manera, la comparación de los parámetros geomecánicos y las capacidades admisibles de carga se realizó siguiendo la misma lógica descrita anteriormente, determinando el promedio de la diferencia porcentual entre las metodologías. Adicionalmente, se contrastaron los parámetros geomecánicos obtenidos en ambas metodologías, con los resultados directos obtenidos de los ensayos especiales, los cuales son considerados como los resultados reales y por ende, el punto de referencia para definir la exactitud de las metodologías.

Con la intención de lograr un análisis integral entre las metodologías en estudio, se compararon las capacidades admisibles de carga obtenidas con cada una de las metodologías, con las capacidades determinadas de acuerdo con los parámetros geomecánicos obtenidos de manera directa de los ensayos especiales. Esta comparación se realizó mediante la obtención del error relativo entre los valores experimentales de cada metodología y los valores reales obtenidos mediante los ensayos especiales, se representaron los resultados de estos errores en un gráfico de caja, con la intención de no perder de vista la variabilidad de los resultados. Este análisis se le realizó a las capacidades admisibles de carga ya que consisten en el resultado final de las metodologías en comparación e involucran todos los resultados determinados previamente.

Resultados

En esta sección se presentan los resultados más relevantes obtenidos durante el desarrollo del proyecto, estos se exhiben siguiendo la misma secuencia descrita en el apartado de metodología. En la sección de apéndices encontrará información complementaria así como resultados preliminares.

La información aquí presentada está debidamente comentada y explicada sin embargo la interpretación y discusión de estos resultados se desarrolla en la sección de análisis de resultados.

Cuadro 3. Profundidad de perforaciones [m].

Perforación	Esterillos		Palmares		Cinchona	
	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u
P1	2.70	2.74	4.95	4.81	4.95	2.62
P2	3.15	2.43	4.95	5.12	4.95	2.89
P3	3.15	5.07	4.95	3.17	4.95	3.00

En el cuadro 3, se exponen las profundidades alcanzadas en las perforaciones de los ensayos SPT y CPT_u realizados, dichas perforaciones tenían como objetivo los 5 metros de profundidad, sin embargo por limitantes de los equipos en los distintos suelos esto no siempre se logró.

Cuadro 4. N_{60} , arena limpia de Esterillos.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u
0.00 - 0.45	2	-	2	5	2	2
0.45 - 0.90	3	-	4	6	2	9
0.90 - 1.35	3	-	8	13	10	28
1.35 - 1.80	9	18	17	29	19	29
1.80 - 2.25	10	19	14	27	16	23
2.25 - 2.70	24	25	24	-	25	26
2.70 - 3.15	-	-	18	-	17	23
3.15 - 3.60	-	-	-	-	-	24
3.60 - 4.05	-	-	-	-	-	23
4.05 - 4.50	-	-	-	-	-	30
4.50 - 4.95	-	-	-	-	-	29

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Cuadro 5. N_{60} , arcilla expansiva de Palmares.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u
0.00 - 0.45	5	1	2	-	5	-
0.45 - 0.90	6	5	6	9	6	9
0.90 - 1.35	6	6	10	8	6	7
1.35 - 1.80	6	8	8	8	6	9
1.80 - 2.25	4	5	5	6	4	6
2.25 - 2.70	5	3	3	4	5	7
2.70 - 3.15	4	3	3	4	4	6
3.15 - 3.60	4	4	5	5	4	-
3.60 - 4.05	6	5	4	7	6	-
4.05 - 4.50	5	7	5	5	5	-
4.50 - 4.95	6	5	6	7	6	-

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Cuadro 6. N_{60} , limo haloisítico de Cinchona.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u
0.00 - 0.45	2	3	3	6	2	4
0.45 - 0.90	1	3	4	7	2	7
0.90 - 1.35	1	6	2	8	2	7
1.35 - 1.80	1	8	5	8	2	12
1.80 - 2.25	1	9	2	6	2	10
2.25 - 2.70	1	9	3	7	2	11
2.70 - 3.15	2	-	3	-	3	14
3.15 - 3.60	2	-	2	-	3	-
3.60 - 4.05	3	-	6	-	4	-
4.05 - 4.50	3	-	4	-	4	-
4.50 - 4.95	2	-	3	-	7	-

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

En los cuadros 4, 5 y 6 se exponen los parámetros N_{60} obtenidos durante la ejecución de los ensayos SPT y CPT_u, estos se obtienen en el ensayo SPT mediante correcciones del número de golpes y del ensayo CPT_u mediante correlaciones de la resistencia por punta.

Cuadro 7. Clasificación de suelos, arena limpia de Esterillos.

	Profundidad [m]	SPT	CPT _u
Perforación 1	0.00 - 0.45	Arena pobremente graduada	-
	0.45 - 0.90		-
	0.90 - 1.35		-
	1.35 - 1.80	Arena pobremente graduada con limo	Arena limpia a arena limosa
	1.80 - 2.25		Arena gravosa a arena
	2.25 - 2.70	-	-
	2.70 - 3.15	-	-
	3.15 - 3.60	-	-
	3.60 - 4.05	-	-
	4.05 - 4.50	-	-
	4.50 - 4.95	-	-
	Perforación 2	0.00 - 0.45	Arena pobremente graduada con limo
0.45 - 0.90			
0.90 - 1.35			
1.35 - 1.80			
1.80 - 2.25			
2.25 - 2.70		-	
2.70 - 3.15		-	
3.15 - 3.60		-	
3.60 - 4.05		-	
4.05 - 4.50		-	
4.50 - 4.95	-		
Perforación 3	0.00 - 0.45	Arena pobremente graduada con limo	Arena limpia a arena limosa
	0.45 - 0.90		
	0.90 - 1.35		
	1.35 - 1.80		
	1.80 - 2.25		
	2.25 - 2.70		
	2.70 - 3.15	-	
	3.15 - 3.60	-	
	3.60 - 4.05	-	
	4.05 - 4.50	-	
4.50 - 4.95	-		

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Cuadro 8. Clasificación de suelos, arcilla expansiva de Palmares.

	Profundidad [m]	SPT	CPTu	
Perforación 1	0.00 - 0.45	Arcilla densa	Arena limosa a limo arenoso	
	0.45 - 0.90			
	0.90 - 1.35			
	1.35 - 1.80	Limo elástico con arena		
	1.80 - 2.25			
	2.25 - 2.70			
	2.70 - 3.15			
	3.15 - 3.60	Arcilla densa		Limo arcilloso a arcilla limosa
	3.60 - 4.05			Arcilla a arcilla limosa
	4.05 - 4.50			
	4.50 - 4.95	Limo elástico		
Perforación 2	0.00 - 0.45	Arcilla densa	-	
	0.45 - 0.90		Arena limosa a limo arenoso	
	0.90 - 1.35			
	1.35 - 1.80	Limo elástico con arena		
	1.80 - 2.25			
	2.25 - 2.70			
	2.70 - 3.15			
	3.15 - 3.60	Arcilla densa		Limo arcilloso a arcilla limosa
	3.60 - 4.05			Arcilla a arcilla limosa
	4.05 - 4.50			
	4.50 - 4.95	Limo elástico		
Perforación 3	0.00 - 0.45	Arcilla densa		-
	0.45 - 0.90		Arena limosa a limo arenoso	
	0.90 - 1.35			
	1.35 - 1.80	Arcilla densa		
	1.80 - 2.25			
	2.25 - 2.70			
	2.70 - 3.15			
	3.15 - 3.60	Limo elástico		-
	3.60 - 4.05			-
	4.05 - 4.50			-
	4.50 - 4.95	-		

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Cuadro 9. Clasificación de suelos, limo haloisítico de Cinchona.

	Profundidad [m]	SPT	CPTu
Perforación 1	0.00 - 0.45	Limo elástico con arena	Arena limosa a limo arenoso
	0.45 - 0.90		
	0.90 - 1.35		
	1.35 - 1.80		
	1.80 - 2.25		
	2.25 - 2.70	Limo arcilloso a arcilla limosa	
	2.70 - 3.15		
	3.15 - 3.60	Limo elástico arenoso	-
	3.60 - 4.05		-
	4.05 - 4.50		-
	4.50 - 4.95		-
			-
Perforación 2	0.00 - 0.45	Limo elástico con arena	Arena limosa a limo arenoso
	0.45 - 0.90		
	0.90 - 1.35	Limo elástico arenoso	Limo arcilloso a arcilla limosa
	1.35 - 1.80		
	1.80 - 2.25		
	2.25 - 2.70		
	2.70 - 3.15		
	3.15 - 3.60		
	3.60 - 4.05		
	4.05 - 4.50		
	4.50 - 4.95		
		-	
Perforación 3	0.00 - 0.45	Limo elástico con arena	Arena limosa a limo arenoso
	0.45 - 0.90		
	0.90 - 1.35	Limo elástico arenoso	
	1.35 - 1.80		
	1.80 - 2.25		
	2.25 - 2.70		
	2.70 - 3.15		
	3.15 - 3.60		
	3.60 - 4.05		
	4.05 - 4.50		
	4.50 - 4.95		
		-	
		-	
		-	

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Los cuadros 7, 8 y 9, contienen la clasificación de los suelos encontrados en las 3 perforaciones de las 3 ubicaciones estudiadas, dichas clasificaciones siguen el sistema unificado de clasificación de suelos o SUCS para la metodología SPT y la clasificación según el tipo de comportamiento del suelo o SBT para la metodología CPTu.

Cuadro 10. Peso unitario [kN/m^3], arena limpia de Esterillos.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPTu	SPT	CPTu	SPT	CPTu
0.00 - 0.45	16.0	-	17.5	13.7	17.5	13.7
0.45 - 0.90	16.0	-	17.5	13.7	17.5	14.5
0.90 - 1.35	16.0	-	17.5	16.8	17.5	19.2
1.35 - 1.80	17.5	17.9	17.5	19.0	17.5	19.1
1.80 - 2.25	20.6	17.6	20.6	18.8	23.4	17.9
2.25 - 2.70	20.6	17.7	20.6	-	23.4	18.4
2.70 - 3.15	-	-	20.6	-	23.4	18.1
3.15 - 3.60	-	-	-	-	-	18.3
3.60 - 4.05	-	-	-	-	-	18.0
4.05 - 4.50	-	-	-	-	-	18.6
4.50 - 4.95	-	-	-	-	-	18.9

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Cuadro 11. Peso unitario [kN/m^3], arcilla expansiva de Palmares.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPTu	SPT	CPTu	SPT	CPTu
0.00 - 0.45	16.8	13.7	16.8	-	16.8	-
0.45 - 0.90	16.8	16.7	16.8	19.0	16.8	18.9
0.90 - 1.35	16.8	17.7	16.8	18.7	16.8	18.3
1.35 - 1.80	16.9	17.5	16.9	18.1	16.4	19.0
1.80 - 2.25	16.9	16.9	16.9	17.8	16.4	17.6
2.25 - 2.70	16.9	13.8	16.9	16.5	16.4	18.0
2.70 - 3.15	16.9	14.5	16.4	15.6	16.4	17.5
3.15 - 3.60	16.4	15.1	16.4	16.5	17.5	-
3.60 - 4.05	16.4	16.7	16.4	17.7	17.5	-
4.05 - 4.50	16.4	17.9	16.4	17.3	17.5	-
4.50 - 4.95	17.5	17.0	17.5	18.1	17.5	-

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Cuadro 12. Peso unitario [kN/m^3], limo haloisítico de Cinchona.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u
0.00 - 0.45	14.2	16.1	14.2	17.7	14.2	16.5
0.45 - 0.90	14.2	16.4	14.2	18.6	14.2	18.8
0.90 - 1.35	14.2	17.9	16.3	18.7	16.3	18.5
1.35 - 1.80	14.2	18.7	16.3	18.7	16.3	18.6
1.80 - 2.25	14.2	18.8	16.3	17.4	16.3	18.2
2.25 - 2.70	14.2	18.4	16.3	18.0	16.3	18.9
2.70 - 3.15	16.3	-	16.3	-	16.3	19.2
3.15 - 3.60	16.3	-	16.3	-	16.3	-
3.60 - 4.05	16.3	-	16.3	-	16.3	-
4.05 - 4.50	16.3	-	16.3	-	16.3	-
4.50 - 4.95	16.3	-	12.9	-	16.3	-

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

En los cuadros 10, 11 y 12, se muestran los resultados de peso unitario obtenidos en la metodología SPT por medio del ensayo de las muestras obtenidas y por medio de correlaciones en la metodología CPT_u.

Cuadro 13. Ángulo de fricción efectivo [°], arena limpia de Esterillos.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u
0.00 - 0.45	21.3	-	21.3	-	21.3	32.0
0.45 - 0.90	22.7	-	23.9	-	21.3	-
0.90 - 1.35	22.7	-	27.6	39.9	29.1	44.3
1.35 - 1.80	28.4	40.5	33.4	43.9	34.5	43.7
1.80 - 2.25	29.1	40.2	31.7	42.6	32.9	41.3
2.25 - 2.70	36.9	41.7	36.9	-	37.4	41.6
2.70 - 3.15	-	-	34.0	-	33.4	40.2
3.15 - 3.60	-	-	-	-	-	39.9
3.60 - 4.05	-	-	-	-	-	39.1
4.05 - 4.50	-	-	-	-	-	40.8
4.50 - 4.95	-	-	-	-	-	40.0

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Cuadro 14. Cohesión total [kPa], arcilla expansiva de Palmares.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPTu	SPT	CPTu	SPT	CPTu
0.00 - 0.45	66.8	-	27.0	-	66.8	-
0.45 - 0.90	80.0	-	80.0	186.2	80.0	182.6
0.90 - 1.35	80.0	-	133.0	143.7	80.0	115.7
1.35 - 1.80	80.0	-	106.5	-	80.0	164.1
1.80 - 2.25	53.5	99.4	66.8	100.9	53.5	96.8
2.25 - 2.70	66.8	-	40.3	68.6	66.8	117.8
2.70 - 3.15	53.5	-	40.3	67.7	53.5	93.3
3.15 - 3.60	53.5	-	66.8	94.2	53.5	-
3.60 - 4.05	80.0	69.2	53.5	98.9	80.0	-
4.05 - 4.50	66.8	91.4	66.8	71.4	66.8	-
4.50 - 4.95	80.0	69.6	80.0	82.5	80.0	-

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Cuadro 15. Cohesión total [kPa], limo haloisítico de Cinchona.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPTu	SPT	CPTu	SPT	CPTu
0.00 - 0.45	27.0	-	40.3	118.0	27.0	-
0.45 - 0.90	13.8	58.9	53.5	144.1	27.0	133.3
0.90 - 1.35	13.8	110.0	27.0	149.3	27.0	136.3
1.35 - 1.80	13.8	128.6	66.8	139.8	27.0	-
1.80 - 2.25	13.8	144.1	27.0	83.7	27.0	-
2.25 - 2.70	13.8	151.9	40.3	112.3	27.0	210.3
2.70 - 3.15	27.0	-	40.3	-	40.3	263.2
3.15 - 3.60	27.0	-	27.0	-	40.3	-
3.60 - 4.05	40.3	-	80.0	-	53.5	-
4.05 - 4.50	40.3	-	53.5	-	53.5	-
4.50 - 4.95	27.0	-	40.3	-	90.3	-

Herramienta computacional: CPeT-IT, Excel.

Los cuadros 13, 14 y 15 reflejan los parámetros geomecánicos que se determinaron a partir de correlaciones de los resultados obtenidos en ambas metodologías. El parámetro geomecánico analizado, para cada uno de los sitios, es dependiente del tipo de suelo presente en ellos, se compara el ángulo de fricción en suelos con predominancia de arenas y la cohesión en suelos con predominancia de limos o arcillas.

Cuadro 16. Parámetros geomecánicos directos.

Profundidad [m]	Ángulo de fricción efectivo [°]		Cohesión total [<i>kPa</i>]	
	Arena limpia	Arcilla expansiva	Limo haloisítico	
0.00 - 0.45	39.4	131.7	52.7	
0.45 - 0.90		288.6	43.9	
0.90 - 1.35		321.1	34.6	
1.35 - 1.80		248.1	38.5	
1.80 - 2.25		137.9	22.9	
2.25 - 2.70		83.1	27.5	
2.70 - 3.15		145.7	33.0	
3.15 - 3.60		76.0	23.6	
3.60 - 4.05		121.2	-	
4.05 - 4.50		59.2	-	
4.50 - 4.95		94.9	-	

Herramienta computacional: Excel.

El cuadro 16 representa los parámetros geomecánicos de cohesión total y ángulo de fricción efectivo, obtenidos de manera directa en laboratorio al ensayar muestras de suelo inalteradas, con la aplicación de ensayos de compresión simple, para los suelos con predominancia de limos o arcillas y el ensayo de corte directo, para suelos arenosos. Es importante recalcar que por limitantes del proyecto, el ensayo de corte directo solo fue aplicado a una muestra de suelo superficial.

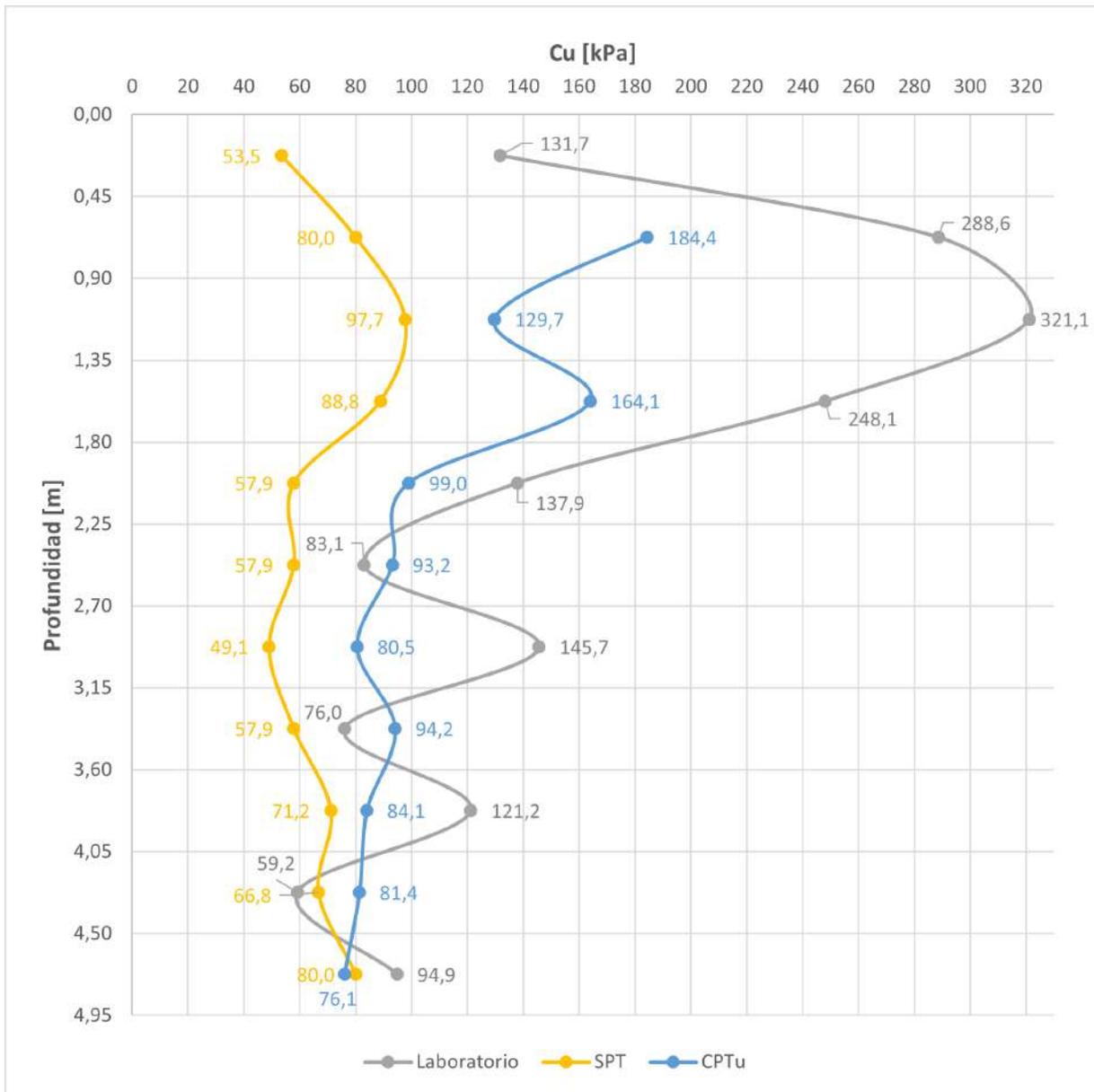


Figura 27. Superposición de curvas de cohesión total, arcilla expansiva de Palmares. Herramienta computacional: Excel.

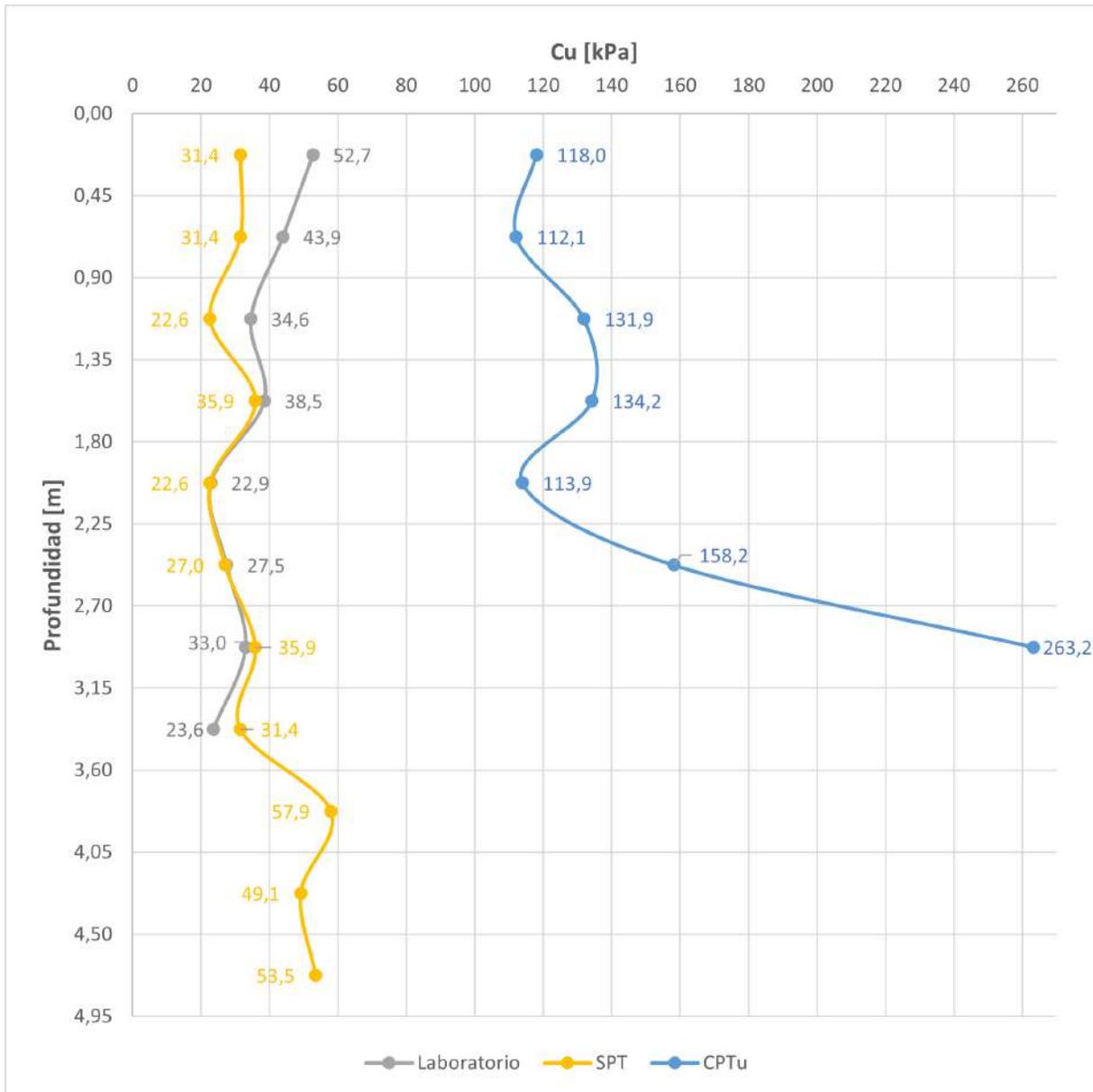


Figura 28. Superposición de curvas de cohesión total, limo haloístico de Cinchona. Herramienta computacional: Excel.

Las figuras 27 y 28, muestran de manera gráfica los resultados de cohesión total presentados en los cuadros 14, 15 y 16, esto obteniendo un promedio de los datos de SPT y CPTu por ubicación y presentándolos en un perfil vertical que representa la profundidad de los tramos analizados.

Cuadro 17. Capacidad admisible de carga [ton/m^2], arena limpia de Esterillos.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u
0.00 - 0.45	4	14	4	14	4	14
0.45 - 0.90	9	25	11	25	8	30
0.90 - 1.35	13	114	25	115	31	247
1.35 - 1.80	35	170	71	299	83	301
1.80 - 2.25	50	205	73	308	88	257
2.25 - 2.70	170	313	177	-	199	325
2.70 - 3.15	-	-	141	-	140	307
3.15 - 3.60	-	-	-	-	-	337
3.60 - 4.05	-	-	-	-	-	338
4.05 - 4.50	-	-	-	-	-	485
4.50 - 4.95	-	-	-	-	-	476

Herramienta computacional: Excel.

Cuadro 18. Capacidad admisible de carga [ton/m^2], arcilla expansiva de Palmares.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u
0.00 - 0.45	17	36	7	36	17	36
0.45 - 0.90	23	42	23	53	23	52
0.90 - 1.35	24	42	39	42	24	34
1.35 - 1.80	25	44	33	44	25	50
1.80 - 2.25	18	32	22	32	18	31
2.25 - 2.70	22	47	14	23	22	38
2.70 - 3.15	19	47	14	23	19	31
3.15 - 3.60	19	48	23	32	19	-
3.60 - 4.05	28	24	19	34	28	-
4.05 - 4.50	24	32	24	26	24	-
4.50 - 4.95	29	25	29	30	29	-

Herramienta computacional: Excel.

Cuadro 19. Capacidad admisible de carga [ton/m^2], limo haloisítico de Cinchona.

Profundidad [m]	P1		P2		P3	
	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u	SPT	CPT _u
0.00 - 0.45	7	25	10	29	7	29
0.45 - 0.90	4	17	16	41	8	38
0.90 - 1.35	5	32	8	44	8	40
1.35 - 1.80	5	39	21	43	9	44
1.80 - 2.25	5	45	9	27	9	45
2.25 - 2.70	6	49	14	37	10	67
2.70 - 3.15	10	-	14	-	14	85
3.15 - 3.60	10	-	11	-	15	-
3.60 - 4.05	15	-	28	-	19	-
4.05 - 4.50	15	-	20	-	20	-
4.50 - 4.95	11	-	16	-	33	-

Herramienta computacional: Excel.

Los cuadros 17, 18 y 19 muestran las capacidades admisibles de carga calculadas según lo descrito en la sección de marco teórico, utilizando un factor de seguridad de 3 y un tamaño de placa de $1 m^2$, además, definiendo la cohesión en suelos granulares como 0 y el ángulo de fricción en suelos finos como 0.

Cuadro 20. Capacidad admisible de carga [ton/m^2], según parámetros geomecánicos directos.

Profundidad [m]	Arena limpia	Arcilla expansiva	Limo haloisítico
0.00 - 0.45	51	33	13
0.45 - 0.90	89	83	13
0.90 - 1.35	125	93	11
1.35 - 1.80	163	75	12
1.80 - 2.25	208	43	8
2.25 - 2.70	253	27	10
2.70 - 3.15	298	48	12
3.15 - 3.60	343	26	9
3.60 - 4.05	389	41	-
4.05 - 4.50	434	22	-
4.50 - 4.95	480	34	-

Herramienta computacional: Excel.

En el cuadro 20, se muestran las capacidades admisibles de carga calculadas según lo descrito en la sección de marco teórico, utilizando los parámetros geomecánicos determinados de manera directa y descritos en el cuadro 16.

Análisis de los resultados

Los resultados son analizados según los 3 tipos de suelos estudiados, dividiendo el análisis en, parámetros de interés, parámetros geomecánicos y las capacidades admisibles de carga. Los resultados numéricos son analizados entre las metodologías en comparación, según el porcentaje de diferencia que se obtiene entre los parámetros del mismo tramo y de la misma perforación, de modo que se generan perfiles de porcentajes de diferencia entre las metodologías para cada tipo de suelo. Esto, con el objetivo de determinar el promedio de estas diferencias, de modo que se pueda representar con un único valor el comportamiento del parámetro analizado entre las metodologías. Adicionalmente se determina la desviación estándar de modo que se pueda conocer la variabilidad del promedio antes descrito.

Por su parte, para los parámetros de clasificación de suelos, es importante recalcar que los resultados obtenidos de la metodología SPT se consideran mucho más certeros, ya que siguen un sistema de clasificación complejo basado en resultados de ensayos de laboratorio aplicados a muestras de suelo, y no una serie de correlaciones a resultados de campo como la metodología CPTu. Por esta razón, los resultados de la metodología SPT son establecidos como los resultados reales de clasificación y por ende utilizados como punto de referencia, para la comparativa entre metodologías.

Arena limpia de Esterillos

Parámetros de interés

En relación con los parámetros N_{60} reflejados en el cuadro 4, se puede observar que los mismos presentan valores mucho mayores al ser correlacionados bajo la metodología CPTu, teniendo, en promedio, una diferencia del 86 %, con una desviación estándar también del 86 %, presentándose tramos en los cuales se obtienen resultados hasta 350 % mayores que los correlacionados del SPT. Por otra parte, si se compara el cambio del factor en la profundidad del perfil, es notable que, los resultados de CPTu siguen un comportamiento creciente continuo, a diferencia de la metodología SPT, en la cual los valores son crecientes, pero no continuamente.

En cuanto a los parámetros de clasificación representados en el cuadro 7, se puede observar como, bajo ambas metodologías, se obtiene un resultado de clasificación muy similar en todo el perfil estratigráfico de las 3 perforaciones, lo cual representa una gran ventaja para la metodología CPTu, la cual no requiere de la obtención y el ensayo de muestras de suelo.

En referencia a los parámetros de peso unitario descritos en el cuadro 10, se puede observar que se obtienen resultados similares en ambas metodologías, los valores correlacionados bajo SPT son ligeramente mayores en la mayoría de los casos; en promedio un 22 % mayores, con una desviación estándar de 8 %.

Analizando la ejecución de los ensayos, y no sus resultados, en los cuadros 4, 7 y 10 se evidencia que de las 6 perforaciones realizadas en este suelo, solo 1 logró llegar a la profundidad deseada, los 5 m. Lo anterior ocurre porque el suelo superficial se encontraba muy disgregado, lo cual provocaba problemas al ejecutar ambos ensayos de campo. Las perforaciones del SPT se cerraban tan pronto se extraían los muestreadores llenos. Por otro lado, en las perforaciones del CPTu se levantaba el equipo, debido a la poca resistencia que lograban las anclas. Sin embargo, gracias a que el largo de estas se puede extender, se consiguió llegar a la profundidad deseada en una de las perforaciones. Por otra parte, como se puede observar en los resultados de la perforación 1, el CPTu no presenta valores en los primeros 3 tramos, esto se debe a que el equipo no registró datos de fricción de fuste, por lo que es imposible generar las correlaciones.

Parámetros geomecánicos

En relación con los parámetros de ángulo de fricción reflejados en el cuadro 13, se puede observar que los resultados obtenidos bajo la metodología CPTu, son mayores a los correlacionados del SPT, en promedio un 32 % mayores, esto con una desviación estándar de 13 %, esta es una diferencia alta al considerar las implicaciones de este parámetro. Realizando la comparación con el ángulo de fricción obtenido de manera directa en el ensayo de corte directo, el cual se ve reflejado en el cuadro 16, se evidencia como los resultados obtenidos del CPTu son mayores al resultado directo, en promedio, un 5 % mayores, esto para todos los tramos exceptuando el tramo 1 y 9 de la perforación 3. Caso opuesto, los resultados del SPT, los cuales son mucho menores al resultado obtenido de manera directa, en promedio, un 26 % menores, con una diferencia muy notable en los primeros tramos de las perforaciones. Por otra parte, el faltante de datos especialmente evidente en los tramos de las perforaciones 1 y 2 del CPTu, se debe a limitantes con el factor I_c de la correlación utilizada para determinar el ángulo de fricción.

Capacidades admisibles de carga

De los resultados reflejados en el cuadro 17, se puede inferir que la capacidad admisible de carga determinada bajo la metodología CPTu es mucho mayor a la calculada con la metodología SPT. En promedio, las capacidades son 286 % mayores, con una desviación estándar de 183 %, teniendo tramos en los que la diferencia de la capacidad de carga llega hasta valores 778 % mayores. Esta gran diferencia se puede relacionar directamente al mayor ángulo de fricción correlacionado a partir de los resultados CPTu, ya que es el factor determinante en la ecuación de Meyerhof, mucho más incluso, que el peso unitario, el cual tiene valores mayores al ser correlacionado del SPT.

Arcilla expansiva de Palmares

Parámetros de interés

En relación con los parámetros N_{60} reflejados en el cuadro 5, se puede observar que los mismos presentan valores muy similares en ambas metodologías, los valores correlacionados del CPTu, son ligeramente mayores a los del SPT, en el 74 % de los tramos, presentando en promedio una diferencia del 29 %, con un desviación estándar de 21 %. Por otra parte, el 26 % de tramos restantes, presenta resultados mayores al ser correlacionados del SPT, con un promedio de diferencia del 31 % y una desviación estándar de 59 %.

En cuanto a los parámetros de clasificación representados en el cuadro 8, se puede observar como, los resultados de clasificación tienen bastante variación entre ambas metodologías, en todo el perfil estratigráfico de las 3 perforaciones, teniendo clasificaciones equivalentes en solo el 26 % de los tramos comparados, lo cual es una desventaja para la metodología CPTu para este tipo de suelos.

En referencia a los parámetros de peso unitario descritos en el cuadro 11, se puede observar que se obtienen resultados similares en ambas metodologías, los valores correlacionados bajo CPTu, son ligeramente mayores en el 74 % de los tramos, presentando en promedio valores 7 % mayores, esto con una desviación estándar de 4 %. Por otra parte, el 26 % de tramos restantes, presenta resultados mayores al ser correlacionados del SPT, con un promedio de diferencia del 10 % y una desviación estándar de 8 %.

Analizando la ejecución de los ensayos, y no sus resultados, en los cuadros 5, 8 y 11 se evidencia que 1 de las 6 perforaciones realizadas en este suelo, no logró llegar a la profundidad deseada, los 5 m. Esto debido a que el equipo CPTu presentó fallas al momento de realizar esta última perforación, en este caso, tiene ventaja el ensayo SPT, el cual no depende de instrumentación electrónica. Por otra parte, en las perforaciones 2 y 3, el CPTu no presenta resultados en el primer tramo, esto se debe a que el equipo no registró datos de fricción de fuste, por lo que es imposible generar las correlaciones.

Parámetros geomecánicos

En relación con los parámetros de cohesión reflejados en el cuadro 14, se puede observar que los resultados obtenidos bajo la metodología CPTu, para la mayoría de los casos, son mucho mayores a los correlacionados del SPT, en promedio un 65 % mayores, con una desviación estándar de 38 %, la cual es una diferencia alta al considerar las implicaciones de este parámetro. Esta diferencia también es notable en la figura 27, en la cual las metodologías son contrastadas con los resultados de cohesión obtenidos de manera directa y mostrados en el cuadro 16. Realizando la comparación con los resultados directos, es evidente que estos son mucho mayores en los primeros tramos del perfil, sin embargo, a partir del quinto tramo el comportamiento se

asemeja a los resultados de la metodología CPTu, poniendo estos en ventaja sobre los del SPT. Por otra parte, la faltante de datos especialmente evidente en los tramos de la perforación 1 del CPTu, se debe a limitantes con el factor I_c de la correlación utilizada para determinar la cohesión.

Capacidades admisibles de carga

De los resultados reflejados en el cuadro 18, se puede inferir que la capacidad admisible de carga determinada bajo la metodología CPTu es mucho mayor a la calculada con la metodología SPT. En promedio las capacidades son 87 % mayores, con una desviación estándar de 77 %, teniendo tramos en los que la diferencia de la capacidad de carga llega hasta valores 420 % mayores. Esta gran diferencia se puede relacionar directamente a la mayor cohesión correlacionada a partir de los resultados CPTu, ya que es el factor determinante en la ecuación de Meyerhof, mucho más incluso, que el peso unitario el cual también es mayor en la metodología CPTu.

Limo haloisítico de Cinchona

Parámetros de interés

En relación con los parámetros N_{60} reflejados en el cuadro 6, se puede observar que los mismos presentan valores mucho mayores al ser correlacionados bajo la metodología CPTu, teniendo, en promedio, una diferencia del 328 %, con una desviación estándar de 237 %, presentándose tramos en los cuales se obtienen resultados hasta 800 % mayores que los correlacionados del SPT. Por otra parte, si se compara el cambio del factor en la profundidad del perfil, es notable que, los resultados de SPT siguen un comportamiento constante poco creciente, a diferencia de la metodología CPTu en la cual los valores son crecientes.

En cuanto a los parámetros de clasificación representados en el cuadro 9, se puede observar como, los resultados de clasificación tienen bastante similitud entre ambas metodologías, en todo el perfil estratigráfico de las 3 perforaciones, teniendo clasificaciones equivalentes en el 68 % de los tramos comparados, lo cual es una gran ventaja para la metodología CPTu la cual no requiere de la obtención y el ensayo de muestras de suelo.

En referencia a los parámetros de peso unitario descritos en el cuadro 12, se puede observar que se obtienen resultados similares en ambas metodologías, los valores correlacionados bajo CPTu son ligeramente mayores en todos los casos, en promedio un 20 % mayores, esto con una desviación estándar de 8 %.

Analizando la ejecución de los ensayos, y no sus resultados, en los cuadros 6, 9 y 12 se evidencia que las 3 perforaciones CPTu realizadas en este suelo no lograron llegar a la profundidad deseada, los 5 m, ya que el equipo CPTu presentó fallas al momento de realizar estas perforacio-

nes, en este caso tiene ventaja el ensayo SPT el cual no depende de instrumentación electrónica.

Parámetros geomecánicos

En relación con los parámetros de cohesión reflejados en el cuadro 15, se puede observar que los resultados obtenidos bajo la metodología CPTu, son mucho mayores a los correlacionados del SPT, en promedio un 477 % mayores, con una desviación estándar de 286 %, esta es una diferencia muy alta al considerar las implicaciones de este parámetro. Esta diferencia también es notable en la figura 28, en la cual las metodologías son contrastadas con los resultados de cohesión obtenidos de manera directa y mostrados en el cuadro 16. Realizando la comparación, es evidente que los resultados del CPTu se alejan mucho de los obtenidos de manera directa, de manera contraria los del SPT los cuales no solo se asemejan en magnitud sino en el comportamiento, el cual es casi idéntico en todo el perfil analizado, colocando la metodología SPT en gran ventaja para este tipo de suelos. La alta desviación en los datos obtenidos del CPTu, puede ser un indicador de que la información procesada en este caso, no representa correctamente las condiciones del sitio. Por otra parte, la faltante de datos especialmente evidente en los tramos de la perforación 3 del CPTu, se debe a limitantes con el factor I_c de la correlación utilizada para determinar la cohesión.

Capacidades admisibles de carga

De los resultados reflejados en el cuadro 19, se puede inferir que la capacidad admisible de carga determinada bajo la metodología CPTu es mucho mayor a la calculada con la metodología SPT. En promedio las capacidades son 396 % mayores, con una desviación estándar de 200 %, teniendo tramos en los que la diferencia de la capacidad de carga llega hasta valores 773 % mayores. Esta gran diferencia se puede relacionar directamente con la mayor cohesión y peso unitario correlacionados a partir de los resultados CPTu, ya que son factores determinantes en la ecuación de Meyerhof.

Análisis integral de las metodologías

Con el propósito de lograr un análisis integral entre las metodologías en estudio, se comparan las capacidades admisibles de carga de cada metodología con las capacidades determinadas a partir de los parámetros geomecánicos obtenidos de manera directa. Esto, por medio del error relativo entre los valores experimentales y los valores reales, y representando estos resultados en un gráfico de caja.

La finalidad de este análisis es poder comparar los resultados finales obtenidos con cada metodología en relación con los resultados reales y poder evidenciar la variación entre las metodologías para los distintos tipos de suelos, los resultados de este análisis se representan en la figura 29.

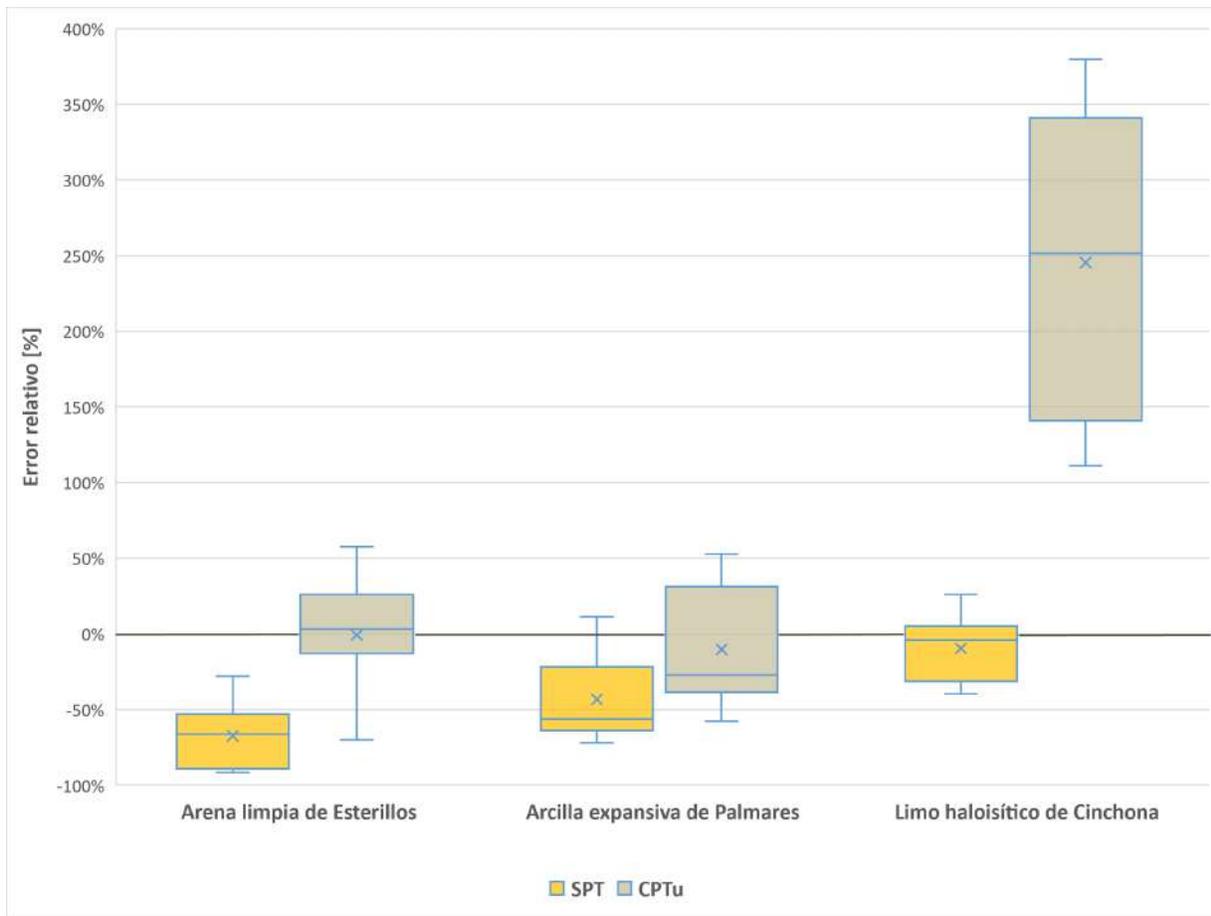


Figura 29. Errores relativos de las capacidades admisibles de carga.
Herramienta computacional: Excel.

Interpretando el análisis reflejado en la figura anterior, como primer punto sobresalen los errores relativos del CPTu pertenecientes al limo haloisítico, los cuales tienen una media de 245 % con una dispersión igualmente alta, esto indica que las capacidades admisibles de carga determinadas a partir del CPTu, presentan valores en promedio 245 % mayores, con máximos de hasta 380 % mayores a los resultados reales. Este error relativo prominentemente alto, al igual que la alta dispersión de estos datos, puede ser indicativo de que la información procesada con la metodología CPTu en este suelo, no representa correctamente las condiciones del sitio, por lo que se decide descartar esta información del análisis general de las metodologías y se recomienda repetir las pruebas de campo para este suelo.

Con respecto a los resultados en la arena limpia, se evidencia cómo bajo la metodología SPT, se obtienen errores relativos negativos, con una media de -67 %, una mediana de -66 % y una asimetría negativa. Por su parte, los errores bajo la metodología CPTu presentan un distribución tanto positiva como negativa, con una media de -1 %, una mediana de 3 % y una asimetría ligeramente positiva.

En cuanto a los resultados en la arcilla expansiva, se evidencia cómo bajo la metodología SPT, se obtienen errores relativos negativos, con una media de -43 %, una mediana de -56 % y una asimetría muy positiva. Por su parte, los errores bajo la metodología CPTu presentan una distribución tanto positiva como negativa, con una media de -10 %, una mediana de -27 % y una asimetría muy positiva. Las asimetrías mostradas en los errores de ambas metodologías son indicativas de que los datos se concentran en la parte inferior de la distribución, por lo tanto, la mayoría de errores son negativos.

Por su parte, los resultados en el limo haloisítico, se evidencia cómo bajo la metodología SPT, se obtienen errores relativos en su mayoría negativos, con una media de -10 %, una mediana de -4 % y una asimetría muy negativa. La asimetría mostrada en los errores indica que los datos se concentran en la parte superior de la distribución, por lo que la mayoría de errores tienden a valores cercanos al 0 %.

Analizando el gráfico sin diferenciar el tipo de suelo, es evidente que los errores relativos del SPT son en su mayoría negativos, lo que indica que las capacidades admisibles de carga determinadas bajo esta metodología suelen presentar resultados menores a los reales, este es un resultado esperado dado al conocimiento general de que las correlaciones de esta metodología son muy conservadoras. Por su parte, los errores relativos del CPTu presentan valores tanto positivos como negativos, con una distribución muy uniforme y medias negativas que tienden al 0 % de error. Esto es indicativo de que las capacidades admisibles de carga determinadas bajo la metodología CPTu, presentan valores cercanos a los reales, pero con tendencia a ser menores.

Conclusiones

Los parámetros N_{60} presentan valores mucho mayores al ser correlacionados bajo la metodología CPTu, con diferencias especialmente altas en las arenas limpias y el limos haloisíticos.

La clasificación de suelos SBT determinada bajo la metodología CPTu, presenta resultados muy favorables en la arena limpia y el limo haloisítico, en los cuales la mayor parte de la estratigrafía presenta resultados equivalentes entre las metodologías SPT y CPTu.

Los resultados de peso unitario tienen poca variación entre las metodologías, alternándose la metodología que presenta resultados mayores. Considerando esto, es aceptable indicar que los resultados de peso unitario, para los 3 suelos analizados, son equivalentes entre las metodologías SPT y CPTu.

La ejecución de los ensayos de campo del CPTu puede presentar inconvenientes al depender de un complejo equipo electrónico y mecánico en comparación con el rudimentario equipo SPT.

La dependencia de equipo complejo del CPTu, permite que su repetibilidad, en los resultados sea muy positiva, en comparación con la del SPT, la cual depende de gran cantidad de factores variables que influyen directamente en los resultados finales.

Los parámetros geomecánicos de ángulo de fricción efectivo, son mayores al ser correlacionados del CPTu, de igual manera, son estos los que se acercan más al valor obtenido de manera directa.

En todos los suelos estudiados, los parámetros geomecánicos de cohesión total, son mayores al ser correlacionados del CPTu.

Los parámetros geomecánicos de cohesión total, obtenidos del CPTu en la arcilla expansiva, presentan resultados más cercanos a los parámetros determinados de manera directa.

Los parámetros geomecánicos de cohesión total, obtenidos del SPT en el limo haloisítico, presentan resultados más cercanos a los parámetros determinados de manera directa, asemejando de manera muy certera su comportamiento.

Las capacidades admisibles de carga, presentan resultados mayores al ser determinadas según los parámetros del CPTu, de igual manera, son estas las que se acercan más a las capacidades admisibles determinadas según los parámetros geomecánicos directos.

Los parámetros de interés obtenidos, presentan resultados muy distintos entre suelos analizados.

Los parámetros geomecánicos obtenidos de manera directa, permitieron determinar la metodología que mejor describe las condiciones del suelo en sitio.

Los resultados de los parámetros de interés obtenidos a partir de las metodologías SPT y CPTu, fueron viables para permitir su adecuado proceso de comparación y análisis, esto con la excepción del parámetro de cohesión total obtenido del CPTu en el limo haloisítico.

Recomendaciones

Se recomienda ampliar los puntos de comparación entre las metodologías SPT y CPTu, así como realizar los ensayos en otros tipos de suelos, de modo que se pueda conocer la variación de otros resultados en distintos medios.

Aumentar el número de ensayos de campo realizados por cada metodología en cada tipo de suelo, con la intención de aumentar la significancia estadística.

Aumentar la cantidad de ensayos de laboratorio realizados, especialmente cortes directos y compresiones confinadas, al mismo tiempo, realizar ensayos triaxiales CD, con la intención de verificar resultados y aumentar la significancia estadística.

Repetir los ensayos de campo CPTu realizados en el terreno de Cinchona, limo haloisítico, debido a la gran desviación y alta variabilidad que presentan los resultados obtenidos.

Repetir los ensayos de campo que no lograron llegar a la profundidad de comparación establecida de 5 metros.

Incorporar en el análisis aspectos operativos de las metodologías, como lo son, los costos de adquisición, de operación y de mantenimiento de los equipos, así como la productividad de los mismos.

Llevar un adecuado control del mantenimiento de los equipos y de la capacitación de los operarios del SPT y CPTu, esto con el objetivo de aumentar la repetibilidad de los resultados.

Llevar un adecuado control del mantenimiento de los equipos y de la capacitación de los operarios del laboratorio de suelos, con el objetivo de garantizar la repetibilidad y fiabilidad de los resultados de los ensayos realizados.

Incorporar en la metodología SPT actualmente utilizada por la empresa, nuevos métodos y correlaciones que permitan obtener resultados más representativos y adaptados al tipo de suelo, con la intención de acercar más las capacidades de carga a los resultados reales.

Referencias

- Aguilar, I. S. (2018a). *RESISTENCIA AL CORTE*. Mecánica de suelos 1. Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica.
- Aguilar, I. S. (2018b). *RESISTENCIA AL CORTE*. [Presentación de diapositivas]. Mecánica de suelos 1. Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica.
- ASTM (2018). *D1586 Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. URL: <http://www.astm.org/Standards/D1586/D1586M>.
- ASTM (2016). *D2166 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. URL: <http://www.astm.org/Standards/D2166>.
- ASTM (2020). *D5778 Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*. URL: <http://www.astm.org/Standards/D5778>.
- ASTM (2011). *D3080 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. URL: <http://www.astm.org/Standards/D3080>.
- ASTM (2015). *D1587 Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes*. URL: <http://www.astm.org/Standards/D1587>.
- ASTM (2011). *D6066 Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential*. URL: <http://www.astm.org/Standards/D6066>.
- ASTM (2017). *D2487 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. URL: <http://www.astm.org/Standards/D2487>.
- Das, Braja M. (2013). *FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA*. 4.^a ed. Cengage Learning.
- Das, Braja M. (2012). *FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES*. 7.^a ed. Cengage Learning.
- GeoLogismiki (2018). *CPeT-IT v.3.0 – CPT interpretation software*. URL: <https://geologismiki.gr/products/cpet-it/>.
- Hunt, Roy E. (2005). *GEOTECHNICAL ENGINEERING INVESTIGATION HANDBOOK*. 2.^a ed. Taylor y Francis Group.
- Jefferies, M. G. y M. P. Davies (1993). «Use of CPTu to Estimate Equivalent SPT N60». En: *Geotechnical Testing Journal* 16.4, págs. 458-468. URL: <https://www.astm.org/gtj10286j.html>.

- Laporte, G y Ramírez (nov. de 2006). *Diseño Geotécnico en Limos Haloisíticos*. [IX Seminario Nacional de Geotécnia].
- Robertson, P. K. y K. L. Cabal (2015). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. URL: <http://www.greggdrilling.com/news/6th-edition-of-guide-to-cone-penetration-testing-now-available/>.
- Sáenz, D. (2015). *Comparación de propiedades geotécnicas obtenidas por medio de distintos ensayos in situ (SDMT, CPT, PMT, SPT y ensayos de laboratorio)*. [Congreso]. XII Congreso Nacional De Geotecnia CONGEO. URL: https://www.geotecniacr.com/premio/Premio_2015_027_Ulloa.pdf.
- Schneid, F. (2005). *Geo-Characterisation and properties of natural soils by in situ tests*. [Actas de conferencia]. International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. URL: <https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=eQy3DAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=Geo-Characterisation+and+properties+of+natural+soils+by+in+situ+tests&ots=rjxnpCp0WD&sig=xrVTSTOKbBrhUemsgytT18mz9AY#v=onepage&q=Geo-Characterisation%20and%20properties%20of%20natural%20soils%20by%20in%20situ%20tests&f=false>.
- Seed E., et al. (1962). «Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays». En: *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 88.3, págs. 53-87. URL: <https://ascelibrary-org.ezproxy.itcr.ac.cr/doi/epdf/10.1061/JSFEAQ.0000431>.
- Serquén, W. R. (2020). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Suelos y Cimentaciones*. URL: <https://aportesingecivil.com/fundamentos-de-ingenieria-geotecnica-2020-william-rodriguez/>.
- Trillos, G. D. (2011). *Caracterización de un sitio mediante ensayo de CPTU*. [Tesis de maestría, Universidad de Javeriana]. Repositorio PUJ. URL: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1469>.

Apéndices

1.	Ubicación de las propiedades ensayadas.	72
2.	Ubicación de las perforaciones realizadas.	75
3.	Comprobaciones de tipos de suelo.	78
4.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Perforación 1 Esterillos.	80
5.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Perforación 2 Esterillos.	85
6.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Perforación 3 Esterillos.	90
7.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Perforación 1 Palmares.	95
8.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Perforación 2 Palmares.	100
9.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Perforación 3 Palmares.	105
10.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Perforación 1 Cinchona.	110
11.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Perforación 2 Cinchona.	115
12.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Perforación 3 Cinchona.	120
13.	Resultados del <i>software</i> CPeT-IT, Superpuestos según terreno.	125

Apéndice 1. Ubicación de las propiedades ensayadas.

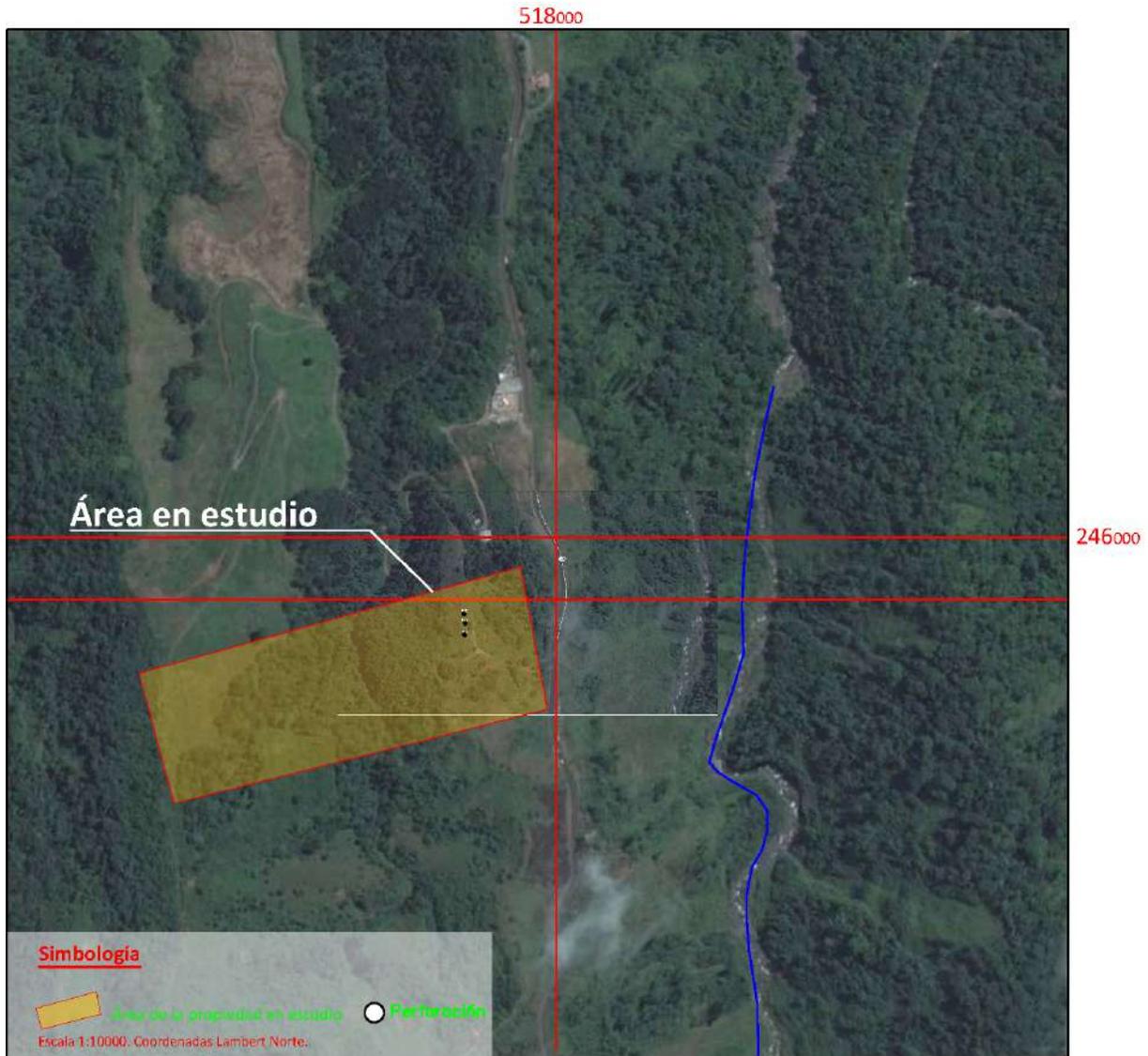
Las imágenes satelitales representan las ubicaciones de las propiedades en las cuales se ejecutaron los ensayos de campo de las metodologías SPT y CPTu.



(a) Ubicación de propiedad, Esterillos.
Herramienta computacional: Google Earth, AutoCAD.



(b) Ubicación de propiedad, Palmares.
Herramienta computacional: Google Earth, AutoCAD.



(c) Ubicación de propiedad, Cinchona.
Herramienta computacional: Google Earth, AutoCAD.

Apéndice 2. Ubicación de las perforaciones realizadas.

Las imágenes satelitales representan las ubicaciones las perforaciones realizadas durante la ejecución de los ensayos de campo de las metodologías SPT y CPTu.



(a) Ubicación de perforaciones, Esterillos.
Herramienta computacional: Google Earth, AutoCAD.



(b) Ubicación de perforaciones, Palmares.
Herramienta computacional: Google Earth, AutoCAD.



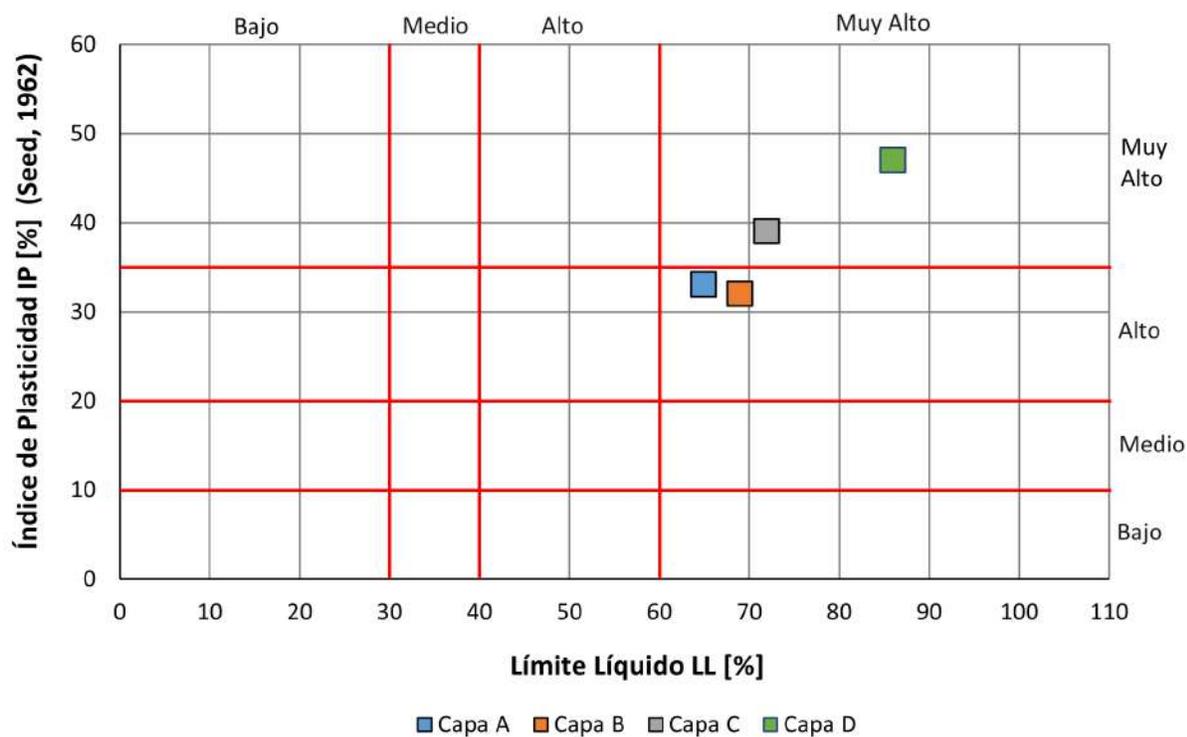
(c) Ubicación de perforaciones, Cinchona.
Herramienta computacional: Google Earth, AutoCAD.

Sistema	Esterillos		Palmares		Cinchona	
	Lambert Sur		Lambert Norte		Lambert Norte	
Perforación	X	Y	X	Y	X	Y
P1	411624.080	386685.528	488528.287	227439.616	517852.031	245843.861
P2	411615.705	386669.834	488535.427	227431.969	517852.683	245861.939
P3	411630.101	386666.608	488540.210	227442.818	517851.648	245876.636

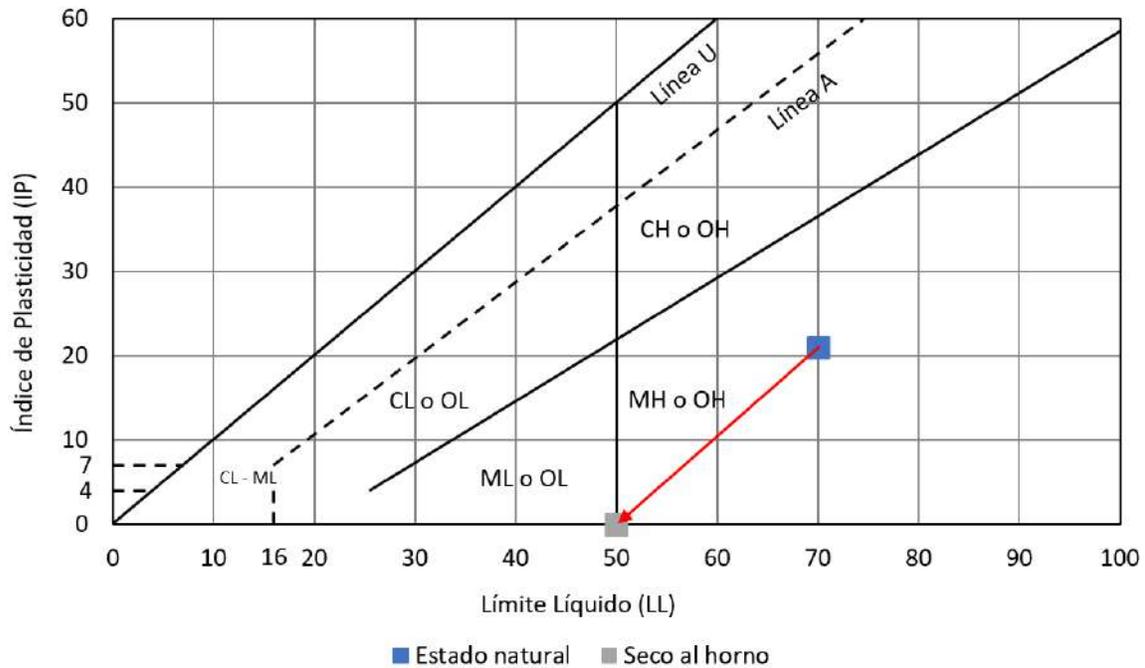
(d) Coordenadas de las perforaciones.
Herramienta computacional: SNITCR, AutoCAD.

Apéndice 3. Comprobaciones de tipos de suelo.

Los gráficos representan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados como medio de comprobación del tipo de suelo presente en los terrenos estudiados.



(a) Gráfico de potencial de expansión, Palmares.
Herramienta computacional: Excel.



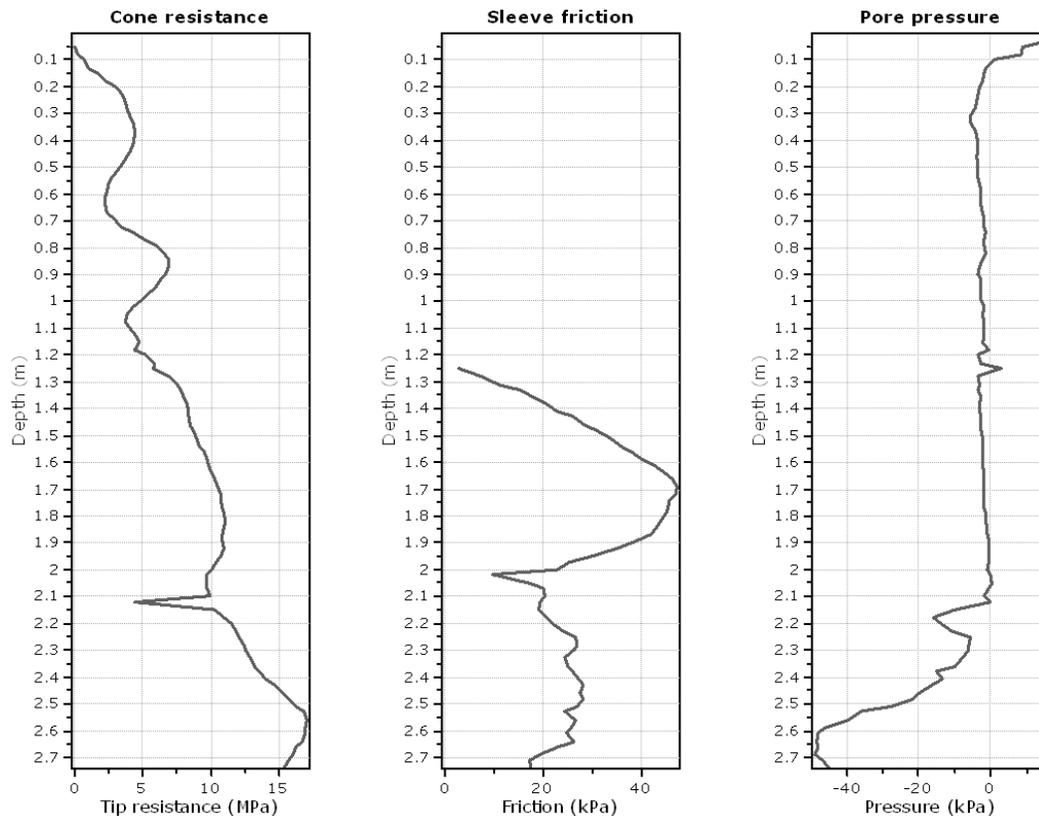
(b) Cambio de plasticidad del suelo, Cinchona.
Herramienta computacional: Excel

Los limos haloisíticos presentan características peculiares, tales como: alta relación de vacíos, alta humedad natural, alta permeabilidad y baja densidad. Una forma de detectar este tipo de suelo, es comparando el límite líquido secado en horno con el realizado con la humedad natural del material, ya que, al secarlos al horno, sus minerales sufren cambios drásticos irreversibles que provocan una caída drástica de la plasticidad (Laporte y Ramírez, 2006).

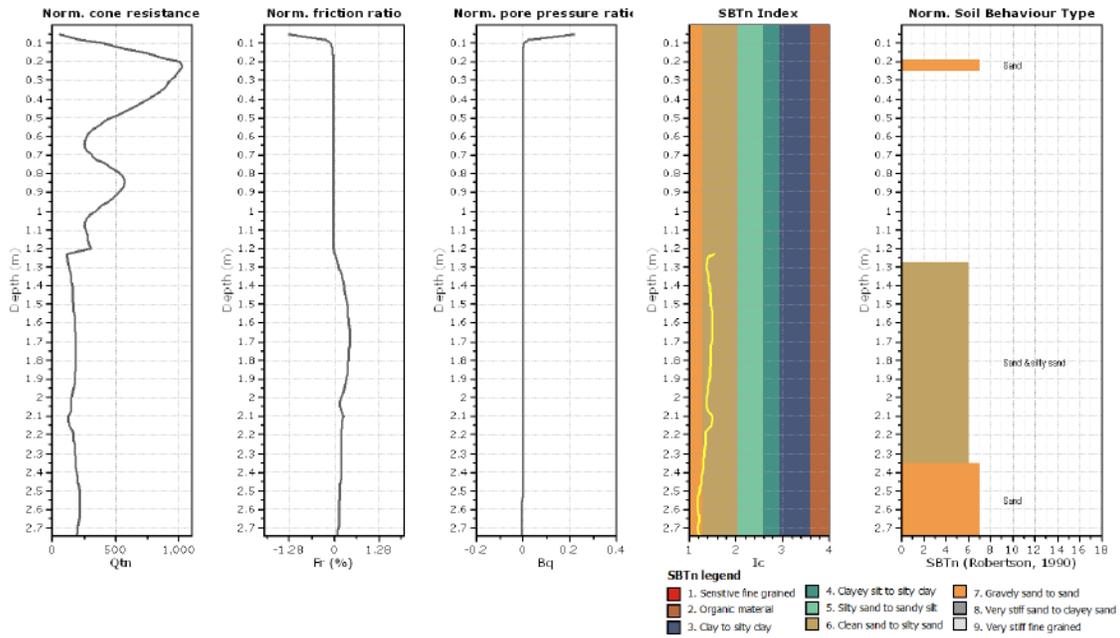
En la figura 3a se puede observar el grado de expansión potencial del suelo presente en el terreno de Palmares, clasificándose este en un rango de expansión de alto a muy alto. Adicionalmente, en la figura 3b se puede observar el cambio de plasticidad del suelo, luego de aplicar el ensayo de límites de consistencia a una muestra de suelo en estado natural y a una muestra seca al horno. Con esta comprobación se clasifica el suelo presente en el terreno de Cinchona como un limo haloisítico de baja resistencia.

Apéndice 4. Resultados del software CPeT-IT, Perforación 1 Esterillos.

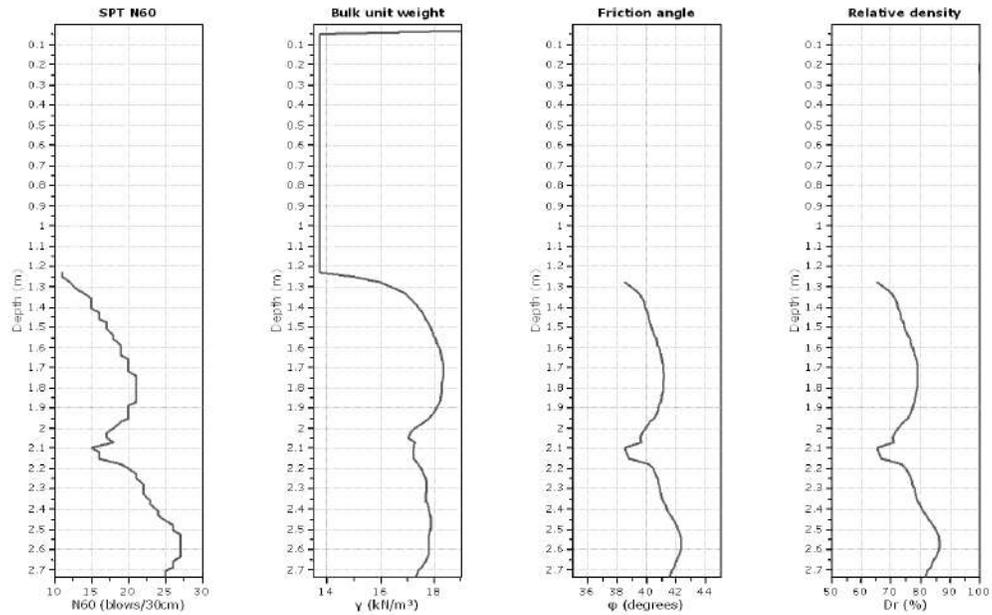
Las imágenes representan parte de los resultados del procesamiento de datos CPTu de la perforación 1 de Esterillos, por medio del software CPeT-IT.



(a) Datos iniciales obtenidos en campo.
Herramienta computacional: CPeT-IT

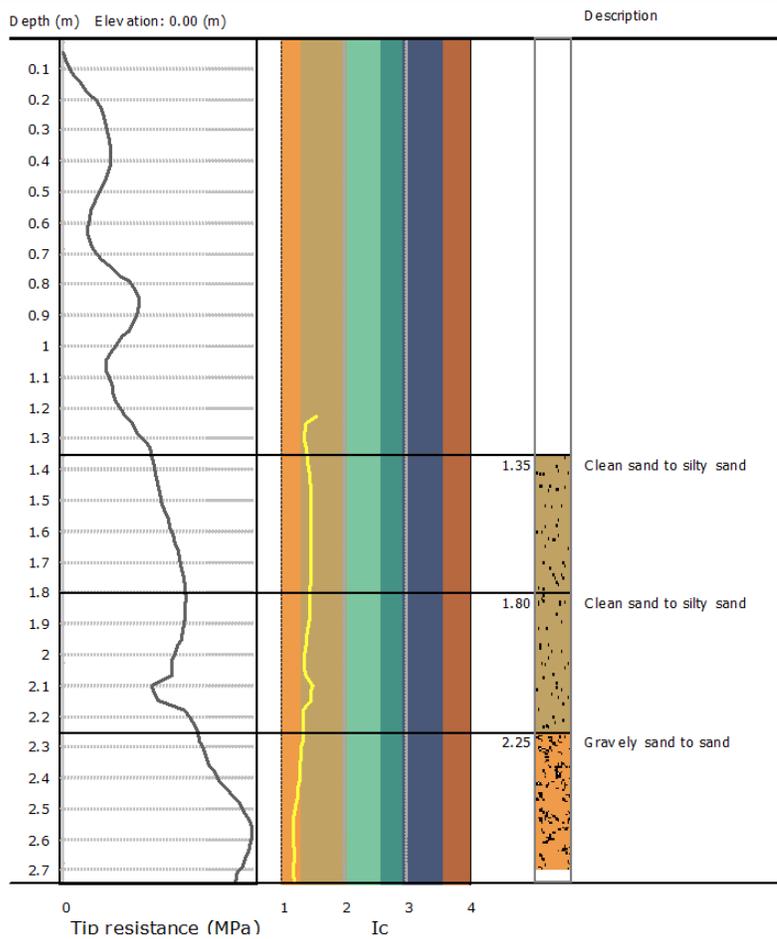


(b) Parámetros normalizados e índice de comportamiento de suelos.
 Herramienta computacional: CPeT-IT



(c) N_{60} , Peso unitario y ángulo de fricción efectivo.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Esterillos
Location: Esterillos, Parrita, Puntarenas



(d) Homologación a tramos de 45cm.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT ₆₀ (blows/30cm)	E _v (MPa)	D _v (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
1.35	0.45	3.31E-04	17.9	42.9	75.8	40.5	53.8	51.6	0.0	0.0	0.0	17.9
1.80		(±7.11E-05)	(±2.3)	(±5.8)	(±3.0)	(±0.6)	(±7.3)	(±8.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
1.80	0.45	4.94E-04	19.0	44.0	73.9	40.2	55.2	52.1	0.0	0.0	0.0	17.6
2.25		(±1.74E-04)	(±2.0)	(±4.2)	(±4.3)	(±0.8)	(±5.3)	(±6.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)
2.25	0.45	1.52E-03	24.7	51.7	82.3	41.7	64.7	61.5	0.0	0.0	0.0	17.7
2.70		(±5.43E-04)	(±2.1)	(±2.7)	(±3.4)	(±0.6)	(±3.4)	(±3.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.1)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

(e) Parámetros promedio de la homologación.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Apéndice 5. Resultados del *software* CPeT-IT, Perforación 2 Esterillos.

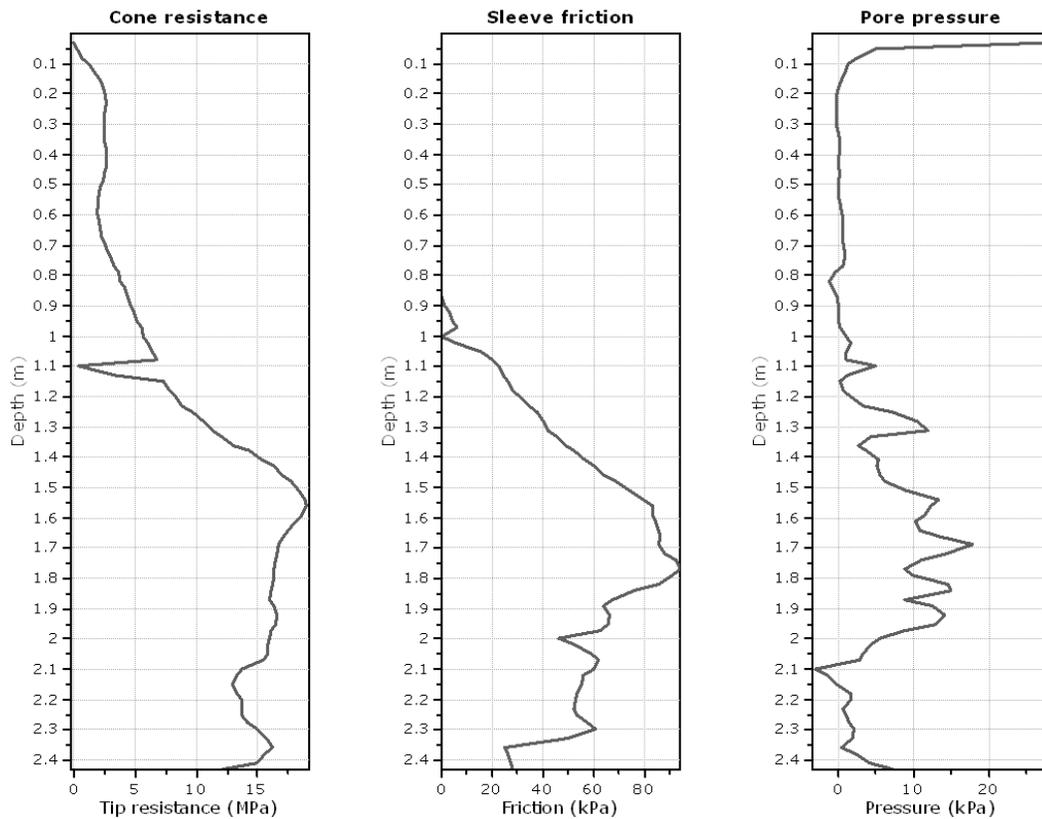
Las imágenes representan parte de los resultados del procesamiento de datos CPTu de la perforación 2 de Esterillos, por medio del *software* CPeT-IT.

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

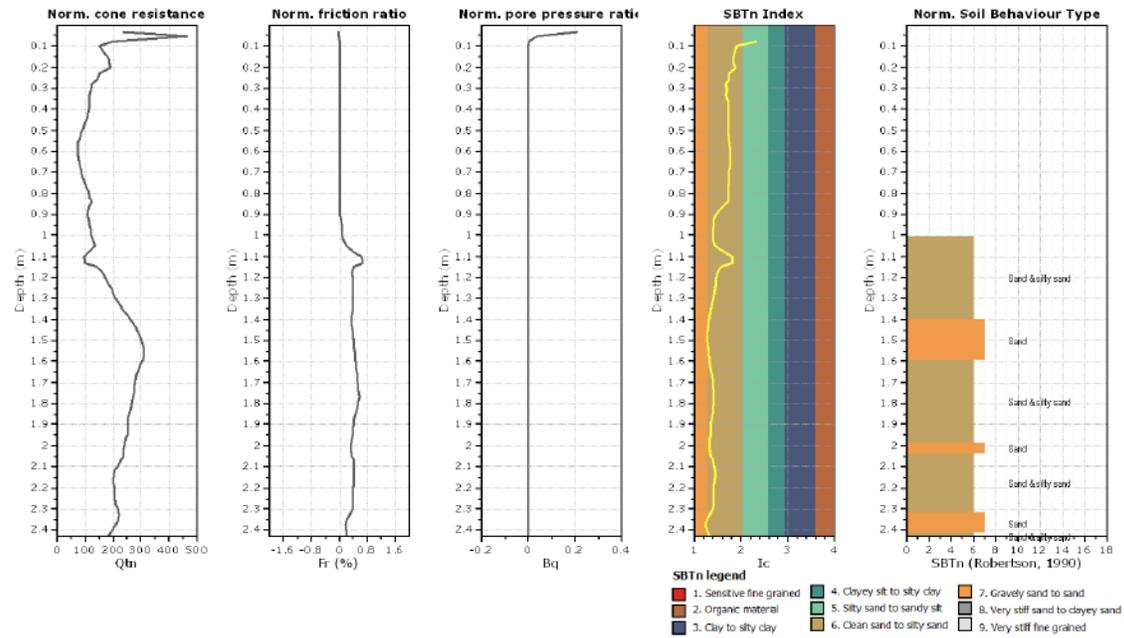
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

Project: CPTu Esterillos
Location: Esterillos, Parrita, Puntarenas

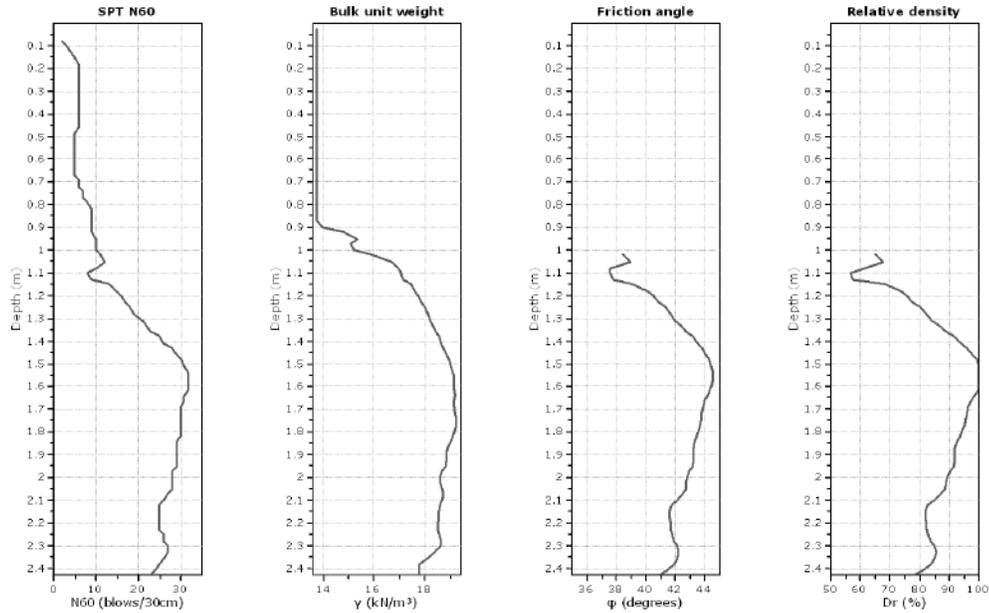
CPTu: 2
Total depth: 2.43 m
Coords: X:411615.71, Y:386669.83



(a) Datos iniciales obtenidos en campo.
Herramienta computacional: CPeT-IT

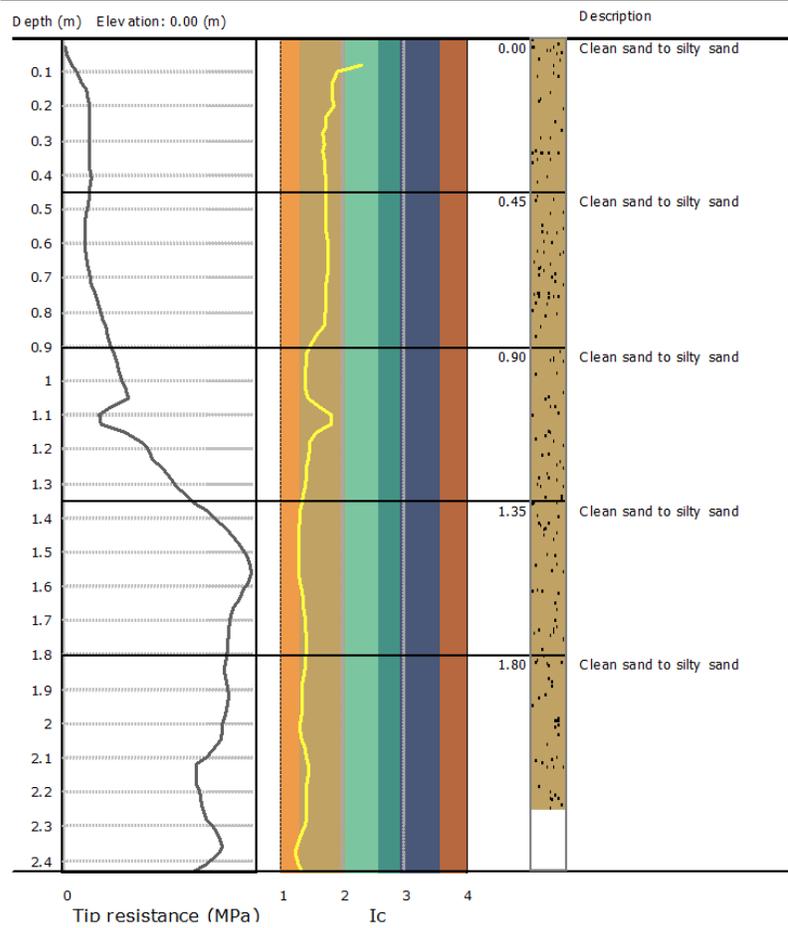


(b) Parámetros normalizados e índice de comportamiento de suelos.
 Herramienta computacional: CPeT-IT



(c) N_{60} , Peso unitario y ángulo de fricción efectivo.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Esterillos
Location: Esterillos, Parrita, Puntarenas



(d) Homologación a tramos de 45cm.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{avg} (blows/30cm)	E (MPa)	D (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G _s (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.45	0.00E+00 (±0.00E+00)	5.3 (±1.3)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	16.9 (±7.1)	12.5 (±5.2)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	13.7 (±0.0)
0.45	0.45	0.00E+00 (±0.00E+00)	6.4 (±1.6)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	22.3 (±5.2)	16.4 (±3.9)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	13.7 (±0.1)
0.90	0.45	3.15E-04 (±1.95E-04)	13.3 (±4.5)	35.6 (±9.0)	72.0 (±10.1)	39.9 (±1.7)	40.0 (±12.1)	36.6 (±13.6)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	16.8 (±1.4)
1.35	0.45	7.75E-04 (±2.43E-04)	29.2 (±3.0)	65.2 (±7.0)	96.2 (±3.8)	43.9 (±0.6)	81.7 (±8.8)	83.2 (±10.1)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	19.0 (±0.3)
1.80	0.45	5.79E-04 (±1.66E-04)	27.4 (±1.8)	62.4 (±3.6)	88.0 (±4.5)	42.6 (±0.7)	78.2 (±4.5)	78.6 (±5.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	18.8 (±0.2)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

(e) Parámetros promedio de la homologación.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

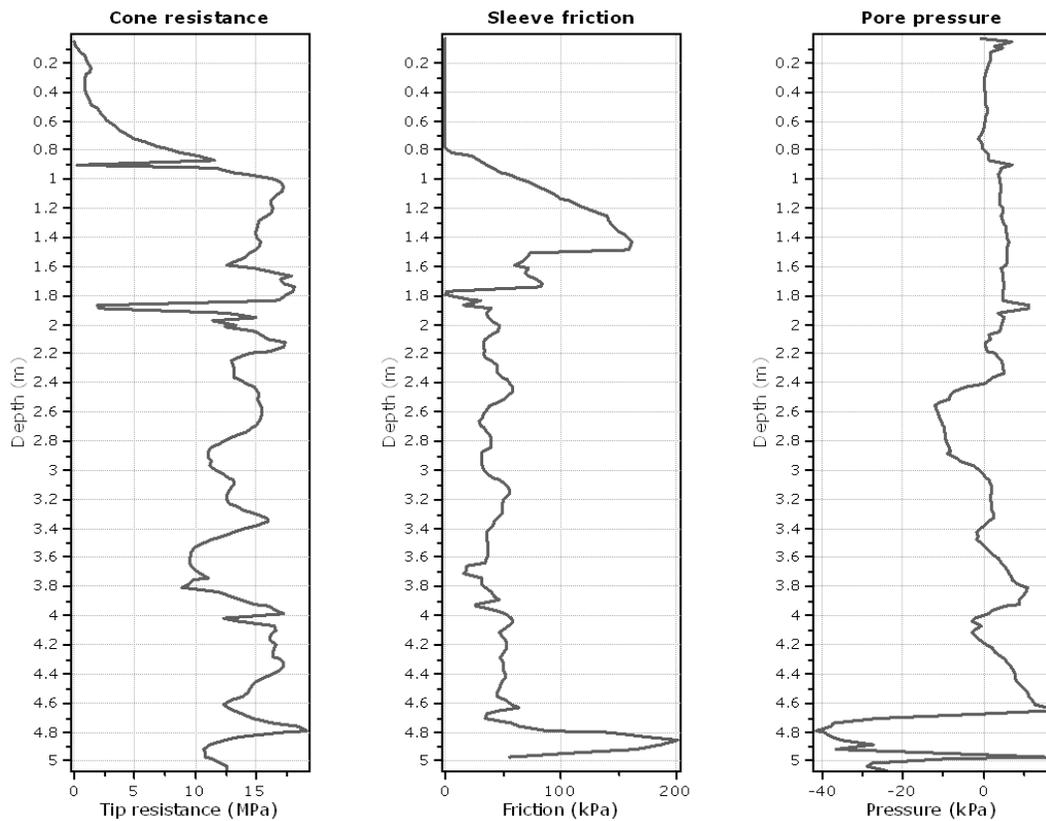
Apéndice 6. Resultados del software CPeT-IT, Perforación 3 Esterillos.

Las imágenes representan parte de los resultados del procesamiento de datos CPTu de la perforación 3 de Esterillos, por medio del software CPeT-IT.

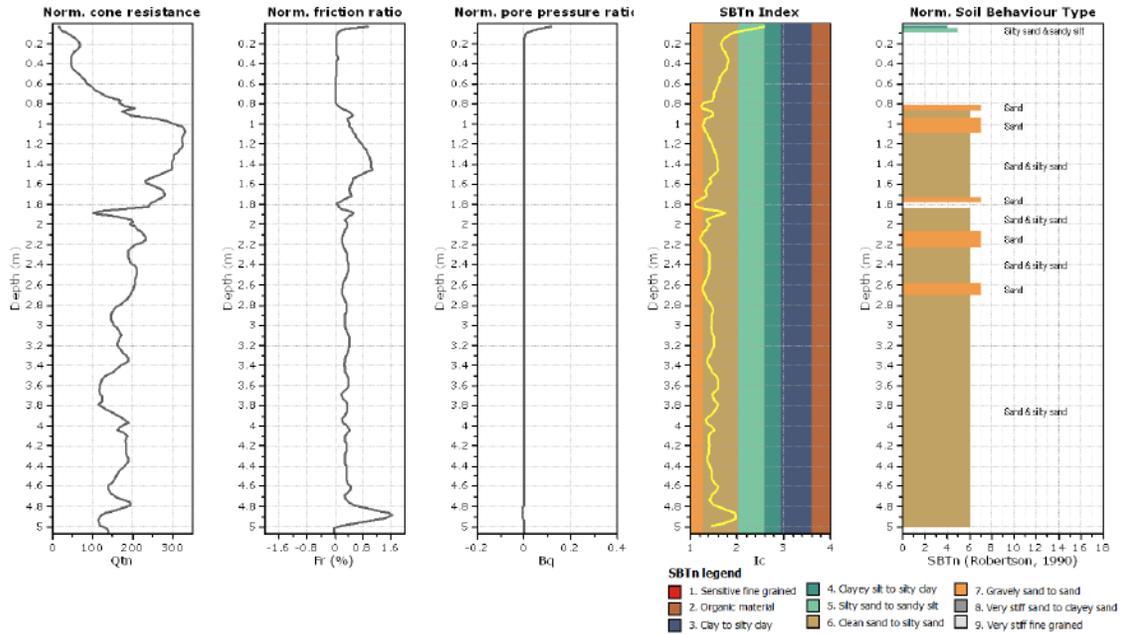
TEC | Tecnológico de Costa Rica
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

Project: CPTu Esterillos
Location: Esterillos, Parrita, Puntarenas

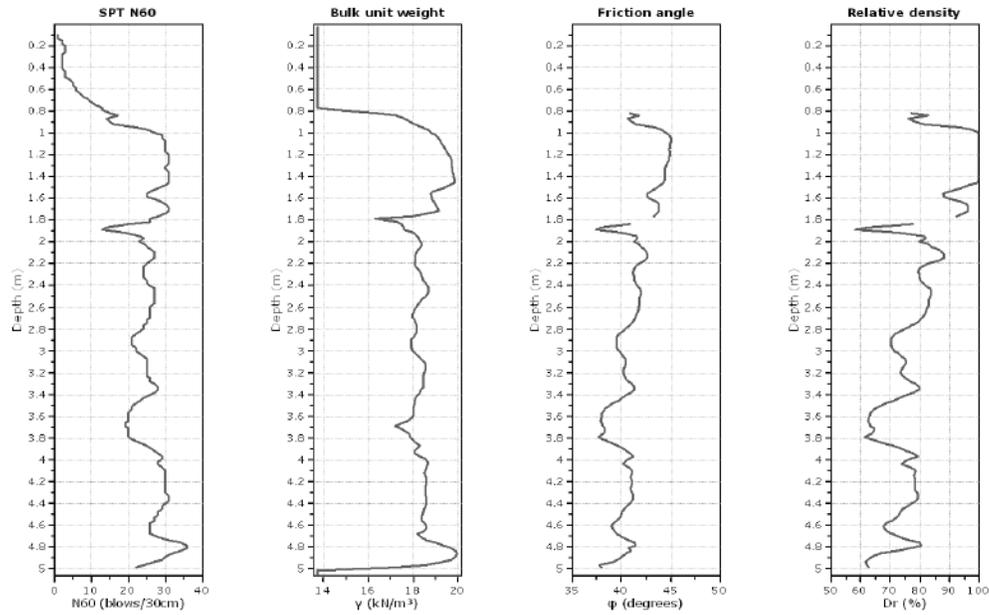
CPTu: 3
Total depth: 5.07 m
Coords: X:411630.10, Y:386666.61



(a) Datos iniciales obtenidos en campo.
Herramienta computacional: CPeT-IT

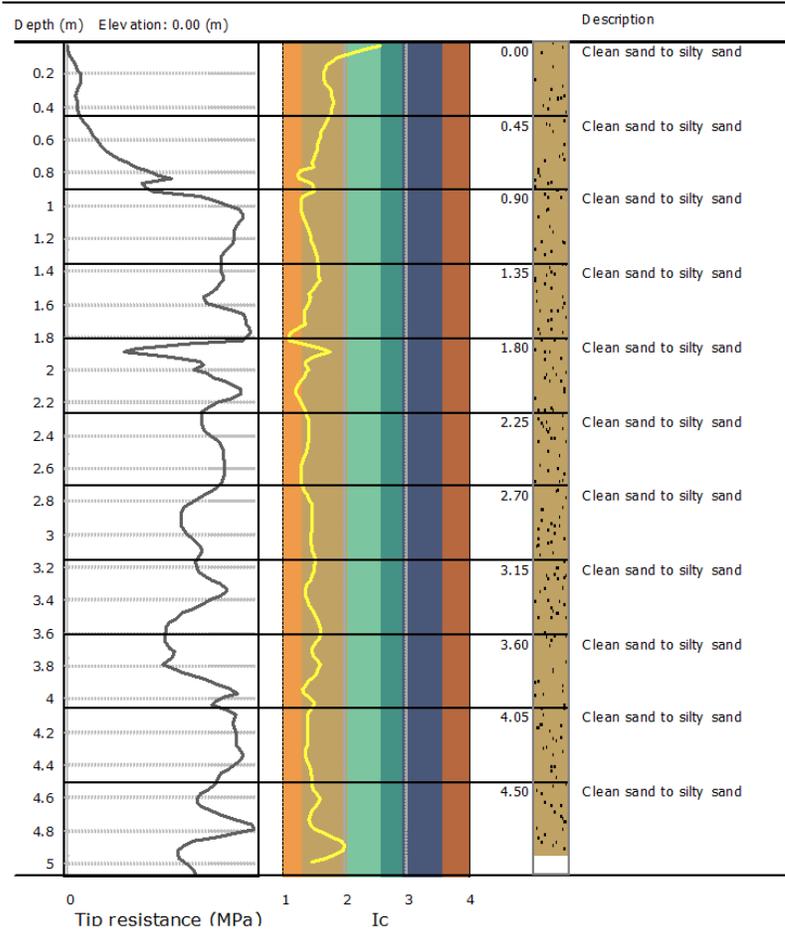


(b) Parámetros normalizados e índice de comportamiento de suelos.
 Herramienta computacional: CPeT-IT



(c) N_{60} , Peso unitario y ángulo de fricción efectivo.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Esterillos
Location: Esterillos, Parrita, Puntarenas



(d) Homologación a tramos de 45cm.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Summary table of mean values

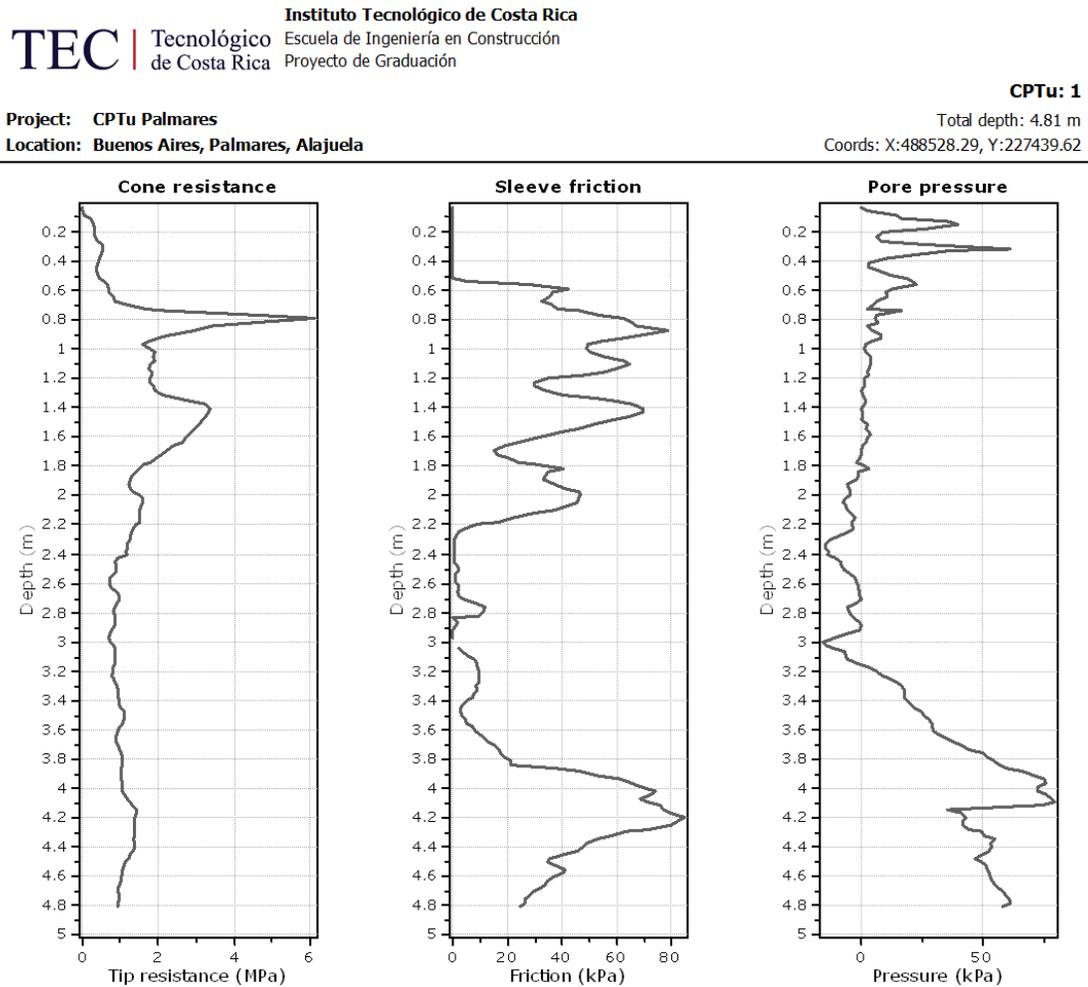
From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT ₁₀₀ (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _v (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₅₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.45	1.62E-06	2.1	1.0	26.8	32.0	6.6	4.8	0.0	0.0	0.0	13.7
0.45	0.45	(±2.11E-06)	(+0.7)	(+0.6)	(±3.3)	(+0.0)	(±3.2)	(±2.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(+0.0)
0.45	0.45	8.58E-04	8.8	0.0	0.0	0.0	26.4	21.2	0.0	0.0	0.0	14.5
0.90	0.45	(±6.70E-04)	(±4.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±12.3)	(±11.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.5)
0.90	0.45	5.44E-04	27.6	64.7	97.2	44.3	81.1	83.6	0.0	0.0	0.0	19.2
1.35	0.45	(±3.48E-04)	(±5.0)	(±12.7)	(±6.6)	(±1.2)	(±15.9)	(±18.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)
1.35	0.45	5.63E-04	29.0	69.7	95.3	43.7	86.1	88.3	0.0	0.0	0.0	19.1
1.80	0.45	(±6.94E-04)	(±2.2)	(±9.0)	(±4.2)	(±0.6)	(±12.3)	(±15.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.9)
1.80	0.45	8.37E-04	23.3	51.8	80.1	41.3	64.7	62.2	0.0	0.0	0.0	17.9
2.25	0.45	(±5.34E-04)	(±4.1)	(±6.9)	(±8.4)	(±1.5)	(±7.6)	(±8.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
2.25	0.45	6.82E-04	25.8	58.3	81.7	41.6	73.1	71.8	0.0	0.0	0.0	18.4
2.70	0.45	(±2.77E-04)	(±1.2)	(±3.0)	(±1.6)	(±0.3)	(±3.8)	(±4.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.2)
2.70	0.45	4.04E-04	23.4	55.4	74.0	40.2	69.4	67.4	0.0	0.0	0.0	18.1
3.15	0.45	(±2.22E-04)	(±1.7)	(±3.6)	(±3.4)	(±0.6)	(±4.5)	(±5.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.2)
3.15	0.45	3.25E-04	24.4	58.8	72.8	39.9	73.7	72.2	0.0	0.0	0.0	18.3
3.60	0.45	(±1.68E-04)	(±2.6)	(±3.9)	(±5.5)	(±1.1)	(±4.9)	(±5.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.2)
3.60	0.45	3.03E-04	23.3	56.3	68.5	39.1	70.6	68.2	0.0	0.0	0.0	18.0
4.05	0.45	(±2.14E-04)	(±3.9)	(±7.1)	(±6.3)	(±1.2)	(±8.9)	(±10.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)
4.05	0.45	4.64E-04	29.8	68.9	77.5	40.8	86.4	85.9	0.0	0.0	0.0	18.6
4.50	0.45	(±9.78E-05)	(±0.9)	(±0.9)	(±1.9)	(±0.3)	(±1.2)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)
4.50	0.45	1.94E-04	29.3	77.9	70.9	40.0	97.6	99.6	0.0	0.0	0.0	18.9
4.95	0.45	(±1.44E-04)	(±3.5)	(±14.9)	(±5.3)	(±0.8)	(±18.7)	(±22.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

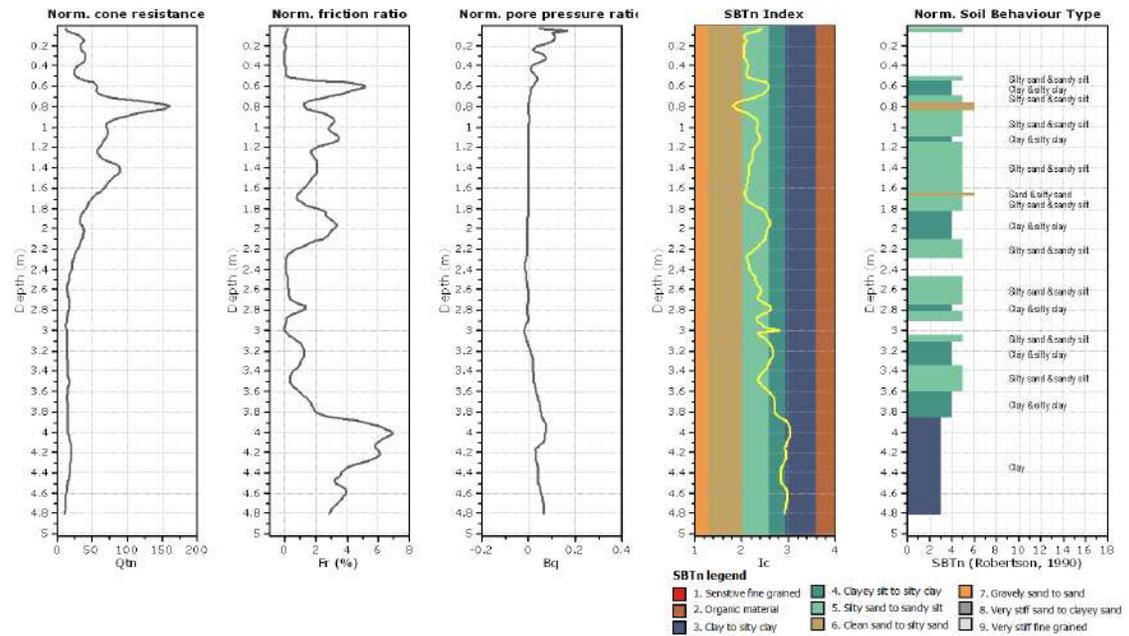
(e) Parámetros promedio de la homologación.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Apéndice 7. Resultados del *software* CPeT-IT, Perforación 1 Palmares.

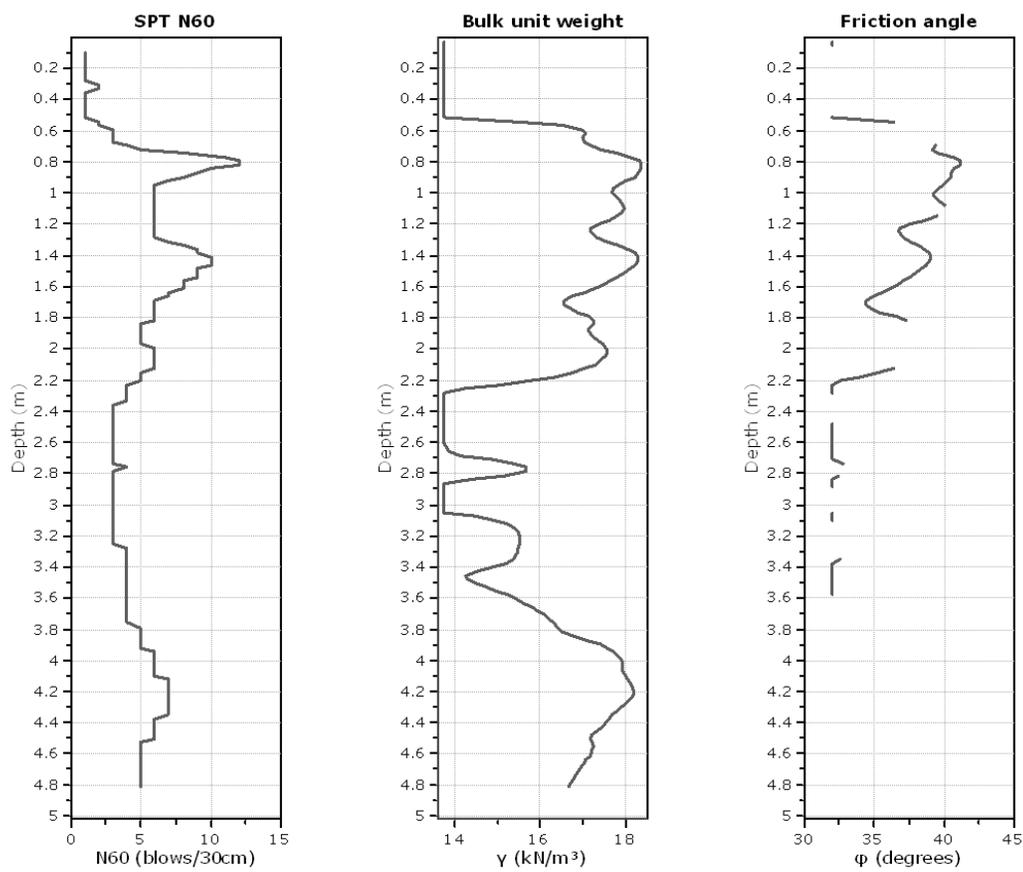
Las imágenes representan parte de los resultados del procesamiento de datos CPTu de la perforación 1 de Palmares, por medio del *software* CPeT-IT.



(a) Datos iniciales obtenidos en campo.
Herramienta computacional: CPeT-IT

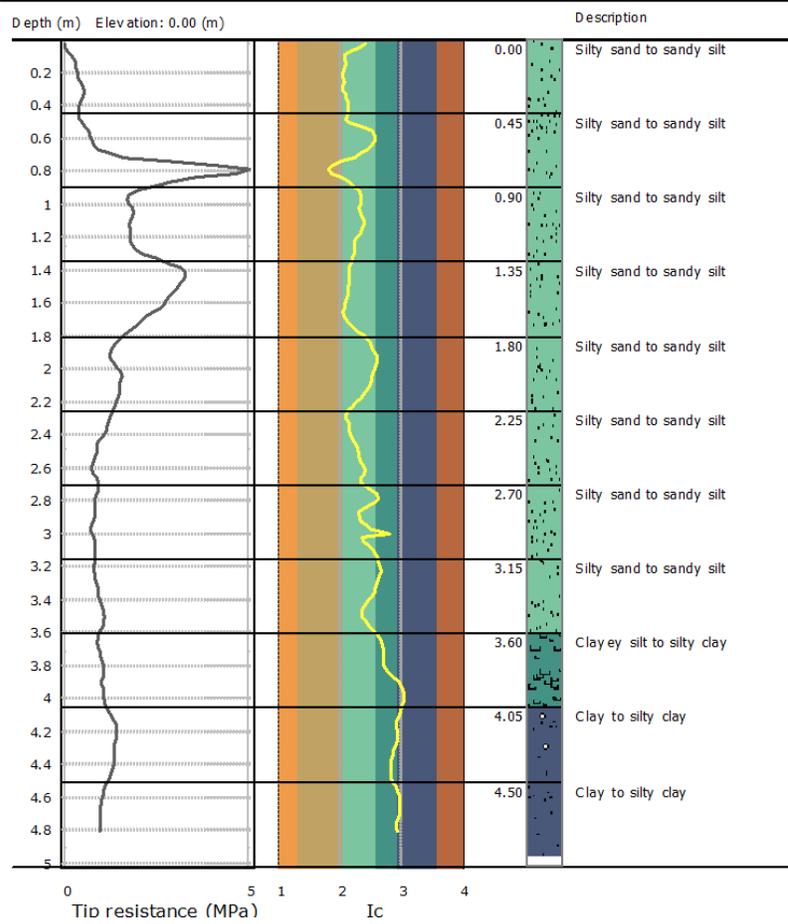


(b) Parámetros normalizados e índice de comportamiento de suelos.
 Herramienta computacional: CPeT-IT



(c) N_{60} , Peso unitario y ángulo de fricción efectivo.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Palmares
Location: Buenos Aires, Palmares, Alajuela



(d) Homologación a tramos de 45cm.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E (MPa)	D _v (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G _s (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.45	5.09E-07	1.1	0.0	0.0	0.0	4.3	3.2	0.0	0.0	0.0	13.7
0.45		(±1.57E-07)	(±0.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.1)	(±1.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)
0.45	0.45	5.55E-06	5.2	25.1	57.1	39.2	21.2	22.1	0.0	0.0	0.0	16.7
0.90		(±8.63E-06)	(±4.0)	(±10.9)	(±13.9)	(±2.7)	(±15.4)	(±14.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.7)
0.90	0.45	9.23E-07	6.3	25.3	48.1	38.8	26.7	30.3	0.0	0.0	0.0	17.7
1.35		(±3.83E-07)	(±0.7)	(±2.1)	(±3.5)	(±1.3)	(±3.0)	(±2.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.3)
1.35	0.45	2.75E-06	7.9	29.1	47.2	36.9	35.7	34.4	0.0	0.0	0.0	17.5
1.80		(±1.14E-06)	(±1.5)	(±5.4)	(±6.0)	(±1.7)	(±7.6)	(±7.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)
1.80	0.45	5.14E-07	5.3	0.0	0.0	0.0	19.8	26.4	99.4	2.5	11.7	16.9
2.25		(±7.08E-07)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.6)	(±5.4)	(±8.8)	(±0.1)	(±0.6)	(±0.9)
2.25	0.45	1.13E-06	3.2	11.7	23.8	32.0	13.2	10.9	0.0	0.0	0.0	13.8
2.70		(±1.04E-06)	(±0.4)	(±1.1)	(±2.5)	(±0.0)	(±2.4)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.1)
2.70	0.45	3.31E-07	3.1	13.2	22.7	32.1	11.1	13.2	0.0	0.0	0.0	14.5
3.15		(±2.55E-07)	(±0.2)	(±1.5)	(±1.0)	(±0.3)	(±1.1)	(±2.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.8)
3.15	0.45	2.39E-07	3.7	15.6	23.0	32.1	12.6	16.1	0.0	0.0	0.0	15.1
3.60		(±1.88E-07)	(±0.5)	(±0.8)	(±0.4)	(±0.2)	(±1.4)	(±1.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
3.60	0.45	4.37E-08	4.8	0.0	0.0	0.0	13.6	29.1	69.2	1.1	5.1	16.7
4.05		(±4.68E-08)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.8)	(±9.4)	(±4.4)	(±0.1)	(±0.3)	(±0.9)
4.05	0.45	1.36E-08	6.6	0.0	0.0	0.0	17.9	44.1	91.4	1.3	6.2	17.9
4.50		(±5.52E-09)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.2)	(±4.4)	(±6.0)	(±0.1)	(±0.4)	(±0.3)
4.50	0.45	1.09E-08	5.2	0.0	0.0	0.0	12.5	33.0	69.6	0.9	4.3	17.0
4.95		(±3.66E-09)	(±0.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.1)	(±2.1)	(±6.2)	(±0.1)	(±0.5)	(±0.2)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

**(e) Parámetros promedio de la homologación.
 Herramienta computacional: CPeT-IT**

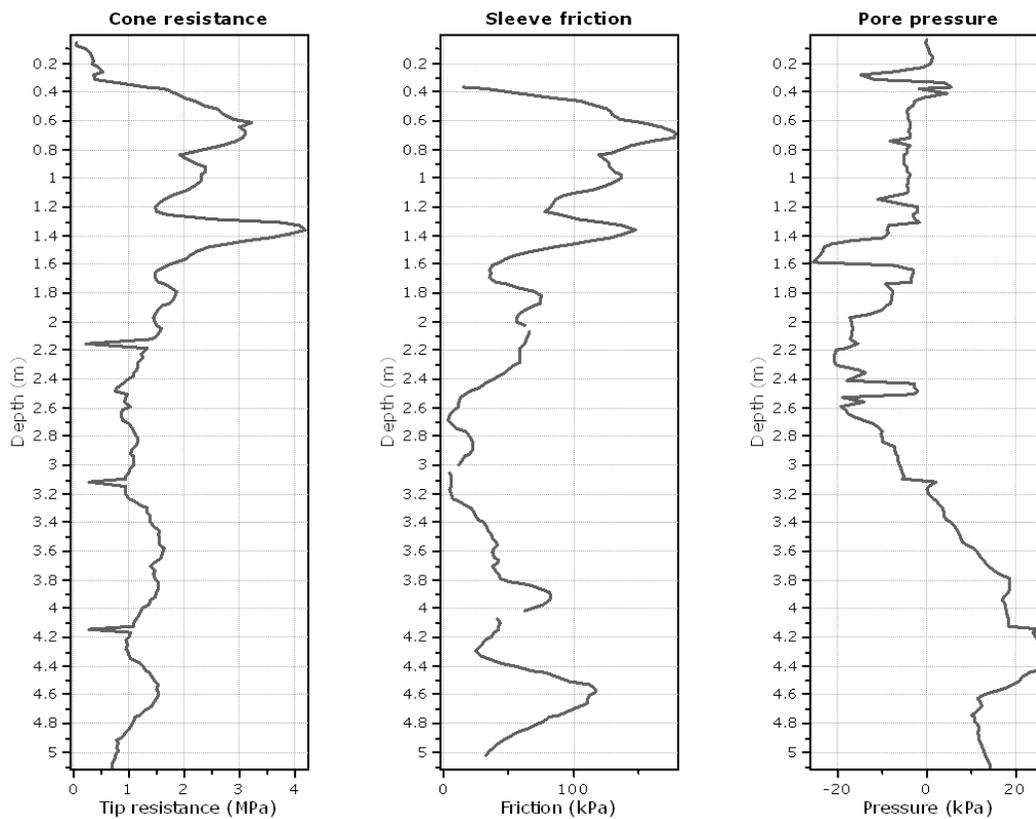
Apéndice 8. Resultados del software CPeT-IT, Perforación 2 Palmares.

Las imágenes representan parte de los resultados del procesamiento de datos CPTu de la perforación 2 de Palmares, por medio del software CPeT-IT.

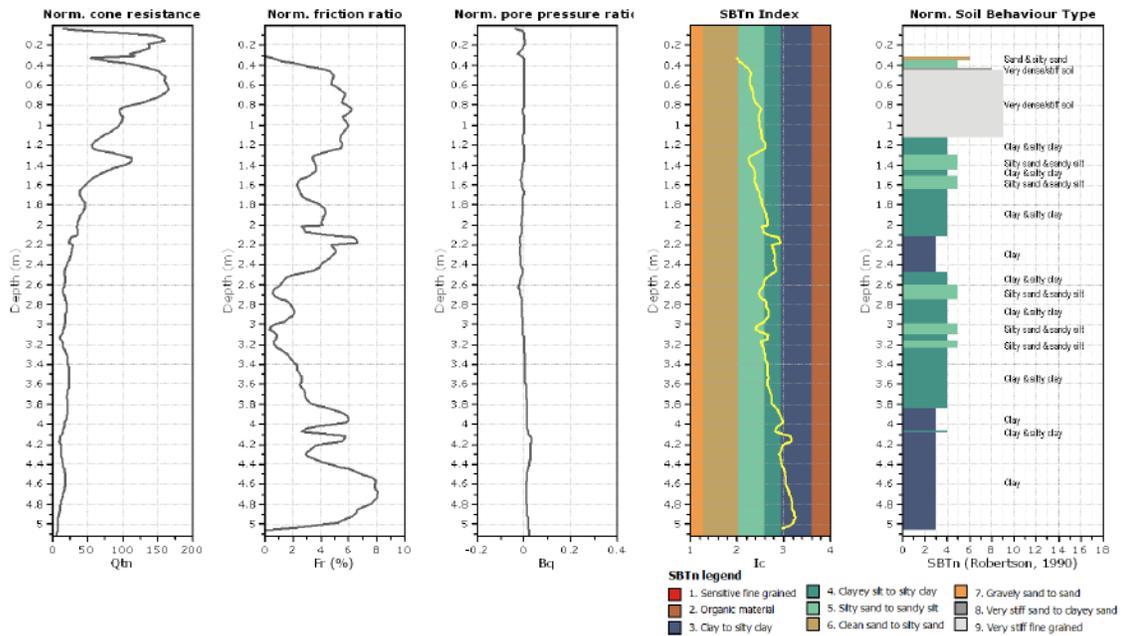
TEC | Tecnológico de Costa Rica
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

Project: CPTu Palmares
Location: Buenos Aires, Palmares, Alajuela

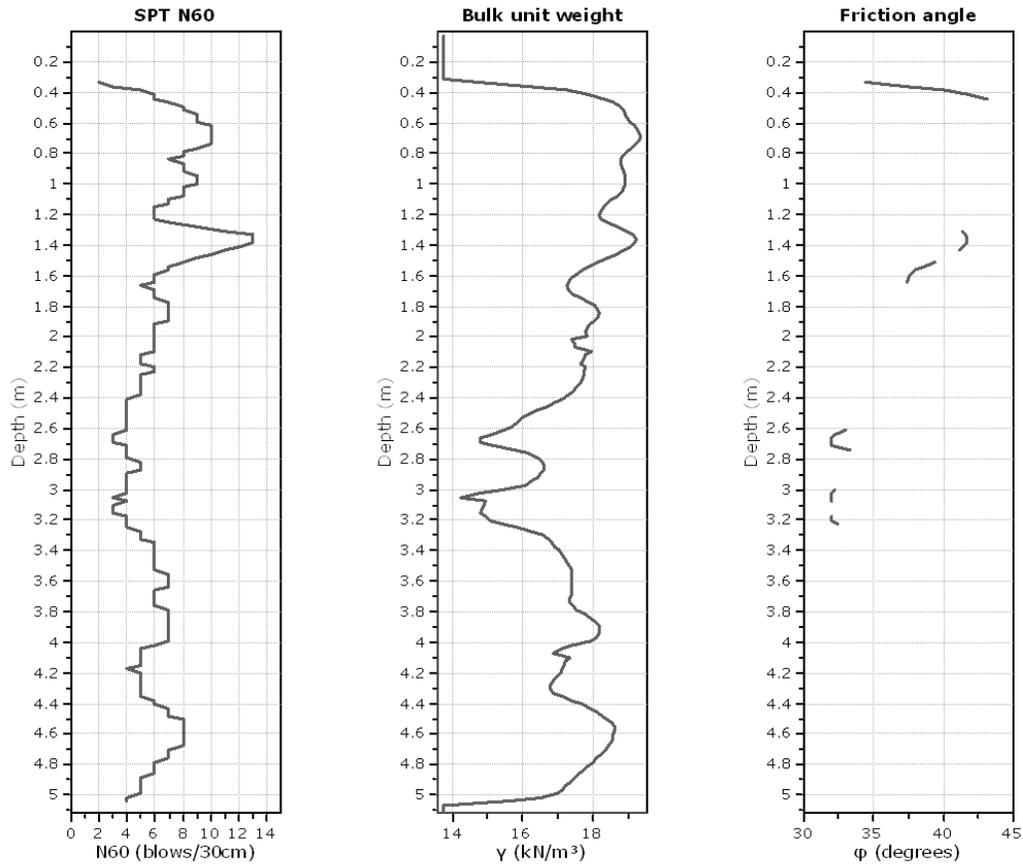
CPTu: 2
Total depth: 5.12 m
Coords: X:488535.43, Y:227431.97



(a) Datos iniciales obtenidos en campo.
Herramienta computacional: CPeT-IT

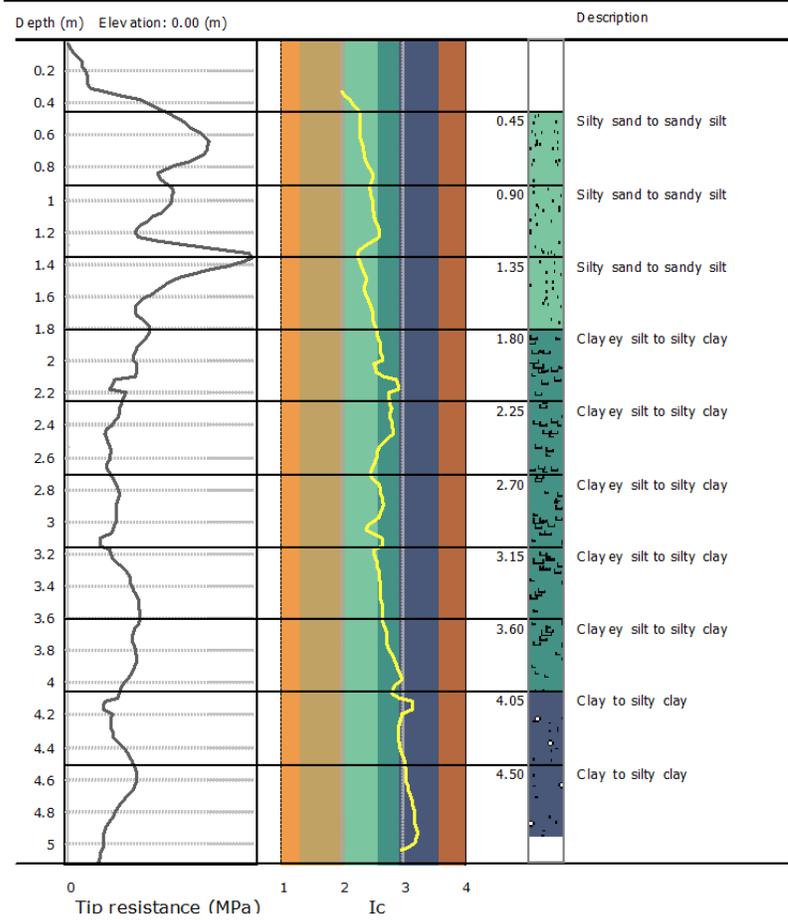


(b) Parámetros normalizados e índice de comportamiento de suelos.
 Herramienta computacional: CPeT-IT



(c) N_{60} , Peso unitario y ángulo de fricción efectivo.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Palmares
Location: Buenos Aires, Palmares, Alajuela



(d) Homologación a tramos de 45cm.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT ₆₀ (blows/30cm)	E _v (MPa)	D _v (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₅₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.45	0.45	7.05E-07	8.6	0.0	0.0	0.0	36.0	46.5	186.2	10.0	46.4	19.0
0.90		(±3.29E-07)	(±1.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.7)	(±7.1)	(±28.1)	(±1.9)	(±8.8)	(±0.3)
0.90	0.45	3.15E-07	8.1	0.0	0.0	0.0	30.8	45.1	143.7	5.7	26.2	18.7
1.35		(±3.03E-07)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±9.0)	(±7.5)	(±25.1)	(±1.2)	(±5.4)	(±0.3)
1.35	0.45	5.30E-07	8.3	37.3	49.2	39.6	32.8	42.1	0.0	0.0	0.0	18.1
1.80		(±3.38E-07)	(±2.8)	(±10.9)	(±9.8)	(±1.9)	(±12.9)	(±13.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.7)
1.80	0.45	8.64E-08	6.1	0.0	0.0	0.0	19.8	35.5	100.9	2.5	11.6	17.8
2.25		(±5.47E-08)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.8)	(±3.2)	(±19.3)	(±0.5)	(±2.4)	(±0.2)
2.25	0.45	8.54E-08	4.2	0.0	0.0	0.0	13.1	23.5	68.6	1.5	7.0	16.5
2.70		(±8.42E-08)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.8)	(±7.2)	(±9.6)	(±0.3)	(±1.3)	(±1.0)
2.70	0.45	1.61E-07	3.9	0.0	0.0	0.0	13.0	19.0	67.7	1.2	5.7	15.6
3.15		(±1.21E-07)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.5)	(±4.4)	(±12.1)	(±0.2)	(±1.2)	(±0.8)
3.15	0.45	1.06E-07	5.3	0.0	0.0	0.0	17.4	27.9	94.2	1.5	7.0	16.5
3.60		(±3.81E-08)	(±1.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.9)	(±8.1)	(±16.6)	(±0.2)	(±1.1)	(±0.9)
3.60	0.45	3.42E-08	6.6	0.0	0.0	0.0	19.4	41.3	98.9	1.5	6.8	17.7
4.05		(±2.35E-08)	(±0.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.7)	(±5.7)	(±8.6)	(±0.2)	(±0.7)	(±0.4)
4.05	0.45	9.64E-09	5.4	0.0	0.0	0.0	13.0	36.0	71.4	1.0	4.5	17.3
4.50		(±5.69E-09)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.6)	(±7.4)	(±13.3)	(±0.2)	(±0.8)	(±0.5)
4.50	0.45	3.15E-09	6.9	0.0	0.0	0.0	14.9	52.3	82.5	1.0	4.7	18.1
4.95		(±1.54E-09)	(±1.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.3)	(±9.2)	(±19.2)	(±0.3)	(±1.2)	(±0.5)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

(e) Parámetros promedio de la homologación.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Apéndice 9. Resultados del *software* CPeT-IT, Perforación 3 Palmares.

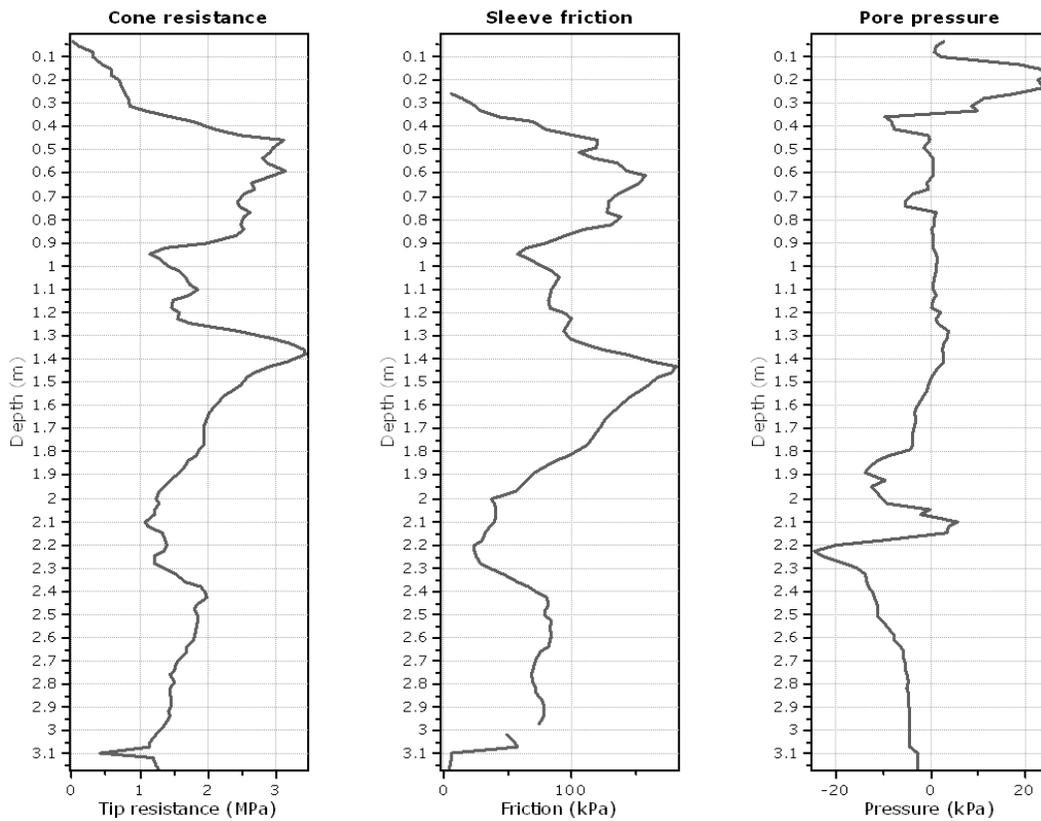
Las imágenes representan parte de los resultados del procesamiento de datos CPTu de la perforación 3 de Palmares, por medio del *software* CPeT-IT.

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

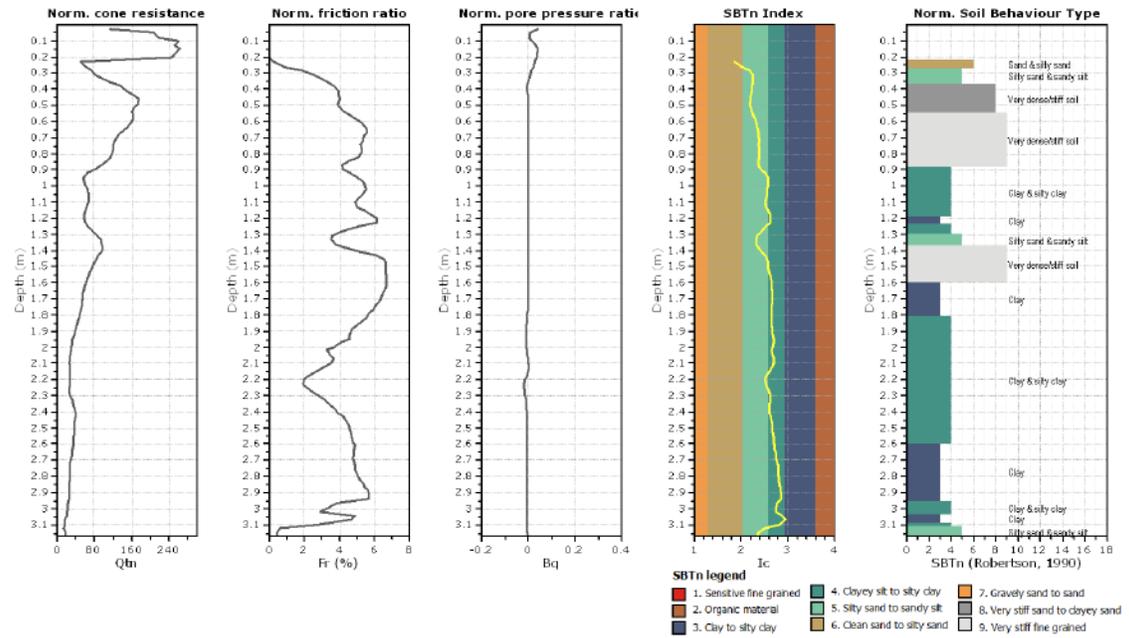
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

Project: CPTu Palmares
Location: Buenos Aires, Palmares, Alajuela

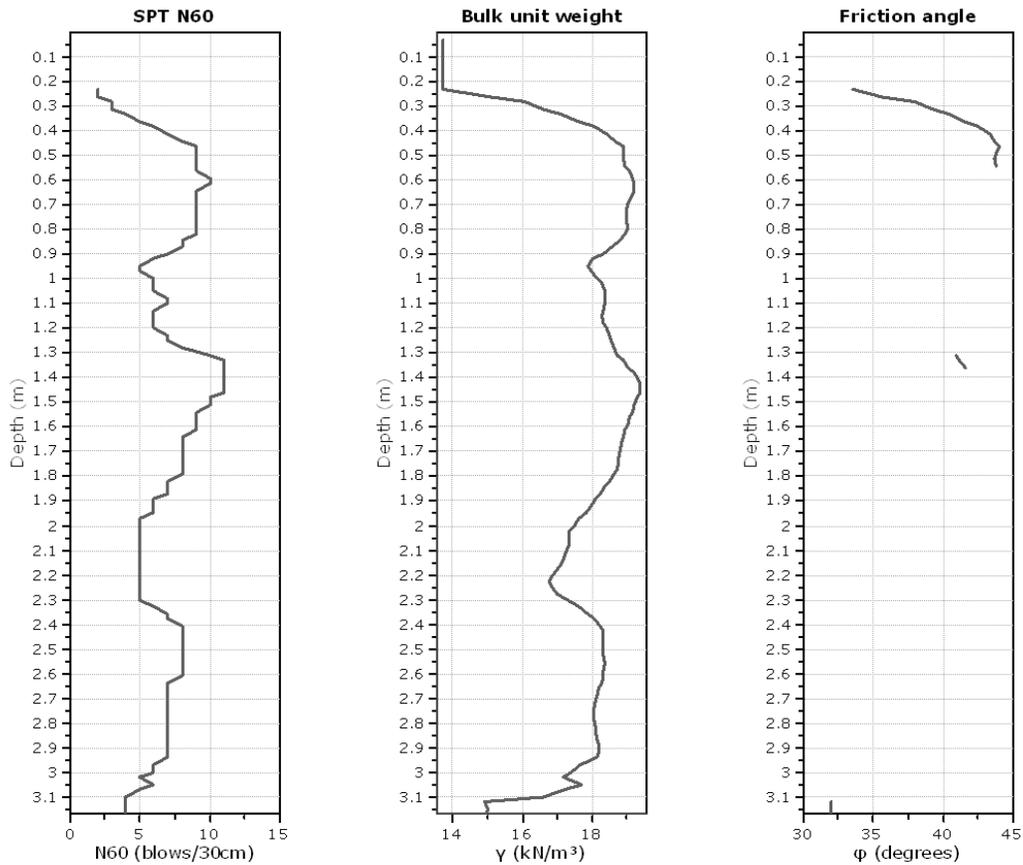
CPTu: 3
Total depth: 3.17 m
Coords: X:488540.21, Y:227442.82



(a) Datos iniciales obtenidos en campo.
Herramienta computacional: CPeT-IT

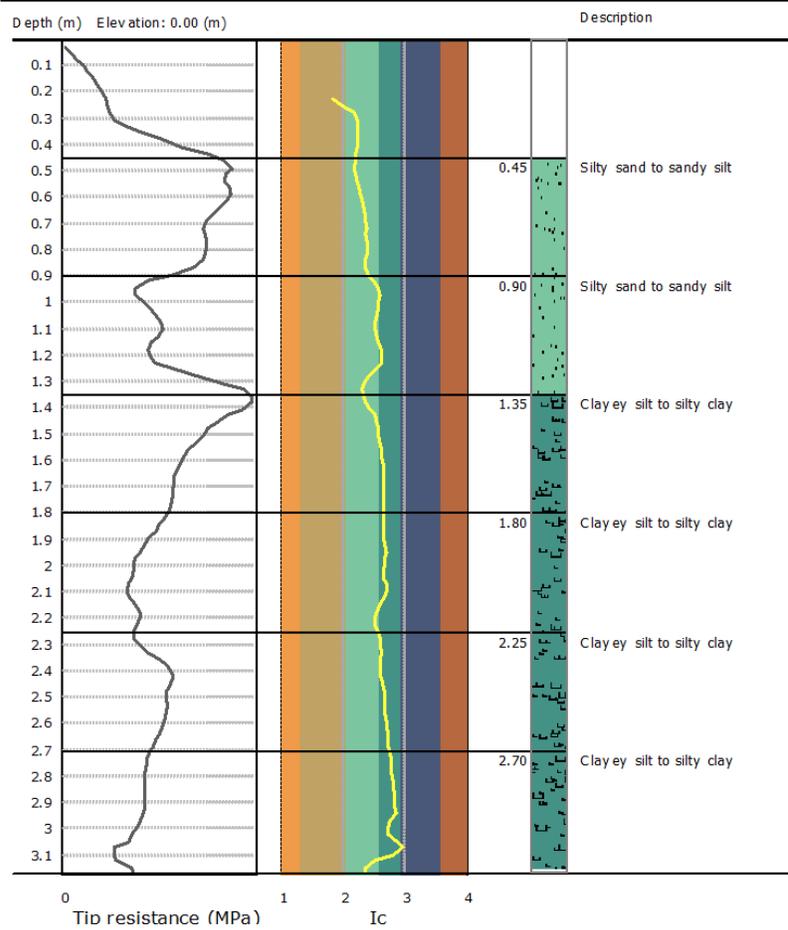


(b) Parámetros normalizados e índice de comportamiento de suelos.
 Herramienta computacional: CPeT-IT



(c) N_{60} , Peso unitario y ángulo de fricción efectivo.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Palmares
Location: Buenos Aires, Palmares, Alajuela



(d) Homologación a tramos de 45cm.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{avg} (blows/30cm)	E (MPa)	D (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G _s (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.45	0.45	9.14E-07	8.8	0.0	0.0	0.0	36.9	45.1	182.6	9.1	42.0	18.9
0.90		(±5.49E-07)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.0)	(±4.1)	(±19.6)	(±1.8)	(±8.2)	(±0.2)
0.90	0.45	2.35E-07	6.8	0.0	0.0	0.0	24.8	37.7	115.7	4.6	21.2	18.3
1.35		(±2.00E-07)	(±1.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.2)	(±6.7)	(±19.1)	(±0.5)	(±2.2)	(±0.3)
1.35	0.45	2.02E-07	9.4	0.0	0.0	0.0	33.5	56.0	164.1	4.9	22.4	19.0
1.80		(±2.27E-07)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.4)	(±5.7)	(±33.1)	(±1.1)	(±5.2)	(±0.2)
1.80	0.45	9.07E-08	5.6	0.0	0.0	0.0	19.0	32.8	96.8	2.4	11.0	17.6
2.25		(±4.59E-08)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.1)	(±7.2)	(±15.9)	(±0.5)	(±2.5)	(±0.6)
2.25	0.45	7.81E-08	7.1	0.0	0.0	0.0	23.1	41.8	117.8	2.4	11.2	18.0
2.70		(±2.88E-08)	(±1.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.0)	(±7.4)	(±15.3)	(±0.3)	(±1.3)	(±0.5)
2.70	0.45	6.30E-08	6.2	0.0	0.0	0.0	17.9	37.0	93.3	1.7	8.1	17.5
3.15		(±1.23E-07)	(±1.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.0)	(±9.3)	(±14.2)	(±0.3)	(±1.5)	(±1.0)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

(e) Parámetros promedio de la homologación.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

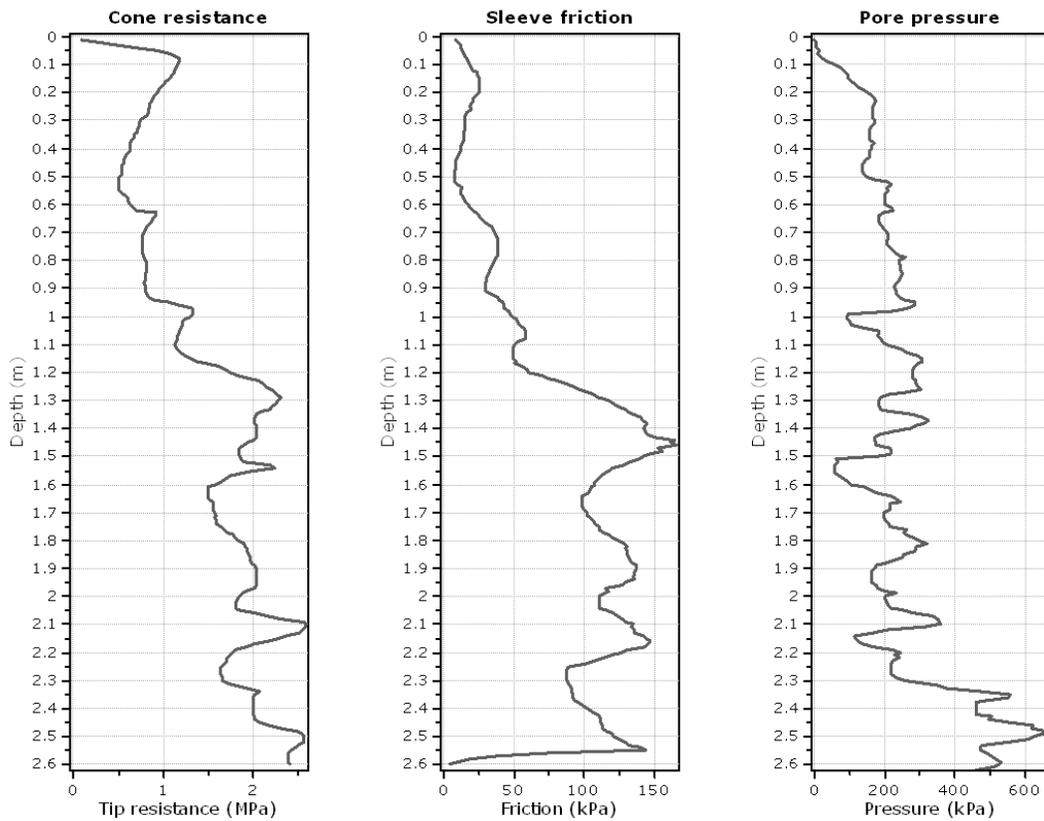
Apéndice 10. Resultados del software CPeT-IT, Perforación 1 Cinchona.

Las imágenes representan parte de los resultados del procesamiento de datos CPTu de la perforación 1 de Cinchona, por medio del software CPeT-IT.

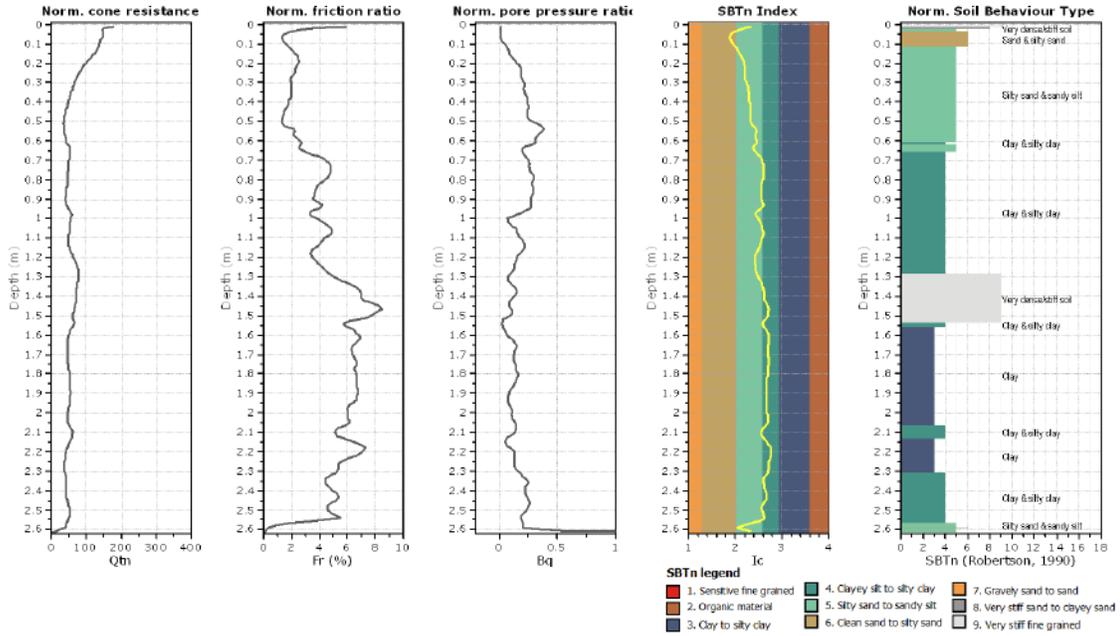
TEC | Tecnológico de Costa Rica
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

Project: CPTu Cinchona
Location: Cinchona, Alajuela, Alajuela

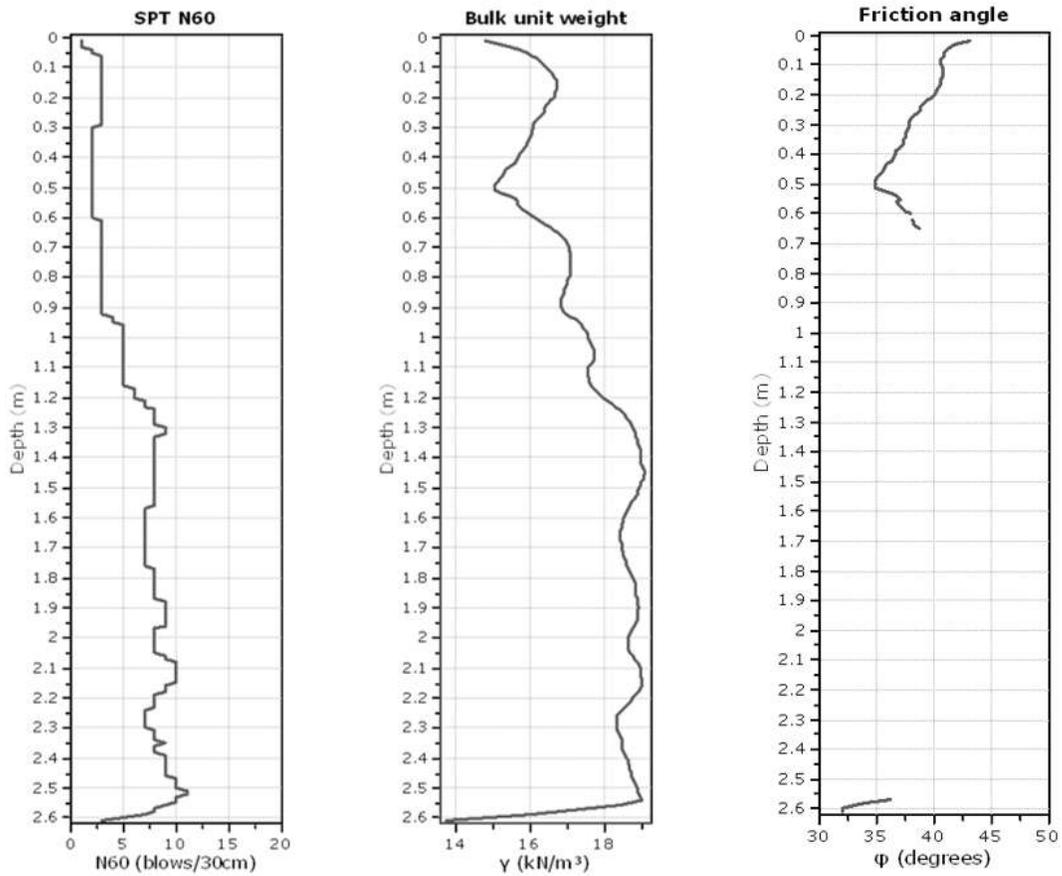
CPTu: 1
Total depth: 2.62 m
Coords: X:517852.03, Y:245843.86



(a) Datos iniciales obtenidos en campo.
Herramienta computacional: CPeT-IT

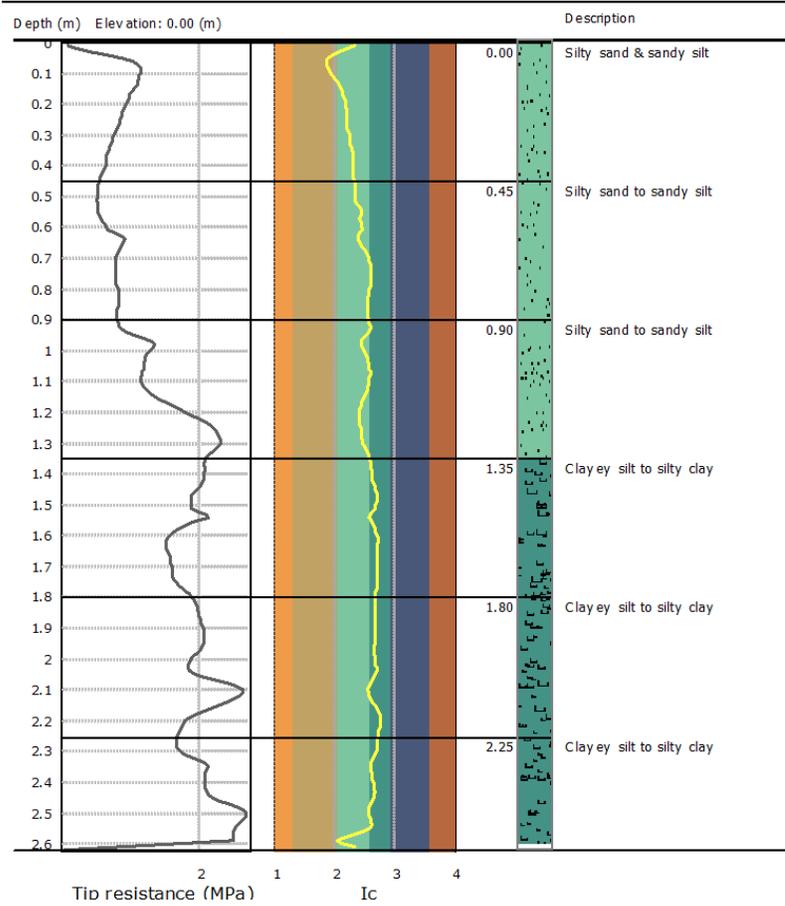


(b) Parámetros normalizados e índice de comportamiento de suelos.
 Herramienta computacional: CPeT-IT



(c) N_{60} , Peso unitario y ángulo de fricción efectivo.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Cinchona
Location: Cinchona, Alajuela, Alajuela



(d) Homologación a tramos de 45cm.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{res} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G _{so} (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.45	3.94E-06	2.5	9.4	54.3	39.0	10.8	10.0	0.0	0.0	0.0	16.1
0.45		(±4.87E-06)	(±0.6)	(±1.7)	(±11.5)	(±1.9)	(±2.7)	(±2.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
0.45	0.45	3.03E-07	2.7	0.0	0.0	0.0	10.4	14.3	58.9	3.4	15.5	16.4
0.90		(±2.13E-07)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.8)	(±4.1)	(±2.5)	(±0.2)	(±1.1)	(±0.8)
0.90	0.45	2.24E-07	5.9	0.0	0.0	0.0	21.6	31.9	110.0	4.2	19.6	17.9
1.35		(±9.40E-08)	(±1.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±6.8)	(±10.1)	(±34.6)	(±0.8)	(±3.9)	(±0.6)
1.35	0.45	6.91E-08	7.6	0.0	0.0	0.0	25.2	48.0	128.6	4.1	19.1	18.7
1.80		(±2.32E-08)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.9)	(±4.2)	(±14.8)	(±0.7)	(±3.2)	(±0.2)
1.80	0.45	6.74E-08	8.6	0.0	0.0	0.0	28.2	54.3	144.1	3.6	16.8	18.8
2.25		(±2.68E-08)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.4)	(±4.0)	(±17.3)	(±0.4)	(±1.8)	(±0.1)
2.25	0.35	4.01E-07	8.6	0.0	0.0	0.0	29.8	50.8	151.9	3.2	14.8	18.4
2.60		(±1.06E-06)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.7)	(±10.3)	(±23.8)	(±0.4)	(±1.6)	(±0.8)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

(e) Parámetros promedio de la homologación.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Apéndice 11. Resultados del software CPeT-IT, Perforación 2 Cinchona.

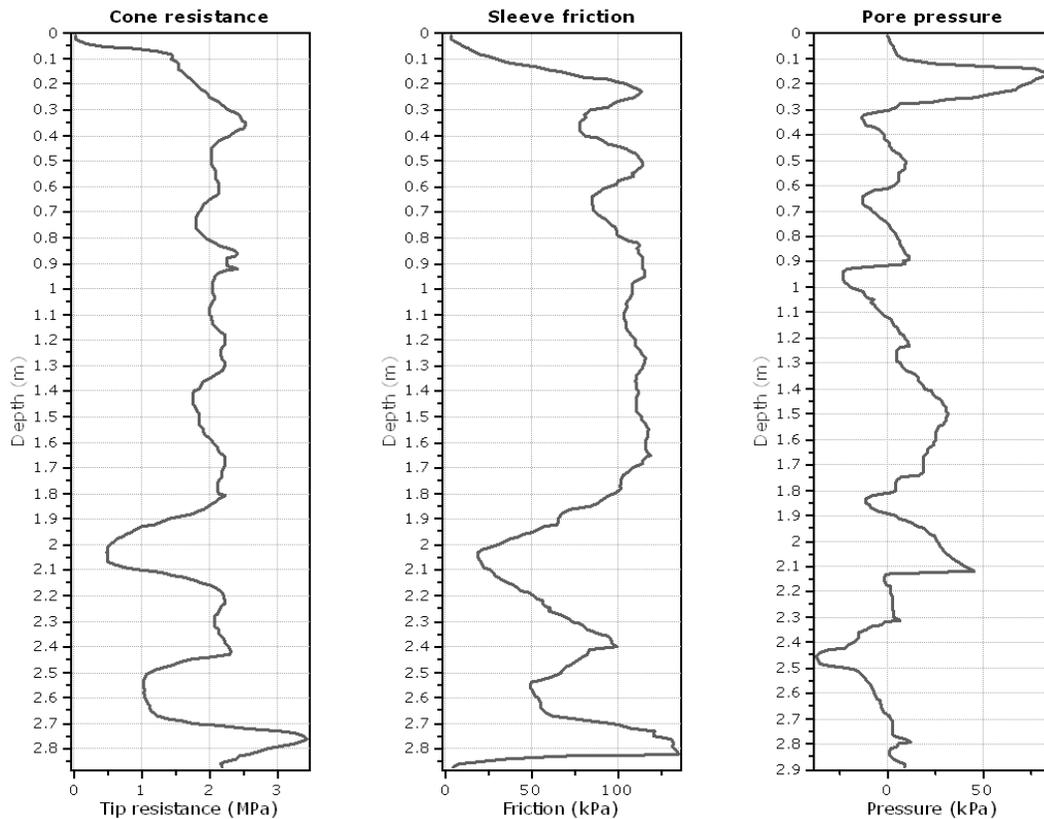
Las imágenes representan parte de los resultados del procesamiento de datos CPTu de la perforación 2 de Cinchona, por medio del software CPeT-IT.

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

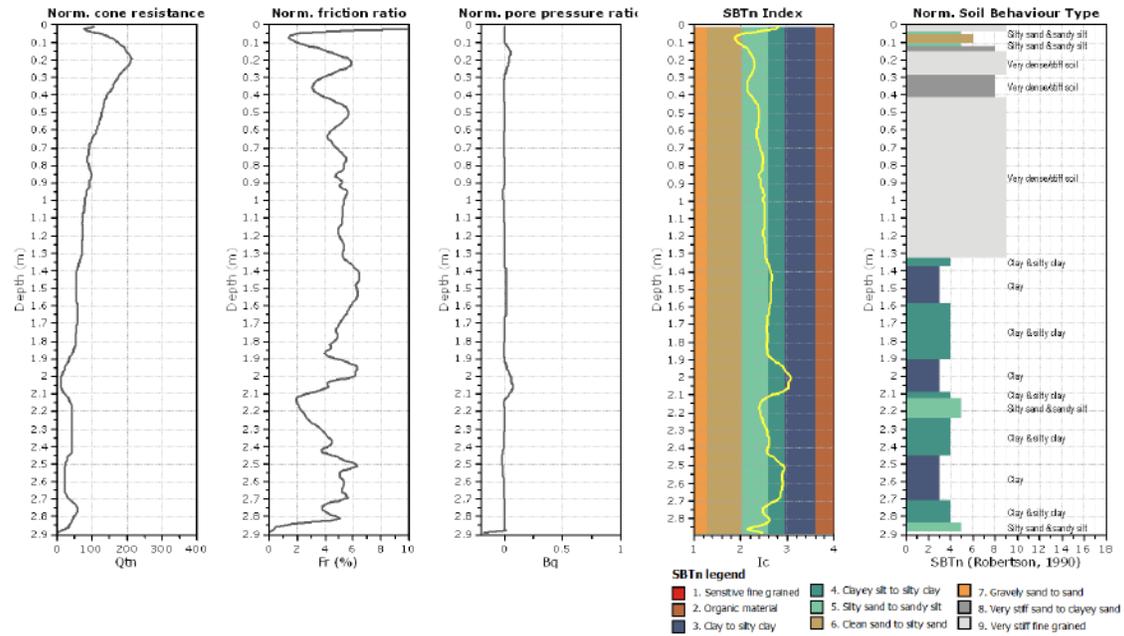
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

Project: CPTu Cinchona
Location: Cinchona, Alajuela, Alajuela

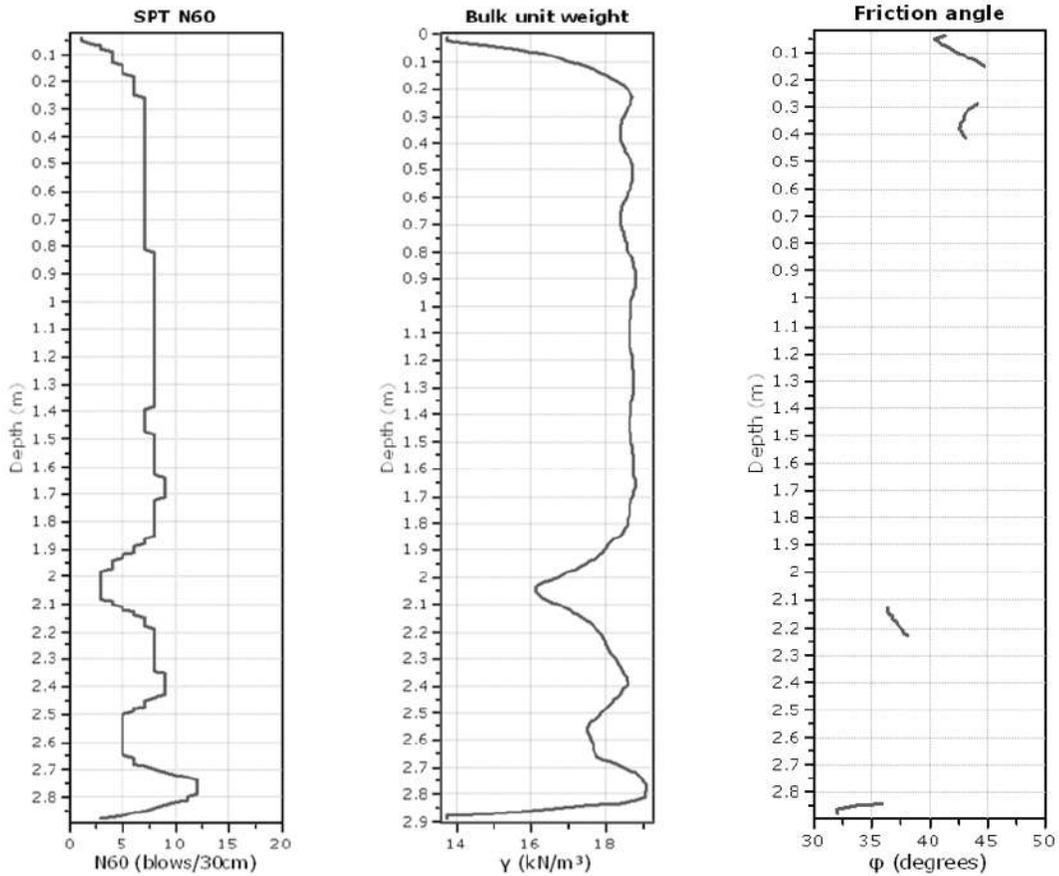
CPTu: 2
Total depth: 2.89 m
Coords: X:517852.68, Y:245861.94



(a) Datos iniciales obtenidos en campo.
Herramienta computacional: CPeT-IT

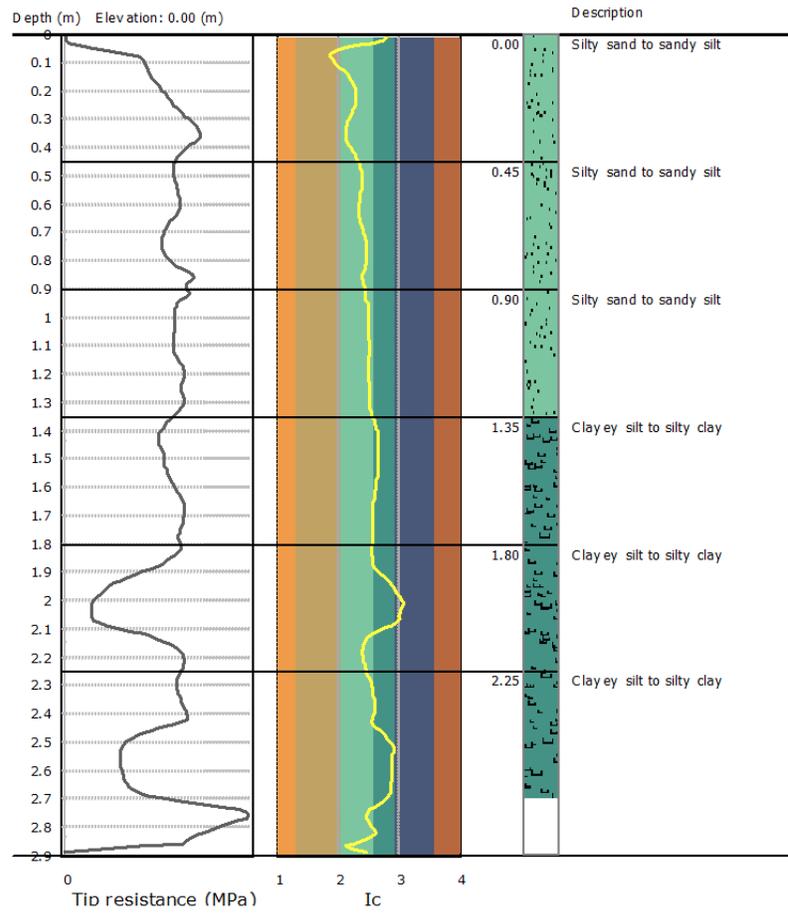


(b) Parámetros normalizados e índice de comportamiento de suelos.
 Herramienta computacional: CPeT-IT



(c) N_{60} , Peso unitario y ángulo de fricción efectivo.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Cinchona
Location: Cinchona, Alajuela, Alajuela



(d) Homologación a tramos de 45cm.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT ₁₀₀ (blows/30cm)	E _v (MPa)	D _v (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G _c (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.45	3.23E-06	5.7	0.0	0.0	0.0	23.6	24.7	118.0	12.2	56.6	17.7
0.45		(±4.21E-06)	(+1.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±10.0)	(±11.0)	(±50.5)	(±3.3)	(±15.1)	(±1.4)
0.45	0.45	4.44E-07	7.2	0.0	0.0	0.0	28.2	38.1	144.1	7.5	34.7	18.6
0.90		(±1.33E-07)	(+0.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.2)	(±3.2)	(±11.2)	(±1.1)	(±5.2)	(±0.1)
0.90	0.45	2.17E-07	8.0	0.0	0.0	0.0	29.3	45.0	149.3	5.5	25.2	18.7
1.35		(±4.30E-08)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.2)	(±1.9)	(±6.3)	(±0.5)	(±2.3)	(±0.1)
1.35	0.45	1.03E-07	8.0	0.0	0.0	0.0	27.4	48.2	139.8	4.1	18.8	18.7
1.80		(±2.56E-08)	(±0.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.3)	(±2.2)	(±11.6)	(±0.2)	(±0.7)	(±0.1)
1.80	0.45	1.46E-07	5.7	0.0	0.0	0.0	19.1	31.9	83.7	2.1	9.6	17.4
2.25		(±1.51E-07)	(±2.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±9.4)	(±10.3)	(±45.4)	(±1.1)	(±4.9)	(±0.7)
2.25	0.45	7.24E-08	6.8	0.0	0.0	0.0	22.0	41.9	112.3	2.3	10.7	18.0
2.70		(±6.73E-08)	(±1.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.0)	(±7.1)	(±35.7)	(±0.7)	(±3.3)	(±0.4)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

(e) Parámetros promedio de la homologación.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

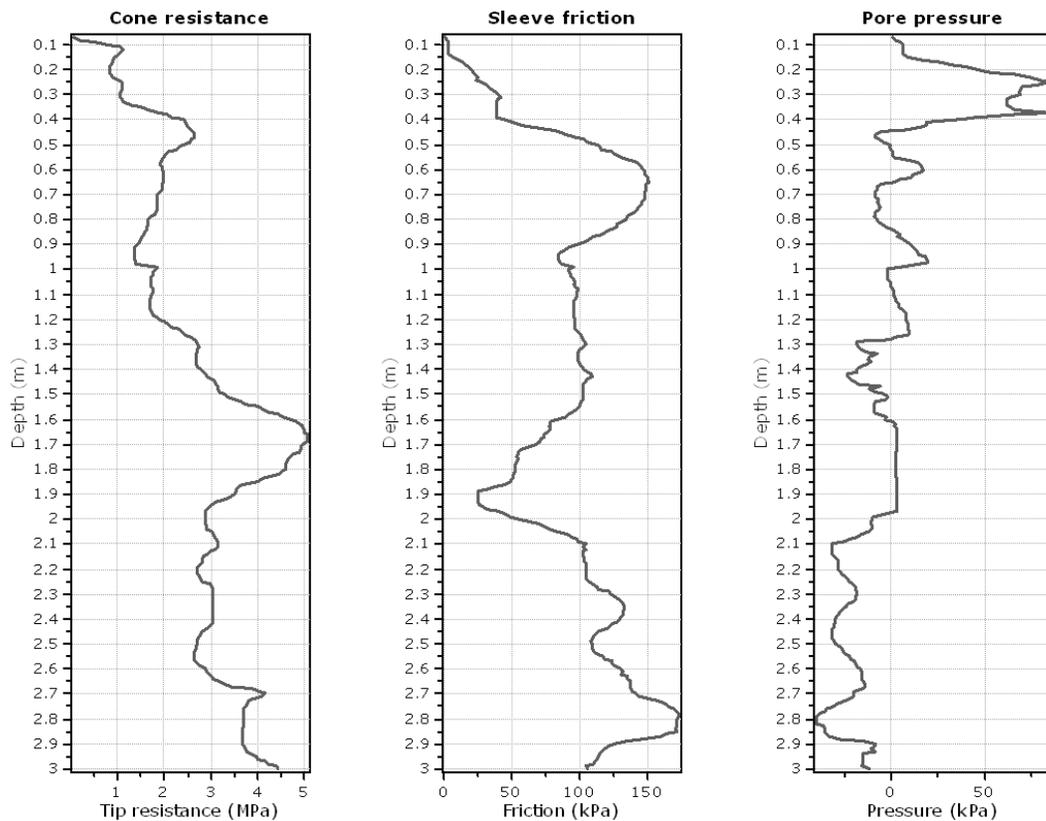
Apéndice 12. Resultados del software CPeT-IT, Perforación 3 Cinchona.

Las imágenes representan parte de los resultados del procesamiento de datos CPTu de la perforación 3 de Cinchona, por medio del software CPeT-IT.

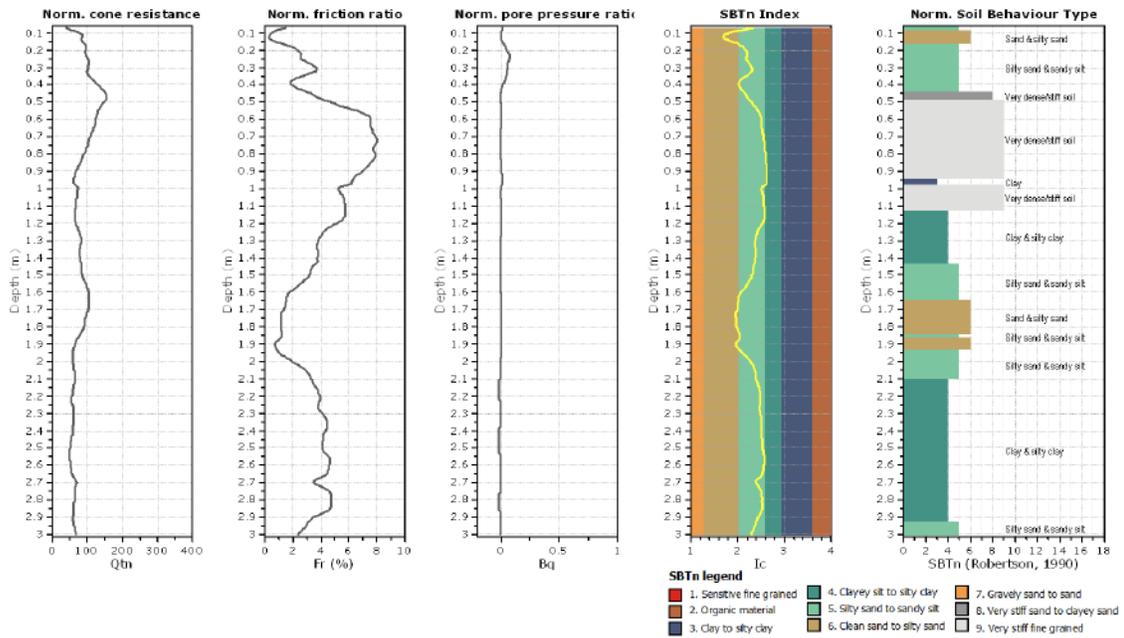
TEC | Tecnológico de Costa Rica
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción
Proyecto de Graduación

Project: CPTu Cinchona
Location: Cinchona, Alajuela, Alajuela

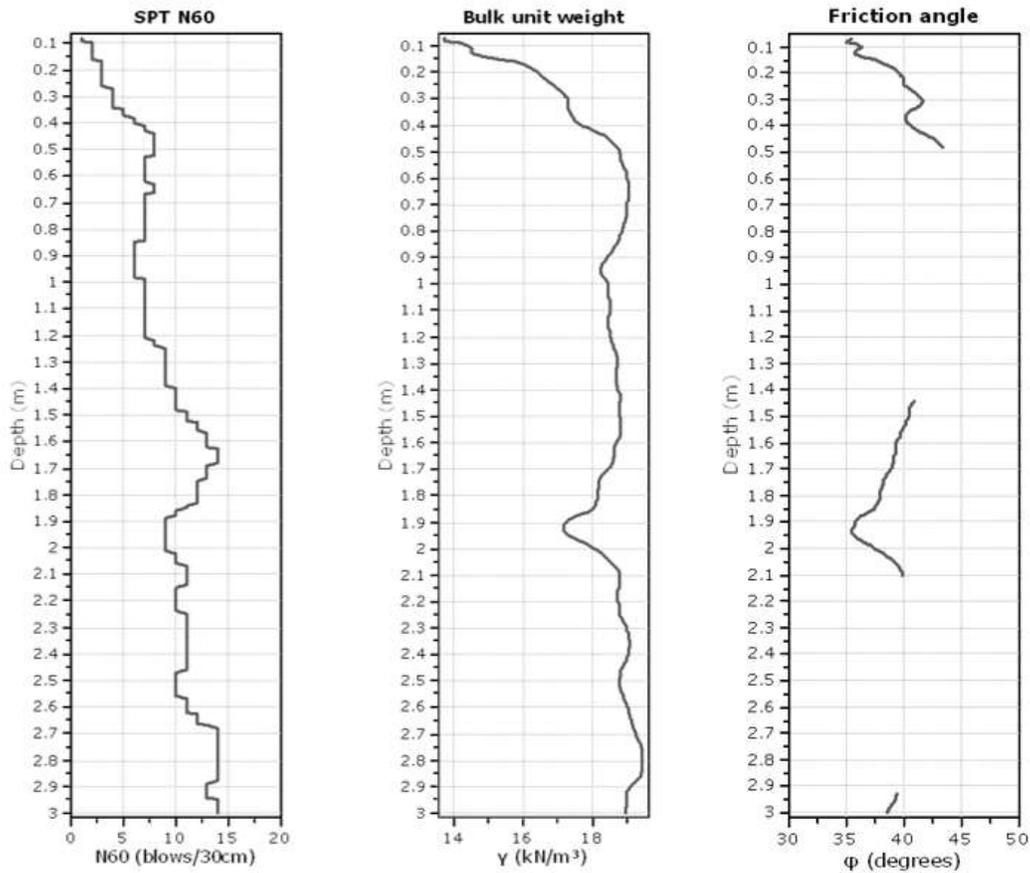
CPTu: 3
Total depth: 3.00 m
Coords: X:517851.65, Y:245876.64



(a) Datos iniciales obtenidos en campo.
Herramienta computacional: CPeT-IT

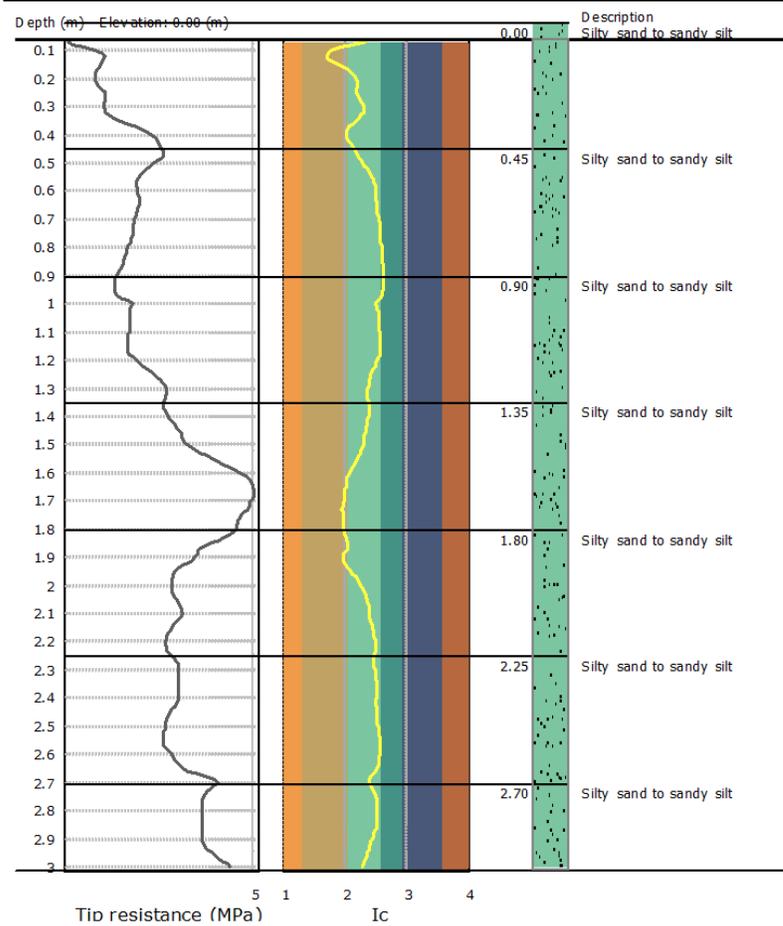


(b) Parámetros normalizados e índice de comportamiento de suelos.
 Herramienta computacional: CPeT-IT



(c) N_{60} , Peso unitario y ángulo de fricción efectivo.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Cinchona
Location: Cinchona, Alajuela, Alajuela



(d) Homologación a tramos de 45cm.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Summary table of mean values

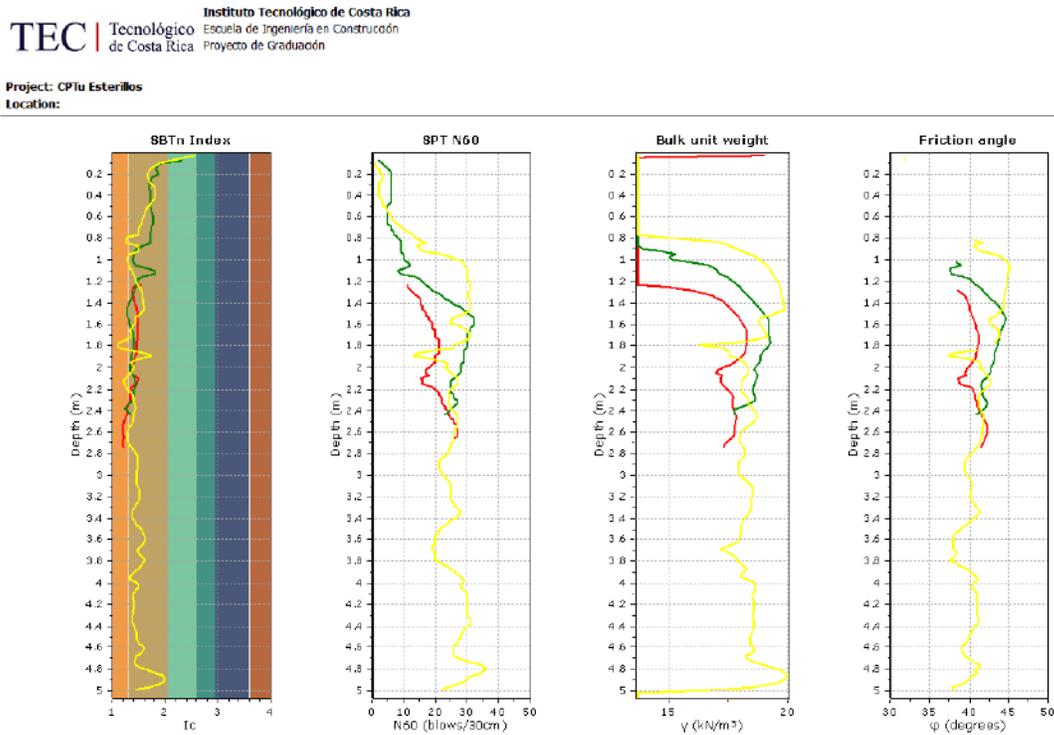
From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT ₆₀ (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _v (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.45	8.87E-06	3.9	13.5	58.0	39.5	16.3	15.5	0.0	0.0	0.0	16.5
0.45	0.45	(±1.51E-05)	(±1.9)	(±6.8)	(±6.9)	(±2.1)	(±8.5)	(±8.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.3)
0.45	0.45	3.96E-07	7.1	0.0	0.0	0.0	27.1	41.0	133.3	7.8	35.9	18.8
0.90	0.45	(±5.68E-07)	(±0.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.5)	(±2.6)	(±17.2)	(±1.6)	(±7.4)	(±0.2)
0.90	0.45	2.32E-07	7.3	0.0	0.0	0.0	26.7	40.7	136.3	5.1	23.3	18.5
1.35	0.45	(±1.55E-07)	(±1.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±6.3)	(±5.3)	(±32.1)	(±0.5)	(±2.1)	(±0.1)
1.35	0.45	4.17E-06	11.7	43.7	56.6	39.3	49.5	53.6	0.0	0.0	0.0	18.6
1.80	0.45	(±3.56E-06)	(±1.6)	(±2.1)	(±2.4)	(±0.9)	(±7.3)	(±3.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.2)
1.80	0.45	2.73E-06	10.1	36.8	47.4	37.4	41.0	48.6	0.0	0.0	0.0	18.2
2.25	0.45	(±3.06E-06)	(±0.9)	(±5.4)	(±3.4)	(±1.4)	(±3.8)	(±8.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)
2.25	0.45	2.07E-07	11.1	0.0	0.0	0.0	41.2	65.1	210.3	4.1	18.9	18.9
2.70	0.45	(±7.38E-08)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.5)	(±4.6)	(±22.9)	(±0.4)	(±1.7)	(±0.1)
2.70	0.30	3.44E-07	13.8	0.0	0.0	0.0	52.6	78.1	263.2	4.6	21.0	19.2
3.00	0.30	(±1.92E-07)	(±0.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.7)	(±4.7)	(±8.6)	(±0.2)	(±0.9)	(±0.2)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

(e) Parámetros promedio de la homologación.
Herramienta computacional: CPeT-IT

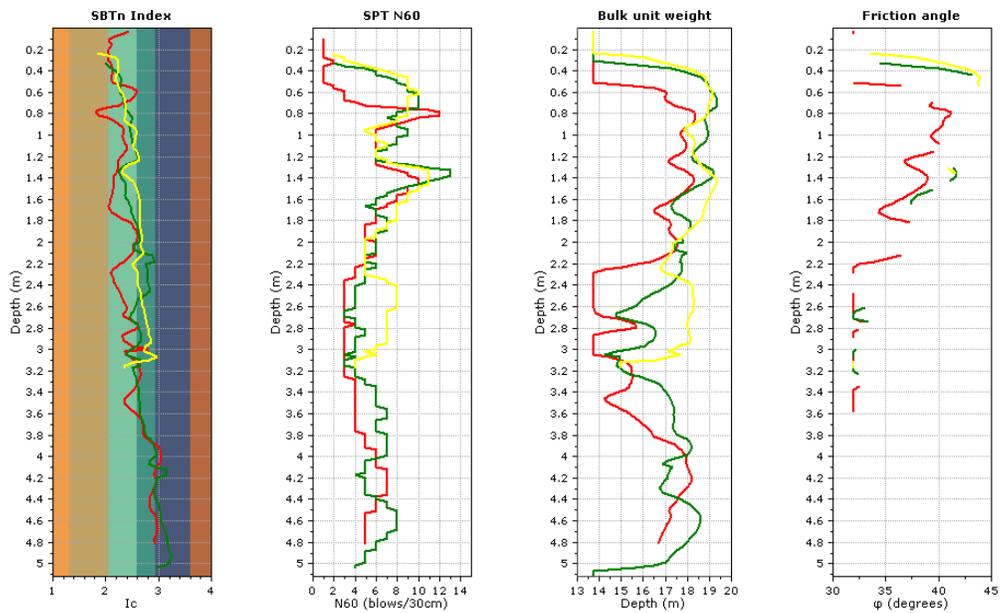
Apéndice 13. Resultados del software CPeT-IT, Superpuestos según terreno.

Las imágenes representan los resultados anteriores superpuestos para facilitar su comparación, por medio del software CPeT-IT.



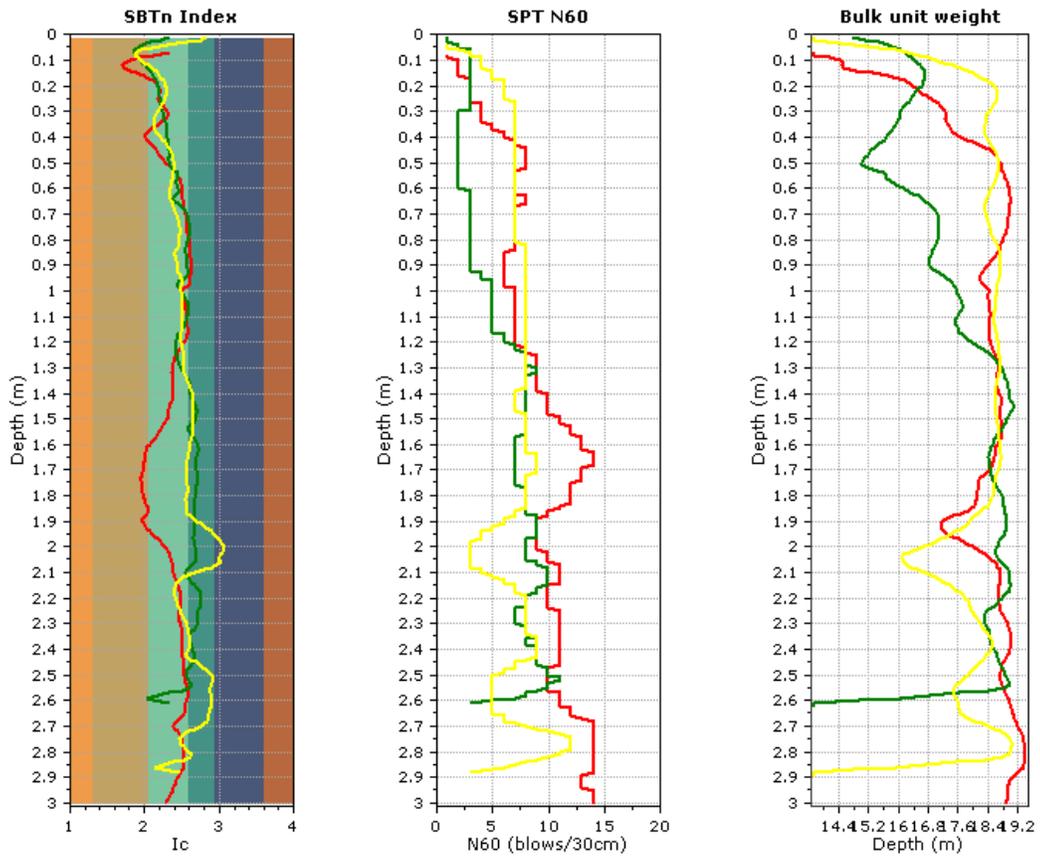
(a) Superposición de resultados, perforaciones Esterillos.
Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Palmares
 Location:



(b) Superposición de resultados, perforaciones Palmares.
 Herramienta computacional: CPeT-IT

Project: CPTu Cinchona
 Location:



(c) Superposición de resultados, perforaciones Cinchona.
 Herramienta computacional: CPeT-IT