

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN
ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



TÍTULO:

**“DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN
PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA
CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO-2018”**

Presentado por:

Bach. HUAMANHORCCO MERINO, Roxana

Bach. MORÁN MORENO, Milson

Jurados:

Dr. Ing. MARÍN LOAYZA, José Felipe

Ing. MONTAÑEZ TUPAYACHI, Américo

M.Sc. Ing. AGUILAR HUERTA, José Ronald

Asesor:

M.Sc. Ing. FERNÁNDEZ BACA VIDAL, Carlos

**Tesis presentada para Optar al Título Profesional de Ingeniero
Civil**

CUSCO, JUNIO 2019

DEDICATORIAS

Va dedicado al motor de mi alma, señor todopoderoso y omnipotente; a mis padres Edith y Roque que son mi ascua sagrada y es mi anhelo retornarles todo lo maravilloso que me han dado , mis abuelitos Martha y Nicanor a quienes adoro y agradezco por siempre dar sin pedir a cambio más que el éxito de su descendencia.

A mis hermanitos Ronald y Naomi quienes me inspiran cada día; a Milson, a quien admiro, por tus principios, gran valor y perseverancia...

Roxana Huamanhorcco Merino.

Dedico esta tesis a mis padres María Moreno Céspedes y Germán Morán Puca, que son el pilar más importante de mi vida, que nuestro creador los proteja siempre.

A mi compañera de tesis Roxana, estaré eternamente agradecido y que Dios derrame muchas bendiciones en tu vida ya profesional. Siempre estarás en mis oraciones...

Milson Morán Moreno.

AGRADECIMIENTOS

Aprovechamos esta oportunidad para expresar un profundo agradecimiento por toda la educación recibida por parte de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), nuestra alma mater, que nos acogió todos estos años de vida universitaria, y en homenaje a esto, el equipo desarrollado por la presente investigación, recibió el nombre de PDC UNSAAC.

A nuestros jurados de tesis: al Dr. Ing. José Felipe Marín Loayza, Ing. Américo Montañez Tupayachi y al M.Sc. Ing. José Ronald Aguilar Huerta. A todos ellos por la paciencia, tiempo y apoyo incondicional durante toda la investigación; asimismo, por el aporte técnico científico al contenido de la tesis.

Al Comité Científico de Prevención y Mitigación de Desastres (COCIPREDE-UNSAAC), y a su director Ing. Julio Gavino Rojas Bravo, por abrirnos las puertas y formar parte de una familia de profesionales dedicados a la investigación, muchos de los cuales hemos tenido el placer de conocerlos.

Al M.Sc. Ing. Carlos Fernández Baca Vidal, nuestro asesor de tesis y mentor, por compartir sus conocimientos, mostrarnos el mundo hermoso de la mecánica de suelos y brindarnos constante motivación en la investigación.

A la Ing. Luz Marlene Nieto Palomino y al personal que labora en el laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil - UNSAAC, por darnos las facilidades y poder realizar todas las pruebas correspondientes. Así como a la Señora Delia, amiga a quién acudimos tantas veces y siempre recibimos su ayuda desinteresada.

A nuestros padres por el apoyo económico y sobre todo por ser motor y motivo de seguir luchando por nuestros sueños.

A David Vega Quispe, ingeniero electrónico y gran amigo, por su asesoría en programación y aporte profesional, fruto del cual fue posible el desarrollo de la parte electrónica del equipo PDC – UNSAAC.

A todos los ingenieros de la escuela profesional de Ingeniería Civil, porque en sus aulas no solo aprendimos de ingeniería, sino de la vida misma con toda su experiencia compartida y peculiar forma de ser. Agradecemos los enojos, los apoyos y alientos recibidos por cada uno de ellos, aún después de ser sus alumnos; en especial al Ing. Iván Cruz, Ing. Francisco Serrano e Ing. José F. Marín.

Finalmente y no menos importante, a nuestros amigos que nos apoyaron de alguna forma, siendo de manera especial a Nathali Medina Vásque, Fanny Tapara Hancoco, Jennyfer Medina Huaylla, David Raúl Nirhuay y David Flores.

RESUMEN

En la presente tesis se ha diseñado e implementado un penetrómetro dinámico ligero de punta cónica con un novedoso sistema de medición electrónica, equipo que ha sido denominado como PDC UNSAAC, con el objetivo general de expandir su aplicación en el estudio de suelos, específicamente en obtener perfiles estratigráficos, y complementar las técnicas usuales de investigación como trincheras, calicatas o perforaciones que suelen ser laboriosas y costosas a medida que aumenta la profundidad de inspección, más aún en lugares de poca accesibilidad y gran área de estudio.

Luego del desarrollo del PDC UNSAAC, el diseño de la investigación estuvo conformado por un “modelo experimental” que consistió en la aplicación de dicho PDC en un pozo estratificado (estratos de grava, arena, limo y arcilla a diferentes densidades), de donde se han definido y obtenido valores probables de parámetros estadísticos, entre ellos la penetración media por golpe y el tipo de rebote, para cada tipo de suelo. Así, las propuestas de investigación resultantes a partir del modelo experimental fueron puestas a prueba en estratos naturales, es decir se desarrolló la “prueba PDC en campo”.

Con la implementación del sistema de medición electrónica se ha optimizado los resultados PDC, llegando a importantes ventajas técnicas como el conteo y registro automatizado de numerosos datos, permitiendo procesar longitudes de penetración por golpe de martillo en vez de número de golpes por cada 10cm de penetración. Por otra parte, al comparar los resultados de los perfiles estratigráficos obtenidos por ensayos PDC UNSAAC, con perfiles naturales de campo, se ha concluido que es factible identificar el cambio de estratos a partir de ensayos PDC con medición electrónica, e incluso identificar el grupo genérico de suelo, lo que motiva a futuras investigaciones específicas no sólo en la identificación de suelos, si no en estudios correlacionales con variables físico - mecánicas del suelo.

Palabras-clave: Penetrómetro Dinámico Ligero con sistema de medición electrónica; Longitud de penetración por golpe; Modelo experimental estratigráfico.

ABSTRACT

In the present thesis, a dynamic cone-tipped penetrometer has been developed, implemented with a new electronic measurement system, equipment that has been called as PDC UNSAAC, with the objective of expanding its application in the study of soils, specifically in obtaining profiles stratigraphic and the mayor number of properties. In contrast, nowadays the common techniques are applied such as trenches, pits or perforations that are usually laborious and expensive as the depth of inspection increases, even more in places that are narrow and vast.

After the development of the PDC UNSAAC, the design of the research was confirmed by an "experimental model" that consisted in the application of the PDC in a stratified draw-well (strata of gravel, sand, silt and clay at different densities), from where have been defined and obtained probable values of statistical parameters, between them the average penetration per stroke and the type of rebound, for each type of soil. Thereby, our proposals research from the experimental model were proven in natural strata, so that, the "PDC test in the field" was developed.

The implementation of the automated measurement system optimized, the PDC results, achieving important technical advantages in the processing data. On the other hand, comparing the results of the stratigraphic profiles obtained by PDC UNSAAC tests, with natural field profiles, we concluded that it is feasible to identify the change of strata from the PDC test with electronic measurement, and even more to identify the generic group of soil, which motivates future specific research not only in the identification of soils, also in studies with physical - mechanical soil.

Key-words: Dynamic Penetrometer Light with system of electronic measurement; Experimental model, profiles stratigraphic

CONTENIDO

RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE IMÁGENES	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE DIAGRAMAS	XII
1 GENERALIDADES	1
1.1 LA IDEA: ORIGEN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	1
1.2 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	2
1.3 PLANTEAMIENTO CUANTITATIVO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	3
1.3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	3
1.3.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.3.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.3.5 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.5 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.6 MARCO INTERPRETATIVO DEL ESTUDIO	7
1.7 DISEÑO Y TIPO DE INVESTIGACIÓN	7
1.8 NIVEL DE ESTUDIO	8
1.9 UNIDADES DE MUESTREO-ANÁLISIS	8
1.10 POBLACIÓN	8
1.11 MUESTRA – ESPÉCIMEN	8
1.12 TÉCNICAS DE OBTENCIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS	9
1.12.1 POZO ESTRATIFICADO	11
1.12.2 PRUEBA PDC EN CAMPO	12
2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	15
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	15
2.2 EL SUELO	19
2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS DEL SUELO	19
2.2.2 GRANULOMETRÍA	22
2.2.3 PLASTICIDAD	23
2.2.4 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL SUELO	25
2.2.5 DESCRIPCIÓN DE SUELOS	26
2.2.6 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	27

2.3 ENSAYOS IN SITU DE SUELOS.....	29
2.3.1 POZOS, CALICATAS O TRINCHERAS	30
2.3.2 PENETRÓMETROS DE PUNTA CÓNICA.....	31
2.3.3 PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (PDC)	31
3 DESARROLLO DE UN PDC CON MEDICIÓN ELECTRÓNICA	37
3.1 DESARROLLO DE LOS PRIMEROS PROTOTIPOS.....	37
3.1.1 PROTOTIPO PDC-01	37
3.1.2 PROTOTIPO PDC-02.	38
3.1.3 PROTOTIPO PDC-03	39
3.2 PDC CON SISTEMA DE MEDICIÓN ELECTRÓNICA	40
3.2.1 DESCRIPCIÓN	40
3.2.2 DETALLE DE LOS ELEMENTOS	41
3.2.3 MANUAL DE OPERACIÓN	47
3.2.4 PRECAUCIONES Y SEGURIDAD	50
4 MODELO EXPERIMENTAL	52
4.1 ENSAYOS PREVIOS DE LABORATORIO.....	52
4.2 DISEÑO DE ESTRATOS	52
4.2.1 CONTROL DE HUMEDAD Y DENSIDAD IN-SITU.	53
4.3 PROCEDIMIENTOS PREVIOS A LA COMPACTACIÓN DE ESTRATOS	55
4.3.1 PROCEDIMIENTOS EN LA GRAVA (G) Y LA ARCILLA (C).....	55
4.3.2 PROCEDIMIENTOS EN LA ARENA (S) Y EL LIMO (M)	57
4.4 MÉTODO DE COMPACTACIÓN APLICADO.....	58
4.4.1 APISONADOR MECÁNICO.	58
4.4.2 APISONADOR MANUAL DE CONCRETO.	58
4.4.3 CONFORMACIÓN POR PESO PROPIO.	59
5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	60
5.1 CLASIFICACIÓN DE SUELOS DEL MODELO EXPERIMENTAL	60
5.1.1 MAB-01 GRAVA DE LA CANTERA DE VICHO (GP-GC).....	60
5.1.2 MAB-02 ARENA SAN JERÓNIMO (SM)	61
5.1.3 MAB-04 LIMO CON ARENA DE SAN JERÓNIMO (ML)	61
5.1.4 MAB-05 ARCILLA (CL)	61
5.2 HUMEDAD DE ESTRATOS DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	61
5.3 DENSIDAD DE ESTRATOS EN ESTUDIO	62
5.4 ENSAYOS PDC EN EL MODELO EXPERIMENTAL	63
5.4.1 PARÁMETROS DE LAS CURVAS PDC CON MEDICIÓN ELECTRÓNICA.....	65
5.5 DIFERENCIACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESTRATOS	69

6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	74
6.1 VENTAJA TÉCNICA	74
6.1.1 TRASLADO Y OPERACIÓN DEL EQUIPO	74
6.1.2 CONTEO DE GOLPES DURANTE EL ENSAYO	74
6.1.3 REGISTRO DE DATOS EN CAMPO	75
6.1.4 PROCESAMIENTO DE DATOS EN GABINETE	75
6.1.5 OBTENCIÓN DE CURVAS DE BALANCE ESTRUCTURAL	786
6.1.6 COMPARACIÓN DE CURVAS RESULTANTES	78
6.2 OBTENCIÓN DE PERFILES ESTRATIGRÁFICOS	79
6.2.1 DELIMITACIÓN DE ESTRATOS	85
6.2.2 IDENTIFICACIÓN DE SUELOS	90
6.2.3 RELACIONES DENSIDAD - PENETRACIÓN MEDIA	92
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
7.1 CONCLUSIONES	93
7.2 RECOMENDACIONES	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

ANEXOS

ANEXO A: GRANULOMETRÍAS

ANEXO B: PLASTICIDAD

ANEXO C: ENSAYOS DE PROCTOR ESTÁNDAR

ANEXO D: DENSIDAD IN SITU PARA GRAVAS

ANEXO E: DENSIDAD IN SITU PARA ARENAS, LIMOS Y ARCILLAS

ANEXO F: RESULTADOS DE ENSAYOS PDC EN EL MODELO EXPERIMENTAL

ANEXO G: RESULTADOS DE PRUEBAS PDC EN CAMPO

ANEXO H: RESULTADOS DE EMS-EDIFICIO RESIDENCIAL DETECTA

ANEXO I: MATRIZ DE CONSISTENCIA DEL PLANTEAMIENTO CUANTITATIVO

ANEXO J: PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXO K: FLUJOGRAMA DE ACTIVIDADES DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.1: Extracción de muestras de suelo a partir de estratos naturales en San Jerónimo, Cusco	9
Imagen 2.1: DCP de masa dual	35
Imagen 2.2: DCP para pruebas de poca profundidad	36
Imagen 2.3: DCP de masa única	36
Imagen 3.1a: Prototipo PDC-01	37
Imagen 3.1b: Prueba de campo del primer prototipo	37
Imagen 3.2a: Detalles prototipo PDC-02 Parte electrónica	39
Imagen 3.2b: Detalles prototipo PDC-02 Prueba de campo	39
Imagen 3.3a: Detalles prototipo PDC-03 Parte electrónica con implementación de más botones de control	39
Imagen 3.3b: Detalles prototipo PDC-03 Ruptura del yunque	39
Imagen 3.4: Prototipo electrónico final.....	40
Imagen 3.5: Ensayo de campo con prototipo final	41
Imagen 4.1a: Ensayo “Test pit” para gravas, excavación y limpieza del hoyo	53
Imagen 4.1b: Ensayo “Test pit” para gravas, hoyo con membrana y agua	53
Imagen 4.1c: Ensayo “Test pit” para gravas, medición del volumen del hoyo	54
Imagen 4.1d: Ensayo “Test pit” para gravas, pesaje del material extraído	54
Imagen 4.2a: Muestreo inalterado con anillo de borde cortante, tapa de hinca y anillo en el suelo	54
Imagen 4.2b: Muestreo inalterado con anillo de borde cortante, extracción de muestra y previo al enrase	54
Imagen 4.2c: Muestreo inalterado con anillo de borde cortante, corte de bases a nivel	55
Imagen 4.2d: Muestreo inalterado con anillo de borde cortante, Pesaje de anillo y muestra	55
Imagen 4.3: Mezclado manual de la arcilla y el agua	56
Imagen 4.4: Capas de arcilla y grava dentro del pozo previo al compactado	56
Imagen 4.5: Capas de limo y arena en el pozo previos al compactado	57
Imagen 4.6: Compactación con el uso de Apisonador mecánico	58
Imagen 4.7: Compactación con el uso de Apisonador manual de concreto	59
Imagen 4.8: Esparcimiento del suelo en el área de diseño	59
Imagen 5.1a: Instante de rebote ligero	69
Imagen 5.1b: Instante de rebote pronunciado	69
Imagen 6.1a: Calicata “C” con presencia de traza con concreciones de marga	86
Imagen 6.1b: Calicata “C” con diferenciación de estratos	86
Imagen 6.2a. Forma y orientación de estratos naturales: Forma curvilínea de los horizontes	86
Imagen 6.2b. Forma y orientación de estratos naturales: Variación en el espesor y continuidad	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Detalles del Modelo Experimental o pozo estratificado a conformar en el Laboratorio de Mecánica de Suelos-UNSAAC	11
Figura 1.2: Ubicación de la zona de ensayo de campo	13
Figura 1.3: Ubicación de la zona de ensayo de campo en el plano geológico cuadrángulo de Cusco - S	28
Figura 2.1: Representación de estructuras simples de partículas del suelo	20
Figura 2.2: Representación de estructuras panaloides	21
Figura 2.3: Estructuras floculentas de partículas del suelo	21
Figura 2.4: Estructuras compuestas de partículas del suelo	21
Figura 2.5: Simbología de suelos (Referencial)	28
Figura 2.6: Esquema de un equipo DPL	33
Figura 2.7: Curva obtenida con un penetrómetro convencional	34
Figura 3.1: Diseño del gancho metálico para adherir el sensor ultrasonido a los tubos	38
Figura 3.2: Esquema de los elementos de penetración del PDC UNSAAC con sistema de medición electrónica.....	42
Figura 3.3: Esquema de los elementos de recuperación del PDC UNSAAC con sistema de medición electrónica	43
Figura 3.4: Disco de medición del PDC UNSAAC	44
Figura 3.5a: Caja de procesamiento del prototipo final PDC UNSAAC, planta	45
Figura 3.5b: Caja de procesamiento del prototipo final PDC UNSAAC, elevación	45
Figura 3.6: Martillo o Masa del PDC UNSAAC	47
Figura 3.7: Elevación del martillo durante el ensayo y registro de datos	48
Figura 4.1: Esquema del "Test Pit"- Diagrama de ensayo	53
Figura 5.1: Curvas resultantes del PDC con y sin medición electrónica	64
Figura 5.2: Curva acumulada de pendientes	65
Figura 5.3: Rangos de penetración mostrados en una curva de dispersión	67
Figura 6.1a. Curva de balance estructural a partir de resultados del ensayo PDC UNSAAC en el punto C-4 del modelo experimental	76
Figura 6.1b. Curva de balance estructural a partir de resultados del ensayo PDC UNSAAC en el punto C-1, del pozo Pz=04 de la prueba en campo	77
Figura 6.2: Comparación de resultados PDC punto A-1 con resultados de perforación Pz=01	79
Figura 6.3: Comparación de resultados PDC punto B-1 con resultados de perforación Pz=02	80
Figura 6.4: Comparación de resultados PDC punto D-1 con resultados de perforación Pz=03	81
Figura 6.5: Comparación de resultados PDC punto D-2 con resultados de perforación Pz=03	81
Figura 6.6: Comparación de resultados PDC punto C-1 con resultados de perforación Pz=04	82
Figura 6.7: Comparación de resultados PDC punto C-2 con resultados de perforación Pz=04	83
Figura 6.8: Comparación de resultados PDC punto C-3 con resultados de perforación Pz=04	84

Figura 6.9: Delimitación de estratos mediante análisis en la curva de dispersión.....	87
Figura 6.10: Identificación de la variación de la humedad en la curva de dispersión	89
Figura 6.11: Identificación de lente o traza en una estratigrafía	90
Figura 6.12: Relaciones densidad – penetración media por golpe	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Detalles de muestras seleccionadas para la prueba de laboratorio (modelo experimental).....	9
Tabla 2.1: Técnicas de investigación en campo	29
Tabla 3.1: Peligro de accidentes	50
Tabla 3.2: Precauciones de conservación del equipo	51
Tabla 4.1: Detalles de suelos requeridos en peso por espécimen	52
Tabla 5.1: Humedades de diseño versus obtenidas según tipos de suelo	62
Tabla 5.2: Cuadro de densidades del modelo experimental (pozo estratificado)	62
Tabla 5.3: Ejemplos de cálculo del rango de penetración	67
Tabla 5.4: Tipos de rebote del martillo	68
Tabla 5.5: Parámetros estadísticos en estratos de arena (SM) del modelo experimental	70
Tabla 5.6: Parámetros estadísticos en estratos de grava (GP-GC) del modelo experimental	70
Tabla 5.7: Parámetros estadísticos en estratos de Limo (ML) del modelo experimental	71
Tabla 5.8: Parámetros estadísticos en estratos de arcilla (CL) del modelo experimental	71
Tabla 5.9: Ejemplo de la determinación de rangos para cada parámetro estadístico	72
Tabla 5.10: Rangos de parámetros estadísticos según tipo de suelo del modelo experimental	73
Tabla 6.1: Peso de los elementos del PDC con sistema de medición electrónica	75
Tabla 6.2: Compatibilidad de perfiles estratigráficos procedentes de ensayos PDC y resultados de perforaciones	85
Tabla 6.3: Compatibilidad de perfiles estratigráficos procedentes de ensayos PDC y resultados de calicatas	85
Tabla 6.4: Ejemplo de aplicación de la tabla 5.10 para la identificación de suelos	91

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1.1: Esquema de la operacionalización de variables, factores e indicadores	4
Diagrama 1.2: Flujograma de técnicas de Recolección y obtención de datos	10
Diagrama 1.3: Croquis de puntos de investigación para la obtención de perfiles estratigráficos	14

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1 GENERALIDADES

1.1 LA IDEA: ORIGEN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“Nada debe ser necesariamente nuevo, pero sí novedoso.”

Juárez & Rico, 2010

Una buena investigación debe ser novedosa, lo cual puede lograrse al tratar un tema no estudiado, profundizar poco en uno medianamente conocido, o darle una visión diferente o innovadora a un problema aunque ya se haya examinado repetidamente. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, p. 25)

Dado el extendido uso de las auscultaciones conviene continuar pensando con mayor hondura y exigiéndose ir más lejos para potenciar sus funciones de tal manera que obtengamos mayores beneficios en costo, eficiencia.

Por otro lado encontramos otro motor de desarrollo, el cual viene a ser la **oportunidad** de indagar este tema medianamente estudiado ya que se cuenta con un dispositivo novedoso¹.

Las primeras ideas vagas de la investigación han llevado a reflexionar acerca de:

¿Qué es un PDC², para qué se utiliza?

¿Cuál es la particularidad del PDC con sistema de medición electrónica respecto a otros de su clase?

¿En qué consiste identificar un suelo?

¿Qué es un perfil estratigráfico? ¿Cuáles son las técnicas conocidas y más aceptadas hasta hoy para obtenerlos?

¿El PDC con sistema de medición electrónica podría cumplir con las normas técnicas en el contexto dónde se utilizaría?

¿Cuál son las limitaciones y uso del PDC según la Norma?

¿Se podría usar el PDC con sistema de medición electrónica para la obtención de perfiles estratigráficos, para la identificación de suelos y sus propiedades?

¿De ser así, qué propiedades podrían ser identificadas realizando ensayos con este equipo?

¹ Este equipo tiene implementado un sistema de medición electrónica que triangula tres sensores ultrasonido y permite registro de un gran número de datos contables discretos, objetos de estudio.

² Siglas de “Penetrómetro dinámico de punta cónica” o DCP (dynamic cone penetration).

1.2 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

Hernández et al. (2014, p. 10) refieren que el enfoque cuantitativo pretende “acotar” intencionalmente la información midiendo con precisión variables de estudio. Mientras que el enfoque cuantitativo busca principalmente la “dispersión o expansión” de la información. Es decir, en uno (cuantitativo) se consolida creencias y, en otro (cualitativo) se forma creencias acerca del fenómeno estudiado.

Esta es la principal razón por la que se fundamenta que la presente investigación es de naturaleza mixta con preponderancia cuantitativa. En consecuencia, toma diferentes enfoques, con incidencia relevante de uno de ellos (cualitativo o cuantitativo) dependiendo de las etapas de la investigación:

- ✓ El Desarrollo del Equipo e implementación del sistema de medición electrónica se ha ido estructurando en base a procesos de ensayo- error³. En efecto, la indagación e implementación del sistema de medición electrónica a un PDC convencional, ha sido circular donde se fue redefiniendo y optimizando su funcionamiento.
- ✓ En la Obtención de Datos el enfoque dominante es el cuantitativo, puesto que se ha seguido una metodología secuencial y probatoria. Es así que, en el Modelo Experimental (pozo estratificado) se ha definido variables con el propósito de manipularlas experimentalmente mediante procesos controlados, así excluir incertidumbre y minimizar errores. Si bien la percepción del tipo de rebote podría figurar como una variable cualitativa, esta complementa los resultados obtenidos de los ensayos de penetración con la realidad del tipo de suelo que se está atravesando.
- ✓ Finalmente, en la etapa de Análisis y Discusión de Resultados, el enfoque cuantitativo se muestra en la estructuración de la idea del proyecto mediante planteamientos iniciales específicos con la intención de comprobar si las presuposiciones (hipótesis) del investigador son apoyadas por el registro y análisis de datos estadísticos, relación de variables medibles u observables. Por otro lado, el enfoque cualitativo se centra en que la acción indagatoria se mueve de manera dinámica: entre los hechos y su interpretación, dónde se espera descubrir otras interrogantes de investigación importantes o perfeccionar las ya planteadas, modificando o introduciendo nuevas variables.

³ En el capítulo 3. “Desarrollo de un PDC con medición electrónica” se ilustra los diferentes prototipos que han sido modificados hasta el presente.

1.3 PLANTEAMIENTO CUANTITATIVO DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

En la exploración de suelos es deseable conocer los perfiles estratigráficos y el mayor número de propiedades. Para lograr dicho propósito, son usuales las técnicas de investigación de campo como trincheras, calicatas o pozos de inspección que permiten una inspección visual y muestreo. No obstante, estas excavaciones suelen ser laboriosas y costosas a medida que aumenta la profundidad de inspección, más aún en lugares de poca accesibilidad como terrenos que presenten topografía muy accidentada. Así mismo, el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), exige la investigación de por lo menos tres puntos o más dependiendo del tipo, área e importancia del proyecto. Conocer los perfiles estratigráficos para la mayor cantidad de puntos en un determinado área de estudio continua siendo una limitante para el solo uso de pozos de inspección.

Realizar el seguimiento, inspección y control técnico de diversas obras de ingeniería, sobre todo las de gran envergadura implican casi siempre la realización de numerosos ensayos de auscultación.

Dado el extendido uso de las auscultaciones se observa la necesidad de equipos cada vez más precisos, eficientes y multifuncionales que demanda el mercado. Requiriéndose la implementación de tecnologías más modernas en los equipos de auscultación de nuestro medio como son los penetrómetros dinámicos ligeros de punta cónica, con el fin de aplicarlos también, de manera técnica y confiable en la obtención de estratigrafías e identificación de suelos. De esa manera, optimizar sus aplicaciones y potenciar su uso en la Ingeniería.

1.3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Se ha elaborado la operacionalización de variables como método gráfico para delimitar el problema en la formulación cuantitativa. Las variables dependientes se han obtenido del conteo de golpes y longitud de penetración en cada golpe a partir de los ensayos de penetración dinámica ligera con sistema de medición electrónica. Mientras que, las variables independientes se han registrado a partir de cambios físicos-mecánicos de los suelos en cuestión.

1.3.2.1 *Variables independientes.*

Identificación de suelos (X): Constituye la variable independiente de la presente investigación, donde se establece que identificar las condiciones de un terreno en estudio depende principalmente de dos factores: la delimitación de estratos y el tipo de suelo.

Delimitación de estratos (X_1): Este factor de la identificación de suelos comprende los límites y espesores de las capas que constituyen un perfil estratigráfico, delimitadas principalmente por cambios en las propiedades físico-mecánicas del suelo (subfactor X_{11}). Asimismo, las variaciones verticales suelen tener como indicadores la evaluación de propiedades como la densidad (kg/cm³) y la humedad del suelo (%).

Tipo de suelo (X_2): Se refiere a la clasificación propiamente dicha de la tipología del suelo, según los sistemas internacionales de clasificación como son el SUCS y el AASHTO. Ambos sistemas dependen de la realización de ensayos como son los límites de consistencia (subfactor X_{21}) y el análisis granulométrico (subfactor X_{22}), constituyendo estos dos últimos subfactores independientes en la operacionalización, cuyos indicadores como la proporción de finos, gruesos, y límites de Atterberg se evalúan basadas en las normas peruanas vigentes.

1.3.2.2 Variables dependientes.

Resultados de Ensayos PDC con Medición Electrónica (Y): Constituye la variable dependiente de la presente investigación, que tiene como factores principales de análisis a la longitud de penetración por golpe y la profundidad de inspección.

Longitud de penetración por cada golpe (Y_1): Este factor es función del registro de las lecturas y análisis de su variabilidad (subfactor X_{22}), teniendo como indicadores parámetros estadísticos obtenidos del ajuste a una distribución normal.

Profundidad de inspección (Y_2): Es otro factor de los resultados de ensayos PDC con sistema de medición electrónica que es alcanzado según la profundidad límite o rechazo (subfactor Y_{22}), estableciéndose como indicador principal, de haber alcanzado el rechazo, el tipo de rebote (especialmente el pronunciado).



Diagrama 1.1. Esquema de la operacionalización de variables, factores e indicadores

Fuente: Elaboración propia.

1.3.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.3.1 *Problema general.*

¿Es posible expandir las aplicaciones de un penetrómetro dinámico ligero de punta cónica, implementándolo con un sistema de medición electrónica en el estudio de suelos?

1.3.3.2 *Problemas específicos.*

- ❖ PE1: ¿Cuáles son los parámetros representativos de las curvas resultantes de un ensayo de penetración dinámica ligera de punta cónica con sistema de medición electrónica?
- ❖ PE2: ¿Cómo se relaciona la longitud de penetración por cada golpe con el cambio de estratos continuos, a partir de los ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con medición electrónica?
- ❖ PE3: ¿Cómo se relacionan los resultados de penetración dinámica ligera de punta cónica con sistema de medición electrónica con la tipología del suelo?

1.3.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.4.1 *Objetivo general.*

Desarrollar un penetrómetro dinámico ligero de punta cónica de fabricación local implementado con un sistema de medición electrónica. Así, plantear una base de estudio respecto a la correlación de resultados de ensayos PDC con sistema de medición electrónica con la identificación de suelos.

1.3.4.2 *Objetivos específicos.*

- ❖ OE1: Establecer parámetros estadísticos basados en las curvas resultantes obtenidas a partir de ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con sistema de medición electrónica.
- ❖ OE2: Relacionar la longitud de penetración por cada golpe con la diferenciación de estratos para la obtención de perfiles estratigráficos a partir de los ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con medición electrónica.
- ❖ OE3: Asociar los resultados PDC con sistema de medición electrónica con la tipología del suelo.

1.3.5 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.5.1 *Hipótesis general.*

El desarrollo del equipo PDC con sistema de medición electrónica, incrementa las ventajas técnicas de este tipo de ensayos, siendo posible correlacionar los resultados obtenidos a partir de ensayos PDC con la identificación de suelos.

1.3.5.2 *Hipótesis específicas.*

- ❖ OE1: Basados en las curvas resultantes obtenidas a partir de ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con sistema de medición electrónica se puede establecer parámetros

estadísticos definidos y generalizados para cualquier cantidad de datos obtenidos de estos ensayos.

- ❖ OE2: Los resultados obtenidos a partir de ensayos PDC con medición automatizada, está relacionada con la diferenciación y caracterización de estratos, siendo factible la obtención de estratigrafías en cuanto a espesor u otras características.
- ❖ OE3: Es posible correlacionar los resultados obtenidos a partir de ensayos PDC con sistema de medición electrónica con el tipo de suelo.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo con Miller y Salkind (como se citó en Hernández & Rico, 2014), es posible establecer criterios para evaluar la utilidad e importancia del presente estudio, los cuáles se expone a continuación:

Utilidad Metodológica.

La investigación pretende obtener un mejor instrumento para recolectar y analizar datos del suelo; así como contribuir a su identificación y caracterización. Además, aportará al mejor entendimiento de relaciones entre propiedades del suelo y los resultados de los ensayos de penetración dinámica, logrando mejorar la forma de experimentar entre estas variables, por desarrollar la investigación en suelos pre-establecidos y/o modelo experimental.

La investigación sugiere una metodología para estudiar poblaciones como estratos continuos (vertical) y puntos de auscultación (horizontal) más adecuadamente. Tanto en lugares poco accesibles, mayor área, a mayores profundidades y sobre todo a menor costo.

Conveniencia.

La presente investigación es conveniente dada la favorable disponibilidad de recursos, el avance tecnológico y las tendencias empíricas en la práctica ingenieril. La investigación servirá para analizar y evaluar la versatilidad y ventajas del uso de un equipo de ingeniería, aumentando sus aplicaciones y obteniendo mayores beneficios técnicos y productivos.

Relevancia Social.

Los beneficiados son ingenieros civiles, geotecnistas, propietarios y constructores, todos los implicados en la realización de estudios de suelos para diferentes fines, ya que podrán disponer de un equipo con mayores aplicaciones en su campo profesional. La proyección social anhelada es la recopilación de abundante información de los suelos en el ámbito regional, nacional y mundial, al servicio de los fines ingenieriles.

Implicaciones Prácticas.

El presente estudio aunado con el desarrollo del equipo de penetración dinámica ligera de cono con medición electrónica, constituye una referencia o punto de comparación para otras investigaciones futuras en campos como la obtención de parámetros mecánicos y de resistencia de suelos, calibración de penetrómetros ligeros y SPT, estandarización y correlación de equipos de auscultación, control de compactación, entre otros, utilizando este equipo en desarrollo. En consecuencia, la investigación representa un aporte académico importante al desarrollo tecnológico en el campo de la Ingeniería.

1.5 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

Se denota la factibilidad de la presente investigación dada la favorable disponibilidad de recursos, el avance tecnológico y las tendencias empíricas en la práctica ingenieril. Además de ello, el conocimiento requerido para desarrollar la investigación está dentro del nivel de pre grado en la FAIC-UNSAAC.

En suma, el desarrollo de la presente idea de investigación viene relacionada con la experiencia profesional de diversos ingenieros, quienes han usado los ensayos de auscultación para deducir características de los suelos que están atravesando y compatibilizar sus resultados con perfiles estratigráficos directamente observados.

1.6 MARCO INTERPRETATIVO DEL ESTUDIO

Hernández et al. (2014) refieren la importancia de conocer los antecedentes de la investigación. Además, de indicar que una revisión completa de la literatura y estado del arte serán fundamentales para ubicar este estudio en la evolución del conocimiento y abordar nuevas perspectivas de ser necesario.

En consecuencia, en cuanto a la investigación previa del tema, se puede afirmar que se encuentra dentro de la categoría “**Temas investigados estructurados y formalizados**” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, p. 27), ya que, el conocimiento acerca de las variables de estudio involucradas puede ser encontrado en diversos documentos, artículos u otros materiales que reportan similares resultados de investigaciones anteriores.

La presente investigación tiene principalmente como marco interpretativo la influencia de dos corrientes de pensamiento los cuales son el Positivismo⁴ y el Empirismo.⁵

1.7 DISEÑO Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es del tipo mixto con preponderancia cuantitativa. Asimismo, su diseño amerita que sea múltiple de naturaleza experimental. En otras palabras, tiene el grado de “experimental”, propiamente dicho, ya que se valdrá de observaciones, registro y análisis de las variables de investigación sobre un modelo y ambiente manipulado artificialmente (Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales-UNSAAC). No obstante, se trabajara con muestreo y grupos intactos de escogencia predeterminada (estratos de suelos identificados), por lo que resulta también ser un diseño “cuasi experimental.”

⁴ El Positivismo sostiene que todas las cosas o fenómenos que estudia la ciencia son susceptibles de ser medidos. Por tanto el único conocimiento auténtico es el que se afirma a través del método científico.

⁵ El Empirismo afirma que el conocimiento proviene solo o principalmente de la experiencia sensorial.

1.8 NIVEL DE ESTUDIO

El nivel de investigación es DESCRIPTIVO-CORRELACIONAL porque se busca especificar todos los procesos e interpretarlos para medir y evaluar aspectos, dimensiones o componentes del evento a estudiar (cómo es y cómo se manifiesta la identificación, caracterización de suelos a través de los ensayos de penetración dinámica).

Adicionalmente, la investigación es transversal o sincrónica, de hecho, se circunscribirá a la medición y caracterización de datos en un tiempo específico.

1.9 UNIDADES DE MUESTREO-ANÁLISIS

Dado que la investigación busca relacionar resultados de ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con medición electrónica con diversos parámetros de identificación de suelos, específicamente en la obtención de perfiles estratigráficos. **La Unidad de Muestreo** fue el estrato de suelo conformado ya sea por suelo gravoso (G), arenoso (S), limoso (M) o arcilloso (L).

La Unidad de Análisis también fue el estrato de suelo, porque esta unidad se ha diferenciado una de otra según las variables independientes: Tipo de suelo (grupo genérico), humedad(W%) y densidad (δ).

1.10 POBLACIÓN

La población de estudio fueron algunos tipos de suelo de la ciudad del Cusco, de escogencia determinada según conveniencia, acceso al lugar de estudio y estratos conocidos por la geología y estudios geotécnicos de referencia.

1.11 MUESTRA – ESPÉCIMEN

Debido a que todos los elementos de la Población no tienen la misma posibilidad de ser escogidos para la muestra; es decir, que éstas dependieron de los propósitos de la investigación, las muestras seleccionadas fueron Muestras no Probabilísticas que fueron básicamente suelos que formaron estratos definidos de la ciudad de cusco, y que a su vez en laboratorio, éstas muestras formaron los especímenes, conformando estratos del mismo tipo de suelo pero con diferentes densidades. Sólo para ensayos de campo, también se obtuvieron sub-especímenes para el caso de análisis de suelos, que fueron pequeños ejemplares de suelos parcialmente alteradas de 10-15cm de longitud, obtenidas por el tubo Shelby de pared delgada o gruesa según fue el caso.

En la tabla 1.1 se muestra el detalle de las muestras de suelo escogidas y su origen para su utilización en el modelo experimental (pozo estratificado).

Tabla 1.1
Detalles de muestras seleccionadas para la prueba de laboratorio (Modelo Experimental)

MUESTRA	CLASIFICACIÓN SUCS		ORIGEN DEL SUELO		
	SÍMBOLO	NOMBRE	LUGAR	DISTRITO	PROVINCIA
Grava "G"	GP-GC	Grava mal gradada con arcilla y arena	Cantera Vicho	Oropesa	Cusco
Arena "S"	SM	Arena Limosa	A.P.V. 30 de Setiembre	San Jerónimo	Cusco
Limo "M"	ML	Limo Arenoso	A.P.V. 30 de Setiembre	San Jerónimo	Cusco
Arcilla "C"	CL	Arcilla de Baja Plasticidad	Ladrilleras artesanales	San Jerónimo	Cusco

Fuente: Elaboración propia



Imagen 1.1. Extracción de muestras de suelo a partir de estratos naturales en San Jerónimo, Cusco.

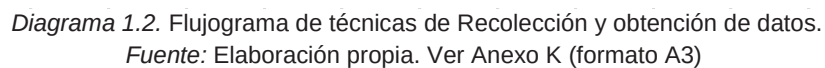
Fuente: Elaboración propia

1.12 TÉCNICAS DE OBTENCIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS

La obtención de datos para la presente investigación comprendió ensayos de campo y pruebas de laboratorio de diferente índole. Básicamente, el diseño de la investigación estuvo conformado por tres etapas:

- ✓ *Desarrollo* de un Penetrómetro Dinámico Ligero de Punta Cónica implementado de un sistema de medición electrónica.
- ✓ *Modelo Experimental*: consistió en la compactación de estratos de escogencia predeterminedada en un pozo, a diferente energía de compactación por cada espécimen, donde se realizaron ensayos PDC con y sin medición electrónica.
- ✓ *Prueba PDC en campo*: procedió a realizarse ensayos de PDC con y sin medición electrónica en estratos naturales, donde también se contaron con perforaciones, calicatas y muestreo para la obtención y comparación de perfiles estratigráficos.

El siguiente Flujograma muestra en resumen los procedimientos seguidos para cada etapa, destacando algunos objetivos y elaboración.



1.12.1 POZO ESTRATIFICADO.

El pozo estratificado (modelo experimental) tuvo como meta diferenciar las curvas del ensayo PDC con sistema de medición electrónica en cada tipo de suelo y a diferentes estados de compactación, para posteriormente definir parámetros estadísticos característicos de cada tipo de suelo y estrato con la observación y análisis de resultados.

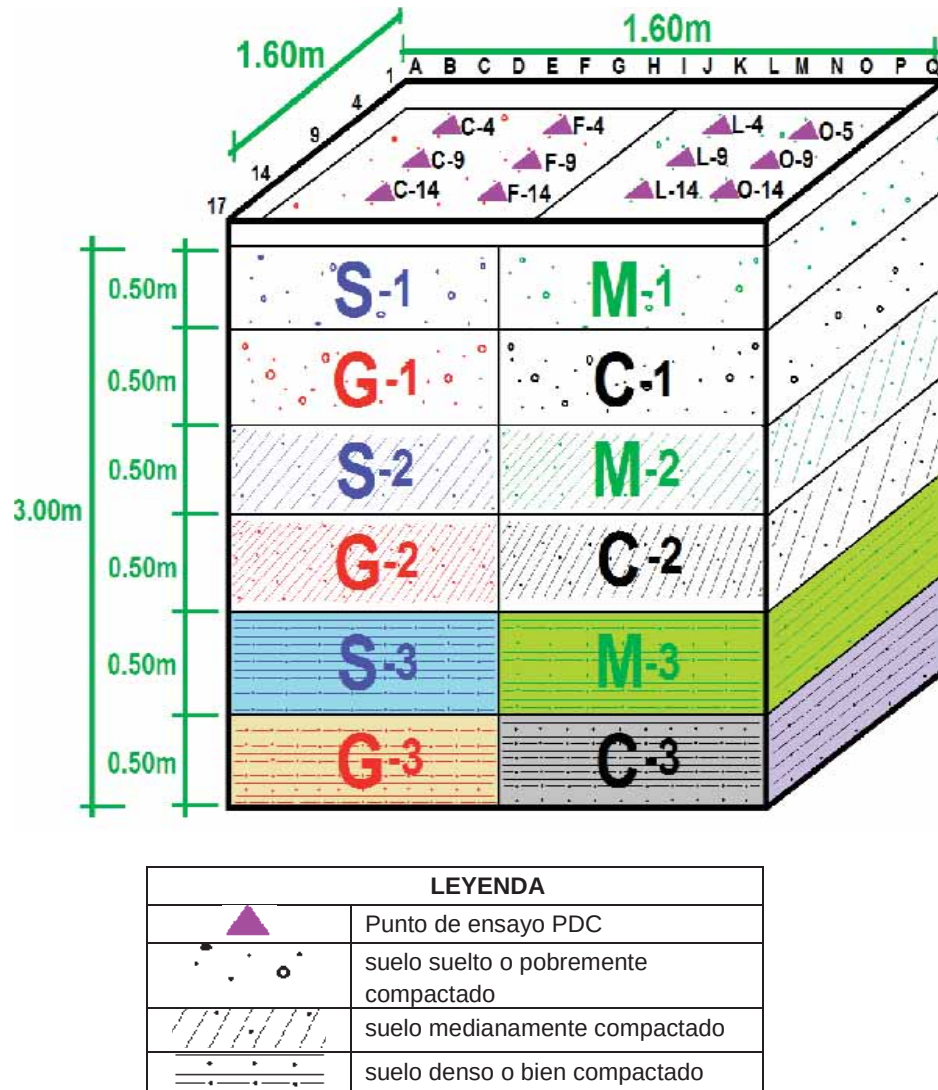


Figura 1.1. Detalles del Modelo Experimental o pozo estratificado a conformar en el Laboratorio de Mecánica de Suelos-UNSAAC. Se observa dos columnas: la primera con estratos de un suelo gravoso (G-i) y otro arenoso (S-i), la segunda columna con estratos de un suelo limoso (M-i) y el otro arcilloso (C-i). En cada columna se ha realizado seis ensayos de PDC con medición electrónica.

Fuente: Elaboración propia.

Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil, UNSAAC-Cusco. Donde se utilizó un pozo de pruebas existente revestido de concreto armado de 6m de profundidad. Se siguieron los siguientes pasos:

- a) Se realizó el movimiento de tierras del pozo del laboratorio hasta una profundidad de 3.20m desde la superficie, y una sección de 1.60 x 1.60m.
- b) Se eligieron 4 tipos de suelos según conveniencia técnica, facilidad de obtención y transporte del suelo. Estos suelos fueron demarcados convenientemente por su naturaleza y grupo genérico, los que son: gravas (G), arenas (S), limos (M), arcillas (C).
- c) Definido estos tipos de suelos, se transportaron al laboratorio aproximadamente 3.5m³ de cada tipo de suelo.
- d) Cada tipo de suelo fue compactado en el pozo a tres diferentes densidades variando las energías de compactación a través de diferentes procedimientos, llegando a un espesor aproximado de 50cm por cada densidad diferente.
- e) Se realizó el muestreo, ensayos de compactación y clasificación de suelos durante el llenado del pozo.
- f) Se obtuvieron datos como la densidad in situ y humedad en cada estrato durante la conformación de estratos.
- g) Se delimitó el área del pozo con líneas a cada 10cm en ambos lados o ejes, dotando de coordenadas a cada punto de inspección tal como muestra la fig. 1.1.
- h) Finalizada la conformación de estratos, desde la superficie se realizaron 12 ensayos PDC con el equipo implementado con el sistema de medición electrónica, donde cada ensayo atravesó los estratos previamente conformados.
- i) Se elaboraron fichas, por cada punto de ensayo, donde se muestran las gráficas de las curvas obtenidas mediante los ensayos PDC con medición electrónica y los resultados de las pruebas realizadas durante la conformación del pozo estratificado.

1.12.2 PRUEBA PDC EN CAMPO.

La prueba de campo tuvo como meta complementar los objetivos e información para la discusión de resultados. Para ello, se han realizado varios ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica (PDC) con medición electrónica en terreno natural, identificando los estratos y caracterizándolos mediante el uso de parámetros estadísticos de las curvas obtenidas mediante las penetraciones antes mencionadas y en base a los resultados e interpretaciones que se obtuvieron en el Modelo experimental (pozo estratificado).

Por consiguiente, la obtención de datos en campo se dio como sigue:

- a) Dentro de la ciudad de Cusco, se eligió la zona de prueba Wanchaq, específicamente los lotes N° 202 y 204 en el pasaje Manglio Carrasco de la Urb. Chachacomayoc, basado en la geología local, topografía y el acceso al lugar.
- b) Dicha zona contó con los siguientes trabajos de campo: Reconocimiento del área, excavación de calicatas, perforación con tubos de muestreo continuo (Shellby), descripción de las columnas estratigráficas, muestreo alterado y muestreo inalterado con anillo de borde cortante. estudios exploratorios geotécnicos pertenecientes al MSc. Ing. Carlos Fernández Baca Vidal, en uno de sus

c) Se obtuvieron cuatro perfiles estratigráficos: una por inspección directa en una calicata de cinco metros de profundidad y las otras tres mediante perforaciones con tubo Shelby.

d) Una vez obtenidos los perfiles estratigráficos e identificados los suelos con sus respectivas propiedades. Se elaboraron fichas donde se muestran las gráficas y los parámetros estadísticos de las curvas obtenidas mediante los ensayos PDC con medición electrónica para el respectivo análisis.

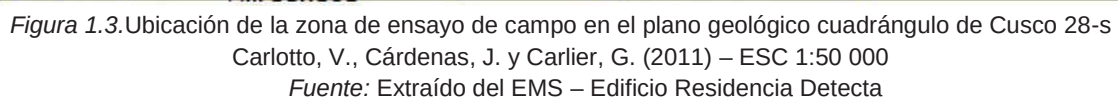
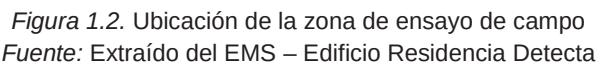




Diagrama 1.3. Croquis de puntos de investigación para la obtención de perfiles estratigráficos.

Fuente: Extraído del EMS – Edificio Residencia Detecta

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO
CONCEPTUAL

2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo del proyecto, se consultaron diferentes investigaciones y trabajos de grado que involucran algunas variables de estudio y presentan referencias de interés para el presente estudio, los cuales van siendo mencionados después del resumen de cada antecedente. A continuación se describe la documentación consultada:

PRIMERO: Fernández Baca C. & Flores E. fueron parte del Proyecto de Investigación: “PROPUESTA DE ESTANDARIZACIÓN DEL USO DE LOS PARÁMETROS DE DESCRIPCIÓN Y REPRESENTACIÓN DE SUELOS.” Realizado por el Concejo De Investigación UNSAAC-NUFIC (1991). El problema central es la diversificación de términos y nomenclaturas en la caracterización de suelos y sus propiedades para una misma zona. Por ello se ha identificado la metodología más conveniente y funcional en base a una serie de recopilaciones de estudios geotécnicos y textos. De esta forma, los términos usados se han unificado de modo que dos personas que la usen puedan llegar a similares resultados. Se ha dicho también, que esta investigación es más funcional sobre todo para el ámbito geográfico en el que ha sido desarrollado, es decir, la región Cusco ya que se emplea terminologías, gráficas, etc. de uso frecuente y ya conocido en este medio. En este trabajo se resalta la descripción de suelos como un complemento fundamental de la clasificación de suelos ya establecido según Normas (SUCS, AASHO).

Relevancia para la investigación: De este primer antecedente se ha tomado en cuenta tópicos de descripción de suelos para el ámbito local y regional, así como la importancia de complementar la identificación respecto a la tipología del suelo con ensayos prácticos en campo y su compatibilización con resultados de laboratorio.

SEGUNDO: Según el MANUAL DE ENSAYO DE MATERIALES PARA OBRAS VIALES MTC E (2000). Los perfiles estratigráficos deben obtenerse en base a perforaciones reales o datos de los cortes. La interpolación entre dichos sitios deberá hacerse con extremo cuidado y con la ayuda de toda la información geológica que se tenga disponible. Es aún más estricta para la extrapolación de datos. Aunque, en áreas locales no investigadas puede hacerse de manera tentativa solo cuando se conozca que existe geológicamente una disposición subsuperficial uniforme del suelo siendo la interpretación de responsabilidad del especialista.

Relevancia para la investigación: Este antecedente es una de las normativas peruanas que regula los procedimientos para la obtención de perfiles estratigráficos basados solamente en perforaciones e inspección directa. El interés para la presente investigación, es mostrar el marco referencial y legal de la normatividad vigente. Luego, buscar el planteamiento de otros procedimientos complementarios, como sería la obtención de estratigrafías mediante ensayos PDC con sistema de medición electrónica.

TERCERO: (Viscarra, 2006) Realizó “EL CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN Y SU APLICACIÓN EN LA EVALUACIÓN DE SUELOS” un proyecto de investigación para la Universidad Privada de Bolivia, con el objetivo principal de analizar la aplicación de estos equipos de auscultación como instrumentos prácticos y económicos en la evaluación de propiedades resistentes del suelo. Las variables del estudio fueron los valores de CBR, DCP, contenido de humedad y peso específico seco. La metodología seguida fue la realización de diversos ensayos de DCP en laboratorio, utilizando diferentes tipos de suelos locales representativos para la conformación de terraplenes. Entre las conclusiones principales fue que el contenido de humedad y peso específico seco presentaron gran influencia durante el desarrollo de pruebas DCP y se ha destacado la gran sensibilidad y confiabilidad que presentan los resultados para evaluar grados de compactación y homogeneidad de suelos en estudio.

Relevancia para la investigación: Esta investigación doctoral es relevante para el presente estudio, ya que en su desarrollo, realiza un análisis estadístico exhaustivo de numerosos datos procedentes de ensayos de penetración dinámica, siendo estas penetraciones por golpe. Entonces, constituye una referencia básica para el análisis estadístico. Además de sus similitudes en cuanto a la metodología de investigación.

CUARTO: (Cruz, 2015) Desarrolló “PÉRDIDA DE ENERGÍA EN LA AUSCULTACIÓN CON PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO (DPL)”, una tesis de investigación de la Universidad Nacional de san Antonio Abad del Cusco. La temática central se refiere a la interpretación teórica de la auscultación de suelos, centrándose en el estudio de los diferentes factores de pérdida de energía y su influencia en la reacción del suelo. Al estudiar y validar para la zona de estudio (Cusco) dichos factores pertenecientes a la fórmula general de hincas dinámicas se ha buscado aumentar la confiabilidad de los ensayos DPL en la aplicación de los estudios de Mecánica de Suelos. Para ello, se han realizado en laboratorio numerosas pruebas, usando sensores de movimiento para la fricción masa-guía a diferentes alturas de caída. Finalmente concluye en que los coeficientes de pérdida de energía se agrupan en tres grupos: interacción equipo-operador, los que dependen solo de los componentes propios del equipo e interacción equipo-suelo.

Relevancia para la investigación: Esta tesis de la misma casa de estudio es un buen referente para la presente investigación, pues abarca el análisis de los factores de pérdida de energía en la auscultación con DPL, en especial para la zona de estudio.

QUINTO: (Tupia & Alva, “EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DEL TERRENO POR MEDIO DE UN EQUIPO DE PENETRACION DINAMICA”, 2001), una investigación expuesta en el XI Congreso Ibero-Americano del Asfalto, Lima. Donde se expone una metodología para obtener información de las condiciones reales en la que se encuentra el terreno de cimentación de un pavimento y establecer en forma estadística; los resultados que se obtendrá en laboratorio por medio de un equipo dinámico (PDC), realizándose con suelos existentes en las carreteras del Perú, siguiendo los modelos matemáticos existentes y proporcionando relaciones aplicadas al Perú para determinar valores de CBR en base a los ensayos de PDC in situ. Se llegó a la conclusión de que al utilizar el equipo de Penetración Dinámica de Cono, no quiere decir que se deja de realizar los ensayos de CBR en laboratorio sino que permite obtener mayor información de la capacidad de soporte del suelo.

Relevancia para la investigación: Esta investigación se desarrolla en el ámbito geográfico nacional por lo que proporciona datos importantes de nuestro medio, así como el uso frecuente de los PDC para cubrir extensas áreas de estudio, resaltándose el hecho que no deben reemplazar los ensayos definitivos.

SEXTO: (Rodríguez, 2004) Realizó “USO Y APLICACIÓN DE SONDEOS DE PENETRACIÓN DE CONO EN CIMENTACIONES DE LA CIUDAD DE MÉXICO” una tesis de pre grado del Instituto Politécnico Nacional, con el propósito fundamental de recopilar información técnica publicada sobre los métodos de exploración con cono y principalmente la aplicación en ingeniería de cimentaciones de los resultados de exploración a través de correlaciones para la ciudad de México, poniendo en discusión las ventajas y desventajas de todos los tipos de penetrómetros de cono, es decir de penetrómetros estáticos y dinámicos con sus mejoras tecnológicas, usados en el cálculo de la resistencia a la penetración (q_c) para cimentaciones en la ciudad de México, llegándose a la conclusión general de que en la ciudad de México se han usado los conos eléctrico, mecánico y dinámico; destacándose en la actualidad el cono eléctrico por su bajo costo de adquisición de equipo, cables, consola y las barras para la perforación, además que la información brindada es rápida y precisa para diseños preliminares.

Relevancia para la investigación: De este documento es posible analizar algunas ventajas y desventajas de los penetrómetros dinámicos de cono con sus mejoras tecnológicas, lo que sirve de referencia para la presente tesis, en cuanto a la implementación del sistema de medición electrónica.

También refiere los bajos costos y mayor productividad de los penetrómetros con mejoras tecnológicas debido a su mecanismo de aplicación.

SÉPTIMO: (Rey, 2012) Realizó “USOS Y APLICACIONES DEL PENETRÓMETRO DE CONO CN - 973”, una tesis de investigación pre grado para el Instituto Tecnológico de Sonora de la ciudad de Obregón, México. El objetivo general fue la de mostrar el uso y aplicación del penetrómetro estático de cono del cuerpo de ingenieros de los EUA modelo CN-973 para la determinación de propiedades físicas de los suelos (humedad, peso específico seco y peso específico húmedo), para lo cual se realizaron ensayos de penetración con el modelo CN – 973 en un terreno de características particulares, de área extensa de terreno natural y con un poco de vegetación para este uso, además se tomaron muestras representativas alteradas de suelo para llevar a cabo las pruebas correspondientes en el laboratorio y así realizar las observaciones a los resultados. La tesis concluye afirmando que se han presentado correlaciones entre el IRC (índice de resistencia al cortante) y algunas propiedades del suelo, para que puedan determinarse de manera directa tanto el peso específico seco y peso específico húmedo, así como también porcentaje de humedad, en suelos con características similares al estudiado.

Relevancia para la investigación: Este antecedente trata principalmente del uso de un penetrómetro del tipo estático. El interés para la investigación son algunas relaciones respecto a los porcentajes de humedad e índices de resistencia.

OCTAVO: (Castañeda, 2014) desarrolló “CAPACIDAD PORTANTE DE LOS SUELOS DE FUNDACIÓN DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, EN LA ZONA NOROESTE Y SURESTE UTILIZANDO EL MÉTODO PENETRACIÓN DINÁMICA LIGERA (DPL) EN COMPARACIÓN CON EL MÉTODO POR CORTE DIRECTO”, una tesis de investigación de pre grado de la Universidad Nacional de Cajamarca, con el objetivo principal de determinar la capacidad portante de los suelos de fundación de la Universidad Nacional de Cajamarca, en la zona noroeste y sureste utilizando el método de Penetración Dinámica Ligera (DPL) en comparación con el método por Corte Directo. Para la obtención de resultados, se realizaron en total 5 ensayos DPL con 5 calicatas a cielo abierto, convenientemente distribuidas en el área de estudio y con una profundidad constante de tres metros para cada caso. Se llega a la conclusión en que la variación del ángulo de fricción interna varía entre 13.90° a 15.30° , siendo éstas arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras y de los resultados del Ensayo de DPL el número de golpes varía entre 10 y 22 que nos indica que se encuentra suelos arcillosos de media a alta plasticidad.

Relevancia para la investigación: Esta investigación presenta algunas semejanzas respecto a la aplicación de ensayos DPL en suelos arcillosos de plasticidad baja a media, como los del modelo experimental en el presente estudio. Además indica algunos índices como la variación del número de golpes en suelos con estas características.

2.2 EL SUELO

El suelo es la base de sustentación de todas las obras de Ingeniería, por ello la gran importancia de su estudio se ha desarrollado desde diferentes enfoques orientados al entendimiento de su naturaleza y diversas propiedades según el área de interés.

Ibañez & Gisber (2010) refieren que existe una serie de definiciones del concepto suelo desarrolladas por distintos autores a lo largo del tiempo. Entre los más destacados, se expone:

- *Joffe (1949)*: “Un cuerpo natural consistente en capas u horizontes de constituyentes orgánicos y/o minerales de espesor variable, que difieren del material parental en la morfología, sus propiedades físicas, químicas y minerales, y en sus características biológicas”.
- *Fitz Patrick (1980)*: “Suelo es una serie continua de espacio-tiempo que forma la parte superior de la corteza terrestre”.
- *Soil Science Society of America*: “Materia mineral no consolidada sobre la superficie de la tierra que ha sido sujeta e influenciada por los factores genéticos y factores ambientales del material parental, clima, organismos y topografía, todos actuando sobre un periodo de tiempo, produciendo un producto (suelo) que difiere del material del que deriva en muchas propiedades físicas, químicas, biológicas y características”.

A pesar de los diversos enfoques que se han tomado en el estudio de suelos, para la Ingeniería Geotécnica, por ende Civil, es fundamental conocer el comportamiento mecánico del suelo. Pues, este es el camino para el éxito en los proyectos que ameritan su campo de acción.

Es común creencia la de que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización. Pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían “vectorialmente”. En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y este es un hecho del que se hace abundante aplicación. (Juárez & Rico, 2010, p. 34)

De lo anteriormente mencionado, se entiende que es posible estudiar las propiedades de un suelo de manera sistemática y generalizada, a pesar de su gran variabilidad. Además resaltar la importancia de un conocimiento adecuado de su perfil estratigráfico.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS DEL SUELO

2.2.1.1 **Tamaño y Forma.**

En los granos gruesos del suelo las fuerzas predominantes son del tipo gravitacional, donde es de gran interés la disposición de partículas y dimensión de las mismas. En suelos de grano muy fino, en cambio, las fuerzas electromagnéticas y constitución interna toman una influencia significativa en el comportamiento mecánico del suelo. En suelos arcillosos, por ejemplo, el comportamiento mecánico se ve decididamente influido por su estructura en general y constitución mineralógica en particular. (Juárez & Rico, 2010)

En este sentido, la influencia del agua en el comportamiento mecánico del suelo es más significativo en aquellos que son de grano fino, en especial en partículas menores a las dos micras (0.002 mm) porque actúan fuerzas moleculares e interacción de partículas finas con partículas de agua.

Asimismo, Juárez & Rico (2010, p.76) refieren que la forma de las partículas del suelo tiene especial importancia en el comportamiento mecánico del mismo. Por ejemplo, en propiedades como la compresibilidad de arcillas se estima que la forma laminada de las partículas es preponderante. Además indican, que los suelos gruesos la forma característica es la equidimensional. Es decir, dimensiones de la partícula de magnitudes comparables, las cuales pueden considerarse como redondeada, la subredondeada, la subangulosa y la angulosa. Aunque estas descripciones de plana y alargada pueden ser omitidas en la descripción de suelos gravosos cuando la característica no es notoria. Asimismo, la textura toma mayor significado en este tipo de suelos, por ser una propiedad física basada en la apariencia visual de los tamaños de los granos.

El análisis del tamaño del grano es importante porque ayuda a identificar por ejemplo: si un suelo puede ser fácilmente drenado, altura estimada del ascenso capilar, conveniencia como material de construcción y como datos para sistemas de clasificación.

2.2.1.2 Estructuración.

El mecanismo de estructuración en gravas y arenas es verificable a simple vista, mientras que en limos y arcillas la estructuración es de carácter más complejo e hipotético.

Juárez & Rico, 2010 exponen algunos tipos de estructuras, de las cuales se destacan:

2.2.1.2.1 Estructuras simples.

Típicas en suelos de grano grueso. Así, “el comportamiento mecánico e hidráulico de un suelo de estructura simple, queda definido principalmente por dos características: la compacidad del manto y la orientación de sus partículas” (Juárez & Rico, 2010, p. 79).

Debe resaltarse que las estructuras a ser descritas son hipótesis de estructuración, cuyo tema sigue siendo objeto de estudio y discusión entre diversos autores.

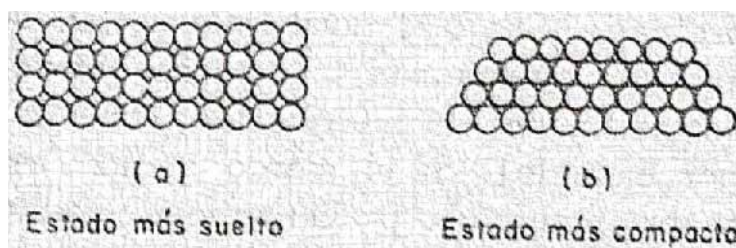


Figura 2.1. Representación de estructuras simples de partículas del suelo
Fuente: “Mecánica de Suelos”, Juárez Badillo & Rico 2010, p.79

2.2.1.2.2 Estructuras panaloides.

Típica en granos de pequeño tamaño, menores a 2 micras. Además de las fuerzas de gravitación que hacen que tiendan a sedimentarse están las fuerzas de adhesión que une partículas entre sí en forma de panal o difusas.

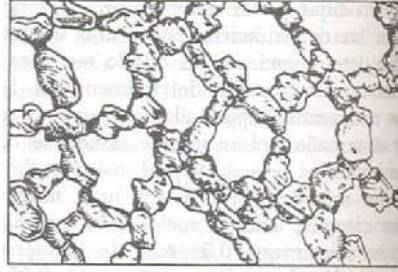


Figura 2.2. Representación de estructuras panaloides
Fuente: "Mecánica de Suelos", Juárez Badillo & Rico 2010, p.79

2.2.1.2.3 Estructuras floculentas.

También llamada panaloide de orden superior. Tiene la misma naturaleza de formación que en las estructuras panaloides con formas muy difusas, el volumen de sólido puede no ser mayor al 10%.

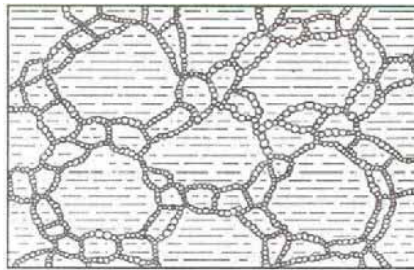


Figura 2.3. Estructura floculenta de partículas del suelo
Fuente: "Mecánica de Suelos", Juárez Badillo & Rico 2010, p.79

2.2.1.2.4 Estructuras compuestas.

Son estructuras reales de los suelos, donde encontramos esqueletos constituidos por granos gruesos y masas coloidales de flóculos que proporcionan nexo entre ellos. Ya que las estructuras anteriores raramente se encuentran puras en la naturaleza.



a) En formación

b) Ya formada

Figura 2.4. Estructuras compuestas de partículas del suelo
Fuente: "Mecánica de Suelos", Juárez Badillo & Rico 2010, p.79

2.2.1.3 *Suelos cohesivos y no cohesivos*

Como característica física, se dice que un suelo es cohesivo si sus granos se pegan ante un humedecimiento y bajo un subsecuente secado, sigue presentando adherencia entre ellos. En cambio, es no cohesivo si sus granos se despegan fácilmente después del secado.

2.2.2 GRANULOMETRÍA

Es un ensayo destructivo del suelo. Dada su naturaleza, al realizarlo se pierde la compacidad y orientación de partículas. Que, como se ha acotado son determinantes en el comportamiento mecánico e hidráulico del suelo, especialmente en estructuras simples.

Juárez & Rico (2010) afirman: En suelos finos en estado inalterado, las propiedades mecánicas e hidráulicas dependen en tal grado de su estructuración e historia geológica, que el conocimiento de su granulometría, resulta totalmente inútil (...) Solamente en suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de lo referente a las propiedades físicas del material. (p.97)

En efecto, Allen Hazen definió dos parámetros conocidos como coeficientes de uniformidad, como una medida simple de uniformidad del suelo, y el otro es el coeficiente de curvatura, como dato complementario necesario para medir la gradación.

En el análisis granulométrico, el valor numérico del Coeficiente de uniformidad decrece conforme esta aumenta. Según refieren Juárez & Rico (2010, p. 101), los suelos con C_u menor de tres (3) se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales muy uniformes rara vez presentan C_u menor de dos (2). En cuanto al coeficiente de curvatura, acotan, que esta relación tiene un valor entre 1 y 3 en suelos bien graduados, con amplio margen de tamaños de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio. Se han desarrollado diversos sistemas de Clasificación de Suelos, basados en la distribución del tamaño, las cuales presentan algunas limitaciones y son de características mayormente descriptivas⁶.

Por otro lado, la granulometría puede servir como una manera tosca de medir la permeabilidad en arenas uniformes comprendidas entre 0.1 y 3mm de diámetro efectivo, esto, mediante la fórmula de Hazen (Juárez & Rico, 2010, p.199). Asimismo, para calcular la permeabilidad en suelos estratificados es necesario determinar el coeficiente de permeabilidad tanto en dirección paralela como normal a los planos de estratificación. Sin embargo, dada las dificultades que presentan los ensayos de campo y laboratorio en la determinación de la permeabilidad, el valor estimado usando la granulometría adquiere cierta importancia como valor de contrastación. Por ello es fundamental el conocimiento de la estratigrafía.

⁶ Algunos de los sistemas de clasificación de suelos basados en criterios de granulometría son: la Clasificación Internacional, desarrollada en Suecia con decimales dos (2.0, 0.02, 0.002) y otra es la Clasificación M.I.T., desarrollada por Gilboy donde se usan términos como arena gruesa, media y fina.

2.2.3 PLASTICIDAD

2.2.3.1 Definición

“En Mecánica de Suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse” (Juárez & Rico, 2010, p. 127). Este concepto más completo de plasticidad diferenciaría una arcilla de una arena fina y húmeda, ya que esta última también puede deformarse y remodelarse sin agrietamiento siempre que la deformación sea lenta. Así, las Teorías de Plasticidad estarían relacionadas con las de Esfuerzo-Deformación, aunque su campo de estudio sea materia de mayor investigación.

Los estudios de Atterberg, Terzaghi y Gold Schmidt llevaron a las siguientes afirmaciones:

1.- La plasticidad no es una propiedad permanente de arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Además, se debe a la carga eléctrica y forma laminar de las partículas coloidales que la constituyen.

2.- Para expresar de forma conveniente la plasticidad se necesita utilizar dos parámetros: el límite líquido y límite plástico, cuya diferencia demarca el intervalo de plasticidad.

2.2.3.2 Límites de Consistencia

Atterberg propuso los siguientes estados de consistencia de un suelo: líquido, semilíquido, plástico, semisólido y sólido. Así, definió límites o fronteras entre un estado u otro, de los cuales tres son los más usados en la ingeniería geotécnica: límite líquido, límite plástico y límite de contracción.

2.2.3.2.1 Límite Líquido.

Se define como “el contenido de agua por debajo del cual el suelo no se comporta ya como un material plástico” (Bowles, 2000, p. 36). La determinación del límite líquido se realiza mediante el ensayo estandarizado de La Cuchara de Casagrande, con la cual se obtienen puntos para determinar la curva de fluidez. Así, la ordenada de esa curva correspondiente a la abscisa de 25 golpes es el contenido de agua coincidente con el límite líquido de Atterberg. Además, A. Casagrande enunció que el número de golpes para cerrar la ranura en la prueba, estaría estrechamente relacionado con la resistencia al corte y tenacidad, especialmente en suelos plásticos (arcillas).

2.2.3.2.2 Límite Plástico.

Es “el contenido de agua por encima del cual el suelo se comporta como un líquido viscoso” (Bowles, 2000). Su determinación se da mediante rolado manual de rollitos de suelo hasta 3mm y aunque este más sometido a la operatividad del técnico, los resultados pueden ser reproducibles entre 1 a 3%.

2.2.3.3 *Plasticidad en arcillas*

Los límites de consistencia en suelos no cohesivos carecen de sentido físico y no conducen a resultados de interés. Por ejemplo, en arenas es muy difícil hacer los rollitos para el límite plástico, entonces es fácil reconocer la poca o nula plasticidad. Bowles (2000) afirma:

Un suelo cohesivo puede ser no plástico, plástico o un fluido viscoso, dependiendo del valor instantáneo del contenido de agua. Un suelo sin cohesión no presenta una línea de demarcación entre los estados plástico y no plástico, ya que este tipo de suelo es no plástico para todos los intervalos de contenido de agua. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, un suelo sin cohesión con un alto contenido de agua puede actuar como un fluido viscoso. (p.36)

No obstante, especialmente en suelos arcillosos, la plasticidad constituye una importante propiedad estrechamente relacionada con las propiedades fisicoquímicas del suelo, que son determinantes en propiedades mecánicas como la permeabilidad y compresibilidad. Esta última, por ejemplo aumenta con el valor del límite líquido, permaneciendo todos los demás factores constantes. Siendo la forma laminar de las partículas (y tal vez una estructuración del tipo castillo de naipes) y no el tamaño lo que determina la compresibilidad en suelos finos (Juárez & Rico, 2010).

Se conoce que los valores de los límites de consistencia son muy sensibles a factores como: el tiempo transcurrido entre la preparación de la muestra y ejecución de las pruebas, adición de sustancias como sales (disminuyen Límite Líquido), bases sódicas (que aumentan considerablemente los límites). Al respecto, Juárez & Rico (2010) enuncian:

El hecho de que la plasticidad de las arcillas sea una propiedad tan sensible que pueda disminuir o aumentar con pequeños cambios en el procedimiento, es desafortunado desde el punto de vista de las pruebas de rutina, pero muy ventajoso para diferenciar arcillas de apariencia similar... (p.138)

Además refieren que otra aplicación de los límites, se da en cuanto a la tixotropía en arcillas⁷, pues una medida de esta propiedad puede tenerse evaluando los valores del **límite líquido** de una arcilla inmediatamente tras el remoldeo y un tiempo después. Si la arcilla es tixotrópica, el valor obtenido en el segundo caso será mayor que el primeramente obtenido.

⁷ Las arcillas montmoriloníticas son tixotrópicas en mayor grado, un tipo útil para la ingeniería es la bentonita que pierde temporalmente sus propiedades de resistencia tras un amasado enérgico y sirve como lubricante en las perforaciones.

2.2.4 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL SUELO

En este ítem solamente se menciona algunas propiedades físico-mecánicas por ser de mayor interés para los objetivos específicos de la presente investigación. No obstante, no se resta importancia a la observación y análisis de otras propiedades fundamentales en el comportamiento mecánico de un suelo, las cuáles, por ahora, no son materia de investigación.

2.2.4.1 **Compacidad.**

El término compacidad se refiere al grado de acomodo alcanzado por las partículas del suelo. Así, mientras más compacto, disminuye el volumen de vacíos y, por ende la capacidad de deformación bajo carga. En una estructura simple (gravas y arenas), la compacidad se puede determinar mediante una relación empírica de Terzaghi llamada compacidad relativa que depende de las relaciones de vacío correspondientes a los estados: más suelto, más compacto y natural.

2.2.4.2 **Humedad natural.**

La humedad natural de un suelo corresponde al valor instantáneo del contenido real de agua presente en el terreno, el cual depende de la relación de vacíos, de la ubicación de la muestra y de los factores climáticos. La humedad se expresa en porcentaje como una relación de pesos del contenido de agua y parte sólida del suelo. “No es raro que los suelos marinos y orgánicos lagunares tengan valores de contenido de agua de hasta 300-400 por ciento, pero el contenido natural de agua para la mayoría de los suelos está por debajo del 60 por ciento” (Bowles, 2000, p. 27).

2.2.4.3 **Grado de saturación.**

Es una propiedad fundamental de la Mecánica de suelos que “Expresa la relación entre el agua presente en los poros del suelo con la cantidad total que podría estar presente si todos los poros estuvieran llenos de agua (...)” (Bowles, 2000).

En las nuevas tendencias de la Mecánica de Suelos, se está profundizando cada vez más el estudio de suelos parcialmente saturados y propiedades como la succión del suelo, fenómeno de histéresis, relacionados directamente con la variación del grado de saturación. Esto, porque los suelos no saturados son más complejos de estudiar y acarrear diversos problemas en los diseños.

2.2.4.4 **Grado de compactación.**

“Se define como grado de compactación de un suelo compactado la relación, en porcentaje, entre el peso específico seco obtenido en la obra, y el máximo especificado en el laboratorio para tal obra”. (Bowles, 2000)

Esta variable es de mucha utilidad en los trabajos de control de calidad en la compactación de estratos, por ejemplo, del contratista por parte del supervisor. No obstante, para determinar el grado de compactación se necesita conocer el contenido de agua o humedad, el cual mediante métodos tradicionales demora al menos 24 horas en su determinación. Este hecho, lógicamente genera inconvenientes respecto a tiempos y productividad, pues probablemente al hacer un control de calidad

en la compactación de una capa y para cuando se tengan sus resultados, ya se habrá compactado otras encima. Actualmente, se ha tratado de resolver este problema de control de compactación mediante métodos que no impliquen la determinación del contenido de agua (método Hilf), o bien determinar esta última in situ con aparatos especiales de tecnología nuclear (higrómetros digitales).

2.2.4.4.1 Pruebas de Compactación.

Las pruebas de compactación están pensadas para estudiar los distintos factores que gobiernan la compactación de suelos. El método técnico utilizado en la presente investigación es la Prueba Proctor Estándar o A.A.S.H.O. (American Association of State Highway Officials). La prueba estándar de Proctor realizada en el laboratorio, tiene los siguientes fines:

- Servir como referencia para el planteamiento de procedimientos de compactación y conformación de estratos en el modelo experimental.
- Controlar el trabajo en campo para mantener los valores cuantitativamente diferenciados de densidad en el modelo experimental (pozo estratificado)

2.2.5 DESCRIPCIÓN DE SUELOS

2.2.5.1 Definición y funcionalidad.

Todos los procesos de exploración de un suelo comienzan con la observación de características y conductas del suelo percibidas a través de nuestros sentidos. Consecuentemente, se trata de inferir sus propiedades relacionando lo observado con experiencias pasadas o lo ya conocido. Es donde la descripción juega un papel muy importante constituyendo el registro adecuado de la “realidad observable”; primero para orientar sus estudios definitivos eligiendo métodos adecuados respecto a propiedades cuantificables, y segundo para compatibilizar los resultados finales. Flores & Fernández Baca (1991) refieren que la descripción de suelos es fundamental por los siguientes motivos:

- ☐ Complementa la clasificación de suelos e uniformiza la terminología para lograr correlacionar trabajos. De esta manera sirve como experiencia acumulada para nuevos proyectos en un terreno o zona. Por ejemplo: antecedentes para la planificación urbanística de una ciudad, microzonificación sísmica, etc.
- ☐ Usa patrones teóricos y físicos de tal forma que reduce la subjetividad de las apreciaciones.
- ☐ Es un medio de control y forma de validación a los resultados de los ensayos de laboratorio.
- ☐ La representación estratigráfica es un instrumento importante y su representatividad adecuada constituye un aporte a la presentación y evaluación de los suelos.

2.2.5.2 Aspectos importantes de la descripción de suelos.

Profundidad y potencia.- Los estratos se pueden diferenciar a simple inspección mediante indicadores como el cambio de color, cambio del tipo de material y el grado de definición de las fronteras, espesor de transición entre ellas.

Material.- Se opta por describir el material predominante, material secundario y por último el material complementario.

Características del estrato.- Observando el estado natural del suelo y enfocando los siguientes: contenido de agua (muy seco, seco, húmedo), homogeneidad del estrato, inclinación, impurezas (indicadores de reciente formación), origen probable, color. Por ejemplo, para el registro del color, viso e intensidad, se puede recurrir a la carta de MUNSELL de propiedad de la SOIL-TEST (USA), que presenta varias tablas con variedad de colores; tomando en cuenta que está orientado para fines agrícolas; (el color como indicador de propiedades mineralógicas y químicas).

2.2.6 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Desde un principio la Mecánica de Suelos ha desarrollado sistemas de Clasificación con el fin de sistematizar de mejor manera la infinidad de suelos existentes. Al principio las agrupaciones se basaron en criterios puramente descriptivos, luego se basaron en el análisis granulométrico (como se ha visto en clasificaciones anteriores), los cuales hoy por hoy han sido superados.

Actualmente, existen diversos sistemas de clasificación de suelos bastante desarrollados y aceptados. Entre ellos están el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Ambos de mayor aceptación y uso, se caracterizan por lo siguiente:

- Para la clasificación general o grupos, usan el análisis granulométrico el cual es más influyente en la fracción gruesa mediante cribado que revela el tamaño y distribución de granos gruesos.
- Los límites de consistencia forman parte del proceso de clasificación para afinar características del comportamiento del material respecto a plasticidad, sobretodo en la fracción fina (menor a la malla N°200).
- Requieren especial atención en la selección de muestras para la realización de ensayos necesarios en el proceso de clasificación (granulometría, límites de consistencia).

2.2.6.1 Sistema Unificado de Clasificación (SUCS)

Ampliamente utilizado a nivel mundial, derivado del Sistema de Clasificación de Aeropuertos, el cual habría sido desarrollado y propuesto originalmente por A. Casagrande en 1942, siendo adoptado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos para la construcción de Aeropistas.

Adicionalmente, Juárez & Rico (2010) refieren que este sistema reconoce que las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos constituidos por partículas menores que la malla N° 200, pueden deducirse cualitativamente a partir de sus características de plasticidad.

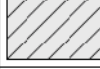
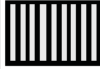
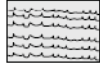
DIVISIONES MAYORES		SÍMBOLO		DESCRIPCIÓN	SUELOS FINOS	LIMOS Y ARCILLAS (LL < 50)	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
		SUCS	GRÁFICO						
SUELOS GRANULARES	GRAVA Y SUELOS GRAVOSOS	GW		GRAVA BIEN GRADUADA					ARCILLA INORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD
		GP		GRAVA MAL GRADUADA					
		GM		GRAVA LIMOSA					
		GC		GRAVA ARCILLOSA					
	ARENA Y SUELOS ARENOSOS	SW		ARENA BIEN GRADUADA		LIMOS Y ARCILLAS (LL > 50)			LIMO INORGÁNICO DE ALTA PLASTICIDAD
		SP		ARENA MAL GRADUADA					
		SM		ARENA LIMOSA					
		SC		ARENA ARCILLOSA					
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS						Pt		TURBA Y OTROS SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS.	

Figura 2.5. Simbología de suelos (Referencial)

Fuente: Extraído de la Norma E-050 Suelos y Cimentaciones, p. 410

2.2.6.2 Importancia y necesidad de los sistemas de Clasificación de Suelos

Un sistema de clasificación de suelos puede ser considerado como un lenguaje de comunicación, puesto que busca dar la mayor información y orientación acerca de las propiedades de un suelo en cuestión de manera comprensible en cualquier parte del mundo. Permitiendo así, aprovechar la experiencia en ingeniería adquirida por otros.

Es evidente que un sistema de clasificación que pretenda cubrir hoy las necesidades correspondientes, debe estar basado en las propiedades mecánicas de los suelos, por ser éstas lo fundamental para las aplicaciones ingenieriles. A la vez esta base debe ser preponderantemente cualitativa, puesto que un sistema que incluyese relaciones cuantitativas y de detalle respecto a las propiedades mecánicas resultaría, sin duda, excesivamente complicado y de engorrosa aplicación práctica (...); de hecho, una de las más importantes funciones de un sistema sería proporcionar la máxima información normativa, a partir de la cual el técnico sepa en qué dirección profundizar su investigación. (Juárez & Rico, 2010, p. 149)

De la referencia anterior, se resalta la necesidad de seguir desarrollando sistemas de clasificación con mejoras continuas y complementarias a los sistemas ya existentes; con enfoque en la conducta físico-mecánica de los suelos. Por supuesto, que el uso de uno u otro sistema de clasificación no elimina la necesidad de pruebas específicas para la determinación de propiedades del suelo.

2.3 ENSAYOS IN SITU DE SUELOS

Las Técnicas de Investigación de Campo aplicables en los estudios de Mecánica de suelos son las indicadas en la siguiente tabla.

Tabla 2.1.
Técnicas de investigación en campo

TÉCNICA	NORMA APLICABLE
Método de ensayo de penetración estándar SPT	NTP 339.133 (ASTM D 1586)
Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería(sistema unificado de clasificación de suelos SUCS)	NTP 339.134 (ASTM D 2487)
Densidad in-situ mediante el método del cono de arena	NTP 339.143 (ASTM D1556)
Densidad in-situ mediante métodos nucleares (profundidad superficial)	NTP 339.144 (ASTM D2922)
Ensayo de penetración cuasi-estática profunda de suelos con cono y cono de fricción	NTP 339.148 (ASTM D 3441)
Descripción e identificación de suelos (Procedimiento visual – manual)	NTP 339.150 (ASTM D 2488)
Método de ensayo normalizado para la capacidad portante del suelo por carga estática y para cimientos aislados	NTP 339.153 (ASTM D 1194)
Método normalizado para ensayo de corte por veleta de campo de suelos cohesivos	NTP 339.155 (ASTM D 2573)
Método de ensayo normalizado para la auscultación con penetrómetro dinámico ligero de punta cónica (DPL)	NTE 339.159 (DIN4094)
Norma práctica para la investigación y muestreo de suelos por perforaciones con barrena	NTP 339.161 (ASTM D 1452)
Guía normalizada para caracterización de campo con fines de diseño de ingeniería y construcción	NTP 339.162 (ASTM D 420)
Método de ensayo normalizado de corte por veleta en miniatura de laboratorio en suelos finos arcillosos saturados.	NTP 339.168 (ASTM D 4648)
Práctica normalizada para la perforación de núcleos de roca y muestreo de roca para investigación del sitio.	NTP 339.173 (ASTM D 2113)
Densidad in-situ mediante el método del reemplazo con agua en un pozo de exploración	NTP 339.253 (ASTM D5030)
Densidad in-situ mediante el método del balón de jebe	ASTM D2167
Cono Dinámico Superpesado (DPSH)	UNE 103-801:1994
Cono Dinámico Tipo Peck	UNE 103-801:1994

Aquí se muestran las diferentes técnicas de investigación avaladas por la norma peruana. La mayoría corresponde a ligeras modificaciones o modelos similares a las normas americanas.

Fuente: Esta tabla fue extraída de la Norma E050 Suelos y Cimentaciones Art. 10.1.

Los ensayos in-situ requieren investigación adicional de suelos para su interpretación. Algunos de ellos, como el Penetrómetro Dinámico Ligero de punta cónica (DPL), Penetrómetro Dinámico Súper Pesado (DPSH), Cono dinámico tipo Peck (CTP), entre otros, evalúan la resistencia de un terreno por medio de la penetración con diferentes tipos de equipos y se caracterizan por:

- No sustituir al Ensayo de Penetración Estándar (SPT), y suelen correlacionarse con él.
- No aplicarse a fondo de calicatas por pérdida de confinamiento.
- Determinar condiciones de cimentación, siempre que se conozca la estratigrafía mediante calicatas, trincheras o pozos.

2.3.1 POZOS, CALICATAS O TRINCHERAS

Proporcionan una visión directa de la estratificación de los suelos y de la presencia de cristales o bolsas de material más débil. Facilitan la toma de muestras de suelo cortadas a mano, evitando la alteración. Son especialmente valiosos para investigar la naturaleza del material de relleno, ya que las capas de depósitos sueltos o material deteriorado se pueden reconocer enseguida. De hecho, los pozos de prueba o las zanjas son el único medio normado para obtener información pertinente en terrenos con relleno o con depósitos naturales muy variados.

2.3.1.1 **Ventajas.**

De ser factible poder ingresar a una excavación a cielo abierto, las ventajas son las siguientes:

- Auscultación directa del terreno precisando el espesor de cada estrato.
- Identificación in situ del terreno siguiendo las Norma ASTM.
- Extracción de muestras alteradas para ensayos de clasificación.
- Extracción cuando sea posible de muestras inalteradas para la ejecución de ensayos especiales de laboratorio.
- Ejecución de ensayos de veleta de bolsillo, penetrómetro portátil y otros en cada estrato.
- Ejecución de ensayos de densidad natural al interior de cada calicata por medio del ensayo de cono de arena, siguiendo la norma ASTM D1556.

2.3.1.2 **Desventajas.**

Aunque apreciar en forma directa el interior de las calicatas por un ingeniero especialista en mecánica de suelos es lo mejor que podría suceder; esto no siempre es posible en virtud de la naturaleza misma del terreno sobre todo por la presencia de suelos demasiado inestables como rellenos sanitarios, desmontes muy sueltos, arenas extremadamente sueltas o el nivel freático muy superficial.

2.3.2 PENETRÓMETROS DE PUNTA CÓNICA

Constituyen un método no destructivo capaz de estimar la capacidad estructural y otras propiedades de resistencia in situ del suelo en estudio. Tales equipos pueden ser utilizados en: Identificación de tramos homogéneos, control de la construcción de las distintas capas de pavimento y determinación de la eficiencia de equipos de compactación, evaluación de un suelo colapsable, estabilidad de taludes, entre otros (Cassan, 1982).

Dentro de la familia de estos equipos se encuentran los penetrómetros de punta cónica de naturaleza estática y dinámica, diferenciados por su mecanismo de accionamiento al auscultar los suelos.

Un *Penetrómetro Estático de Cono* (CPT) se puede utilizar para evaluar la consistencia del suelo mediante la determinación de nivel de compactación y la capacidad de carga del suelo. Es especialmente útil en la evaluación de cimentaciones superficiales y sub-bases de pavimento donde se utilizan suelos blandos y de grano fino.

Se utiliza en suelos de grano fino y suave en la conformación de pavimentos o explanadas de poca profundidad para evaluar la consistencia del suelo, el nivel de compactación y capacidad de soporte. Los convencionales cuentan con un manómetro con 0-70kg/cm² de escala para lectura directa de la tensión de cono. Además de diseños de doble varilla elimina factor de fricción del suelo.

Un *Penetrómetro Dinámico de Cono* (PDC o DCP)⁸ mide la penetración dinámica por golpe, a través del terreno natural o suelo fundación, la energía aplicada puede ser variable según el peso del martillo y altura de caída. En el siguiente ítem se desarrolla más este tipo de equipos por ser materia principal de estudio para la presente investigación. Asimismo, se muestra algunos ejemplos de los PDCs más utilizados en el mercado.

2.3.3 PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (PDC)

2.3.3.1 *Ámbito local y nacional.*

En el Perú y por ende, también en la ciudad del Cusco los requisitos para la ejecución de Estudios de Mecánica de Suelos con fines de cimentación, de edificaciones y otras obras indicadas están establecidos por la Norma Técnica de Edificación E.050 SUELOS Y CIMENTACIONES. Particularmente, este ensayo de auscultación se encuentra normado por la NTP 339.159:2001. Mediante el “Método de Ensayo Normalizado para la auscultación con penetrómetro dinámico ligero de punta cónica (DPL)”. Aceptación ampliamente utilizada en el Perú por su mención en la Norma. De lo expuesto, se entiende que un PDL es un penetrómetro dinámico de Cono considerado como un ensayo de auscultación dinámica.

⁸ NTP 339.159 (DIN 4094)

Respecto a su aplicación ingenieril, actualmente la Normatividad peruana menciona:

- Por ser clasificada como una auscultación dinámica, requiere de investigación adicional, por lo que los parámetros obtenidos deben ser correlacionados con los parámetros del SPT (N) en el sitio de estudio, o en el caso de rellenos controlados, con el grado de compactación.
- Su aplicación más favorable se da en suelos del tipo SP, con uso restringido en suelos SW, SM y no recomendable en el fondo de calicatas, debido a la pérdida de confinamiento.
- Para determinar las condiciones de cimentación sobre la base de auscultaciones dinámicas, debe *conocerse* previamente la estratigrafía del terreno obtenida mediante la ejecución de calicatas, trincheras o perforaciones. (RNE 2017)

De aquí se desprende la importancia de conocer e identificar las capas del terreno que se está atravesando antes que nada. Puesto que en base a ello, recién se podría estimar las condiciones de frontera, parámetros de resistencia u otros aplicando auscultaciones y correlaciones con el SPT.

De la Norma Peruana se puede deducir que actualmente, el **perfil estratigráfico** solo puede ser determinada mediante inspección directa (calicatas, pozos y trincheras) o muestreo en perforaciones. Sin embargo hoy en día, en la práctica ingenieril se están estimando también los perfiles estratigráficos a través de las auscultaciones dinámicas, extendiendo así, de manera empírica sus funciones. Esta práctica se ha generalizado porque en el estudio de suelos de diversos proyectos de Ingeniería ha dado mayormente resultados confiables. En adición, presenta algunas ventajas frente a las excavaciones de inspección directa y muestreo en cuanto a costo, accesibilidad, dificultad de trabajo y profundidad de investigación.

En suma, determinar la estratigrafía del suelo es un tema evidentemente no desarrollado aun de manera amplia y clara en la Norma Técnica Peruana vigente. Por tanto, esta necesidad demanda una investigación.

2.3.3.1.1 Descripción

El modelo consta de una varilla de acero de penetración de 16mm de diámetro. En su extremo inferior un cono de acero temperado de 60 grados y 20mm de diámetro. El PDC es introducido en el suelo por un martillo deslizante de 8kg que cae desde una altura de 575mm. Para realizar las lecturas posee una regla de medición sujeta al instrumento por dos soportes, un soporte superior unido al yunque que sirve de referencia para las lecturas y un soporte inferior fijo a la regla y unido a la barra de penetración. En la fig. 2.6 se muestra el esquema de un penetrómetro dinámico estandarizado en la norma peruana E-050 Suelos y Cimentaciones.

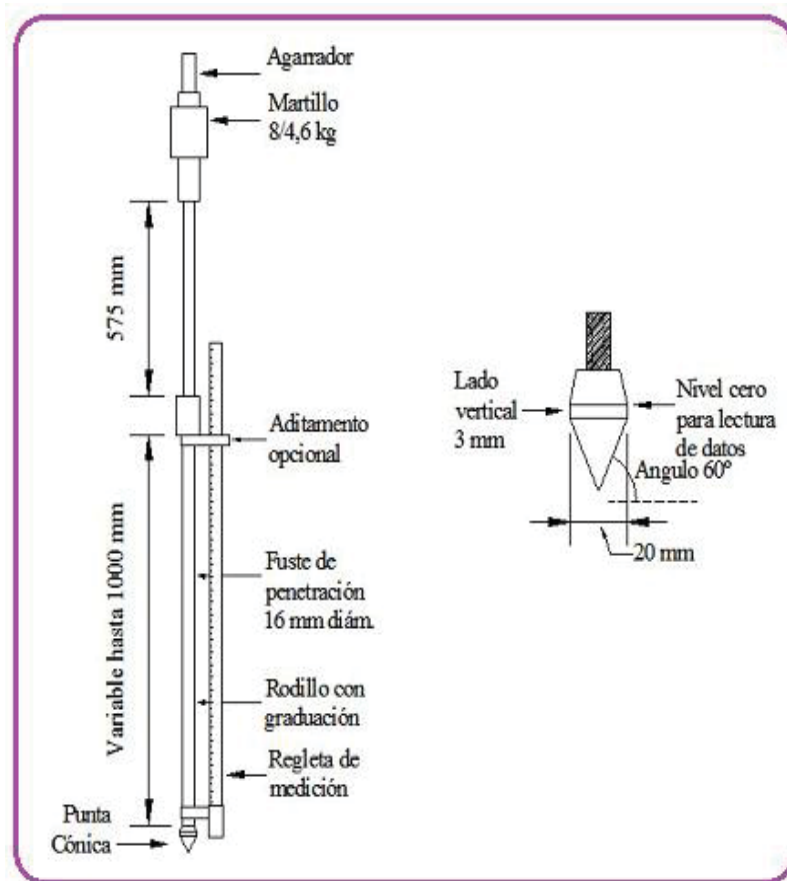


Figura 2.6. Esquema de un equipo DPL
Fuente: Norma E050 suelos y cimentaciones Art. 10.1

2.3.3.1.2 Curva obtenida

En la siguiente figura se muestra una curva PDC con su uso convencional (conteo manual por cada 10cm de penetración). Hoy en día existe una gama de variedades de penetrómetros “DPC”, variando la altura de caída y el peso de la masa, pero cabe recalcar que el cono es constante en cada una de ellas y que se toma en cuenta la energía específica de golpe de cada tipo de Penetrómetro. Los resultados de estos ensayos son usados referencialmente sólo para calificar e interpretar la calidad de los suelos a profundidades inalcanzables.

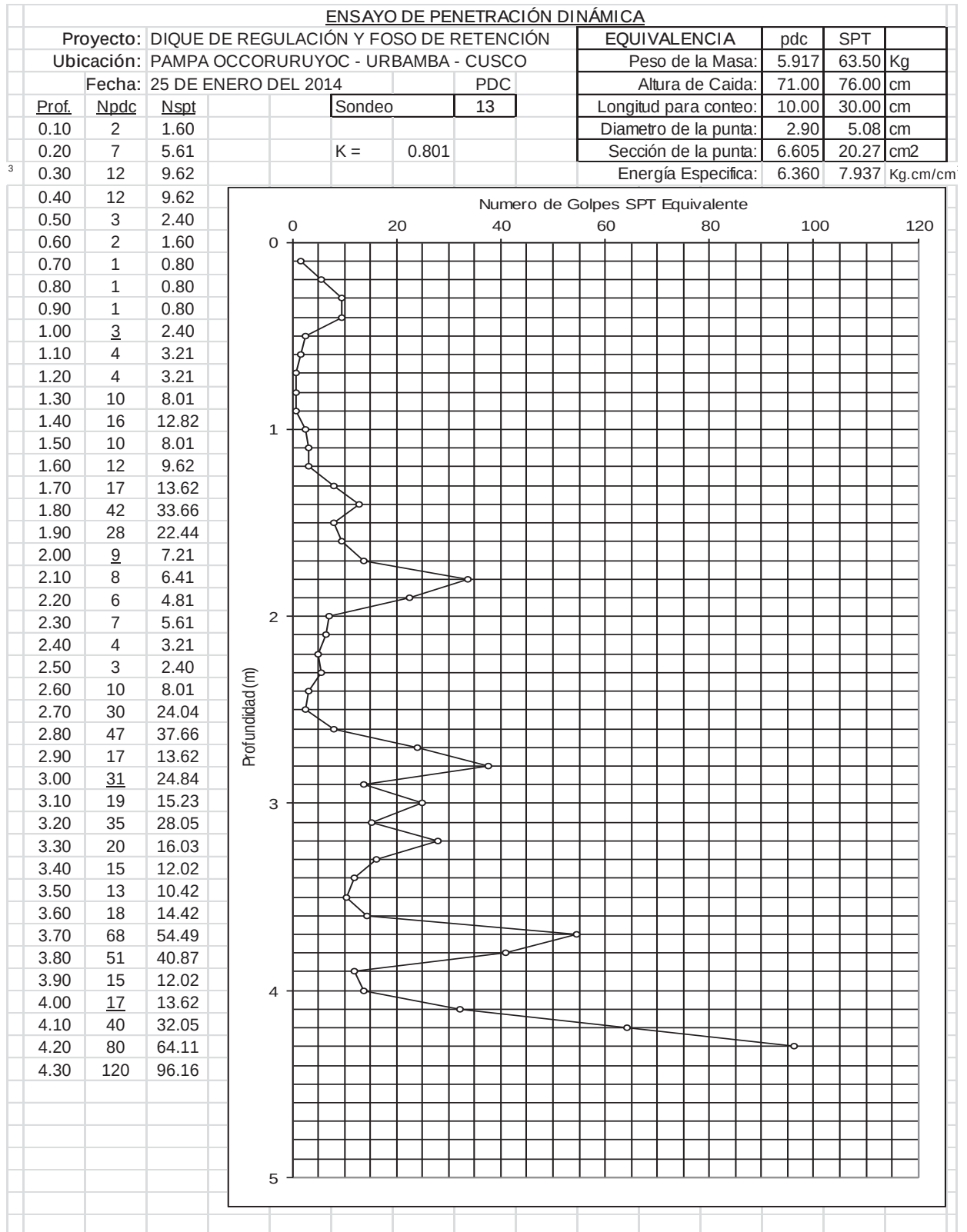


Figura 2.7. Curva obtenida con un penetrómetro convencional.
Fuente: Extraído de un EMS a cargo del MSc. Ing. Carlos Fernández Baca Vidal.

2.3.3.2 *Ámbito mundial.*

2.3.3.2.1 *DCP de Masa Dual.-*

Desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército, Penetrómetro dinámico de cono (DCP), un método de prueba para determinar rápidamente valores de CBR in-situ de la base y sub base de pavimentos. DCP se utilizan principalmente para determinar la resistencia al corte del suelo in situ, en la construcción de carreteras con los valores de CBR desde 0,5 a 100%. Ellos pueden utilizarse fácilmente para profundidades de 30 pulgadas a 6 pies con varillas de accionamiento y extensiones opcionales. El equipo viene implementado con una escala, una tabla para calcular valores de CBR. La punta cónica suele ser desechable con diámetro en la base de 20 milímetros, o sea 8 milímetros más grande que la del eje de extensión.

Las conexiones son roscadas o con pines de conexión rápida. Martillo de fácil agarre mecanizado en la cara posterior de la brida proporcionando la elevación fácil y antideslizante, cuando se realiza una prueba. Asimismo, el martillo de doble masa puede convertirse rápidamente a una sola unidad de masa mediante la eliminación de la manga exterior para su uso en suelos más débiles que tienen bajos valores de CBR o evaluaciones de cimentación.



Imagen 2.1. DCP de masa dual.
Fuente: Catálogo Nro11. HUMBOLDT, p. 22

2.3.3.2.2 *DCP para pruebas in situ de poca profundidad.-*

Para pruebas in situ a profundidades pequeñas. Desarrollado inicialmente por George Sowers, utiliza una masa de acero de 15 lb y altura de caída de 20", golpeando un yunque para penetrar un cono cuyo diámetro es 1,5" y ángulo de 45 °. El DCP puede ser utilizado eficazmente en casi todos los tipos de suelos a profundidades de 15 a 20 ft. (4,6 a 6,1 m). Los componentes son de zinc-plata y los conos son tratados térmicamente. El cono puede ser reemplazado con un tubo de accionamiento de conjunto (tubos Shelby) para la recogida de muestras de 3" x 10" (7,6 x 25,4 cm). Adicionalmente también puede cambiarse el martillo por un mango timón.



Imagen 2.2. DCP para pruebas de poca profundidad.
Fuente: Catálogo Nro.11. HUMBOLDT, p. 23

2.3.3.2.3 DCP de masa única.-

El DCP de masa única (10.1 lb o 4.5 Kg) de rápida conexión es utilizado para estimar la resistencia al corte del suelo débil con un CBR menos de 20%. Se puede utilizar para evaluar la resistencia en un suelo no perturbado o materiales compactados, grosor del material. Ideal para aplicaciones de construcción horizontales, tales como cimentaciones superficiales, zapatas y los hombros del pavimento. Típicamente se usa para evaluar las propiedades del material hasta una profundidad de 36 in (914 mm) por debajo de la superficie. Además, con el uso de Extensiones de 24" se puede aumentar a 6 pies (2 m). Este equipo viene con una barra de accionamiento de 37,75" (95.8 cm) marcada en incrementos de cada 2" (5cm) para medir el número de golpes en cada marca. Además posee un martillo deslizante con caída de 22.6" (575 mm) y con una tolerancia de 0.039in. (1,0 mm). La punta es reutilizable, tiene un ángulo de 60° con una tolerancia de 1 °; el diámetro base de la punta es 0.790" (20 mm) con una tolerancia de 0.010" (0.25mm).



Imagen 2.3. DCP de masa única.
Fuente: Catálogo Nro.11. HUMBOLDT, p. 23

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE UN PDC CON MEDICIÓN ELECTRÓNICA

3 DESARROLLO DE UN PDC CON MEDICIÓN ELECTRÓNICA

3.1 DESARROLLO DE LOS PRIMEROS PROTOTIPOS

El equipo desarrollado es un Penetrómetro Dinámico de punta Cónica (PDC de fabricación local), en el cual se ha incorporado sensores de medición, ultrasonido y sonido, de tal manera que mediante el desarrollo de un software se obtiene la longitud de penetración por cada golpe del martillo, dichas medidas a su vez son almacenadas en una memoria MicroSD.

La metodología adoptada para el desarrollo del equipo PDC con sistema electrónica fue la de “Ensayo-Error”, dado que después de obtener cada prototipo, éstos eran llevados a campo para sus respectivas pruebas y así encontrar deficiencias o problemas que posteriormente se solucionaban respectivamente con un siguiente prototipo.

A continuación se muestra la evolución de cada uno de estos primeros prototipos con respecto al sistema de medición automatizada que se adaptó al PDC.

3.1.1 PROTOTIPO PDC-01

El primer prototipo se construyó básicamente con la finalidad de probar la idea de usar un sensor de ultrasonido en la medición de longitudes de penetración, por tal razón éste primer prototipo fue algo rústico con respecto a su construcción.



Imagen 3.1. a) Prototipo PDC-01. b) Prueba de campo del primer prototipo

Fuente: Fotografías propias.

3.1.1.1 Limitaciones del prototipo PDC-01.

- Se requería siempre la presencia de una computadora portátil donde estuviese la programación del equipo, además de ser fuente de energía.
- Los cables resultaban flojos e inestables en la placa de prueba Protoboard.

- Falta de protección de los elementos electrónicos, en especial del sensor de ultrasonido.
- El sensor de ultrasonido se movía demasiado con cada golpe del martillo, resultando valores no confiables.
- Se necesitaba una base reflectora muy densa.

3.1.2 PROTOTIPO PDC-02.

Se llegó a este prototipo con las siguientes mejoras:

- ✓ Se implementó una batería recargable pequeña de 5v capaz de alimentar de energía al equipo por más 24 horas de uso continuo.
- ✓ Se diseñó y construyó un circuito impreso PCB que reemplaza de mejor manera a la placa de prueba Protoboard.
- ✓ Se adaptó una caja de plástico para cubrir y proteger al sensor de ultrasonido.
- ✓ Se diseñó y construyó un gancho metálico con la capacidad de sujetar al sensor de ultrasonido y su caja protectora el tubo PDC en el momento del ensayo.
- ✓ Se implementó una plancha metálica circular que funcionó como base reflectante del ultrasonido.
- ✓ Se eliminó definitivamente la presencia de una computadora portátil, no sólo por la fuente de energía, sino porque este nuevo prototipo ya fue capaz de guardar los datos tomados en una memoria MicroSD.

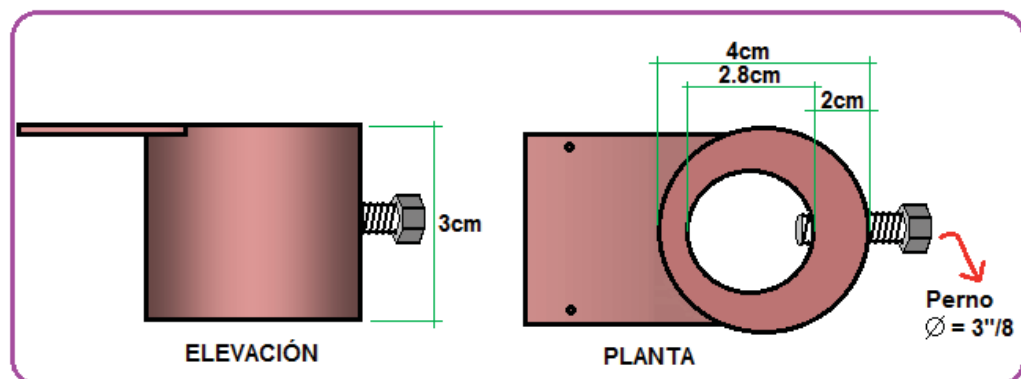


Figura 3.1. Diseño del gancho metálico para adherir el sensor ultrasonido a los tubos.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.1 Limitaciones del prototipo PDC-02.

- Después de un número no mayor de 50 golpes del martillo, el gancho que sujeta al sensor de ultrasonido quedaba suelta produciendo el desplazamiento de ésta, dando como resultado datos no tan confiables y además de esto por cada nuevo ajuste del gancho, se dañaba los tubos PDC.
- Se necesitaba un guardado manual por cada 50 golpes del martillo, de modo que, si no se estaba atento a estos detalles se perdía una cantidad considerable de datos.
- Los cables de conexión sensor-circuito eran demasiado rígidos, causando su fractura incluso durante el traslado del equipo al campo.

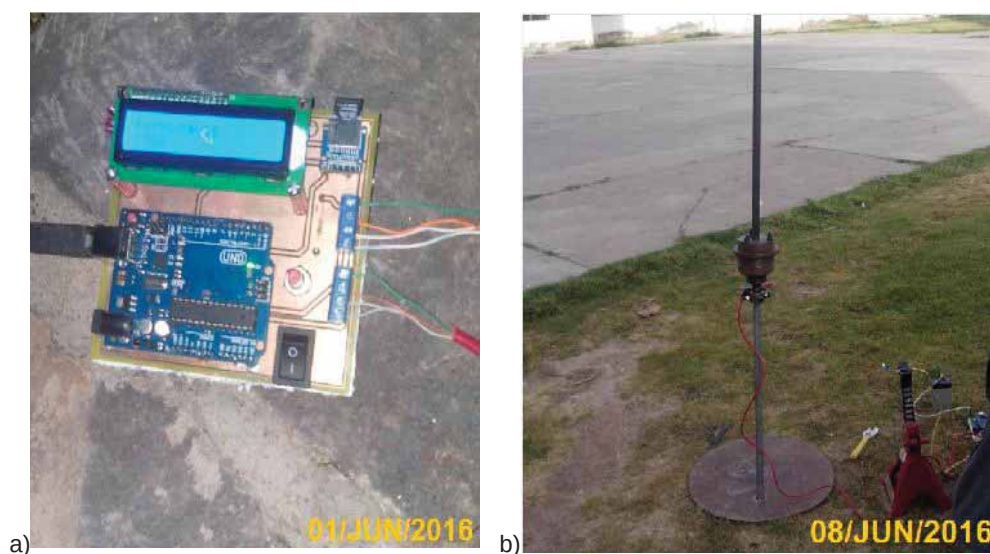


Imagen 3.2. Detalles prototipo PDC-02: a) Parte electrónica. b) Prueba de campo

Fuente: Fotografías propias.

3.1.3 PROTOTIPO PDC-03

Este prototipo no es más que una ampliación de la anterior, llegando así con las siguientes mejoras:

- ✓ Se soldó la placa que sujeta a la caja y al sensor de ultrasonido a la guía de golpe, eliminando por completo el uso del gancho metálico.
- ✓ Se mejoró el algoritmo de programación, eliminando el constante guardado manual de los datos tomados, realizando este proceso sólo al concluir el ensayo.
- ✓ Se cambiaron los cables rígidos a cables más flexibles, logrando cambiar también las uniones entre circuito-cable, con un sistema de anclaje resistente y moderno del mercado.

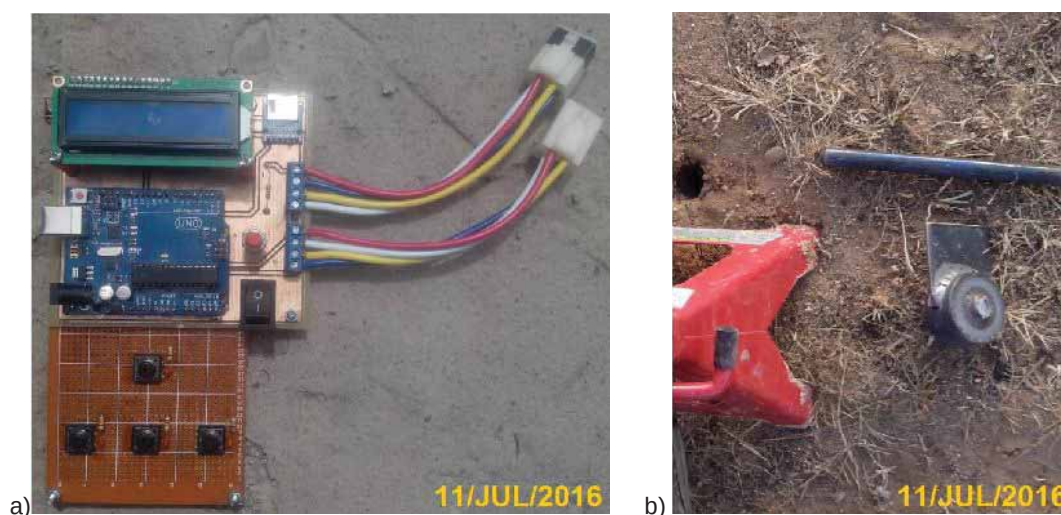


Imagen 3.3. Detalles prototipo PDC-03: a) Parte electrónica con implementación de más botones de control. b) Ruptura del yunque

Fuente: Fotografías propias.

3.1.3.1 Limitaciones del prototipo PDC-03.

- La mayor deficiencia o mejor dicho el problema principal de este prototipo fue la vibración, dado que la placa que sujeta al sensor de ultrasonido estaba soldado a la guía de golpe, el golpe del martillo causaba una vibración que dañaba de manera permanente al sensor.
- Se encontró un 3% de datos erróneos o sin sentido.

3.2 PDC CON SISTEMA DE MEDICIÓN ELECTRÓNICA

Es el equipo más recientemente desarrollado, el cual ha sido denominado “PDC Cociprede”, siendo resultado de las experiencias obtenidas por los anteriores prototipos.

Este PDC con medición electrónica cuenta con tres sensores de ultrasonidos que están ubicados equitativamente (formando los vértices de un triángulo equilátero) en un circuito circular impreso PCB, pero ahora se anclan en el suelo, restringiendo cualquier contacto con los tubos PDC que provoquen vibración y daño a los sensores. Además de ser diseñado y construido para contar con mayor capacidad y protección.

La plancha circular metálica reflectante se redujo en su diámetro y a partir de este prototipo, este elemento se enrosca por un agujero central a la guía de golpe del equipo PDC.

El presente equipo ha superado las limitaciones presentadas en anteriores prototipos, pero esto no impide a los investigadores seguir mejorándolo.

3.2.1 DESCRIPCIÓN

El Penetrómetro Dinámico de Cono PDC con medición electrónica es un novedoso y moderno equipo que mide la longitud de penetración dinámica por cada golpe de la misma energía específica, es decir de la misma masa y de la misma altura, realizando el almacenamiento respectivo y ordenado de todas las longitudes de penetración en una memoria MicroSD para su respectivo análisis en gabinete.



Imagen 3.4. Prototipo electrónico final.

Fuente: Fotografía propia.



Imagen 3.5. Ensayo de campo con prototipo final
Fuente: Fotografía propia.

3.2.2 DETALLE DE LOS ELEMENTOS

El equipo PDC con medición electrónica o medición automatizada básicamente está dividido por los elementos de penetración - recuperación y el sistema incorporado de medición electrónica.

3.2.2.1 Elementos de penetración.

En función a la Figura 3.2 los elementos son: **Punta (1)** con un peso promedio de 75 gramos, es de acero templado, de forma cónica con un diámetro máximo de 2,54cm (1pulg), el vértice tiene un ángulo de 60°, la base del cono está soldado a un perno alto de hilo corriente con un diámetro de 5/8 de pulgada (1,6cm). **Tubo PDC (2)** con un peso promedio de 1,03 kilogramos, es un tubo de fierro galvanizado ligero de media pulgada de diámetro y 2mm de espesor, de donde en un extremo está soldada con una tuerca alta y en el otro perno de $\varnothing = 5/8$, y de la punta del perno soldado a la soldadura de la tuerca mide 1m. **Yunque (3)** comprende la tuerca y la varilla de unión a la guía, con un peso promedio de 1,16 kilogramos, y diámetro de 5,7cm (2"1/4), de altura de 3cm. Tiene unos hilos en la superficie del cilindro. Una de las bases esta soldada una varilla de 1,6cm (5/8) de diámetro, de 20cm de altura, y en la otra base esta soldado una tuerca de $\varnothing = 5/8$. **Disco reflectante (4)** con un peso promedio de 920 gramos, es una plancha circular de acero de 26cm de diámetro superior y 3mm de espesor, cuenta con un agujero del mismo diámetro que la Guía de golpe, de tal manera que se enrosque a ella por los hilos. **Tubo guía (5)** con un peso promedio de 990 gramos, es un tubo de acero de $\varnothing = 1/2$ y de una longitud de 97cm. **Martillo o masa (6)** con un peso de 6,01 kilogramos de acero. **Campana (7)** con un peso promedio de 140 gramos, es un pequeño cono de acero de 2" 1/2 de diámetro mayor, con una altura de 2cm y un espesor de 3mm. En el centro del cono está soldado un perno de $\varnothing = 5/8$ con una altura de 3cm.

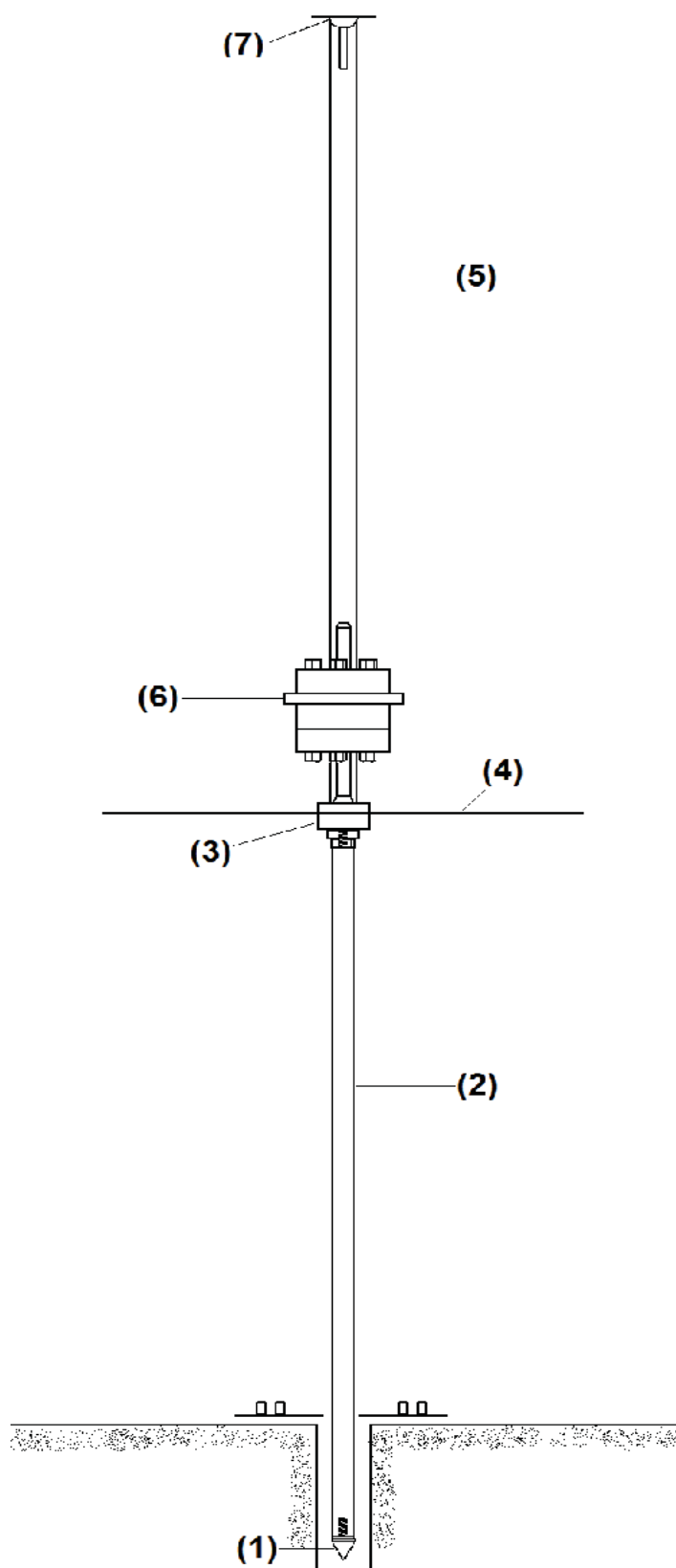


Figura 3.2. Esquema de los elementos de penetración del PDC UNSAAC.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.2 Elementos de recuperación.

Denominamos elementos de recuperación a todos aquellos que intervienen en la recuperación o extracción de los tubos hincados en el suelo.

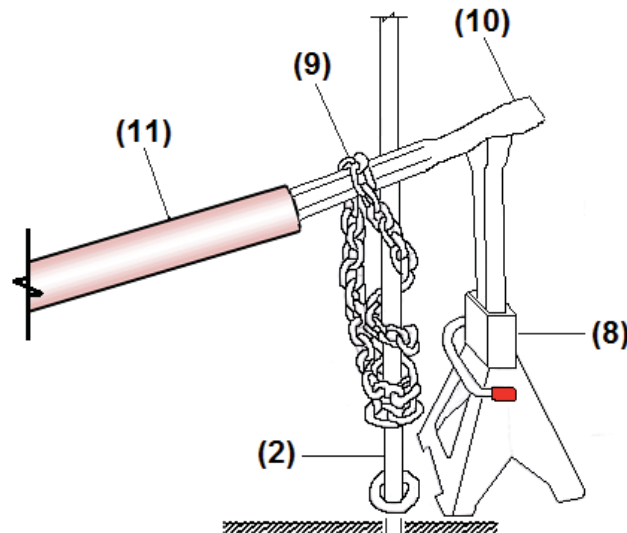


Figura 3.3. Esquema de los elementos de recuperación del PDC UNSAAC
Fuente: Elaboración propia.

En función a la Figura 3.4 estos elementos son: **Caballete (8)** con un peso promedio de 3,14 kilogramos, en este caso, en la marca Fortón. Es un trípode de acero, con altura variable desde 30cm hasta los 43cm y una capacidad de 3 toneladas. **Cadena (9)** con un peso promedio de 675 gramos, de acero de 1/4" por una longitud de 0,90m, la cual está soldada por ambos extremos. **Palanca (10)** con un peso promedio de 4,64 kilogramos, es una barreta de acero hexagonal de 1" de diámetro y 1,5m de longitud, al cual se le ha cortado la punta, dándole una longitud total de 1,00m. **Tubo extensión de palanca (11)** con un peso promedio de 3,09 kilogramos, es un tubo de acero de 3,7cm de diámetro, con una altura de 1,02m y de un espesor de 2mm, y sirve para aumentar el brazo de palanca, introduciendo una parte de la barreta en él.

3.2.2.3 Elementos electrónicos.

Los diferentes elementos electrónicos se encuentran en el disco de medición y en la caja de procesamiento.

El *disco de medición* es anclado en el suelo por una plancha metálica de la misma forma y tamaño que el circuito impreso, además cabe recalcar que los sensores son conectados a la caja de procesamiento mediante cables USB.

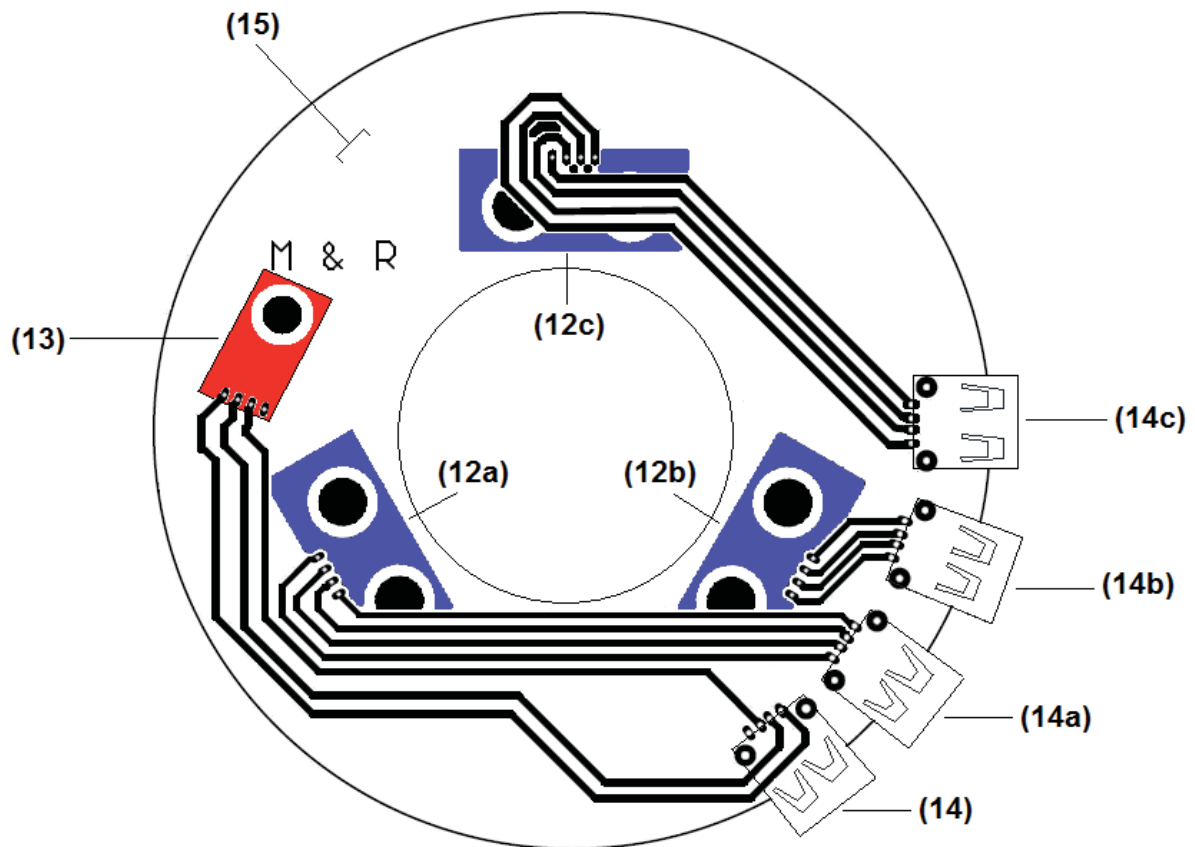


Figura 3.4. Disco de medición del PDC UNSAAC
Fuente: Elaboración propia.

En base a la Figura 3.5 tenemos: **Sensor de ultrasonido (12)** que sirve para medir distancias al emitir y captar el ultrasonido reflejado por la placa metálica. **Sensor de sonido (13)** que es un pequeño micrófono y sirve para captar el sonido del golpe del martillo, y así poder realizar el conteo y medida de altura del tubo por cada golpe. **Cabezales hembra de USB (14)**, son los conectores de los diferentes sensores con la caja de procesamiento. **Circuito impreso PCB (15)** que es una placa de baquelita o fibra de vidrio con una fina lámina de cobre en la parte superior, que mediante procesos químicos se imprimió el circuito diseñado por los investigadores.

La *caja de procesamiento* es el segundo elemento electrónico donde se encuentran todos los botones de control, memoria de almacenamiento y puertos USB para todos los sensores. Se muestra un esquema de la misma en las figuras 3.5a y 3.5b.

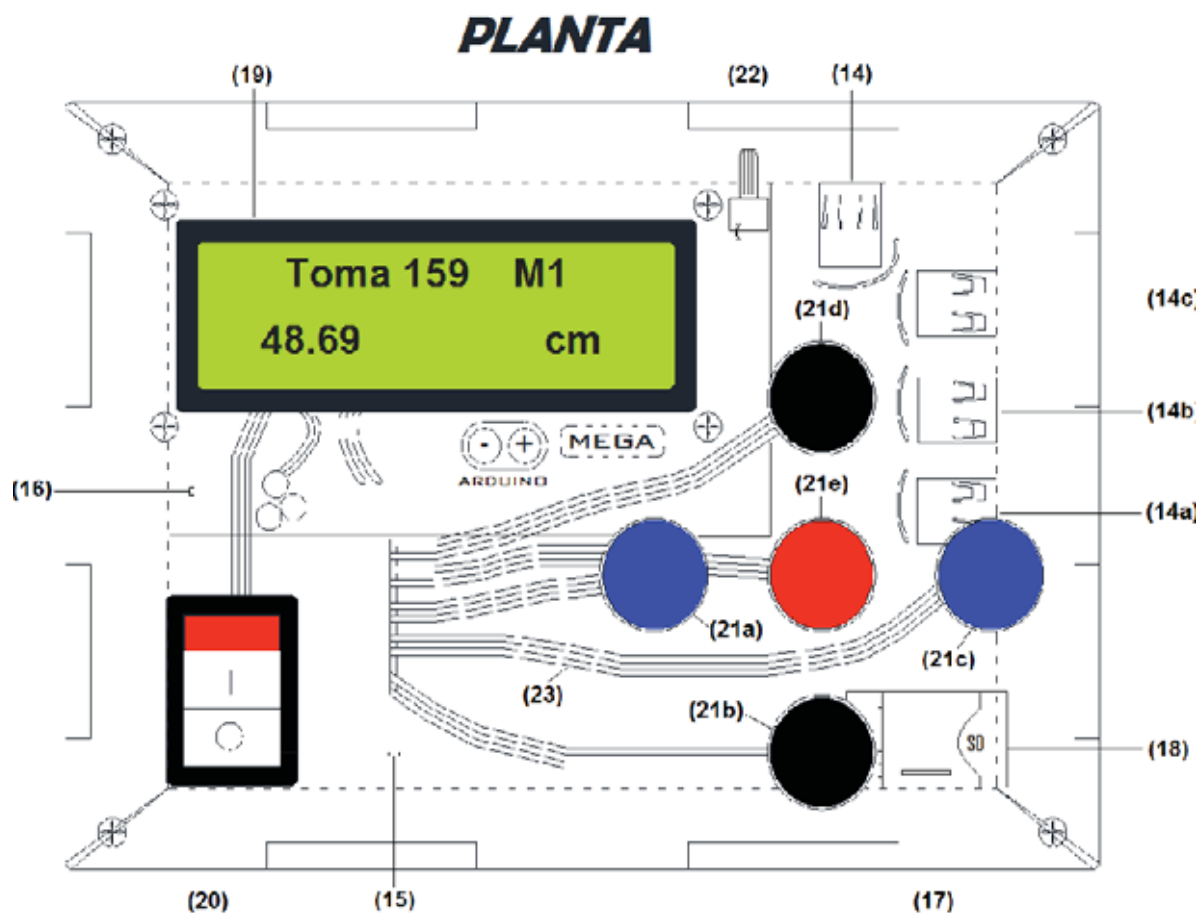


Figura 3.5a Caja de procesamiento del prototipo final PDC - UNSAAC, planta.
Fuente: Elaboración propia.

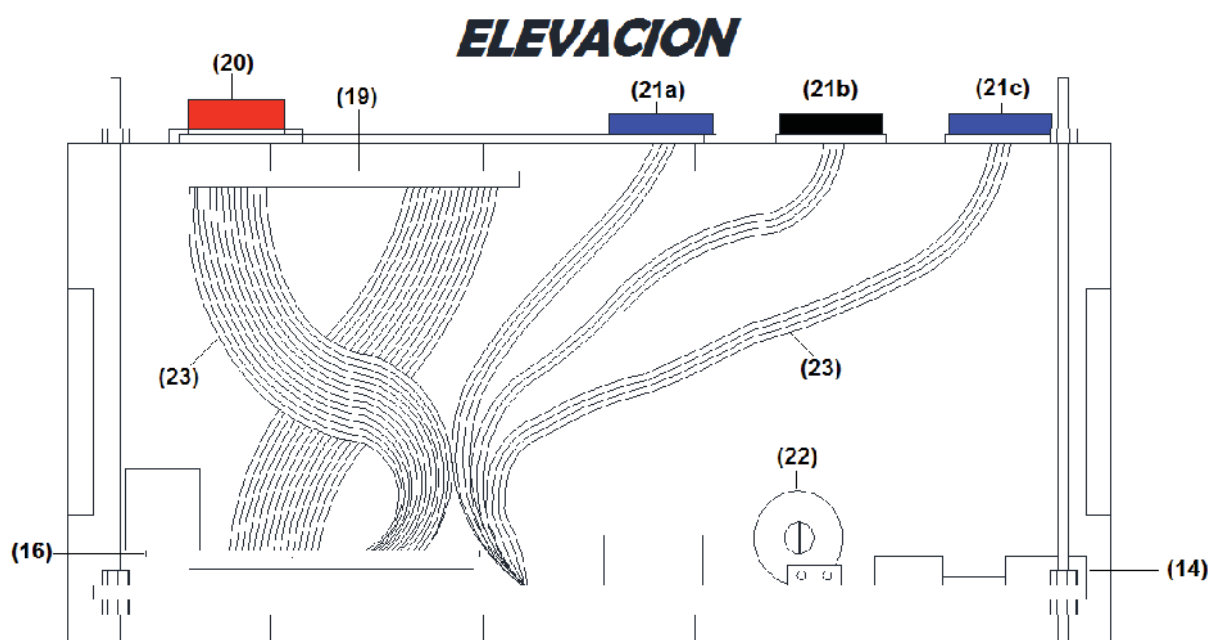


Figura 3.5b Caja de procesamiento del prototipo final PDC UNSAAC, elevación.
Fuente: Elaboración propia.

En función de las Figuras 3.6a y 3.6b se muestran: **Tarjeta de entrenamiento Arduino MEGA (16)**, es un micro controlador en el cual se le ha guardado los algoritmos de programación que nos permite conectar y controlar las funciones de los demás dispositivos electrónicos como el sensor de sonido, ultrasonido, LCD, etc. Así como también la función de guardar en una memoria de manera ordenada las distancias medidas tomadas por el equipo en conjunto. **Slot de tarjeta SD (17)**, sirve para comunicar la tarjeta de entrenamiento con la memoria micro SD y así almacenar los datos tomados en campo del ensayo de PDC. **Memoria MicroSD (18)**, Aquí se almacena los datos tomados en campo en forma de lista para posterior trabajo de gabinete. **LCD con comunicación i2c (19)**, que es una pantalla donde se muestra el número de golpe y la respectiva lectura de los sensores de ultrasonido. **Interruptor (20)**, que sirve para prender y apagar la caja de procesamiento. **Pulsadores (21)**, son botones que nos permiten controlar el uso de la caja de procesamiento y encontramos en tres colores, rojo que es el botón ENTER y los otros colores azul y negro que nos permiten desplazarnos de las diferentes herramientas que tiene el programa. **Regulador de pantalla (22)**, que nos permite mejorar la visibilidad en la pantalla LCD. **Cables de conexión (23)**, conectan los elementos electrónicos con la tarjeta de entrenamiento Arduino.

3.2.2.4 *Herramientas de uso múltiple.*

Dos Llaves Stillson de 10 pulgadas además de una **llave francesa**, normalmente se usan para ajustar y desajustar los tubos PDC o algún otro elemento que lo requiera. **Aceite de máquina** y un **cepillo** son necesarios para el mantenimiento de pernos y tuercas. Así también una **comba**, para el enderezado de los tubos PDC si se requiriese.

3.2.2.5 *Características específicas del martillo o masa.*

Respecto al *martillo o masa*, cabe indicar que está constituida principalmente por cuatro discos de acero (tres discos con diámetro de 101mm, espesor de 27mm y un disco con diámetro de 129mm, espesor de 12mm) con un agujero concéntrico del mismo diámetro. Para la unión de estos discos, se realizaron tres perforaciones, para tres pernos de $\varnothing = 5''/16 \times 4''1/2$. Estas perforaciones forman los vértices de un triángulo equilátero en los discos. Los discos llevan una numeración escrita en su superficie para un correcto armado, el disco de mayor diámetro está colocado entre los discos de menor diámetro, proveyendo un manejo ergonómico del martillo. El disco número 1, que es el que golpea al Yunque, en una de sus superficies tiene el agujero de un diámetro más grande y que disminuye de manera cónica en una altura de 5mm para que llegue finalmente al diámetro del agujero central que todos los disco tienen. Esto sirve para que el Martillo golpee plenamente a la Guía de golpe y no así a la soldadura de forma cónica de esta.

Se ha diseñado el martillo de tal forma que puedan realizarse investigaciones futuras respecto a la variación de la masa. En la fig. 3.7 se muestra los detalles del Martillo.

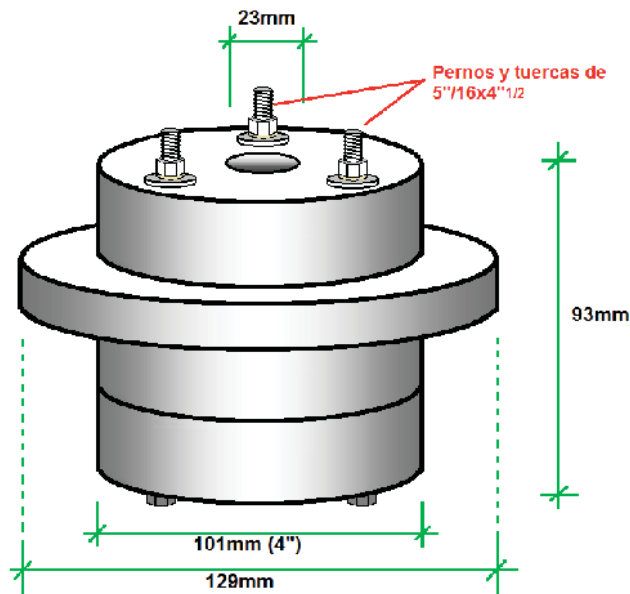


Figura 3.6. Martillo o Masa del PDC UNSAAC
Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 MANUAL DE OPERACIÓN

3.2.3.1 Actividades preliminares.

- Colocar el equipo de manera ordenada en el posible punto de ensayo de tal manera que se evitó obstruir vías o accesos durante el trabajo y, tratándose de calicata a 1,5m alejado de ella para evitar caída de varillaje o de la masa al personal en calicata.
- Averiguar y comprobar la inexistencia de instalaciones eléctricas o sanitarias por debajo o cercano al punto de ensayo.
- Tomar detalles del punto de ensayo: cotas, referencias, etc.
- Revisar el equipo: los hilos de los pernos y tuercas tienen que estar limpios y aceitados sin bordes o filos por impacto, producto del uso anterior del equipo. Además de tener los Tubos PDC derechos.

3.2.3.2 Armado del equipo.

- Comenzar el armado colocando la Punta a uno de los tubos PDC. Ajustar bien.
- Ensamblar el yunque en el tubo PDC y ajustar bien con la ayuda de las llaves Stillson.
- Ensamblar el disco reflectante con el yunque.
- Colocar el disco de medición en el punto de ensayo, luego conectarlo mediante los cables USB con la caja de procesamiento.
- Colocar el tubo PDC en el punto de ensayo verticalmente para iniciar el test de sensores⁹.

⁹ El test de sensores constituye la verificación y comprobación de las lecturas indicadas por cada uno de los sensores de ultrasonido, encargados de medir la distancia de la superficie del terreno al disco reflector.

- Colocar la memoria micro SD, encender el equipo y ejecutar el test de sensores programado en la caja de procesamiento.
- Después de comprobar el correcto funcionamiento del equipo, ir a la herramienta “nuevo ensayo” y colocar el nombre ¹⁰ para el punto de inspección a realizarse.
- Poner la masa o martillo encima del yunque a través del agujero medio de la masa de tal forma que su disco sobresaliente quede en la parte superior (ver fig. 3.7).
- Colocar el tubo guía en la varilla del yunque y dentro del orificio de la masa (ver fig. 4.2).
- Por la parte superior del tubo guía colocar la campana, para la protección y límite de elevación de la masa, la misma que será sujeta por uno de los operadores en todo momento durante el ensayo.
- Una vez instalado el equipo y listos los operadores oprimir el botón rojo de inicio (21e) el cual marcará la lectura inicial.

3.2.3.3 Durante el ensayo.

- Levantar el martillo hasta que choque a la campana y dejarlo en caída libre.
- Anotar el tipo de rebote de la masa. Cuando se identifique cambio del mismo, anotar el número de golpe mostrado en la pantalla LCD.
- Repetir los pasos anteriores para penetrar el tubo PDC hasta que queden alrededor de 10cm sobre la superficie del suelo, y así poder sujetar las varillas con las llaves Stillson al retirar el yunque y ensamblar el nuevo tubo PDC.

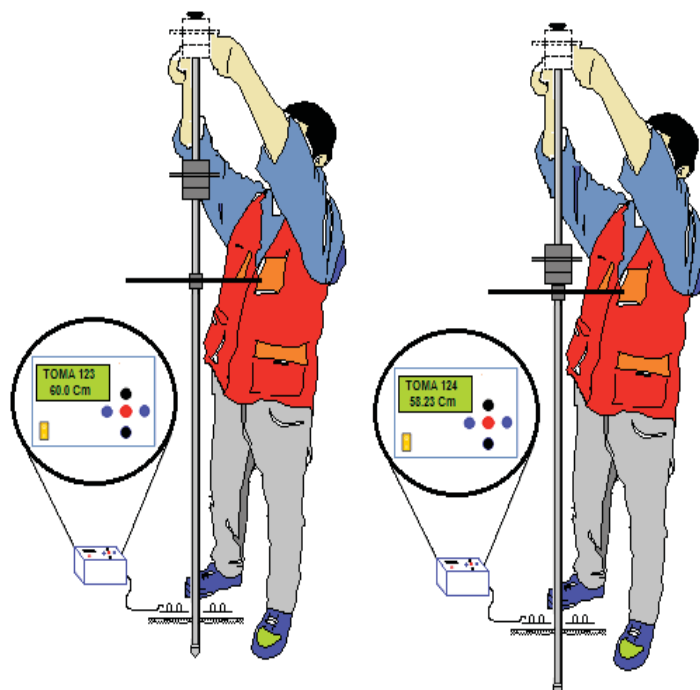


Figura 3.7. Elevación del martillo durante el ensayo y registro de datos.
Fuente: Elaboración propia.

¹⁰ Se recomienda nominar los ensayos con números de letras no mayores a siete, incluido espaciamentos.

- Retira el tubo guía con la campana.
- Retirar la masa.
- Desarmar y retirar el yunque con el disco reflectante usando las llaves Stillson de ser necesarias.
- Armar el siguiente tubo PDC, colocando unas gotas de aceite en el hilo del perno, en caso de ser necesario.
- Ajustar los dos tubos PDC con las llaves Stillson, es decir mano derecha arriba en el segundo tubo, y la izquierda abajo.
- Repetir los pasos del armado del yunque, masa, tubo guía y campana respectivamente para continuar con el ensayo.
- Se repiten los pasos anteriores hasta el rechazo.
- Se considera que se ha llegado al rechazo cuando al menos diez lecturas consecutivas del equipo indican penetraciones menores a dos milímetros (2mm) o existe rebote pronunciado excesivo que además causa lecturas fallidas constantemente (es fácil notar que el equipo salta).
- Guardar los datos tomados y apagar el equipo.

3.2.3.4 Extracción.

- Extraer el tubo guía, la masa, el disco reflector y la guía de golpe.
- Retirar el disco de medición y conjuntamente con la caja de procesamiento colocarlos a una distancia seca y prudente del punto de ensayo.
- Colocar el caballete detrás del tubo PDC.
- Colocar la cadena con 4 vueltas en el Tubo sobresaliente, para luego bajarlo hasta el nivel del caballete.
- Introducir la Palanca por medio de la cadena y apoyar éste extremo en el caballete (Fig. 3.4).
- Aumentar el brazo de palanca con el tubo de extensión de ser necesario.
- Levantar la palanca sólo hasta el nivel horizontal o paralela al terreno.
- Bajar la cadena con ayuda de una llave Stillson y repetir el paso anterior.
- Se extrae todos los tubos repitiendo los dos pasos anteriores.
- Cada vez que un tubo sale 50 o 60cm completamente sobre el nivel del suelo, desarmar los tubos PDC con las llaves Stillson, con la mano izquierda arriba en el tubo superior PDC y, la mano derecha abajo en el inferior.

3.2.3.5 Mantenimiento.

- ❖ Limpiar los Tubos PDC (puede usarse agua y un paño).
- ❖ También se deben de limpiar las herramientas y secarlas para evitar que se oxiden.
- ❖ Enderezar los tubos PDC arqueados, dando golpes leves con la comba en una superficie horizontal del suelo, de preferencia de tierra, para evitar que se aplane la sección circular o se produzcan indentaciones.
- ❖ Echar aceite a los pernos y tuercas de los tubos PDC.

3.2.4 PRECAUCIONES Y SEGURIDAD

3.2.4.1 Peligro de accidentes.

En el siguiente cuadro se muestra una lista de posibles accidentes durante todos los procesos de ensayo y sus respectivas precauciones que la evitan:

Tabla 3.1.
Peligro de accidentes

PELIGROS	PRECAUCIONES
Impacto de dedos en la guía de golpe durante la caída de la masa.	Trabajar sin apuro y concentrado, descansos frecuentes, no conversar cuando se trabaja, esperar su rebote final para volver a levantar masa desde sus extremos.
Caída de la masa sobre los dedos del pie.	Evitar siempre levantar la masa más alto de la capacidad de uno, por eso en el momento de armado del equipo primero se coloca la masa y después el tubo guía, y lo inverso para extraerlo.
Caída de varillaje o masa a personal en calicata.	Los tubos y demás elementos deben de estar como mínimo 1.50m de la calicata, sujetos en paquete y entre estacas, es decir, los extremos del paquete deben estar amarrados con varias capas de lona o saco fuerte.
Deslizamiento de una varilla del paquete durante el transporte.	Antes de trasladar el equipo se debe de comprobar que todos los elementos estén bien sujetos al elemento de transporte y los extremos dentro de una lona que los envuelve y que está firmemente sujeta.
Impacto por escape de llave Stillson a otro operador.	Formar siempre un ángulo agudo ($< 90^\circ$) entre las llaves Stillson y girar hacia dentro. Solo un operador debe manejar las dos llaves y girarlas de modo que se junten.
Caída de operador que sujeta la guía del banquillo de alcance.	El banquillo que soporta al operador debe de ser estable y resistente, aun con el movimiento del operador
Fatiga de la espalda durante elevación de la masa.	Mejorar la posición del cuerpo y alternar el trabajo entre ambos operadores reduce la fatiga del obrero. Usar la postura que centra la fuerza de elevación en las piernas y no en la cintura.
Esguince en la espalda al subir la palanca de extracción.	Levantar la palanca de extracción con la ayuda de ambos operadores. Incrementar el brazo de palanca o usando un tubo de extensión adicional.
Cortes por resbalo de la palanca del apoyo.	La persona quien se encarga de levantar la palanca debe de estar a un costado de esta y no al frente.
Agarre de piel o dedos en la cadena de extracción.	Bajar la cadena siempre con la llave Stillson u otra herramienta, nunca con los dedos.

Fuente: Elaboración Propia

3.2.4.2 Precauciones de conservación del equipo.

A continuación se muestra una lista de precauciones de conservación del equipo con sus respectivos argumentos.

Tabla 3.2.
Precauciones de conservación del equipo

PRECAUCIONES DE CONSERVACION DEL EQUIPO	ARGUMENTO
Control de varillas derechas antes de iniciar el ensayo.	Evita la desviación de la verticalidad de la penetración y que los posteriores tubos PDC se doblen también.
Control visual de fisuras en las uniones.	Evita que falle las uniones debido al golpe o a la extracción.
Limpieza de los hilos de uniones perno y tuerca y colocación de lubricante.	Facilita el armado de los elementos que contienen pernos y tuercas. Evita que los hilos se oxiden.
Ajuste a contacto total en uniones antes de la hinca de cada varilla.	Evita que falle (se borre) el hilo del perno o tuerca.
Ajuste frecuente de unión guía de golpe - tubo PDC durante el ensayo.	Evita que falle el hilo del perno. Aumenta el tiempo de vida útil de los tubos y del yunque.
Ajuste de uniones de varillas hincadas durante el ensayo, cuando se note cambios en el sonido de los golpes (como de piezas sueltas).	Evita la pérdida de tubos PDC durante la extracción.
Golpeo con la parte lateral (costado) del combo durante enderezado de Tubos PDC.	Evita abolladuras en los tubos.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4.3 Control de calidad.

- Control de verticalidad durante el ensayo, estimando el ángulo de inclinación.
- Control de elevación de la masa durante el ensayo, la fatiga o talla del operador de turno, suele provocar variaciones en la altura de caída.
- Revisar si la punta del equipo no tiene demasiado desgaste. Algunos reportes del ensayo indican que esto no causa variación en el resultado a menos que se trate de una notoria disminución del diámetro.
- Tener en cuenta la intensidad del color de la pantalla, dado que cuando se vuelva borrosa es un indicador que la batería esta desgastada y que posiblemente en el transcurso del ensayo deje de funcionar.
- En el cambio de rebote del martillo, no sólo se anota el número de golpe, sino también la altura leída por los sensores, ya que durante el trabajo de gabinete ambos valores deben coincidir.

CAPÍTULO IV
MODELO
EXPERIMENTAL

4 MODELO EXPERIMENTAL

4.1 ENSAYOS PREVIOS DE LABORATORIO

Previamente a la compactación de los estratos, se realizaron ensayos de clasificación de suelos, es decir Granulometría y Límites de consistencia. Adicionalmente, y como referencia para el control de compactación se han realizado ensayos de Proctor Estándar en cada tipo de suelo.

Por último y, cuestiones de diseño, se requirió datos de humedad natural promedio de las muestras, para lo cual también se hicieron ensayos de Humedad Natural de todos los suelos.

4.2 DISEÑO DE ESTRATOS

Para el cálculo de suelo y agua requerida para la compactación, se optó un diseño por peso del material, por tener menor variabilidad con respecto al volumen. En la Tabla N° 5.1 se muestra la cantidad de suelo y agua que se necesitó para cada espécimen de 50cm de espesor, sin considerar desperdicios.

Tabla 4.1
Detalles de suelos requeridos en peso por espécimen

MUESTRA	TIPO DE SUELO SUCS	HUMEDAD NATURAL	ESPECIMEN	PROF. (m)	HUMEDAD DE DISEÑO	DENSIDAD SECA * (t/m ³)	TOTAL SUELO COMPACTADO (t)	SUELO NATURAL REQUERIDO ** (t)	AGUA REQUERIDA ** (litros)
GRAVA (G)	GP-GC	1.62%	G-1	0.5-1.0	8.0%	2.21	1.528	1.437	90.2
			G-2	1.5-2.0					
			G-3	2.5-3.0					
ARENA (S)	SM	3.48%	S-1	0.0-0.5	11.5%	1.69	1.206	1.119	86.7
			S-2	1.0-1.5					
			S-3	2.0-2.5					
LIMO (M)	ML	2.30%	M-1	0.0-0.5	13.5%	1.88	1.366	1.231	134.8
			M-2	1.0-1.5					
			M-3	2.0-2.5					
ARCILLA (C)	CL	7.56%	C-1	0.5-1.0	21.0%	1.60	1.239	1.101	137.6
			C-2	1.5-2.0					
			C-3	2.5-3.0					

(*) Estas densidades son referenciales. En la práctica se han obtenido densidades diferentes debido a la variabilidad de los procedimientos de compactación en cada estrato conformado.

(**) Las cantidades requeridas de suelo natural y agua, son valores aproximados para la conformación de cada espécimen de suelo.

Fuente: Elaboración propia

4.2.1 CONTROL DE HUMEDAD Y DENSIDAD IN-SITU.

4.2.1.1 Densidad “in situ” para gravas

Por el tamaño de los fragmentos de grava en el suelo se realizaron ensayos de **Densidad Natural de Gran Escala** mediante ensayo no convencional, en anillo de 25cm de diámetro que permite incluir en la medición, fragmentos de hasta 3” del material. Este ensayo está basado en la Norma USBR-7221-89.

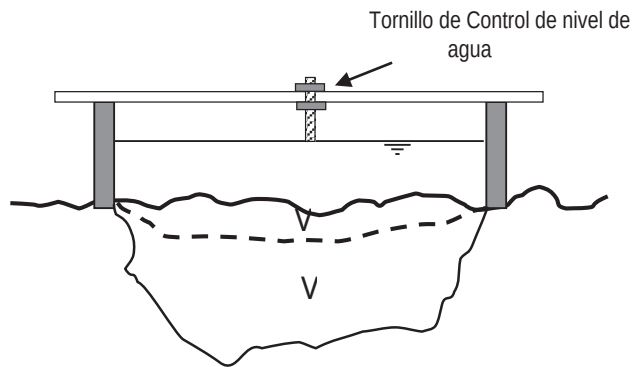


Figura 4.1. Esquema del “Test Pit”- Diagrama de ensayo.
Fuente: Extraído de USBR-221-89

Este ensayo considera la determinación de una superficie de referencia mediante una primera medición del volumen de agua hasta un nivel establecido en el anillo de confinamiento (V1) y una segunda medición del volumen del hoyo dejado por la muestra excavada, llenando con agua nuevamente hasta el mismo nivel establecido (V2). En ambas oportunidades se emplea una membrana plástica muy delgada, flexible e impermeable, para revestir el hoyo y el anillo de confinamiento.





Imagen 4.1. Ensayo "Test pit" para gravas. En las fotografías se muestra los procedimientos de la prueba de densidad a gran escala. a) Excavación y limpieza del hoyo. b) Hoyo con membrana y agua. c) Medición del volumen del hoyo. d) Pesaje del material extraído.

Fuente: Fotografías propias.

Este ensayo tiene el mismo principio que el ensayo de densidad in situ del cono de arena ASTM D1556, con la ventaja de que se puede aplicar a suelos naturales no compactados en los que la superficie superior no queda plana y nivelada, como es el caso de gravas o suelos que contienen gravas. Razón por la cual se aplicó en la conformación de estratos de grava del pozo.

4.2.1.2 Muestreo inalterado con anillo de borde cortante.

El equipo consiste en un anillo de acero de 5,6cm de diámetro y 2cm de alto que se introduce en el terreno presionando manualmente sobre una base que se acopla al extremo no afilado del anillo. Luego se extrae el bloque de suelo que contiene al anillo, se enrasa la cara inferior y se cubre con la tapa metálica con que cuenta el equipo, luego se corta el material excedente y se enrasa la otra cara con un cuchillo para proceder a tapar también este extremo, se sellan ambas tapas con cinta aislante y así queda la muestra protegida para su traslado al laboratorio.





Imagen 4.2. Muestreo inalterado con anillos de borde cortante. a) Tapa de hinca y anillo en el suelo. b) Extracción de muestra y previo al enrase. c) Corte de bases a nivel. d) Pesaje de anillo y muestra.

Fuente: fotografías propias.

El presente ensayo fue conveniente para evaluar la densidad in situ en los estratos donde no hubo grava (en arenas, limos y arcillas), dada la practicidad, área y espesor de estrato intervenido. Otra de las ventajas es que dada la poca longitud de la muestra, la fricción entre el suelo y el anillo es poco significativa de modo que no se producen esfuerzos longitudinales, durante la hinca o extracción.

4.3 PROCEDIMIENTOS PREVIOS A LA COMPACTACIÓN DE ESTRATOS

Para la compactación de los diferentes tipos de suelos se siguieron procedimientos de trabajo, con la finalidad de lograr estratos de suelos tan homogéneos como sea posible.

En los siguientes ítems se describe los procedimientos de conformación de estratos para cada tipo de suelo.

4.3.1 PROCEDIMIENTOS EN LA GRAVA (G) Y LA ARCILLA (C)

En primera instancia cabe mencionar que se compraron 3,5m³ de grava de la cantera de Vicho, y 120 sacos de arcilla molida de una cantera de San Jerónimo con un peso de 27kg por saco en promedio.

La compactación de cada estrato se realizó en cuatro capas de 12,5cm de espesor. Se describe los procedimientos que se realizaron para la construcción de cada capa antes de su respectiva compactación y control de densidad in-situ:

- Se preparó una mezcla con 359,25kg de la grava (GW-GC) con 22,55kg de agua. Estos datos son la cuarta parte de los cálculos mostrados en la Tabla 5.1.
- Se colocó listones de madera dentro del pozo para dividirlo por la mitad.
- Se introdujo la mitad de la grava preparada en la primera mitad del área del pozo.
- Se extrajo los listones de madera y se guardó para usos posteriores.
- Dentro y fuera del pozo se cubrieron la Grava con sacos y plásticos con la finalidad de no perder humedad y evitar contaminación de la muestra, éste último sobre todo en el pozo.

- f) Se mezcló dentro del pozo (segunda mitad del área del pozo) cada saco de la arcilla con 3,4kg de agua, usándose alrededor de 10 sacos de arcilla con 34,4kg de agua por cada capa de 12,5cm de espesor de arcilla en el pozo. Para facilitar el trabajo, el agua fue medido en unos baldes en función del peso.
- g) El procedimiento de mezcla arcilla y agua se realizó de manera manual por lo que fue una de las labores que más tiempo tomó y más difíciles de realizar.
- h) Luego de llegar la arcilla al nivel de la grava, nuevamente se colocó los listones para dividir el pozo.
- i) Se trasladaron los sacos y plásticos que cubrían a la grava, para ahora cubrir a la arcilla con la misma finalidad antes mencionada.
- j) Se introdujo la otra mitad de la grava preparada donde corresponde al estrato de grava.
- k) Se repitieron los procedimientos de mezclado de arcilla hasta alcanzar nuevamente el nivel de la grava. Es así que se terminó la preparación de la primera capa de suelos para su respectivo compactado.
- l) Terminado el compactado de cada subcapa de 12,5cm de espesor, se repitieron todos los procedimientos mencionados hasta alcanzar el espesor de diseño del estrato, es decir de 50cm.



Imagen 4.3. Mezclado manual de la arcilla y el agua. Se realizó mediante el regado de agua con delgadas subcapas de arcilla para lograr la mayor uniformidad posible de humedad
Fuente: Fotografía propia.



Imagen 4.4. Capas de arcilla y grava dentro del pozo previo al compactado
Fuente: Fotografía propia.

4.3.2 PROCEDIMIENTOS EN LA ARENA (S) Y EL LIMO (M)

Previo estudios y resultados de laboratorio, se extrajeron 3,5m³ de arena y limo directamente de estratos naturales ubicados en el distrito de San Jerónimo de la ciudad de Cusco, para luego ser trasladados al laboratorio.

La compactación de cada estrato también se realizó en cuatro capas de 12,5cm de espesor. A continuación se describe los procedimientos que se realizaron para la construcción de cada capa antes de su respectiva compactación y control de densidad in-situ:

- a) Se preparó una mezcla con 279,75kg de la arena (SM) con 21,68kg de agua. Estos datos son la cuarta parte de los cálculos mostrados en la Tabla 5.1 de la presente Tesis.
- b) Se colocó listones de madera dentro del pozo para dividirlo por la mitad.
- c) Se introdujo la mitad de la arena preparada en la primera mitad del área del pozo.
- d) Se extrajo los listones de madera y se guardó para usos posteriores.
- e) Dentro y fuera del pozo se cubrieron la arena con sacos y plásticos con la finalidad de no perder humedad y evitar contaminación de la muestra, éste último sobre todo en el pozo.
- f) Se mezcló dentro del pozo (segunda mitad del área del pozo) dos baldes de gran tamaño que contenían alrededor de 31kg de limo por balde, con 6,7kg de agua. Para facilitar el trabajo, el agua también fue medido en unos baldes en función del volumen.
- g) A diferencia de la arcilla, durante la mezcla de limo y agua se usó mayor cantidad de estos materiales debido a que resultaron ser más fáciles en su mezclado, cabe recalcar que también fue un procedimiento manual.
- h) Luego de llegar el limo al nivel de la arena, nuevamente se colocó los listones para dividir el pozo.
- i) Se trasladaron los sacos y plásticos que cubrían a la arena, para ahora cubrir al limo con la misma finalidad antes mencionada.
- j) Se introdujo la otra mitad de la arena preparada donde corresponde al estrato de arena.
- k) Se repitieron los procedimientos de mezclado del Limo hasta alcanzar nuevamente el nivel de la Arena. Es así que también se termina la preparación de la primera capa de suelos para su respectivo compactado. Repitiéndose todos los procedimientos mencionados hasta alcanzar el espesor de diseño del estrato, es decir un espesor de 50cm.



Imagen 4.5. Capas de limo y arena en el pozo previos al compactado
Fuente: Fotografía propia.

4.4 MÉTODO DE COMPACTACIÓN APLICADO

Se aplicaron diferentes procesos de compactación con el objetivo de lograr densidades notablemente diferentes para un mismo tipo de suelo, procurando mantener la humedad de diseño, que a su vez, se adapte al trabajo dentro del pozo. Por tales razones las diferentes densidades se alcanzaron mediante diferentes procedimientos destacados según el equipo o herramienta usada.

4.4.1 APISONADOR MECÁNICO.

El apisonador mecánico o conocido también en el medio como “Canguro”, fue usado para lograr las mayores densidades, en los estratos más profundos del pozo (de 2m a 3m).

Este equipo mecánico fue conveniente para compactar los cuatro tipos de suelos (finos y gruesos) debido a que su área de contacto, a diferencia de otros compactadores es de menor tamaño, y gracias a esa característica fue capaz de alcanzar la mayor parte del área del pozo.



Imagen 4.6. Compactación con el uso de Apisonador mecánico

Fuente: Elaboración propia

Para efectos de la investigación, los estratos de limo y arcilla conformados mediante este método han sido denominados en estado “duro”, mientras que las arenas y gravas como “compacto”

4.4.2 APISONADOR MANUAL DE CONCRETO.

Este dispositivo normalmente usado como poste portátil para señalización, y popularmente conocido como “cachaco”, es básicamente un bloque de concreto de 30 x 30 x10cm con un mango de madera o metal que está anclado por el centro de la cara superior.

Esta herramienta fue usada para apisonar estratos intermedios, es decir para los estratos con profundidades entre 1m y 2m de los cuatro tipos de suelos según el diseño.



Imagen 4.7. Compactación con el uso de Apisonador manual de concreto. Pozo de prueba del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales-UNSAAC.

Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo, los estratos de limo y arcilla conformados mediante este método han sido denominados en estado “semiduro”, mientras que las arenas y gravas como “semicompacto”.

4.4.3 CONFORMACIÓN POR PESO PROPIO.

Se refiere al llenado de los estratos superficiales por caída propia del material y sólo esparcimiento en el área de diseño, con el fin de lograr densidades mínimas en los estratos con profundidades de 0 a 1m, no se realizó ningún método de compactación, más que sólo acomodamiento de las partículas. En consecuencia, los estratos de limo y arcilla conformados mediante este método han sido denominados en estado “blando”, mientras que las arenas y gravas en estado “suelto”.



Imagen 4.8. Esparcimiento del suelo en el área de diseño. Pozo de prueba del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales-UNSAAC.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V
ANÁLISIS E
INTERPRETACIÓN DE
RESULTADOS

5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se observa, analiza e interpreta los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados durante la conformación del pozo estratificado y la subsecuente serie de ensayos de penetración dinámica, metas planteadas para el cumplimiento de objetivos de la presente investigación.

5.1 CLASIFICACIÓN DE SUELOS DEL MODELO EXPERIMENTAL

Se eligió usar solamente el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos – SUCS, por ser más precisa en el momento de distinguir el grupo genérico del suelo. Es decir, nombra en primera instancia la predominancia de Grava (G), Arena (S), Limo (M) o Arcilla (C), cuestión que tiene dificultad el sistema de clasificación AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes), como por ejemplo: el grupo A-2, del sistema AASHTO, que a su vez se divide en cuatro grupos A-2-4, A-2-5, A-2-6 y A-2-7, tienen la tipología de gravas y arenas limosas o arcillosas, de donde para elegir el grupo de grava o arena hace referencia a una clasificación SUCS.

Por otra parte la Norma E.050 del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, da preferencia significativa en el uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos – SUCS, como se demuestra en el Artículo 10.6 que dice: *“En el laboratorio se seleccionarán muestras típicas para ejecutar con ellas ensayos de clasificación. Como resultados de estos ensayos, las muestras se clasificarán, en todos los casos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos – SUCS NTP 339.134 (ASTM D 2487) y los resultados de esta clasificación serán comparados con la descripción visual – manual NTP 339.150 (ASTM D 2488) obtenida para el perfil estratigráfico de campo, procediéndose a compatibilizar las diferencias existentes a fin de obtener el perfil estratigráfico definitivo, que se incluirá en el informe final.”* Del mismo modo se demuestra lo mencionado en los artículos 12.1 Memoria Descriptiva, índice e) Perfil del Suelo y 13.3 Resultados de los Ensayos en Laboratorio de la Norma E.050 Suelos y Cimentaciones.

5.1.1 MAB-01 GRAVA DE LA CANTERA DE VICHO (GP-GC)

Resulta ser de una simbología doble GP-GC, es decir una grava mal gradada con finos plásticos de baja compresibilidad, o una grava mal gradada con arcilla según la nomenclatura del SUCS.

Este suelo (ver Anexo A.1), es una mezcla de grava chancada (61%) y arena gruesa (32%), procedentes de la cantera de Vicho. Asimismo, en la fracción gruesa predomina grava con tamaño máximo de $\frac{1}{2}$ ” en casi la tercera parte del total (30,5%), el cual es mostrado en los resultados de coeficientes de uniformidad y curvatura ($C_c = 4,16 > 3$). La fracción de finos (7%) es un caso de frontera (entre 5-12% finos); según se detalla en el Anexo B.1 se ha distinguido como una arcilla limosa (CL-ML) de baja compresibilidad ¹¹ indicado por el límite líquido resultante ($LL = 24,3\%$) y el índice de plasticidad ($4 < I_p = 6,3 < 7$).

¹¹ La compresibilidad del suelo es una función directa del límite líquido por lo que $LL < 50\%$ se consideran de baja compresibilidad y $LL > 50\%$ de alta compresibilidad. Sin embargo, no ha de confundirse con alta o baja plasticidad, pues esta última depende tanto

5.1.2 MAB-02 ARENA SAN JERÓNIMO (SM)

Este suelo procede de la APV. 30 de Setiembre, distrito de San Jerónimo, extraído de estratos naturales sueltos pertenecientes a la formación San Sebastián conformada por los fondos de lago Morkill (ver imagen 3.1). El análisis granulométrico (ver Anexo A.2) muestra que está constituida prácticamente por arena (82%) presentando mayor porcentaje de retención (37,94%) en la malla N°100 que indicaría predominancia de granos finos (entre 0,3mm-0,15mm).

La cantidad de finos que pasan la malla N°200 resultó de 18%, siendo una cantidad apreciable (>12%). EL límite líquido (LL=24,7%) y el índice de plasticidad ($I_p = 1,6$) muestran que el suelo posee muy poca plasticidad (limos) con baja compresibilidad.

5.1.3 MAB-04 LIMO CON ARENA DE SAN JERÓNIMO (ML)

Este suelo procede también de la APV. 30 de setiembre del distrito de San Jerónimo. Está conformado por partículas de grano fino puesto que el análisis granulométrico indica que el tamaño de casi el total de partículas pasan la malla #8 (menores a 2,4 mm), siendo la cantidad de arena (49%) casi tan apreciable como la de finos (51%) que pasan la malla #200. Esta última fracción denota una baja compresibilidad de naturaleza no plástica (limos) por su $LL = 23\%$ e $I_p = 3,5$ resultando ser un tipo de limo inorgánico (ver Anexos A.3 y B.3).

Se ha realizado el modelo experimental con este tipo de suelo (limo con arena) puesto que en la naturaleza raramente se encuentran limos puros. Como refieren Juárez & Rico (2010, p.156) estos son suelos típicos de limos inorgánicos y polvo de roca con $LL < 30\%$. Así como también pueden ser encontrados en depósitos eólicos, del tipo del Loess, usualmente con $25\% < LL < 35\%$.

5.1.4 MAB-05 ARCILLA (CL)

Esta arcilla procedente de la zona ladrillera del distrito de San Jerónimo, contiene una fracción pequeña de arena fina (3%). El límite líquido es $LL = 48\%$ y el índice de plasticidad $I_p = 23,8$ que lo clasifican como una arcilla inorgánica de baja plasticidad (ver Anexos A.4 y B.4).

5.2 HUMEDAD DE ESTRATOS DEL MODELO EXPERIMENTAL

En total se realizó seis ensayos de humedad para cada tipo suelo in situ durante la compactación¹².

En la Tabla 5.1 se muestra las humedades de diseño y resultantes en cada tipo de suelo, además de sus respectivos coeficientes de variación. El cuadro muestra que las humedades resultantes, obtenidas durante el llenado del pozo, son un tanto menores a las humedades de diseño. Este decremento es en promedio de 1,5% siendo mayor en el estrato de arena.

del LL como de I_p . Por ejemplo las tierras diatomáceas prácticamente puras suelen no ser plásticas, a pesar de que su límite líquido pueda ser mayor que 100% (MH).

¹² Se ha realizado dos ensayos de contenido de agua por cada estrato, los que se presentan en los anexos "Fichas resumen de resultados de ensayos PDC en el Laboratorio UNSAAC".

Tabla 5.1
Humedades de diseño versus obtenidas según tipos de suelo

Tipo de suelo (SUCS)	Nombre	Humedad de diseño Wd (%)	Humedad obtenida Wp (%)	Coefficiente de variación Cv
GP-GC	Grava mal gradada con arcilla y arena	8,0	6,7	11%
SM	Arena limosa	11,5	8,7	12%
ML	Limo con Arena	13,5	12,6	14%
CL	Arcilla de baja plasticidad	21,0	20,0	11%

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al análisis de variabilidad de la humedad, en todos los estratos de un mismo tipo de suelo, se observa que los coeficientes de variación son inferiores al 15%, pues se ha buscado restringir una influencia significativa de esta propiedad, de tal forma que se permita un análisis específico de la influencia de la densidad en las curvas resultantes de los ensayos con PDC electrónico. En otras palabras, para cada tipo de suelo se obtuvieron tres estratos con la misma humedad promedio pero diferentes densidades.

5.3 DENSIDAD DE ESTRATOS EN ESTUDIO

Para efectos de control de compactación en la conformación de estratos en el pozo (modelo experimental), se ha tenido como referencia los valores obtenidos a partir de ensayos Proctor Estándar (Ver Anexo C).

En la Tabla 5.2 se muestra un cuadro comparativo de densidades obtenidas en los diferentes estratos del modelo experimental.

Tabla 5.2
Cuadro de densidades del modelo experimental (pozo estratificado)

Tipo de suelo (SUCS)	Nombre	Diseño Proctor Estándar (t/m3)	Máxima densidad alcanzada	Densidad media alcanzada	Mínima densidad alcanzada
GP-GC	Grava mal gradada con arcilla y arena	2,21	2,47	2,25	2,18
SM	Arena limosa	1,69	1,79	1,59	1,42
ML	Limo con Arena	1,88	2,21	2,00	1,70
CL	Arcilla de baja plasticidad	1,60	2,11	1,61	1,40
Profundidad de estratos según diseño:			De 2-3m	De 1-2m	De 0-1m

Fuente: Elaboración propia

Durante la conformación de cada estrato, se han realizado dos ensayos de densidad in situ a cada 25cm de espesor según el método indicado (ítem 4.4), obteniéndose la densidad promedio para cada estrato.

Según se observa, en la conformación de estratos y después de la evaluación de densidades mediante ensayos de densidad a gran escala en gravas (Anexos D) y uso de anillos de borde cortante en arenas, limos y arcillas (Anexos E), las densidades máximas alcanzadas en el estrato más compacto de cada tipo de suelo son mayores a las indicadas por el Proctor estándar; además, estas densidades máximas fueron obtenidas a menor humedad. Esto es debido a la mayor energía de compactación aplicada en los estratos más profundos (2m a 3m de profundidad), puesto que se usó el apisonador mecánico (cap.5), equipo normalmente utilizado en la compactación de capas, terraplenes, entre otros.

No obstante, las densidades promedio alcanzadas en los estratos intermedios (de 1m a 2m de profundidad) resultaron similares a las de diseño. Es así que, en los estratos conformados hasta los dos metros de profundidad se tiene un rango de densidades que trata de imitar los estratos naturales de cada material a diferentes condiciones de compactación.

5.4 ENSAYOS PDC EN EL MODELO EXPERIMENTAL

Al realizar un ensayo PDC con sistema de medición electrónica se obtiene el registro de una serie de puntos contables discretos que vienen a ser lecturas de distancia del censor al disco metálico reflectante, así por diferencia se determina las longitudes de penetración por cada golpe dado. Este punto de inspección, naturalmente, sigue una trayectoria vertical atravesando todos los estratos existentes hasta alcanzar el rechazo. Se considera que se ha llegado al rechazo cuando al menos diez lecturas consecutivas del equipo indican penetraciones menores a dos milímetros (2mm) o existe rebote pronunciado excesivo que además causa constantemente lecturas mayores a las anteriores (es fácil notar que el equipo salta).

El pozo conformado por estratos de características y espesores conocidos permite la observación y análisis de todos los puntos obtenidos en los ensayos de PDC con y sin medición electrónica. Según se muestra en la *Fig. 1.1 Detalles del Modelo Experimental*, se han realizado 12 puntos representativos para ensayar con el equipo PDC. Sin embargo se ha descartado el ensayo en el punto C-14 (columna de gravas y arenas), en razón de mostrar resultados atípicos e inconsistentes. Esto es debido a su cercanía con un tubo antiguo de concreto hueco en una de las esquinas, con el cual habría tenido interferencia.

En las fichas del Anexo F. se presentan los resultados de ensayos PDC para cada punto de inspección del pozo estratificado. Mostrándose tres tipos de curvas obtenidas, las cuales son:

- a) *Curva convencional*, sin medición electrónica. Esta curva grafica en la abscisa cantidad de golpes contados por el operador cada vez que se alcance aproximadamente 10cm de penetración, y en la ordenada la profundidad alcanzada.
- b) *Curva de dispersión*, con medición electrónica donde se representa la penetración en cada golpe con respecto a la profundidad alcanzada. Esta curva se utiliza para analizar la dispersión de las penetraciones por golpe en cada estrato según el tipo de suelo y densidad. Además de ello, en esta curva se denota el tipo de rebote por colores (variable cualitativa).

- c) *Curva acumulada de pendientes*, también con medición electrónica siendo una curva de variable acumulada en la abscisa (cantidad de golpes acumulados) y en la ordenada la profundidad alcanzada. Esta curva se utiliza para la diferenciación de estratos.

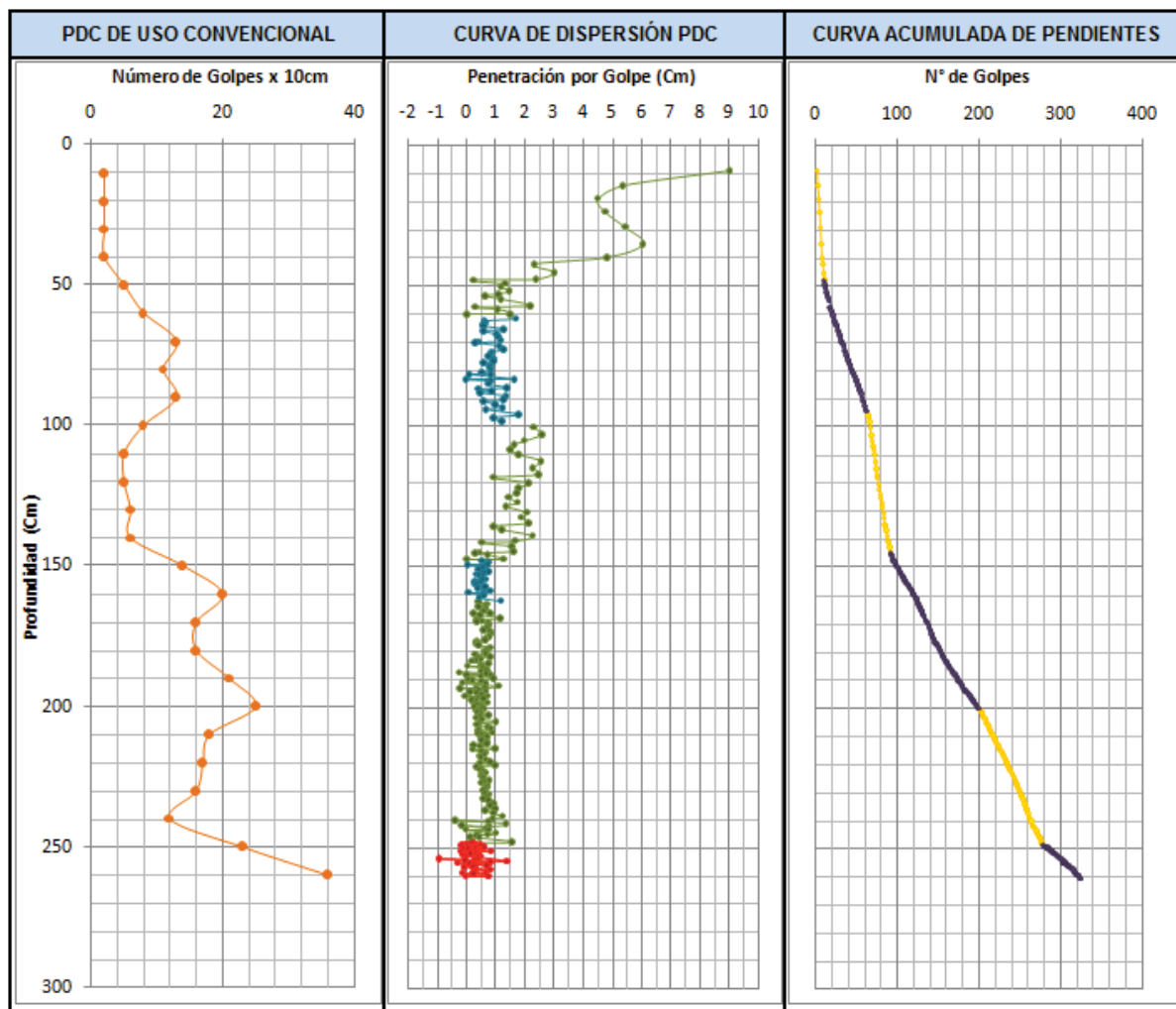


Figura 5.1. Ejemplo de Curvas resultantes del PDC con y sin medición electrónica

Fuente: Captura de pantalla, extraído del Anexo F, punto C-4

5.4.1 PARÁMETROS DE LAS CURVAS PDC CON MEDICIÓN ELECTRÓNICA

La observación y análisis estadístico de las curvas obtenidas a partir de ensayos de penetración dinámica con sistema de medición electrónica han conllevado a establecer parámetros estadísticos inherentes a la sensibilidad del equipo, que registra las longitudes de penetración por cada golpe como series de datos contables discretos; cuyo análisis se ha ajustado a una distribución normal.

5.4.1.1 Penetración media por golpe.

Es la media de un conjunto de datos, penetraciones por golpe ordenadas y sucesivas, cuya gráfica en su respectiva curva acumulada de pendientes, tiende a ser una recta.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Donde: $\bar{P}$ = Penetración media por golpe (mm)

P_i = Longitud de penetración en el golpe i (mm)

n = Número de penetraciones o número de golpes

Nótese en la fig. 5.2 que los cambios de color de amarillo a morado o viceversa, marcan puntos de bifurcación¹³ donde la curva sufre cambios notorios en la pendiente. Dichos puntos delimitan series de datos con la misma tendencia. Entonces, para cada serie o conjunto de datos es posible calcular la penetración media por golpe, que viene a ser numéricamente igual a la pendiente obtenida en un ajuste lineal (mínimos cuadrados).

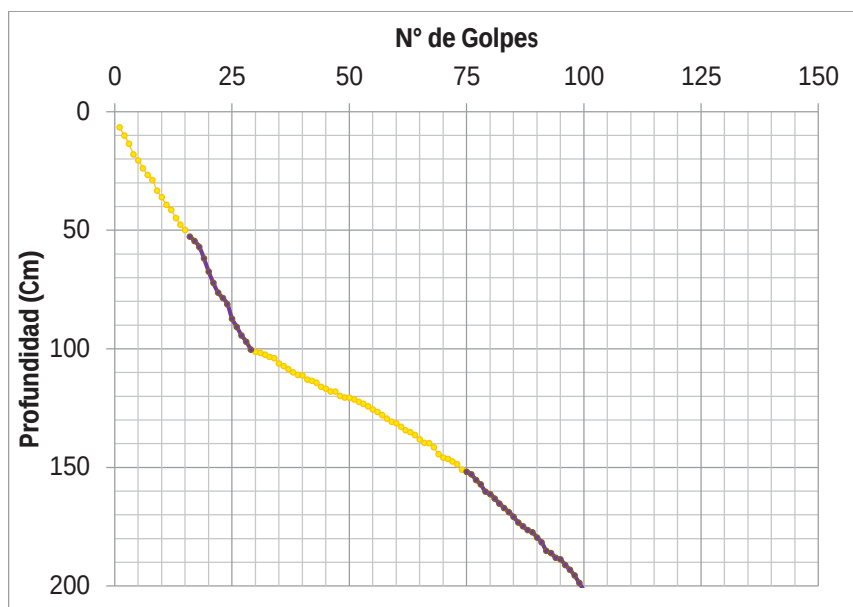


Figura 5.2. Ejemplo de Curva acumulada de pendientes.
Fuente: Extraído del anexo F punto L-4.

¹³ Son puntos donde una curva experimenta cambios abruptos en su tendencia.

5.4.1.2 Variabilidad

5.4.1.2.1 Desviación estándar.

Es un valor estadístico para analizar la dispersión de un conjunto de datos con una misma tendencia lineal, indicando qué tan alejados están los datos respecto a la media, en este caso, la penetración media por golpe.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{P} - P_i)^2}{n - 1}}$$

Donde: σ = Desviación estándar (mm)

$\bar{P}$ = Penetración media o pendiente de la recta (mm)

P_i = Longitud de penetración en el golpe i (mm)

n = Número de penetraciones o número de golpes

El valor de la desviación estándar es fundamental para la determinación del coeficiente de variación y rango de penetración, variables estadísticas de mayor interés por su representatividad en la presente investigación.

5.4.1.2.2 Coeficiente de variación.

La variabilidad de un conjunto de longitudes de penetración por golpe que siguen una misma tendencia lineal, queda mejor representada con el coeficiente de variación. Definiéndose, este último como el cociente entre la desviación estándar y la penetración media.

$$V(\%) = \frac{\sigma}{\bar{P}} * 100\%$$

Donde: $V(\%)$ = Coeficiente de variación

σ = Desviación estándar (mm)

$\bar{P}$ = Penetración media o pendiente de la recta (mm)

5.4.1.3 Rango de penetración.

Es un intervalo de clase cuyos límites muestran el rango de longitudes de penetración para un conjunto de datos con la misma tendencia lineal (penetración media).

El cálculo del límite inferior (penetración mínima) se obtiene por la resta algebraica entre la penetración media y la desviación estándar, mientras que el límite superior (penetración máxima) se obtiene con la suma de los mismos.

Este método permite, sólo para el cálculo del rango de penetración, excluir las longitudes de penetración muy dispersas al conjunto de datos. Entonces, se obtiene un ancho de clase representativo del conjunto de datos en cuestión, tal como muestra en el ejemplo de la fig. 5.3 donde se ilustra tres series de datos con sus respectivos rangos de penetración.

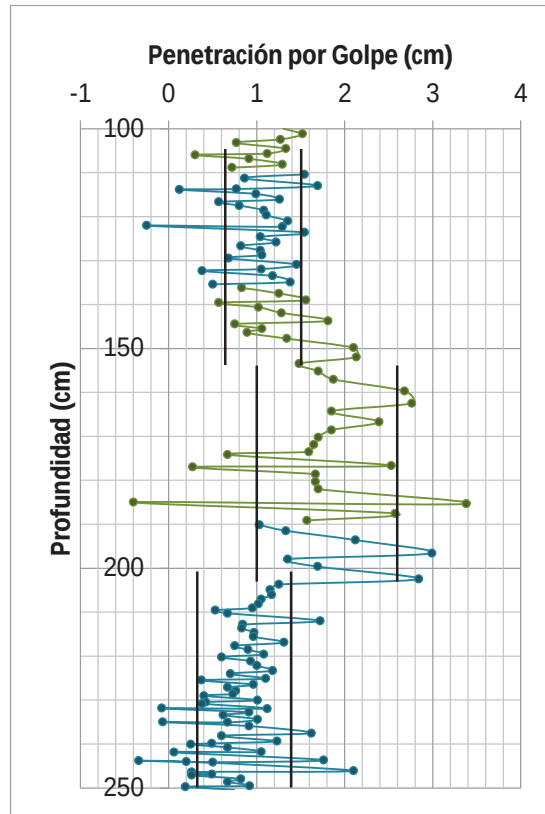


Figura 5.3. Ejemplos de Rangos de penetración mostrados en una curva de dispersión.

Fuente: Extraído del Anexo F punto L-9.

En la tabla 5.3, se muestra ejemplos del cálculo del rango de penetración con respecto a los datos de la figura anterior (fig. 5.3).

Tabla 5.3
Ejemplos de cálculo del rango de penetración

Estrato	Penetración media (mm) $\bar{p}$	Desviación estándar (mm) σ	Límite inferior (mm)* $\bar{p} - \sigma$	Límite superior (mm)* $\bar{p} + \sigma$	Rango de penetración
1	10,5	4,4	6	15	[6, 15]
2	17,8	7,9	10	26	[10, 26]
3	8,3	5,2	5	19	[5, 19]

*Nótese que los límites inferiores y superiores del rango de penetración están siendo redondeados a cero decimales por ser más práctico

Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.4 Tipo de rebote del martillo.

Es una variable cualitativa que depende de la observación del operador del equipo PDC durante su ensayo. Esta variable describe la reacción del martillo después de cada golpe, caracterizando la presencia de rebote o grado del mismo.

El rebote se ha establecido como la máxima altura alcanzada por la base del martillo o masa después que ha golpeado el yunque para la penetración. Para la presente investigación se ha definido tres tipos de rebote.

Tabla 5.4
Tipos de rebote del martillo

COLOR REPRESENTATIVO	TIPO DE REBOTE	SÍMBOLO
	Golpe seco o sin rebote	S
	Golpe con rebote ligero	R
	Golpe con rebote pronunciado	RP

Fuente: Elaboración propia

5.4.1.4.1 Golpe seco o sin rebote (S).-

Se considera golpe seco o sin rebote cuando, después del golpe del martillo en el yunque, el martillo sólo sufre vibraciones más no rebote alguno. Se identifica fácilmente al escuchar un solo sonido de golpe.

5.4.1.4.2 Golpe con rebote ligero (R).-

Se considera rebote ligero cuando, después del golpe del martillo en el yunque, el rebote es no mayor a 2cm, que es un valor límite aproximado y señalado en el tubo guía de golpe. La forma práctica de identificarlo es observando que la base del martillo no supera la marca señalada; además que, el segundo sonido de golpe del martillo en el yunque debido al rebote, es más leve que el golpe del martillo desde la altura de caída del ensayo PDC.

5.4.1.4.3 Golpe con rebote pronunciado (RP).-

Se considera rebote pronunciado cuando, después del golpe del martillo en el yunque, el martillo experimenta un rebote mayor a los 2cm, llegando a superar incluso los 5cm. La forma práctica de identificarlo es también por la observación del rebote superando la marca señalada; en tanto, el segundo sonido de golpe del martillo en el yunque debido al rebote, es similar al sonido emitido por el golpe del martillo desde la altura de caída del ensayo PDC.



a) b)
Imagen 5.1. En las fotografías se muestran instantes en que el martillo alcanza alturas máximas marcando el tipo rebote a) Rebote ligero. b) Rebote pronunciado.

Fuente: Capturas de pantalla de vídeos propios durante un ensayo.

5.5 DIFERENCIACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESTRATOS

En el modelo experimental (pozo estratificado), conocidas las profundidades de cada estrato conformado y una vez realizados los ensayos de penetración dinámica con el sistema de medición electrónica; fue posible analizar y asociar los parámetros estadísticos, obtenidos de las curvas PDC, con las características de los suelos en cuestión.

En primera instancia, la observación y análisis de todas las curvas acumuladas de pendientes en los resultados del pozo estratificado (Anexo F), muestran que los puntos de bifurcación, donde cambian las pendientes, son normalmente cada 50 cm, coincidiendo con el cambio de estratos.

La interpretación correspondiente en base a estos resultados es que, efectivamente, al realizar un ensayo PDC con sistema de medición electrónica se obtiene una curva acumulada de pendientes donde puede identificarse conjuntos de datos diferenciados por la tendencia que siguen, esta última debido a las características físico-mecánicas y tipología del suelo que representan. Así, cada punto de bifurcación señala un cambio en las propiedades físico- mecánicas del suelo y la profundidad a la que esta se da.

Técnica de la superposición.

Una forma práctica de identificar los puntos de bifurcación es mediante la superposición de una regla sobre la curva acumulada de pendientes, de tal forma que la recta proyectada abarque la mayor cantidad de puntos hasta que sea necesaria un cambio de dirección (deflexión), lo cual indica la ubicación del punto requerido. Esta delimitación de fronteras para cada estrato se refuerza con el análisis de los demás parámetros establecidos.

Cálculos de parámetros estadísticos en cada tipo de suelo.

Una vez identificado los conjuntos de datos (estratos) en el modelo experimental, se ha determinado las variables estadísticas para cada serie de datos. Las tablas numeradas del 5.5 al 5.8 muestran los parámetros estadísticos resultantes para cada tipo de suelo en los doce puntos de auscultación ensayados en el modelo experimental.

Tabla 5.5

Parámetros estadísticos en estratos de arena (SM) del modelo experimental

ESTRATO	PUNTO	PENETRACIÓN MEDIA $\bar{P}$ (mm/golpe)	DESVIACIÓN ESTANDAR σ (mm)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN V (%)	RANGO DE PENETRACIÓN e [mm, mm]	TIPO DE REBOTE % de ocurrencia
ARENA	C-4	47,7	19,8	42%	[28, 68]	100% S
SUELTA	C-9	48,6	19,9	41%	[29, 68]	100% S
$\bar{\gamma} = 1.43$	F-4	40,3	19,5	48%	[21, 60]	100% S
(Tn/m3)	F-9	38,3	22,9	60%	[15, 61]	100% S
	F-14	42,4	20,9	49%	[21, 63]	100% S
ARENA	C-4	17,3	5,2	30%	[12, 23]	95%S-5%R
SEMI	C-9	18,7	4,4	23%	[14, 23]	100%R
COMPACTA	F-4	16,9	3,6	21%	[13, 20]	95%S-5%R
$\bar{\gamma} = 1.52$	F-9	15,7	4,1	26%	[12, 20]	100%S
(Tn/m3)	F-14	15,8	5,5	35%	[10, 21]	80%S-20%R
ARENA	C-4	6,2	3,0	48%	[3, 9]	100% S
COMPACTA	C-9	7,2	6,2	86%	[1, 13]	100% S
$\bar{\gamma} = 1.84$	F-4	3,7	3,6	97%	[0, 7]	100% R
(Tn/m3)	F-9	3,7	3,2	88%	[0, 7]	25%R-75%RP
	F-14	4,0	3,1	79%	[1, 7]	50%R-50%RP

Fuente: Elaboración propia a partir de registro y procesamiento de datos procedentes de los ensayos PDC con medición electrónica, Anexo F.

Tabla 5.6

Parámetros estadísticos en estratos de grava (GP-GC) del modelo experimental

ESTRATO	PUNTO	PENETRACIÓN MEDIA $\bar{P}$ (mm/golpe)	DESVIACIÓN ESTANDAR σ (mm)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN V (%)	RANGO DE PENETRACIÓN e [mm, mm]	TIPO DE REBOTE % de ocurrencia
GRAVA	C-4	8,9	4,5	50%	[4, 13]	20%S-80%R
SUELTA	C-9	12,1	5,5	46%	[7, 18]	50%S-50%R
$\bar{\gamma} = 2.15$	F-4	10,4	5,7	55%	[5, 16]	20%S-80%R
(Tn/m3)	F-9	8,6	3,4	40%	[5, 12]	100%R
	F-14	10,6	6,0	57%	[5, 17]	100%R
GRAVA	C-4	5,1	2,7	53%	[2, 8]	80%S-20%R
SEMI	C-9	5,7	5,5	96%	[0, 11]	100%R
COMPACTA	F-4	5,4	4,0	74%	[1, 9]	8%S-92%R
$\bar{\gamma} = 2.20$	F-9	5,2	2,6	50%	[3, 8]	20%S-80%R
(Tn/m3)	F-14	6,5	5,4	84%	[1, 12]	50%S-50%R
GRAVA	C-4	2,6	3,7	143%	[-1, 6]	100%RP
COMPACTA	C-9	2,8	6,1	220%	[-3, 9]	100%RP
$\bar{\gamma} = 2.39$	F-4	1,0	3,1	306%	[-2, 4]	100%RP
(Tn/m3)	F-9	1,0	2,3	240%	[-1, 3]	100%RP
	F-14	1,0	4,6	447%	[-4, 6]	100%RP

Fuente: Elaboración propia a partir de registro y procesamiento de datos procedentes de los ensayos PDC con medición electrónica, Anexo F.

Tabla 5.7

Parámetros estadísticos en estratos de Limo (ML) del modelo experimental

ESTRATO	PUNTO	PENETRACIÓN MEDIA $\bar{P}$ (mm/golpe)	DESVIACIÓN ESTANDAR σ (mm)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN V (%)	RANGO DE PENETRACIÓN e [mm, mm]	TIPO DE REBOTE % de ocurrencia
LIMO BLANDO $\bar{\gamma} = 1.72$ (Tn/m3)	L-4	33,2	11,6	35%	[22, 45]	100%S
	L-9	33,1	11,3	34%	[22, 44]	100%S
	L-14	32,2	8,0	25%	[24, 40]	100%S
	O-5	33,4	13,2	40%	[20, 47]	100%S
	O-9	31,1	8,0	26%	[23, 39]	100%S
LIMO SEMI DURO $\bar{\gamma} = 1.97$ (Tn/m3)	O-14	26,3	9,7	37%	[17, 36]	100%S
	L-4	11,2	5,8	51%	[5, 17]	100%S
	L-9	10,5	4,4	42%	[6, 15]	50%S-50%R
	L-14	10,7	3,4	32%	[7, 14]	100%S
	O-5	11,7	5,6	48%	[6, 17]	100%S
LIMO DURO $\bar{\gamma} = 2.18$ (Tn/m3)	O-9	11,7	7,6	65%	[4, 19]	100%S
	O-14	12,5	5,4	43%	[7, 18]	100%S
	L-4	6,6	3,4	51%	[3, 10]	40%S-60%R
	L-9	8,3	5,2	62%	[3, 14]	100%R
	L-14	8,0	3,6	45%	[4, 12]	80%S-20%R
	O-5	6,5	4,4	68%	[2, 11]	100%R
	O-9	8,9	3,7	42%	[5, 13]	100%S
	O-14	7,3	4,8	66%	[3, 12]	90%S-10%R

Fuente: Elaboración propia a partir de registro y procesamiento de datos procedentes de los ensayos PDC con medición electrónica, Anexo F.

Tabla 5.8

Parámetros estadísticos en estratos de arcilla (CL) del modelo experimental

ESTRATO	PUNTO	PENETRACIÓN MEDIA $\bar{P}$ (mm/golpe)	DESVIACIÓN ESTANDAR σ (mm)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN V (%)	RANGO DE PENETRACIÓN e [mm, mm]	TIPO DE REBOTE % de ocurrencia
ARCILLA BLANDA $\bar{\gamma} = 1.44$ (Tn/m3)	L-4	36,1	13,1	36%	[23, 49]	100%S
	L-9	31,3	15,1	48%	[16, 46]	100%S
	L-14	36,4	12,1	33%	[24, 48]	100%S
	O-5	31,7	13,2	42%	[18, 45]	100%S
	O-9	28,9	4,8	17%	[24, 34]	100%S
ARCILLA SEMI DURA $\bar{\gamma} = 1.53$ (Tn/m3)	O-14	32,4	10,9	34%	[22, 43]	100%S
	L-4	19,6	7,5	38%	[12, 27]	100%S
	L-9	17,8	7,9	45%	[10, 26]	80%S-20%R
	L-14	20,1	5,2	26%	[15, 25]	100%S
	O-5	16,8	6,7	40%	[10, 24]	90%S-10%R
ARCILLA DURA $\bar{\gamma} = 2.07$ (Tn/m3)	O-9	13,5	5,3	39%	[8, 19]	100%S
	O-14	16,1	6,0	37%	[10, 22]	100%S
	L-4	10,4	5,6	54%	[5, 16]	20%S-80%R
	L-9	9,5	5,2	55%	[4, 15]	100%R
	L-14	12,1	4,3	36%	[8, 16]	100%R
	O-5	10,3	5,0	48%	[5, 15]	90%S-5%R
	O-9	7,0	5,0	72%	[2, 12]	50%S-10%R-40%RP
	O-14	11,2	4,0	36%	[7, 15]	5%S-95%R

Fuente: Elaboración propia a partir de registro y procesamiento de datos procedentes de los ensayos PDC con medición electrónica, Anexo F.

En total se ha realizado el registro de 3655 lecturas, de las cuales se han descartado 241, pertenecientes al punto C-14. Todas las lecturas se han agrupado en 76 conjuntos de la misma tendencia según la metodología indicada para la delimitación de estratos, a partir de las cuales se ha realizado el análisis estadístico respectivo.

Se observa que cada estrato en estudio cuenta con cinco a seis series de parámetros estadísticos (filas) susceptibles a la continuación del análisis estadístico para la asociación con las características del suelo que representan.

Por ejemplo, con los datos del estrato definido como *limo semiduro* (ver tabla 5.7), se muestra la determinación de rangos para cada parámetro estadístico en la siguiente tabla:

Tabla 5.9
Ejemplo de la determinación de rangos para cada parámetro estadístico

	LIMO SEMIDURO (ESTRATO M-2)	Penetración Media (mm)	Desviación estándar (mm)	Coeficiente de variación %	Rango de Penetración		Tipo de rebote (% de ocurrencia)
					Límite inferior	Límite superior	
Puntos de inspección en M-2	L-4	11.2	5.8	51%	5.5	17.0	100%S
	L-9	10.5	4.4	42%	6.1	14.8	50%S-50%R
	L-14	10.7	3.4	32%	7.3	14.1	100%S
	0-5	11.7	5.6	48%	6.1	17.3	100%S
	0-9	11.7	7.6	65%	4.1	19.4	100%S
	0-14	12.5	5.4	43%	7.1	18.0	100%S
Determinación de rangos para cada parámetro	Promedio (i)	11.4	5.4	47%	6.0	16.7	92%S- 8%R
	Desv. Estándar (ii)	0.8	1.4	11%			
	Límite inferior (i-ii)	10.6	3.9	36%			
	Límite superior (i+ii)	12.2	6.8	58%			
	Rango de cada parámetro [i-ii, i+ii]	[10, 12]	[4, 7]	[36%, 58%]	[6, 17]		92% S- 8% R

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se observa que la penetración media por golpe en estratos de limo semiduro varía estadísticamente entre 10 a 12 milímetros, con desviaciones estándar que van de cuatro a siete milímetros. Del mismo modo se obtiene el rango de valores probables en cuanto a la variabilidad de los datos (variabilidad promedio 47%).

En cuanto al tipo de rebote para este estrato de limo, se muestra que en casi todos los puntos de inspección se ha presentado golpe seco (S) al 100%. Sin embargo, en el punto L-9 se ha registrado rebote (R) en 50%, el cual ha influido en el rango final para el tipo de rebote del estrato en cuestión,

determinándose en promedio porcentajes de ocurrencia de 92% de golpes secos (predominante) y 8% de rebote.

El procedimiento anteriormente descrito para la determinación de rangos probables de cada parámetro estadístico se ha realizado para cada uno de los doce estratos conformados en el modelo experimental. En consecuencia, se ha obtenido la Tabla 5.10 como un resultado de la investigación que asocia el tipo de suelo con rangos de variables propuestas que podría ser usada para interpretar perfiles PDC de campo.

Tabla 5.10
Rangos de parámetros estadísticos según tipo de suelo del modelo experimental

SUELO	ESTADO	PENETRACIÓN MEDIA $\bar{P}$ (mm/golpe)	DESVIACIÓN ESTANDAR σ (mm)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN V (%)	RANGO DE PENETRACIÓN e [mm, mm]	TIPO DE REBOTE Reb
GRAVA (GP-GC)	SUELTO	[9, 12]	[4, 6]	[43%, 56%]	[5, 15]	18%S-82%R
	SEMI COMPACTO	[5, 6]	[3, 5]	[52%, 91%]	[2, 10]	32%S-68%R
	COMPACTO	[1, 3]	[3, 5]	[>100%]	[-2, 6]	100%RP
ARENA (SM)	SUELTO	[39, 48]	[19, 22]	[40%, 56%]	[23, 64]	100% S
	SEMI COMPACTO	[16, 18]	[4, 5]	[22%, 32%]	[12, 21]	74%S-26%R
	COMPACTO	[3, 7]	[2, 5]	[61%, 98%]	[1, 9]	40%S-35%R-25%RP
LIMO (ML)	BLANDO	[29, 34]	[8, 12]	[27%, 39%]	[21, 42]	100%S
	SEMI DURO	[10, 12]	[4, 7]	[36%, 58%]	[6, 17]	92%S-8%R
	DURO	[7, 9]	[3, 5]	[45%, 67%]	[3, 12]	52%S-48%R
ARCILLA (CL)	BLANDO	[30, 36]	[8, 15]	[24%, 46%]	[21, 44]	100%S
	SEMI DURO	[15, 20]	[5, 8]	[31%, 44%]	[11, 24]	95%S-5%R
	DURO	[8, 12]	[4, 5]	[36%, 64%]	[5, 15]	38%S-56%R-6%RP

Fuente: Elaboración propia

Analizando las variables estadísticas definidas en las curvas PDC con medición electrónica, para los tipos de suelos estudiados y a partir de sus estados en el modelo experimental, se obtiene las siguientes afirmaciones:

- La penetración media y demás parámetros estadísticos de las curvas resultantes en cada estrato están influenciados por el tipo de suelo y la densidad del mismo. Para cada tipo de suelo en cuestión se ha establecido tres densidades diferentes que representan estados como suelto, semicompacto y compacto en el caso de gravas y arenas. En cambio, se ha denominado como blando, semiduro y duro en los casos de arcillas y limos.
- La tabla 5.10 muestra que, en un mismo tipo de suelo, la penetración media en el estrato suelto es aproximadamente el doble que en el estrato semicompacto. Esto representa incrementos de la densidad en 6% tanto en arcillas como en arenas. En cuanto a las gravas, se trata de incrementos del 2% y en los limos 10%.
- Los estratos de limo y arcilla en estado blando presentan similares valores en cuanto a la penetración media y tipo de rebote. Diferenciándose un tanto en la variabilidad de los datos.

CAPÍTULO VI DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El desarrollo del Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) con sistema de medición electrónica, ensayado en perfiles estratigráficos (modelo experimental), permitió el establecimiento de parámetros estadísticos con respecto a la auscultación de suelos con equipos PDC. Estos resultados, valores y ventajas encontradas fueron puestos a discusión en ensayos de campo descritos en el ítem 1.12.2 (prueba PDC en campo).

Este capítulo de discusión de resultados se ha llevado en torno a dos tópicos principales de la investigación. Los cuales son:

- Descripción de las ventajas técnicas del equipo desarrollado y comparación con otros equipos utilizados en nuestro medio.
- Obtención de perfiles estratigráficos (diferenciación de estratos e identificación del tipo de suelo) en base a los resultados y propuestas de la investigación.

6.1 VENTAJA TÉCNICA

6.1.1 CONTEO DE GOLPES DURANTE EL ENSAYO

En la mayoría de ensayos PDC utilizados en nuestro medio, continua el método rudimentario de contar el número de golpes por cada 10cm de penetración, lo cual incrementa las posibilidades de error en el conteo debido a distracciones por parte de los operadores; además que la señalización de los 10cm de penetración muchas veces es imprecisa quedando a criterio del operador decidir cuándo se ha llegado aproximadamente a los 10cm.

A diferencia de lo anteriormente descrito, el equipo PDC con el sistema de medición electrónica realiza el conteo de golpes de manera automática durante el ensayo PDC, registrando el número de golpes acumulados.

6.1.2 TRASLADO Y OPERACIÓN DEL EQUIPO

Un Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC), se caracteriza por ser un instrumento liviano y de fácil transporte incluso a lugares poco accesibles. Con la implementación del sistema de medición electrónica esta cualidad no cambia, puesto que el peso de los elementos constituyentes del sistema electrónico es no mayor al 5% del peso total del equipo PDC, tal como se demuestra en la tabla 6.1 donde se detalla los pesos unitarios de cada elemento del equipo.

Respecto a la operación del equipo PDC con el sistema de medición automatizada, resulta ser igual de sencillo y práctico tal como se detalla en el ítem 3.2.3 (manual de operación), donde también se describe las precauciones de seguridad y conservación del equipo.

Tabla 6.1
Peso de los elementos del PDC con sistema de medición electrónica

ELEMENTO MECÁNICO	CANTIDAD	PESO UNITARIO (kg)	PESO TOTAL (kg)	PORCENTAJE QUE REPRESENTA
PARTE MECÁNICA				
Punta	2	0,075	0,150	0,4%
Tubo pdc	12	1,030	12,360	34,9%
Yunque	2	1,115	2,230	6,3%
Tubo guía	1	0,990	0,990	2,8%
Martillo o masa	1	6,010	6,010	17,0%
Campana	1	0,140	0,140	0,4%
Apoyo	1	3,135	3,135	8,9%
Cadena	1	0,675	0,675	1,9%
Palanca	1	4,635	4,635	13,1%
Tubo extensión de palanca	1	3,090	3,090	8,7%
Herramientas de uso múltiple	1	0,225	0,225	0,6%
PARTE ELECTRÓNICA				
Caja de procesamiento y elementos electrónicos	1	1,200	1,200	3,4%
Disco de medición y elementos electrónicos	1	0,320	0,320	0,9%
Cables de conexión	1	0,240	0,240	0,7%
TOTAL	26	22,88	35,40	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

6.1.3 REGISTRO DE DATOS EN CAMPO

El registro de número de golpes por cada 10cm de penetración implica que el ensayo PDC pierda dinamismo y continuidad cuando éstos son escritos en una libreta de campo.

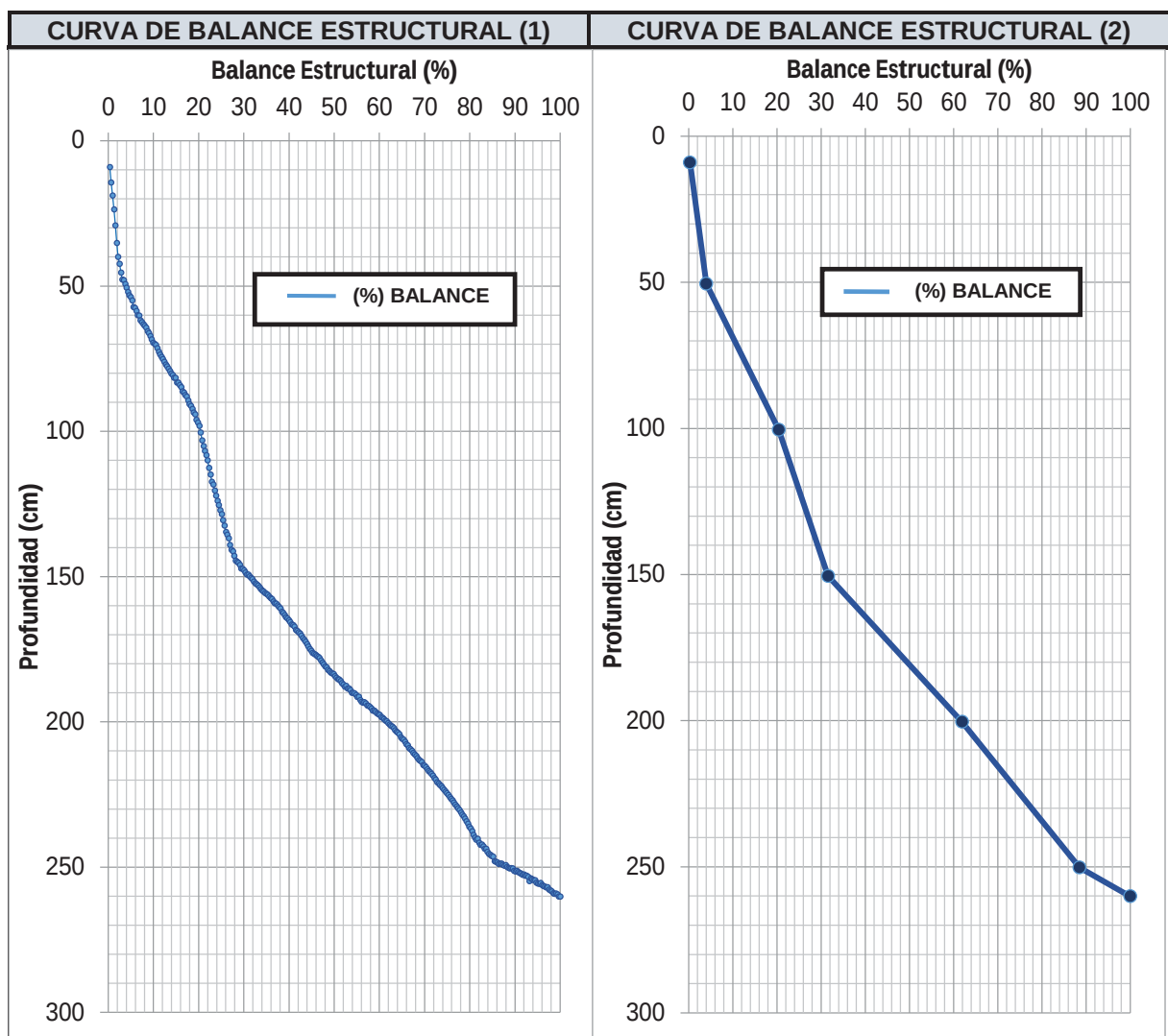
Con la aparición de los nuevos equipos PDC con la regla milimétrica incorporada; si bien, han logrado obtener longitudes de penetración por golpe del martillo a través de lecturas visuales y posterior anotaciones, se ha incrementado el tiempo para el registro de datos y por consiguiente hay una mayor reducción del dinamismo, lo que cambia totalmente con un sistema de medición automatizada.

6.1.4 PROCESAMIENTO DE DATOS EN GABINETE

Trasladar ya sea 50 datos de número de golpes de la libreta de campo a la computadora es fastidioso, ahora trasladar 1000 o 2000 datos como longitudes de penetración a la computadora puede resultar hasta estresante, incrementándose el tiempo necesario para el procesamiento de datos, inconveniente que es resuelto satisfactoriamente por el nuevo equipo desarrollado, debido a la ventaja de trasladar rápidamente los datos a la computadora para su posterior procesamiento, requiriendo un par de minutos ya que el equipo lo registra en una memoria MicroSD, facilitando incluso el envío de datos registrados mediante dispositivos electrónicos.

6.1.5 OBTENCIÓN DE CURVAS DE BALANCE ESTRUCTURAL

La cantidad de datos obtenidos por los ensayos de penetración dinámica con el PDC – UNSAAC, se adapta fácilmente a la producción de otros gráficos, obtenidas a partir del conteo de golpes de los ensayos PDC, planteados por diferentes investigadores con objetivos semejantes a nivel nacional e internacional, por ejemplo: la curva de Balance Estructural, es una curva que relaciona el porcentaje de golpes requeridos para penetrar cierta profundidad, respecto del número total de golpes necesario para penetrar la profundidad evaluada, todo esto en función a la profundidad alcanzada (Tupia & Alva, 2001). Este tipo de gráfico es posible realizarlo con la data del PDC – UNSAAC, donde se obtiene una curva más suavizada, notándose además que es semejante a la curva acumulada de pendientes.

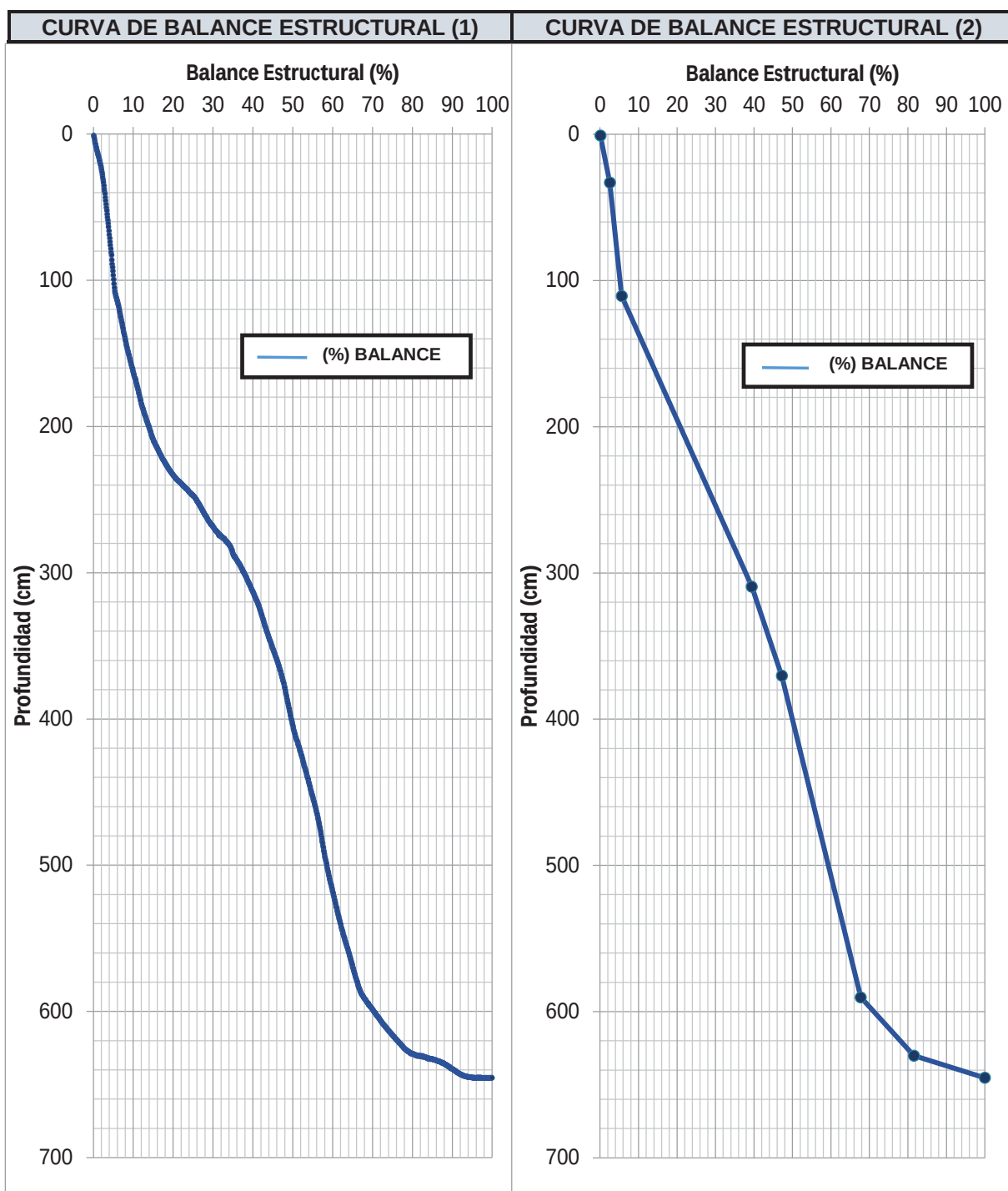


(1) Curva de balance estructural a partir de longitudes de penetración por golpe del martillo.

(2) Curva de balance estructural por estratos definidos por resultados de ensayos PDC UNSAAC.

Figura 6.1a. Curva de balance estructural a partir de ensayo PDC UNSAAC en el punto C-4 del modelo experimental.

Fuente: Elaboración propia



(1) Curva de balance estructural a partir de longitudes de penetración por golpe del martillo.

(2) Curva de balance estructural por estratos definidos por resultados de ensayos PDC UNSAAC.

Figura 6.1b. Curva de balance estructural a partir de ensayo PDC UNSAAC en el punto C-1, del pozo Pz=04 de la prueba en campo.

Fuente: Elaboración propia

6.1.6 COMPARACIÓN DE CURVAS RESULTANTES

Al realizar una comparación de resultados con el quinto y octavo antecedente de la investigación, Viscarra F. (2006) y Cruz J. (2015), se ha encontrado que existe un valor aproximado de la penetración media, el cual es llamado por los autores como “Índice de penetración” y “Número PDC” respectivamente, que indica una medida de resistencia del suelo. Éste valor es calculado de la siguiente manera:

$$N_{10} = \frac{10cm}{N^{\circ} \text{ de golpes}}$$

La variación de este valor, indican los autores, representa las modificaciones en las características de humedad, densidad o bien cambio de estrato del suelo. Este valor mencionado, a diferencia del parámetro estadístico “Penetración media” obtenida a partir de los ensayos PDC con sistema de medición electrónica, no considera la variación que pueda existir ya sea en propiedades físico-mecánicas o cambio de estratos en rangos de 10cm.

El suelo en la naturaleza es sumamente heterogéneo. En 10cm de profundidad pueden existir lentes, trazas, o bolsonadas; partes de un perfil estratigráfico, que podrían ser detectadas por el equipo desarrollado en la presente investigación.

Por otro lado, la “Curva de Dispersión” es una nueva gráfica procedente del registro y procesamiento de datos del PDC con sistema de medición electrónica, donde se denota directamente cada golpe del martillo, la profundidad alcanzada además de la existencia y caracterización del rebote, variables destacadas en la presente investigación.

6.2 OBTENCIÓN DE PERFILES ESTRATIGRÁFICOS

Los siguientes cuadros comparativos muestran los perfiles estratigráficos obtenidos por los resultados de las curvas PDC con medición electrónica respecto a los resultados de perforaciones y calicatas realizadas en campo.

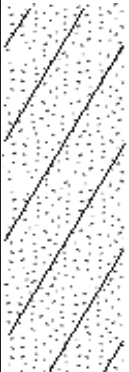
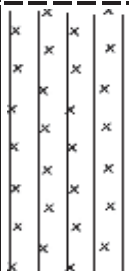
RESULTADOS PDC CON SISTEMA DE MEDICIÓN AUTOMATIZADA							RESULTADOS DE PERFORACION				
Prof (cm)	PARAMETROS DE IDENTIFICACION					RESULTADO SEGÚN TABLA 5.10	Prof (cm)	Hum W%	MATERIAL		OBSERVACIONES
	Pen mm/glpe	σ mm	V (%)	e mm	Reb				SUCS	DESCRIPCIÓN SUCS	
30	42,9	5,8	14%	[37, 49]	S	Arena suelta Arcilla semidura	35	18,9		CL - ML Arcilla limosa	Arcilla limosa marrón rojiza, Dura compacta.
100	18,0	4,7	26%	[13, 23]	S	Arena semicompacta Arcilla semidura	95	16,8		SM Arena limosa	Arena arcillo limosa marrón rojizo clara presenta concreciones de marga (manchas rojo blanquecino).
150	10,0	5,8	58%	[4, 16]	S	Limo semiduro	135	18,2			
193		3,0	30%	[7, 13]	S	Limo semiduro	185	13,2			
270	8,6	5,9	68%	[3, 14]	S	Limo duro Arena compacta	285			SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina con poco limo marrón rojizo claro presenta concreciones carbonatadas (marga) en forma de manchas rosadas.
345	2,4	3,3	140%	[-1, 6]	RP	Grava compacta Arena compacta	295	18,1		SP Arena mal gradada	Arena fina limpia marrón rojizo clara, con traza de gravilla.
380	3,3	4,0	120%	[-1, 7]	R	Arena compacta Grava semicompacta	409	21,3		SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina limosa marrón rojizo clara. Dura compacta
420	4,8	3,2	67%	[2, 8]	50%S 50%R	Limo duro					

Figura 6.2. Comparación de resultados PDC punto A-1 con resultados de perforación Pz=01

Fuente: Elaboración propia

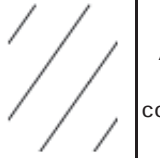
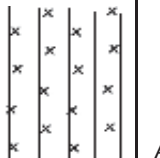
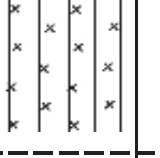
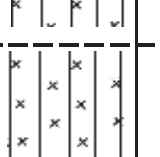
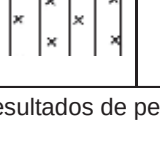
RESULTADOS PDC CON SISTEMA DE MEDICIÓN AUTOMATIZADA							RESULTADOS DE PERFORACION				
Prof (cm)	PARAMETROS DE IDENTIFICACION					RESULTADO SEGÚN TABLA 5.10	Prof (cm)	Hum W%	MATERIAL		OBSERVACIONES
	Pen mm/glpe	σ mm	V (%)	e mm	Reb				SUCS	DESCRIPCIÓN SUCS	
110	13,6	4,2	31%	[9,18]	S	Limo semiduro Arcilla Semidura	93	18,1		CL Arcilla de baja compresibilidad	Arcilla limosa con arena fina marrón rojizo clara, concreciones calcáreas de marga visibles como manchas rojo blanquecino.
175	9,7	2,6	27%	[7, 12]	S	Limo duro Arena compacta	165	21,9		SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina limosa marrón rojizo clara, material homogéneo, duro y compacto.
260	6,1	2,3	37%	[4, 8]	S	Arena compacta Limo duro	187	20,0			
385	3,3	2,1	63%	[1, 5]	62%S 23%R 15%RP	Arena compacta con lente o traza de material duro a profundidad de 3.30m-3.50m	247	19,4		SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina con limo marrón rojiza, con un lente de grava.
	Lente o traza de Material muy duro o compacto						350	17,0			
560	3,7	3,2	85%	[1, 7]	82%S 18%R	Arena compacta	370				
							395	27,6		SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina limosa rojizo clara, con traza de arena limpia marron rojiza.
							460	17,7			
							534	19,9			

Figura 6.3. Comparación de resultados PDC punto B-1 con resultados de perforación Pz=02

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS PDC CON SISTEMA DE MEDICIÓN AUTOMATIZADA							RESULTADOS DE PERFORACION				
Prof (cm)	PARAMETROS DE IDENTIFICACION					RESULTADO SEGÚN TABLA 5.10	Prof (cm)	Hum W%	MATERIAL		OBSERVACIONES
	Pen mm/glpe	σ mm	V (%)	e mm	Reb				SUCS	DESCRIPCIÓN SUCS	
35	4,9	3,6	73%	[1, 8]	R	Arena compacta	85 105 243	14,3		CL Arcilla de baja compresibilidad	Arcilla limo arenoso marrón rojiz. Dura, compacta.
80	7,7	4,6	59%	[3, 12]	30%R 70%S	Limo duro					
190	8,2	3,9	48%	[4, 12]	S	Limo duro Arena semicompacta					
240	4,6	2,4	52%	[2, 7]	60%S 30%R 10%RP	Arena compacta					

Figura 6.4. Comparación de resultados PDC punto D-1 con resultados de perforación Pz=03

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS PDC CON SISTEMA DE MEDICIÓN AUTOMATIZADA							RESULTADOS DE PERFORACION				
Prof (cm)	PARAMETROS DE IDENTIFICACION					RESULTADO SEGÚN TABLA 5.10	Prof (cm)	Hum W%	MATERIAL		OBSERVACIONES
	Pen mm/glpe	σ mm	V (%)	e mm	Reb				SUCS	DESCRIPCIÓN SUCS	
35	7,3	3,7	51%	[4, 11]	S	Limo duro Arcilla dura	85 105 243	14,3		CL Arcilla de baja compresibilidad	Arcilla limo arenoso marrón rojiz. Dura, compacta.
80	12,3	5,5	45%	[7, 18]	S	Limo semiduro					
120		2,6	21%	[10, 15]	S	Arcilla semidura Arena semicompacta					
170	8,4	3,6	43%	[5, 12]	S	Limo duro					
240	5,9	2,7	46%	[3, 9]	79%S 21%R	Arena compacta Limo duro					

Figura 6.5. Comparación de resultados PDC punto D-2 con resultados de perforación Pz=03

Fuente: Elaboración propia

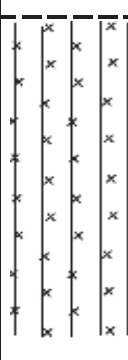
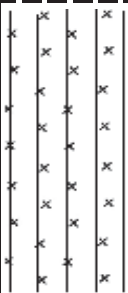
RESULTADOS PDC CON SISTEMA DE MEDICIÓN AUTOMATIZADA							RESULTADOS DE CALICATA				
Prof (cm)	PARAMETROS DE IDENTIFICACION					RESULTADO SEGÚN TABLA 5.10	Prof (cm)	Hum W%	MATERIAL		OBSERVACIONES
	Pen mm/glpe	σ mm	V (%)	e mm	Reb				SUCS	DESCRIPCIÓN SUCS	
30	11,8	3,1	27%	[9, 15]	S	Limo semiduro Arcilla dura	13			CL CL	Tierra arcillosa marrón
80	22,8	2,7	12%	[20, 25]	S	Arcilla semidura	80			Arcilla de baja compresibilidad	Arcilla arenosa marrón oscura, material suave.
110		8,0	35%	[15, 31]	S	Limo semiduro Arcilla semidura	105 110	21,2		CL - ML Arcilla limosa	Arcilla limosa verde amarillento. (LENTE)
210	9,5	2,7	29%	[7, 12]	S	Limo duro Arcilla dura	144	17,8		CL - ML Arcilla limosa	Arcilla areno limosa marrón rojizo blanquecino claro, presenta concreciones de marga.
310	Trazas de Material muy duro o compacto				40%S 40%R 20%RP	Arena compacta con lente o traza de material duro a profundidad de 2.35m-2.52m	210 217	15,5			SP - SM Arena mal gradada con limo
370	7,1	1,9	27%	[5, 9]	S	Arena compacta Limo duro	310	17,3			SP - SM Arena mal gradada con limo
480	9,7	2,7	28%	[7, 12]	S	Limo duro Arena semicompacta Arcilla dura	379 420 440	22,1 30,4 20,7			SP - SC Arena mal gradada con arcilla
590		3,2	33%	[7, 13]	S	Limo duro Arcilla dura	479 515 592	25,4 25,7	SP - SM Arena mal gradada con limo		Arena fina limosa marrón, con pocas concreciones margosas, material duro y compacto.
640	2,6	2,0	77%	[1, 5]	50%S 50%R	Arena compacta					

Figura 6.6. Comparación de resultados PDC punto C-1 con resultados de perforación Pz=04
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS PDC CON SISTEMA DE MEDICIÓN AUTOMATIZADA							RESULTADOS DE CALICATA				
Prof (cm)	PARAMETROS DE IDENTIFICACION					RESULTADO SEGÚN TABLA 5.10	Prof (cm)	Hum W%	MATERIAL		
	Pen mm/glpe	σ mm	V (%)	e mm	Reb				SUCS	DESCRIPCIÓN SUCS	OBSERVACIONES
10		13,6	48%	[27, 56]	S	Arcilla blanda	13			CL	Tierra arcillosa marrón
70	28,4	8,9	31%	[20, 37]	S	Arcilla blanda Limo blando	80			CL	Arcilla arenosa marrón oscura, material suave.
							105			CL - ML Arcilla limosa	Arcilla limosa verde amarillento. (LENTE)
	10,2	3,2	32%	[7, 13]	S	Limo semiduro	110	21,2			
							144	17,8		CL - ML Arcilla limosa	Arcilla areno limosa marrón rojizo blanquecino claro, presenta concreciones de marga.
220							210				
	3,2	2,4	76%	[1, 6]	25%S 75%RP	Arena compacta	217	15,5			
300										SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina limosa marrón rojizo clara, con trazas de arena limpia. Material duro.
	4,5	3,2	73%	[1, 8]	R	Arena compacta	310	17,3			
360											
	5,9	2,3	39%	[4, 8]	S	Arena compacta	379	22,1			
420							420	30,4		SP - SC Arena mal gradada con arcilla	Arena fina limoarcillosa marrón rojiza con concreciones de marga.
450	1,9	3,5	187%	[-2, 5]	RP	Grava compacta	440	20,7			
							479				
***	***	***	***	***	***	***	515	25,4		SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina limosa marrón, con pocas concreciones margosas, material duro y compacto.
							592	25,7			

Figura 6.7. Comparación de resultados PDC punto C-2 con resultados de perforación Pz=04
Fuente: Elaboración propia

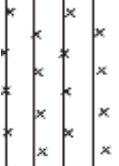
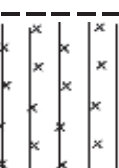
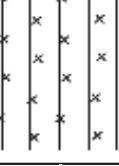
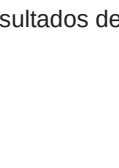
RESULTADOS PDC CON SISTEMA DE MEDICIÓN AUTOMATIZADA							RESULTADOS DE CALICATA				
Prof (cm)	PARAMETROS DE IDENTIFICACION					RESULTADO SEGÚN TABLA 5.10	Prof (cm)	Hum W%	MATERIAL		OBSERVACIONES
	Pen mm/glpe	σ mm	V (%)	e mm	Reb				SUCS	DESCRIPCIÓN SUCS	
20	10,00	3,3	33%	[7, 13]	50%S 50%R	Limo duro Arcilla dura	13			CL CL	Tierra arcillosa marrón
80	19,1	10,3	54%	[9, 29]	S	Arena suelta Limo blando arcilla blanda	80			Arcilla de baja compresibilidad	Arcilla arenosa marrón oscura, material suave.
140		4,6	24%	[14, 24]	S	Arcilla semidura Arena semicompacta	105 110	21,2		CL - ML Arcilla limosa	Arcilla limosa verde amarillento, (LENTE)
210	10,8	4,3	40%	[6, 15]	S	Limo semi duro arcilla dura	144	17,8		CL - ML Arcilla limosa	Arcilla areno limosa marrón rojizo blanquecino claro, presenta concreciones de marga.
270	4,8	2,3	48%	[2, 7]	30%R 70%RP	Arena compacta	210 217	15,5		SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina limosa marrón rojizo clara, con trazas de arena limpia. Material duro.
290	2,2	3,6	163%	[-1, 6]	RP	Grava compacta	310	17,3			
320	4,0	10,1	254%	[-6, 14]	RP	Grava compacta Arena compacta	379	22,1			
***	***	***	***	***	***	***	420 440	30,4 20,7		SP - SC Arena mal gradada con arcilla	Arena fina limoarcillosa marrón rojiza con concreciones de marga.
***	***	***	***	***	***	***	479			SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina limosa marrón, con pocas concreciones margosas, material duro y compacto.
***	***	***	***	***	***	***	515 592	25,4 25,7			

Figura 6.8. Comparación de resultados PDC punto C-3 con resultados de perforación Pz=04
Fuente: Elaboración propia

En total se realizaron siete ensayos PDC con medición electrónica, detallados como sigue: un ensayo cerca a cada pozo 01 y 02 (perforaciones), dos ensayos alrededor del pozo 03 (también perforación) y tres ensayos alrededor de la calicata 04 (ver diagrama 1.3). Estos últimos con el objetivo de observar las variaciones que puede presentarse entre dos o tres ensayos PDC alrededor a un mismo pozo de estudio (análisis de compatibilización).

Basándose en los cuadros comparativos presentados, se ha elaborado la tabla 6.2 que sintetiza las similitudes y discrepancias entre perfiles estratigráficos obtenidos a partir de ensayos PDC con medición automatizada y las correspondientes perforaciones o calicatas.

Tabla 6.2
Compatibilidad de perfiles estratigráficos procedentes de ensayos PDC y resultados de perforaciones

Pozo	Punto	Procedencia de estratos identificados		N° de estratos resultantes de ensayo PDC	N° de estratos resultantes de perforación	Compatibilización de resultados	
		Curva acumulada	Curva de dispersión			Profundidad	Tipo de suelo
Pz 01	A1	7	1	8	5	100,0%	38,4%
Pz 02	B1	5	0	5	4	100,0%	75,0%
Pz 03	D1	4	0	4	2	100,0%	37,5%
	D2	4	1	5	2	100,0%	29,5%
Promedio						100,0%	45,1%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.3
Compatibilidad de perfiles estratigráficos procedentes de ensayos PDC y resultados de calicatas

Pozo	Punto	Procedencia de estratos identificados		N° de estratos resultantes de ensayo PDC	N° de estratos resultantes de calicata	Compatibilización de resultados	
		Curva acumulada	Curva de dispersión			Profundidad	Tipo de suelo
Pz 04	C1	7	2	9	7	83,3%	47,6%
	C2	6	1	7	6	50,0%	50,0%
	C3	6	1	7	5	75,0%	46,6%
Promedio						69,4%	48,1%

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1 DELIMITACIÓN DE ESTRATOS

6.2.1.1 Profundidad.

Según la tabla 6.2, en todos los puntos de inspección realizados alrededor de sus respectivas perforaciones (pozos 01-03), las profundidades que indicaban cambio de estrato han coincidido al 100% con pequeñas variaciones de altura (menores a 15cm). Sólo en la calicata Pz.04, los tres puntos alrededor presentan algunas discrepancias (15-25cm) respecto a la profundidad de cambio de estrato. Esto sería, debido a la heterogeneidad del suelo, claramente observado en las caras laterales de dicha calicata (ver imagen 6.1).



Imagen 6.1. Las fotografías muestran los estratos diferenciados de: a) Calicata "C" con presencia de traza con concreciones de margas. b) Calicata "C" con diferenciación de estratos
Fuente: Fotografías propias.

En efecto, se sabe que el suelo es un cuerpo heterogéneo de gran variabilidad donde es de sumo interés para la ingeniería conocer las profundidades y espesores de los estratos que lo conforman. Cabe resaltar que estos estratos o capas del perfil estratigráfico no siempre son horizontales, mostrando incluso gran variedad en su espesor y forma en áreas relativamente pequeñas (ver imagen 6.2).

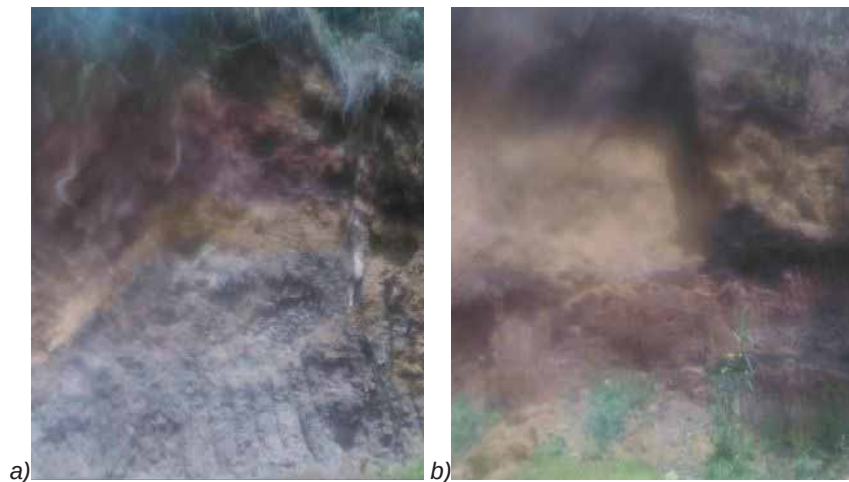


Imagen 6.2. Forma y orientación de estratos naturales:
a) Forma curvilínea de los horizontes. b) Variación en el espesor y continuidad.
Fuente: Fotografías propias, APV. Sol Naciente, Abancay-Apurímac.

Esta es la razón por la que en la obtención de perfiles estratigráficos de dos a más ensayos PDC con medición electrónica, suele presentarse variaciones en las profundidades o coincidencias con pocos centímetros de diferencia. La principal ventaja que puede obtenerse de este hecho es que mediante un número de ensayos PDC en una extensión de terreno requerido, sea cual sea el área, es posible conocer más acertadamente los espesores medios, profundidades, forma e inclinación de las capas; obteniéndose así un panorama general y particular de la zona de estudio muy conveniente para los propósitos ingenieriles.

6.2.1.2 Número de capas.

En los cuadros comparativos (fig. 6.2 a fig. 6.8) se ha mostrado la delimitación de estratos mediante la técnica de superposición¹⁴ en las curvas acumuladas de pendientes, evaluando así la coincidencia con los cambios de estratos procedentes de los pozos de campo (perforaciones y calicata). De esta manera se ha determinado el número de capas en cada punto ensayado con el PDC de medición electrónica.

No obstante, el cambio de un estrato a otro no siempre puede notarse solamente observando la variación de la pendiente (penetración media) en la curva acumulada de pendientes. Existen casos, para los que dos estratos consecutivos de diferentes propiedades físico-mecánicas y clasificación, no muestran cambios aparentes en su penetración media (casos de algunos estratos de arcillas, limos y arenas). Entonces, la determinación de las fronteras entre dichos estratos queda complementada con la observación y análisis de su respectiva curva de dispersión, centrándose en la variabilidad de los rangos de penetración y su desfase en la gráfica.

Por ejemplo:

En el Anexo G, Pozo 03 - Punto D2, específicamente en la segunda curva de pendiente constante (de 0,35m a 1,20m y $p=12\text{mm/golpe}$), se ha sub dividido en 2 grupos, diferenciados por la variación del rango de penetración del grupo de puntos correspondientes (ver fig. 6.8). En este caso la sub-división del grupo de puntos mediante la complementación con la curva de dispersión, optimizó la estratificación vertical del suelo, coincidiendo con la profundidad de cambio de estrato (tipo de suelo) de los resultados de perforación. Casos similares se presentan en el Pozo 04, específicamente en los puntos C-1 (de 0,40m a 1,10m), C-2 (los primeros 0,70m), y C-3 (de 0,20m a 1,40m de profundidad).

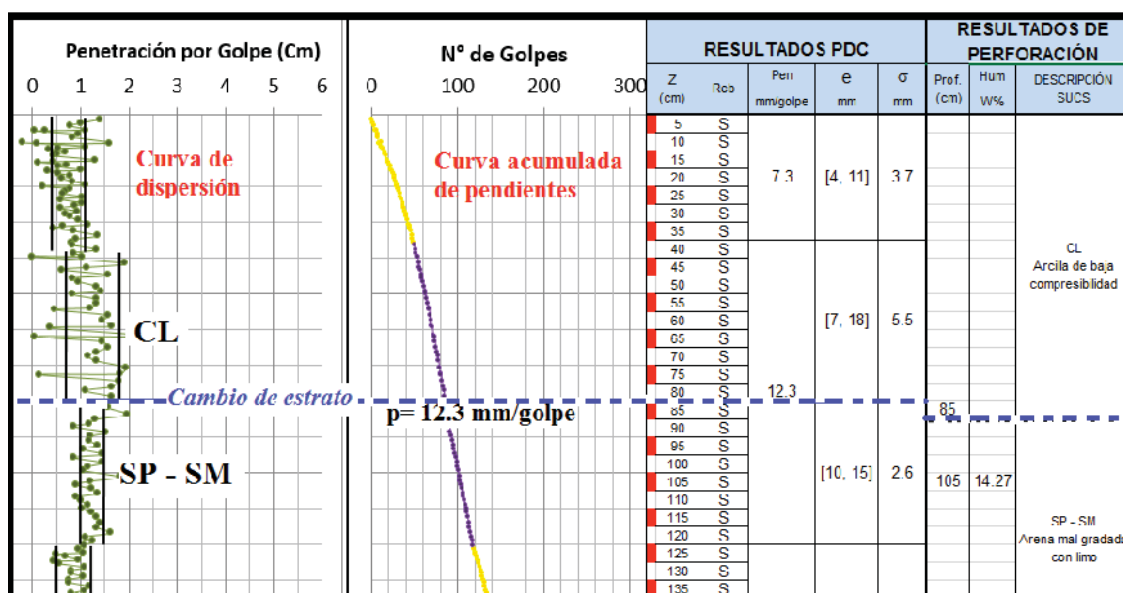


Figura 6.9. Delimitación de estratos mediante análisis en la curva de dispersión.

Fuente: Extraído del Anexo G, punto D-2.

¹⁴ Deducido en el modelo experimental (ítem 5.5) y reforzado en la fase de campo.

En cuanto al número de estratos resultantes, según la tabla 6.2, se observa que para un mismo perfil estratigráfico, el número de capas obtenidas a partir de los ensayos PDC con medición electrónica resultan mayor que las identificadas a través de perforaciones e inspección visual. Esto sugiere la sensibilidad del equipo para identificar estratigrafías, no solamente tomando en cuenta el cambio del material o tipo de suelo (clasificación) sino también otras propiedades físico-mecánicas cuya incidencia ha de notarse relevantemente en las curvas resultantes de los ensayos PDC.

Si se observara un perfil estratigráfico donde aparentemente hay un estrato de arcilla de un metro de espesor según la inspección visual, y después de una serie de pruebas, resultara que los primeros 40cm tienen gran variación de humedad, límites de consistencia respecto a los 60 cm restantes. Entonces, muy probablemente se estaría tratando con dos estratos de diferente comportamiento mecánico. La anterior proposición, muy cercana a la realidad, evidenciaría la limitación de estratigrafías obtenidas solo por métodos de inspección visual.

A este respecto, ha de tenerse en cuenta que el aspecto de una arcilla inalterada es muy engañoso; a simple vista puede no presentar la menor indicación de estratificación, ni cambio de color y, ello no obstante, su contenido natural de humedad puede variar grandemente. (Juárez & Rico, 2010, p. 138)

En efecto, de acuerdo con los autores y basándose en los resultados de campo de la presente investigación, se refuerza la idea expuesta anteriormente en el siguiente ejemplo:

En el Anexo G, Pozo 01 – Punto A1, se observa que el tercer tramo de la curva acumulada de pendientes (de 1,0m a 2,0m de profundidad), es sub dividida en 2 grupos, debido al notable estrechamiento de los rangos de penetración (ver fig. 6.10). Comparando estos dos grupos delimitados en la curva de dispersión con los resultados de humedad obtenidas entre esas profundidades, se ha observado que cada uno de ellos corresponde a humedades bien diferenciadas (18% y 13%), es decir, en un mismo tipo de suelo es posible identificar la variación de humedad que, en este caso implica diferente comportamiento mecánico, cuya incidencia es captada por la sensibilidad del equipo y mostrada en la curva de dispersión.

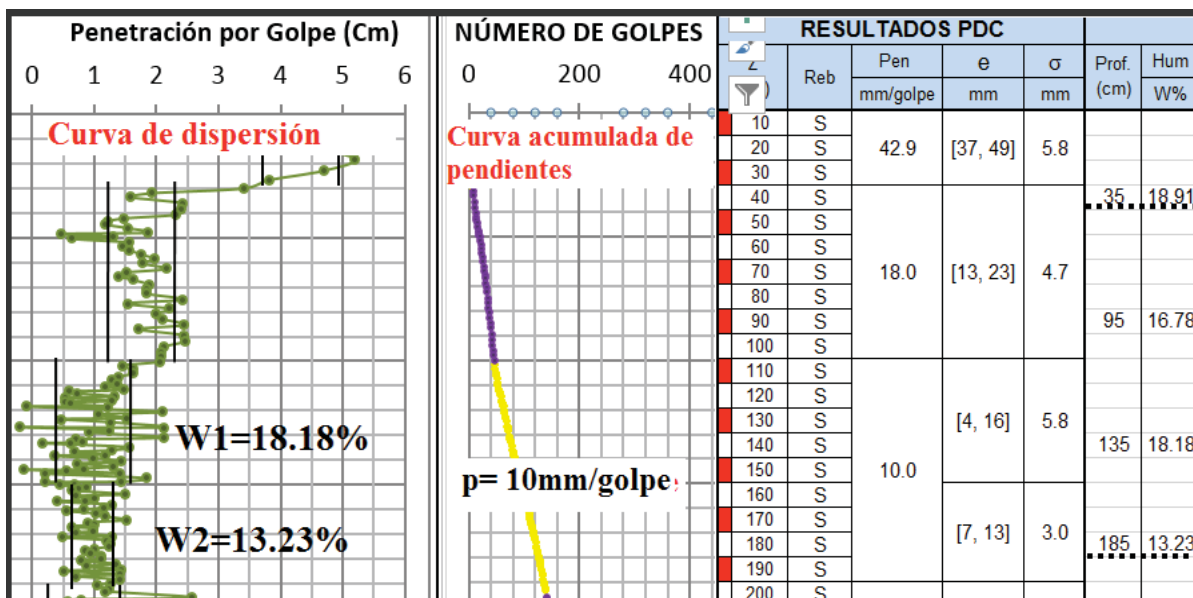


Figura 6.10. Identificación de la variación de humedad en la curva de dispersión

Fuente: Extraído del Anexo G, punto A-1

En consecuencia, mientras más estratos tengamos va a quedar mejor definido el perfil estratigráfico, representando más afinadamente las condiciones reales del suelo, lo cual beneficia la orientación de estudios definitivos, puesto que se conoce en mayor detalle las profundidades adecuadas para muestreo y determinación de pruebas.

6.2.1.3 Identificación de trazas, lentes y bolsonadas.

Si bien se ha tratado durante la investigación sobre la delimitación de “estratos” a partir de ensayos PDC con medición electrónica, cabe resaltar que los estratos propiamente dichos suelen incluir lentes, trazas y bolsonadas de materiales caracterizados por su diferente comportamiento mecánico y continuidad, presentes de forma errática en una estratigrafía.

Estas características particulares del suelo pueden ser identificadas también a partir de los ensayos PDC con medición electrónica, específicamente a través de cambios en el tipo de rebote o variaciones inusuales de poco espesor dentro de un grupo de puntos con la misma tendencia estadística.

En el anexo G. Punto B-1, en el estrato que va de 2,60m a 3,90m de profundidad, se muestra un ejemplo de la identificación de lente o traza (ver fig. 6.11), pues en la curva de dispersión se observa el cambio abrupto del tipo de rebote, pasando de seco (S) hacia pronunciado (RP) en un tramo de 10cm para luego retornar a rebote seco (S), lo que indicaría que muy probablemente se está atravesando una bolsonada, lente o traza en dicho punto de inspección.

Ciertamente, para determinar si se trata de una bolsonada, lente o traza ha de complementarse con el análisis de otros puntos aledaños en el área de estudio.

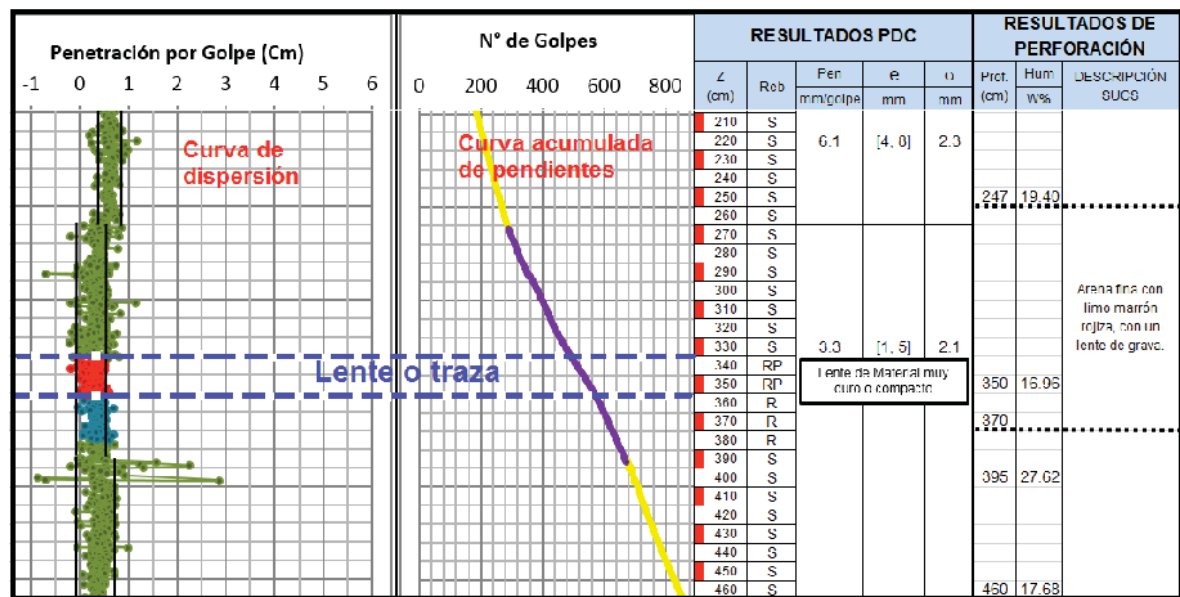


Figura 6.11. Identificación de lente o traza en una estratigrafía

Fuente: Extraído del Anexo G, punto B-1

6.2.2 IDENTIFICACIÓN DE SUELOS

Se discute la aplicación de la tabla 5.10 *Rangos de parámetros estadísticos según tipo de suelo del modelo experimental*, procedente de los resultados en el pozo estratificado y constituye una propuesta de investigación para la identificación de los suelos basado en resultados de ensayos PDC con medición electrónica. Es así que dicha tabla ha sido aplicada en la prueba de campo, para cada estrato delimitado también a partir de ensayos PDC Cociprede; tal como se ha mostrado en los cuadros comparativos (fig. 6.2 al 6.8).

En total se aplicó la tabla 5.10 para los 45 estratos resultantes de la obtención de perfiles estratigráficos a partir de ensayos PDC con medición electrónica. Los pasos que se siguieron para la estimación del tipo de suelo, se explica a continuación con un ejemplo:

Se toma los resultados de los parámetros estadísticos de identificación de suelos PDC con medición electrónica de la Figura 6.3 (Comparación de resultados PDC punto B-1 con resultados de perforación $P_z=02$), del cuarto estrato: Penetración media 3,3 mm/golpe, desviación estándar 2,1mm, coeficiente de variación 63%, rango de penetración de [1, 5] mm/golpe y con 62% de golpes secos, 23% golpes con rebote ligero y 15% golpes con rebote pronunciado. Todos estos valores son ubicados en la Tabla 5.10 *Rangos de parámetros estadísticos según tipo de suelo del modelo experimental*, de tal manera que si el valor numérico del parámetro estadístico está dentro de rango, esta se pinta de verde tomando un peso de un punto. Paralelo a esto, si dicho valor está cercano a un rango no mayor a dos unidades numéricas, esta es pintada de gris tomando un peso de medio punto, por ejemplo: la penetración media 3.3mm/golpe está dentro del rango [3, 7] perteneciente a la arena compacta, y está cercana por la derecha al rango [1, 3] perteneciente a la grava semicompacta.

Se suman todos los puntos por filas, donde el posible tipo de suelo para dicho estrato según la Tabla 5.10, propuesta para la identificación de suelos con ensayos de PDC con medición electrónica, es aquel que tiene el mayor puntaje. La siguiente tabla muestra la forma de identificación de tipo de suelo con los datos del ejemplo anterior, resultando arena compacta como el suelo más probable del estrato en cuestión.

Tabla 6.4
Ejemplo de aplicación de la tabla 5.10 para la identificación de suelos

SUELO	ESTADO	PENETRACIÓN MEDIA $\bar{P}$ (mm/golpe)	DESVIACIÓN ESTANDAR σ (mm)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN V (%)	RANGO DE PENETRACIÓN e (mm, mm)	TIPO DE REBOTE Reb	PUNTOS
GRAVA	SUELTO	[9, 12]	[4, 6]	[43%, 56%]	[5, 15]	18%S-82%R	-
(GP-GC)	SEMI COMPACTO	[5, 6]	[2, 5]**	[52%, 91%]*	[2, 10]**	32%S-68%R	2,0
	COMPACTO	[1, 3]**	[3, 5]**	[>100%]	[2, 6]*	100%RP	2,0
ARENA	SUELTO	[39, 48]	[9, 22]	[40%, 56%]	[23, 64]	100% S	-
(SM)	SEMI COMPACTO	[16, 18]	[4, 5]	[22%, 32%]	[12, 21]	74%S-26%R**	0,5
	COMPACTO	[3, 7]*	[2, 5]*	[61%, 98%]*	[1, 9]*	40%S-35%R-25%RP*	5,0
LIMO	BLANDO	[29, 34]	[8, 12]	[27%, 39%]	[21, 42]	100%S	-
(ML)	SEMI DURO	[11, 12]	[4, 7]	[36%, 58%]	[6, 17]	92%S-8%R	-
	DURO	[7, 9]	[3, 5]**	[45%, 67%]*	[3, 12]**	52%S-48%R**	2,5
ARCILLA	BLANDO	[30, 36]	[8, 15]	[24%, 46%]	[21, 44]	100%S	-
(CL)	SEMI DURO	[15, 20]	[5, 8]	[31%, 44%]	[11, 24]	95%S-5%R	-
	DURO	[8, 12]	[4, 5]	[36%, 64%]*	[3, 15]	38%S-56%R-6%RP**	1,5

* De color verde y valor un punto, que son rangos dentro de los cuales están los valores de parámetros estadísticos procedentes de los ensayos PDC con medición electrónica.

** De color gris y valor medio punto, que son rangos cercanos a los valores de los parámetros estadísticos procedentes de los ensayos PDC con medición electrónica.

Fuente: Elaboración propia

Existieron casos donde dos resultados fueron iguales o cercanos con una diferencia menor a 0,5 en la suma de puntos, en estos casos se consideraran ambas posibilidades en orden de mérito de puntaje asignado, además de considerar como variables más ponderativas las de penetración media y tipo de rebote.

Cabe resaltar que la principal aplicación de la propuesta de investigación es la identificación, sobre todo, del grupo genérico de clasificación (grava, arena, limo o arcilla) y el estado en el cual se encuentra, según la propuesta del modelo experimental. Pues, como refieren Juárez & Rico (2010) “La colocación del suelo en uno de los grupos definidos indicará que participa del conjunto de propiedades mecánicas e hidráulicas características de ese grupo; así, y más si se cuenta con una cierta dosis de experiencia, se tiene un modo simple, rápido y económico de adquirir valiosa información básica sobre el suelo en cuestión” (p. 152).

De los 45 estratos en estudio, el 24,4% de tipos de suelo en cada estrato ha coincidido con los resultados del grupo genérico del suelo. El 46,6% han arrojado dos posibilidades en el grupo genérico, coincidiendo siempre al menos uno de ellos con los resultados de perforación o calicata. Además, se ha notado peculiarmente que casi la mitad (42,7%) de los resultados que arrojan dos opciones, al ser mezcladas estas últimas resulta el tipo de suelo según SUCS. Por ejemplo: en el quinto estrato de la

fig. 6.2 (Punto A-1, perforación Pz=01) los resultados de identificación de estrato con PDC salieron limo duro o arena compacta, mientras que el estrato fue identificado como arena mal gradada con limo (SP-SM).

En líneas generales, la compatibilidad de perfiles estratigráficos procedentes de ensayos PDC y resultados de perforaciones o calicatas se da en 46,4%, un valor potencial considerando las limitaciones y restricciones de la investigación (cuya tabla ha sido obtenida solamente a partir del modelo experimental). Lo importante es que se ha logrado plantear una metodología base para complementar los sistemas de clasificación ampliamente usados y aceptados como son el SUCS. De esta forma se puede relacionar propiedades físicas y mecánicas del suelo, para potenciar los sistemas de clasificación, además de aprovechar la experiencia adquirida sobre suelos en todo el mundo.

6.2.3 RELACIONES DENSIDAD - PENETRACIÓN MEDIA

Durante el desarrollo de la investigación, en especial en la etapa de análisis e interpretación de resultados en el modelo experimental (pozo estratificado) se ha advertido relaciones entre la densidad de los estratos conformados y la penetración media por golpe, resultando curvas que relacionan estas variables, para cada tipo de suelo en estudio, tal como se muestra en la figura 6.12. Este gráfico correlaciona la densidad con la penetración media por golpe. Esto ha sido posible, ya que al contar con tres densidades diferentes para un mismo tipo de suelo y sus respectivas penetraciones medias¹⁵, se ha realizado, indirectamente, un proceso de análisis en la optimización de densidades.

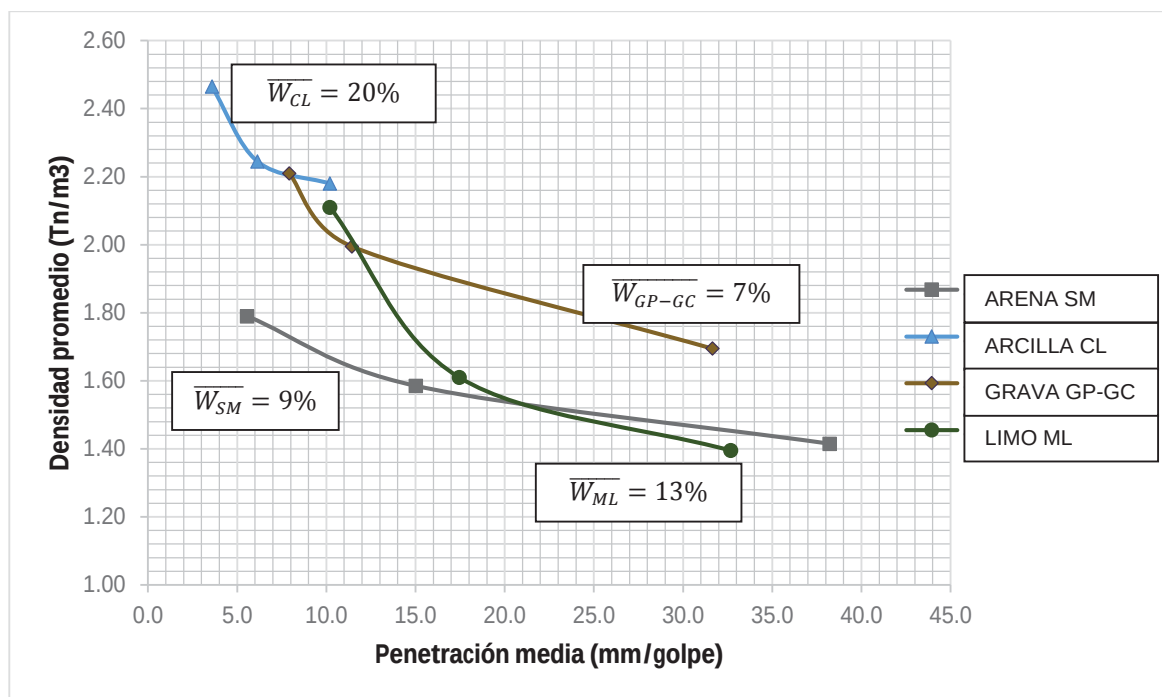


Figura 6.12. Relaciones densidad-penetración media por golpe
Fuente: Elaboración propia.

¹⁵ Cada penetración media por golpe ha sido resultado del promedio de seis penetraciones en cada punto de inspección, incrementando la confiabilidad estadística.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- El equipo PDC UNSAAC presenta ventajas frente a otros de su clase en cuanto a la obtención y procesamiento de datos, a través de un registro automatizado de numerosas lecturas que permiten procesar longitudes de penetración por golpe de martillo en vez de número de golpes por cada 10cm de penetración.
- Es factible definir perfiles estratigráficos mediante ensayos de PDC con sistema de medición electrónica, puesto que por su naturaleza, presenta notable sensibilidad a cambios significativos de propiedades físico mecánicas como la humedad, densidad; los cuales no son siempre percibidos en estratigrafías obtenidas por inspección visual.
- Mediante el análisis estadístico de los datos obtenidos a través del PDC UNSAAC se ha establecido parámetros de entrada para el uso de la tabla 5.10 “Propuesta de Identificación de Suelos” donde los más representativos son la Penetración Media por Golpe y el Rango de Penetración, definiéndose además una nueva gráfica llamada “Curva de Dispersión”.
- La variación estadística de la longitud de penetración por golpe, determinada por el equipo PDC UNSAAC, se relaciona con el cambio de estrato mediante variaciones lineales en las gráficas resultantes. Asimismo, los resultados tienen incluido el tipo de rebote, que permite observar desfases y cambios de amplitud en los rangos de penetración, afinando y complementando la determinación de profundidades, espesores medios, forma y continuidad.
- Respecto a la identificación del tipo de suelo, mediante la aplicación de la propuesta de investigación (tabla 5.10) en perfiles de campo; los resultados muestran porcentajes del 45% y 48% de compatibilidad respecto a los resultados de perforación y calicata, respectivamente. Asimismo, se ha identificado bolsonadas, trazas o lentes presentes en las estratigrafías naturales (prueba PDC en campo), basado en el tipo de rebote.
- En cuanto a las profundidades donde hay cambio de estrato, determinadas a partir de la técnica de superposición (cambio notorio de pendiente) en complementación con la curva de dispersión, en perfiles de campo, se ha encontrado un 100% de compatibilidad respecto a los resultados de perforaciones (con variaciones no significativas de 5 a 10cm), y un 69% respecto a los de calicata.
- La aplicación de ensayos PDC con sistema de medición electrónica se aplican de forma óptima a casi cualquier tipo y condición del terreno, con limitaciones en la profundidad de inspección (rechazo) y aplicación en algunos tipos de suelo, por ejemplo en gravas donde las penetraciones medias por golpe son en promedio de 2mm/golpe para una densidad de 2.47 t/m³ (estado compacto) con gran variabilidad (>100%) y presencia de rebote pronunciado (RP), el cual indica el rechazo.
- El uso del PDC, es un ensayo no destructivo, in situ, que no requiere la pérdida de compacidad ni estructura real de un suelo. Las pendientes que se obtengan sirven para acumular datos de curvas y hacer penetrogramas (curvas resultantes) adquiriendo mayor experiencia y conocimiento mientras más ensayos se realicen.

- La presente investigación no pretende reemplazar el uso de calicatas y perforaciones en las auscultaciones de suelo. No obstante, constituye una contribución que afirma la inclusión de ensayos PDC con sistema de medición electrónica como un ensayo complementario para verificar y ampliar los detalles de las condiciones reales del suelo en estudio, abarcando mayores áreas a menor costo.

7.2 RECOMENDACIONES

- ✓ El PDC Cociprede por ser un equipo de fabricación local con potenciales aplicaciones, requiere ser validado en la normativa peruana con sus nuevas ventajas técnicas y prácticas, por tanto se recomienda hacer un análisis exhaustivo de sus elementos como el tamaño, peso y forma; además de calibrarlo en función de las teorías de pérdida de energía de compactación existentes. De esta manera poder estandarizarlo en la normativa peruana, a través de investigaciones más específicas en base a la propuesta planteada.
- ✓ Basado en la propuesta de investigación para la identificación de suelos, se recomienda realizar tablas del tipo 5.10 para cada grupo genérico del suelo. Así se irá enriqueciendo la información mientras más ensayos se realicen.
- ✓ El nuevo equipo PDC Cociprede no deja de ser un prototipo más, ya que puede tener en el futuro nuevas mejoras tecnológicas como la eliminación de los cables de conexión con el uso de un sistema Bluetooth y con un aplicativo celular, de tal manera que los resultados sean procesados a tiempo real.
- ✓ Las correcciones específicas para el PDC con sistema de medición electrónica, en cuanto a la altura de caída basándose en la observación de la forma en como levanta la masa el operador durante un tiempo prolongado de trabajo constituye un tema de investigación futura necesaria para la calibración del equipo.
- ✓ Es preciso tomar en cuenta la limitación de las relaciones encontradas ya que, en primera instancia constituyen correlaciones emergentes en el proceso de investigación, por tanto, susceptibles de mejoramiento y especificación mediante estudios paramétricos en adelante. Entonces, puede aplicarse sobre todo en suelos de similar condición, una vez identificados y conocida su humedad, cuando se requiera determinar la densidad de forma aproximada.
- ✓ Conviene realizar nuevos trabajos de optimización o estudios paramétricos, es decir controlar una variable mientras se limita las otras para analizar el impacto sobre el sistema o fenómeno en estudio. De esta manera, se puede obtener, por ejemplo, la incidencia de cada propiedad del suelo en las curvas resultantes de los ensayos PDC con sistema de medición electrónica.
- ✓ Se recomienda investigar implicaciones del tipo causal- explicativa. Por ejemplo: el grado de influencia de la tipología, densidad y grado de saturación sobre la evaluación de resultados obtenidos mediante ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con sistema de medición electrónica.

“Hay que encontrar respuestas, pero también es preciso hacer más preguntas.”

Juárez & Rico, 2010

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bowles, J. (2000). *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL.
- Cassan, M. (1982). *Los Ensayos "in Situ" en la Mecánica del Suelo*. Barcelona, España: Editores técnico asociados, S.A.
- Castañeda, L. (2014). *Capacidad Portante de los Suelos de Fundación de la Universidad Nacional de Cajamarca, en la Zona Noroeste y Sureste Utilizando el Método Penetración Dinámica Ligera (DPL) en Comparación con el Método por Corte Directo* (tesis pre grado). Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Cruz, J. A. (2015). *Pérdida de energía en la auscultación con penetrómetro dinámico ligero DPL* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú.
- Fernández Baca, C. (2018). *Estudio de Mecánica de Suelos para Cimentación-Proyecto: Edificio Residencial Detecta*
- Flores, E., & Fernandez Baca, C. (1991). *Diagnóstico del Uso de los Parámetros de descripción y Representación Esquemática de los Suelos*. Prácticas Pre-profesionales, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), Cusco, Cusco. Recuperado el Enero de 2017
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación* (Vol. 6° Edición). Santa Fe: McGRAW-HILL.
- HUMBOLDT. (2017). CATALOG ELEVEN. *Testing Equipment for Construction Materials*, 352. Retrieved from www.humboldtmg.com
- Juárez, E., & Rico, A. (2010). *Mecánica de Suelos* (3 ed., Vol. 1). Balderas, México: Limusa.
- Rey, D. (2012). *Usos y Aplicaciones del Penetrómetro de Cono CN - 973* (tesis pre grado). Instituto Tecnológico de Sonora, España.
- Rodríguez, A. (2004). *Uso y Aplicación de Sondeos de Penetración de Cono en Cimentaciones de la Ciudad de México* (tesis pre grado). Instituto Politécnico Nacional, México.
- Tupia, C. & Alva, J. (Noviembre del 2001). *Evaluación de la Capacidad de Soporte del Terreno por Medio de un Equipo de Penetración Dinámica*. Simposio llevado a cabo en el XI Congreso Ibero-latinoamericano del asfalto, Lima, Perú.
- Viscarra, F. (2006). *El Cono Dinámico de Penetración y su Aplicación en la Evaluación de Suelos* (tesis doctoral). Universidad Privada Boliviana, Bolivia.

ANEXO A. GRANULOMETRÍAS



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMISADO (VÍA HÚMEDA) NTP-339-128 - ASTM-D4318

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO A.1

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : Cantera Vicho

Distrito : Oropesa

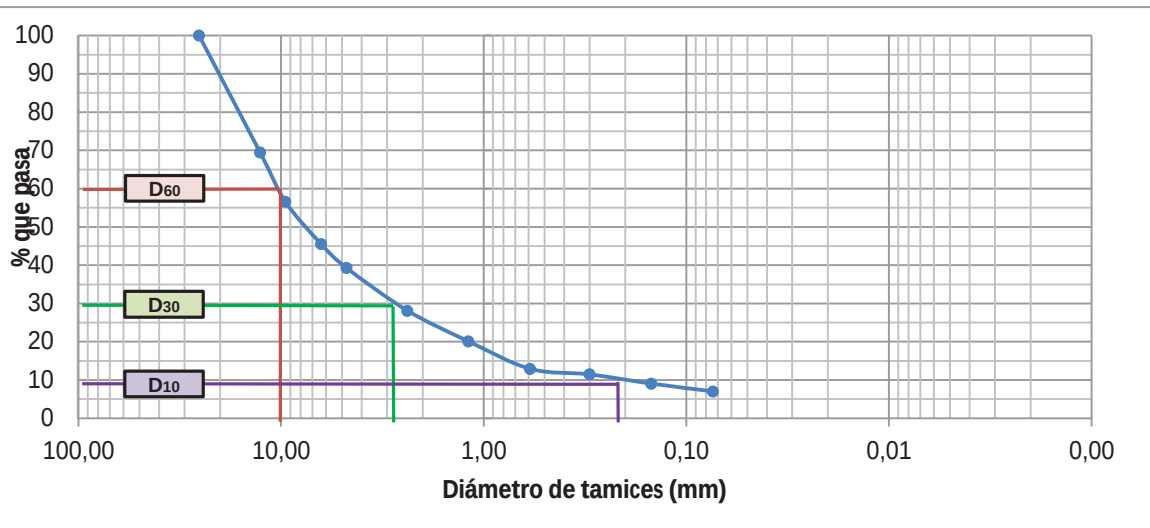
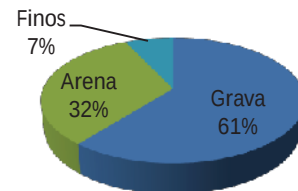
Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018
Fuente : Elaboración propia
Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino
Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA	Grava (G)	PESO DEL POSILLO (gr)	346,22	PESO DE MUESTRA SECA (gr)	1476,25
ESPECIMEN	MAB-O1	PESO DE MUESTRA SECA + POSILLO (gr)	1822,47	PESO DE MUESTRA SECA LAVADA (gr)	1373,5
Prof. (m)	—	PESO DE MUESTRA SECA LAVADA + POSILLO (gr)	1719,72	PESO DE FINOS LAVADO (gr)	102,75

Abertura del Tamiz	Peso (gr)	%	% Retenido	%
Tamiz	mm	Retenido	Retenido	Pasante
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	100,00
1"/2	12,70	450,35	30,51	69,49
3"/8	9,53	190,13	12,88	56,61
1"/4	6,35	163,40	11,07	45,55
#4	4,75	92,45	6,26	39,28
#8	2,38	164,68	11,16	28,13
#16	1,19	118,23	8,01	20,12
#40	0,59	106,16	7,19	12,93
#50	0,3	21,48	1,46	11,47
#100	0,149	35,43	2,40	9,07
#200	0,074	30,05	2,04	7,04
CAZUELA	0,0	1,65	***	0,00
SUMA		1374,01	ERROR	-0,04%
				< 1% OK

Clasificación SUCS
GP-GC
Grava mal gradada con arcilla y arena



D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀	C _u	C _c	% GRAVA	% ARENA	% FINOS
10,1	2,9	0,2	50,50	4,16	60,72	32,25	7,04

* Tamaño de la muestra de suelo (ASTM D1140-54)

Diámetro nominal de la partícula mayor

Tamiz N° 10

Tamiz N° 4

3"/4 pulg.

Peso mínimo aproximado de muestra en (gr)

200

500

1500

* Algunas fórmulas:

Coefficiente de Uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

coeficiente de Curvatura:

$$C_c = \frac{D_{30} \times D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$$



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMISADO (VÍA HÚMEDA) NTP-339-128 - ASTM-D4318

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO A.2

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO
LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : APV 30 de Setiembre

Distrito : San Jerónimo

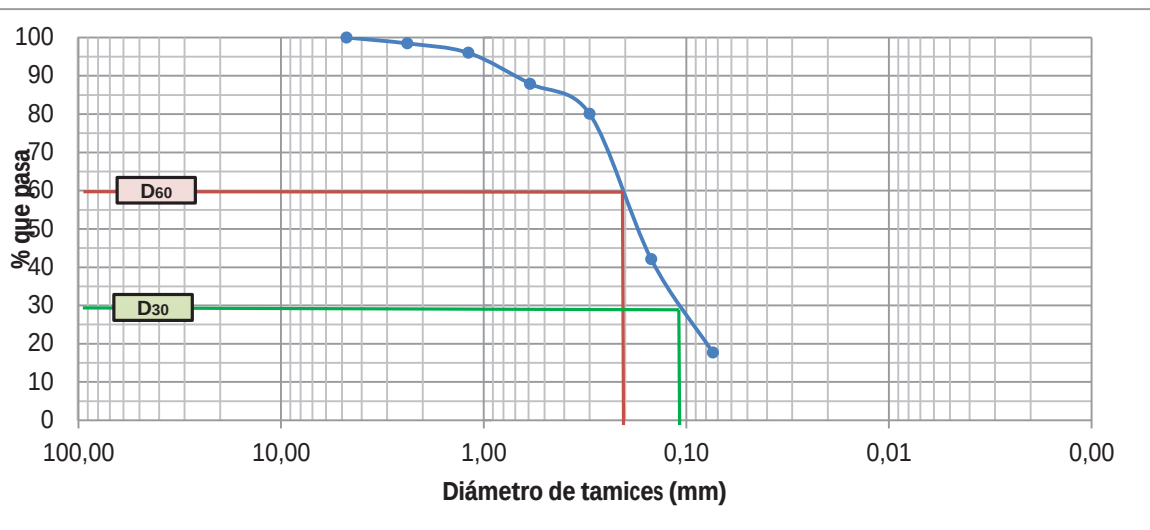
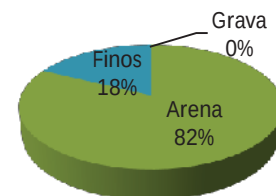
Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018
Fuente : Elaboración propia
Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino
Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA	Arena (S)	PESO DEL POSILLO (gr)	327,72	PESO DE MUESTRA SECA (gr)	493,50
ESPECIMEN	MAB-O2	PESO DE MUESTRA SECA + POSILLO (gr)	821,22	PESO DE MUESTRA SECA LAVADA (gr)	410,15
Prof. (m)	—	PESO DE MUESTRA SECA LAVADA + POSILLO (gr)	737,87	PESO DE FINOS LAVADO (gr)	83,35

Abertura del Tamiz		Peso (gr) Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
Tamiz	mm				
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
1"/2	12,70	0,00	0,00	0,00	100,00
3"/8	9,53	0,00	0,00	0,00	100,00
1"/4	6,35	0,00	0,00	0,00	100,00
#4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
#8	2,38	7,63	1,55	1,55	98,45
#16	1,19	12,18	2,47	4,01	95,99
#40	0,59	39,8	8,06	12,08	87,92
#50	0,3	38,91	7,88	19,96	80,04
#100	0,149	187,25	37,94	57,91	42,09
#200	0,074	120,3	24,38	82,28	17,72
CAZUELA	0,0	4,08	***	***	0,00
SUMA		410,15	ERROR	0,00%	< 1% OK

Clasificación SUCS	
SM	
Arena Limosa	



D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀	C _u	C _c	% GRAVA	% ARENA	% FINOS
0,21	0,12	***	***	***	0,00	82,28	17,72

* Tamaño de la muestra de suelo (ASTM D1140-54)

Diámetro nominal de la partícula mayor

Tamiz N° 10

Tamiz N° 4

3"/4 pulg.

Peso mínimo aproximado de muestra en (gr)

200

500

1500

* Algunas fórmulas:

Coefficiente de Uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

coeficiente de Curvatura:

$$C_c = \frac{D_{30} \times D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$$



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMISADO (VÍA HÚMEDA) NTP-339-128 - ASTM-D4318

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO A.3

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO
LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA
IDENTIFICACIÓN DE SUELOS. CUSCO - 2018"

Origen suelo : APV 30 de Setiembre

Distrito : San Jerónimo

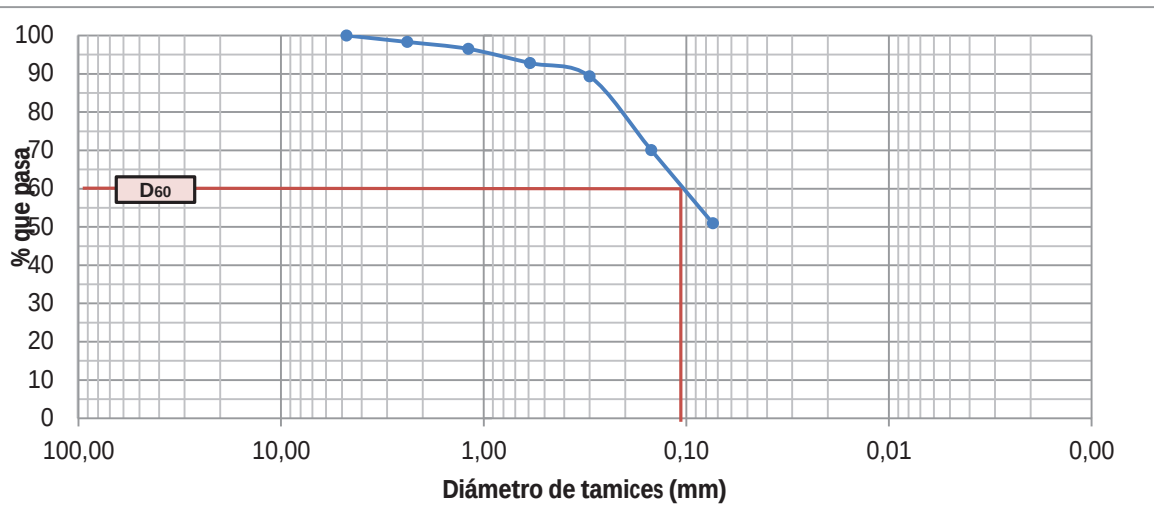
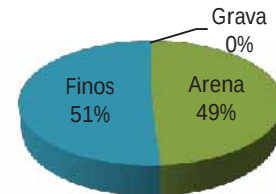
Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018
Fuente : Elaboración propia
Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino
Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA	Limo (M)	PESO DEL POSILLO (gr)	111,64	PESO DE MUESTRA SECA (gr)	486,74
ESPECIMEN	MAB-O4	PESO DE MUESTRA SECA + POSILLO (gr)	598,38	PESO DE MUESTRA SECA LAVADA (gr)	242,65
Prof. (m)	—	PESO DE MUESTRA SECA LAVADA + POSILLO (gr)	354,29	PESO DE FINOS LAVADO (gr)	244,09

Abertura del Tamiz		Peso (gr) Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
Tamiz	mm				
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
1"/2	12,70	0,00	0,00	0,00	100,00
3"/8	9,53	0,00	0,00	0,00	100,00
1"/4	6,35	0,00	0,00	0,00	100,00
#4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
#8	2,38	8,2	1,68	1,68	98,32
#16	1,19	8,81	1,81	3,49	96,51
#40	0,59	18,02	3,70	7,20	92,80
#50	0,3	16,83	3,46	10,65	89,35
#100	0,149	93,79	19,27	29,92	70,08
#200	0,074	93,12	19,13	49,05	50,95
CAZUELA	0,0	4,08	***	***	0,00
SUMA		242,85	ERROR	-0,08%	< 1% OK

Clasificación SUCS	
ML	
Limo con arena	



D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀	C _u	C _c	% GRAVA	% ARENA	% FINOS
0,11	***	***	***	***	0,00	49,05	50,95

* Tamaño de la muestra de suelo (ASTM D1140-54)

Diámetro nominal de la partícula mayor

Tamiz N° 10

Tamiz N° 4

3"/4 pulg.

Peso mínimo aproximado de muestra en (gr)

200

500

1500

* Algunas fórmulas:

Coefficiente de Uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

coeficiente de Curvatura:

$$C_c = \frac{D_{30} \times D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$$



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMISADO (VÍA HÚMEDA) NTP-339-128 - ASTM-D4318

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO A.4

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS. CUSCO - 2018"

Origen suelo : Empresa Ladrillera

Distrito : San Jerónimo

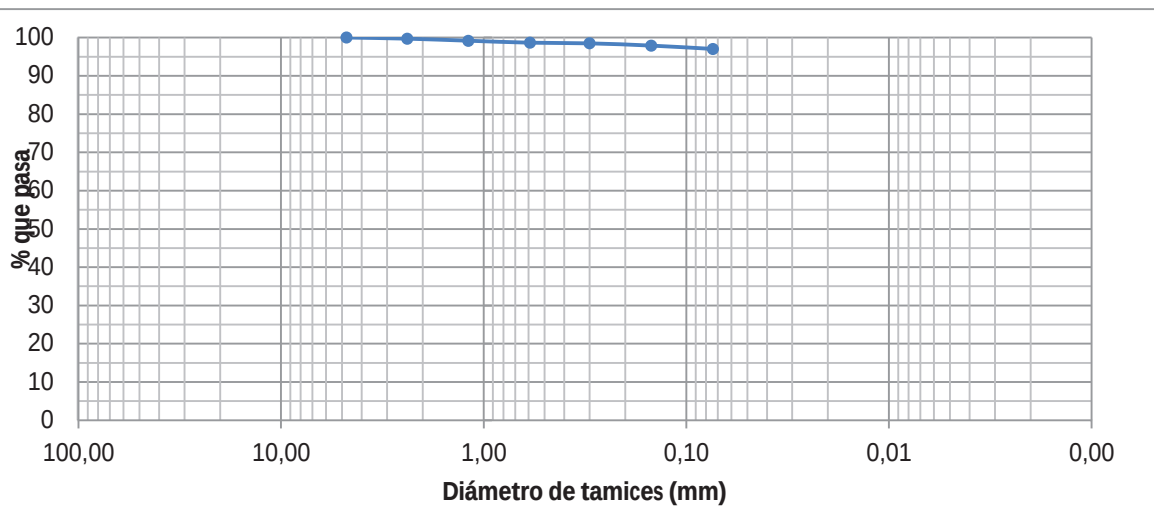
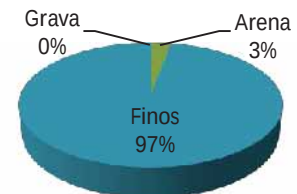
Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018
Fuente : Elaboración propia
Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino
Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA	Arcilla (C)	PESO DEL POSILLO (gr)	220,04	PESO DE MUESTRA SECA (gr)	471,58
ESPECIMEN	MAB-O5	PESO DE MUESTRA SECA + POSILLO (gr)	691,62	PESO DE MUESTRA SECA LAVADA (gr)	13,75
Prof. (m)	—	PESO DE MUESTRA SECA LAVADA + POSILLO (gr)	233,79	PESO DE FINOS LAVADO (gr)	457,83

Abertura del Tamiz		Peso (gr) Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
Tamiz	mm				
1" 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
1"/2	12,70	0,00	0,00	0,00	100,00
3"/8	9,53	0,00	0,00	0,00	100,00
1"/4	6,35	0,00	0,00	0,00	100,00
#4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
#8	2,38	1,41	0,30	0,30	99,70
#16	1,19	2,51	0,53	0,83	99,17
#40	0,59	2,43	0,52	1,35	98,65
#50	0,3	0,83	0,18	1,52	98,48
#100	0,149	2,77	0,59	2,11	97,89
#200	0,074	4,09	0,87	2,98	97,02
CAZUELA	0,0	0,03	***	***	0,00
SUMA		14,07	ERROR	-2,33%	< 1% OK

Clasificación SUCS	
CL	
Arcilla de Baja Plasticidad	



D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀	C _u	C _c	% GRAVA	% ARENA	% FINOS
***	***	***	***	***	0,00	2,98	97,02

* Tamaño de la muestra de suelo (ASTM D1140-54)

Diámetro nominal de la partícula mayor

Tamiz N° 10

Tamiz N° 4

3"/4 pulg.

Peso mínimo aproximado de muestra en (gr)

200

500

1500

* Algunas fórmulas:

Coefficiente de Uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

coeficiente de Curvatura:

$$C_c = \frac{D_{30} \times D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}$$

ANEXO B.

PLASTICIDAD



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

LÍMITES DE CONSISTENCIA

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO - IP
NTP-339-129 - ASTM-D4318

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO B.1

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : Cantera Vicho

Distrito : Oropesa

Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA : **Grava (G)**

ESPECIMEN : **MAB-01**

Prof. (m) : —

LÍMITE LÍQUIDO - ASTM 423-66

ESOS	N° DE ENSAYO	1	2	3	4
Peso de la Cápsula (gr)		58,38	54,00	58,84	59,44
Peso de la Cápsula + suelo húmedo (gr)		79,62	75,81	80,81	77,82
Peso de la Cápsula + suelo seco (gr)		75,20	71,46	76,58	74,36
Número de golpes		12	20	27	34
Peso del suelo seco (gr)		16,82	17,46	17,74	14,92
Contenido de humedad* (w%)		26,28	24,91	23,84	23,19

LÍMITE LÍQUIDO**
(%)

24,3

LÍMITE PLÁSTICO - ASTM D424-59

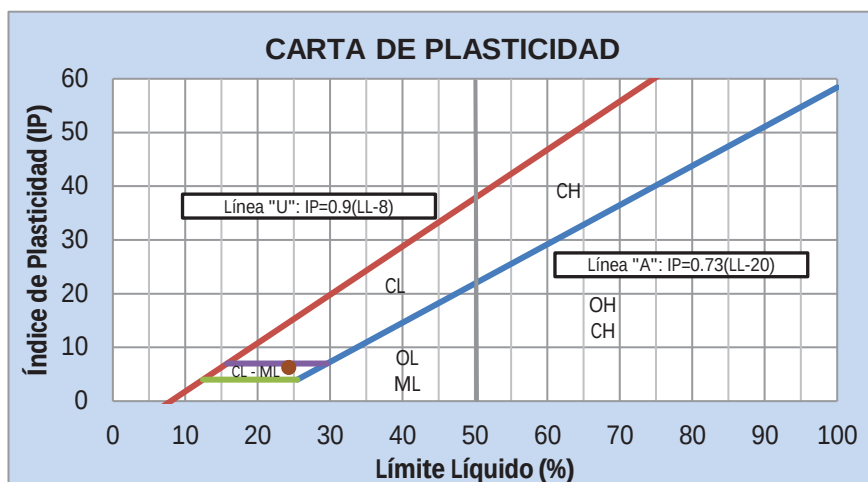
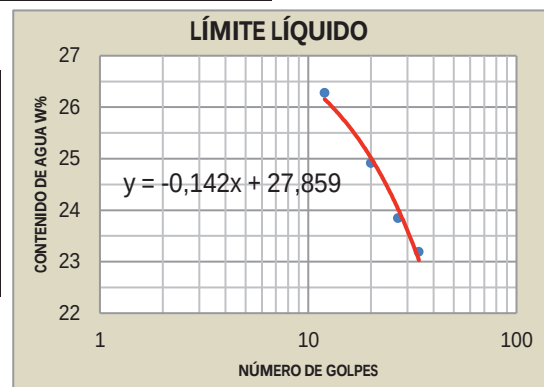
ESOS	N° DE ENSAYO	1	2
Peso de la Cápsula (gr)		59,29	57,93
Peso de la Cápsula + suelo húmedo (gr)		65,64	62,44
Peso de la Cápsula + suelo seco (gr)		64,67	61,75
Peso del suelo seco (gr)		5,38	3,82
Contenido de humedad* (w%)		18,03	18,06

LÍMITE PLÁSTICO*** (%)

18,0

ÍNDICE PLÁSTICO**** IP

6,3



CLASIFICACIÓN SUCS

CL-ML

Arcilla Limosa

OBS.

CORRESPONDIENTE

A LA PARTE FINA

DEL SUELO

* **Contenido de humedad (W):** Razón entre el peso del agua y el peso del suelo seco. Se expresa en porcentaje:

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

*** **Límite Plástico (Wp):** Contenido de humedad del suelo entre el estado semi - sólido y plástico.

** **Límite Líquido (WL):** Contenido de humedad del suelo entre el estado semi - líquido y plástico.

**** **Índice de Plásticidad (IP):** Es la diferencia entre los límites líquido y plástico. $IP = WL - Wp$



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

LÍMITES DE CONSISTENCIA

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO - IP
NTP-339-129 - ASTM-D4318

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO B.2

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : APV 30 de Setiembre

Distrito : San Jerónimo

Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018
Fuente : Elaboración propia
Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino
Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA **Arena (S)**

ESPECIMEN **MAB-02**

Prof. (m) —

LÍMITE LÍQUIDO - ASTM 423-66

PESOS \ N° DE ENSAYO	1	2	3	4
Peso de la Cápsula (gr)	58,49	59,76	54,65	60,56
Peso de la Cápsula + suelo húmedo (gr)	76,55	79,62	68,57	73,59
Peso de la Cápsula + suelo seco (gr)	72,54	75,65	65,90	71,13
Número de golpes	7	20	27	37
Peso del suelo seco (gr)	14,05	15,89	11,25	10,57
Contenido de humedad* (w%)	28,54	24,98	23,73	23,27

LÍMITE LÍQUIDO**
(%)

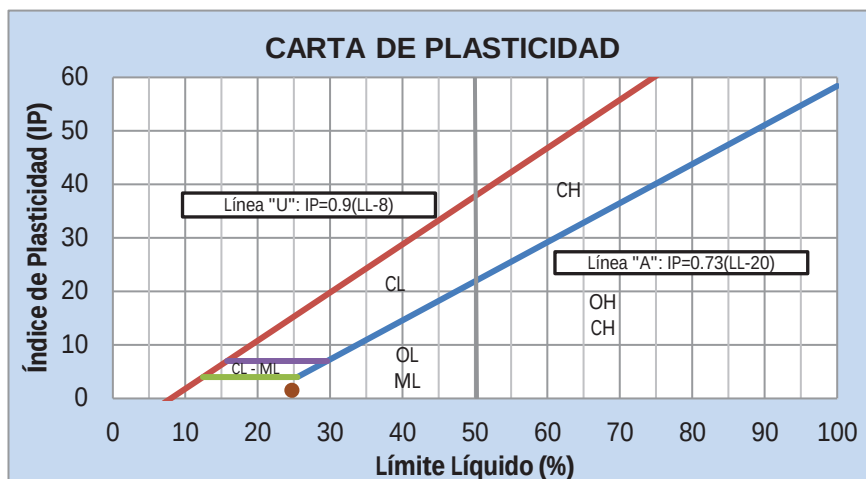
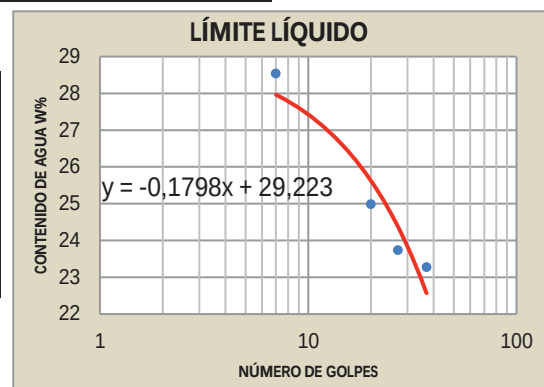
24,7

LÍMITE PLÁSTICO - ASTM D424-59

PESOS \ N° DE ENSAYO	1	2
Peso de la Cápsula (gr)	58,28	58,56
Peso de la Cápsula + suelo húmedo (gr)	65,88	67,48
Peso de la Cápsula + suelo seco (gr)	64,45	65,80
Peso del suelo seco (gr)	6,17	7,24
Contenido de humedad* (w%)	23,18	23,20

LÍMITE PLÁSTICO*** (%) **23,2**

ÍNDICE PLÁSTICO**** IP **1,6**



CLASIFICACIÓN SUCS

ML

Limo de Baja
Plasticidad

OBS.

CORRESPONDIENTE
A LA PARTE FINA
DEL SUELO

* **Contenido de humedad (W):** Razón entre el peso del agua y el peso del suelo seco. Se expresa en porcentaje:

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

*** **Límite Plástico (Wp):** Contenido de humedad del suelo entre el estado semi - sólido y plástico.

** **Límite Líquido (WL):** Contenido de humedad del suelo entre el estado semi - líquido y plástico.

**** **Índice de Plasticidad (IP):** Es la diferencia entre los límites líquido y plástico. $IP = WL - Wp$



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

LÍMITES DE CONSISTENCIA

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO - IP
NTP-339-129 - ASTM-D4318

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO B.3

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : APV 30 de Setiembre

Distrito : San Jerónimo

Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA **Limo (M)**

ESPECIMEN **MAB-O4**

Prof. (m) —

LÍMITE LÍQUIDO - ASTM 423-66

PESOS \ N° DE ENSAYO	1	2	3	4
Peso de la Cápsula (gr)	58,23	58,92	59,29	59,26
Peso de la Cápsula + suelo húmedo (gr)	81,84	79,41	79,62	79,39
Peso de la Cápsula + suelo seco (gr)	77,06	75,44	75,80	75,86
Número de golpes	8	14	24	33
Peso del suelo seco (gr)	18,83	16,52	16,51	16,60
Contenido de humedad* (w%)	25,39	24,03	23,14	21,27

LÍMITE LÍQUIDO**
(%)

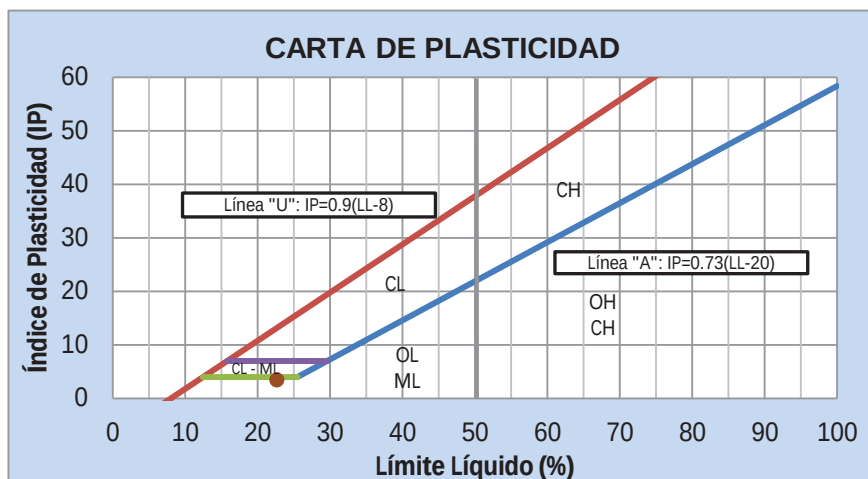
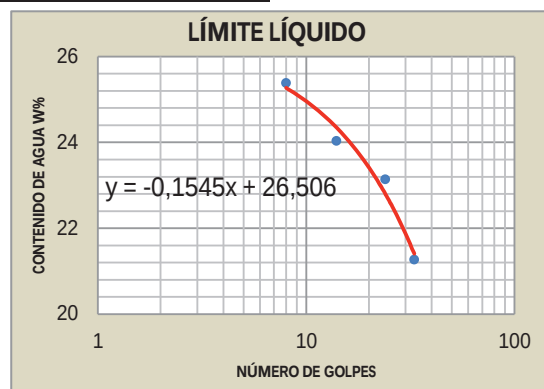
22,7

LÍMITE PLÁSTICO - ASTM D424-59

PESOS \ N° DE ENSAYO	1	2
Peso de la Cápsula (gr)	58,54	54,18
Peso de la Cápsula + suelo húmedo (gr)	64,86	60,53
Peso de la Cápsula + suelo seco (gr)	63,85	59,50
Peso del suelo seco (gr)	5,31	5,32
Contenido de humedad* (w%)	19,02	19,36

LÍMITE PLÁSTICO*** (%) **19,2**

ÍNDICE PLÁSTICO**** IP **3,5**



CLASIFICACIÓN SUCS

ML

Limo de Baja
Plasticidad

OBS.

CORRESPONDIENTE
A LA PARTE FINA
DEL SUELO

* **Contenido de humedad (W):** Razón entre el peso del agua y el peso del suelo seco. Se expresa en porcentaje:

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

*** **Límite Plástico (Wp):** Contenido de humedad del suelo entre el estado semi - sólido y plástico.

** **Límite Líquido (WL):** Contenido de humedad del suelo entre el estado semi - líquido y plástico.

**** **Índice de Plasticidad (IP):** Es la diferencia entre los límites líquido y plástico. $IP = WL - Wp$



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

LÍMITES DE CONSISTENCIA

LÍMITE LÍQUIDO - LÍMITE PLÁSTICO - IP

NTP-339-129 - ASTM-D4318

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO B.4

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : Empresa Ladrillera

Distrito : San Jerónimo

Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA **Arcilla (C)**

ESPECIMEN **MAB-05**

Prof. (m) —

LÍMITE LÍQUIDO - ASTM 423-66

PESOS \ N° DE ENSAYO	1	2	3	4
Peso de la Cápsula (gr)	57,55	57,92	59,70	61,17
Peso de la Cápsula + suelo húmedo (gr)	73,93	70,28	76,06	75,34
Peso de la Cápsula + suelo seco (gr)	68,11	66,07	71,06	71,30
Número de golpes	17	24	26	36
Peso del suelo seco (gr)	10,56	8,15	11,36	10,13
Contenido de humedad* (w%)	55,11	51,66	44,01	39,88

LÍMITE LÍQUIDO**
(%)

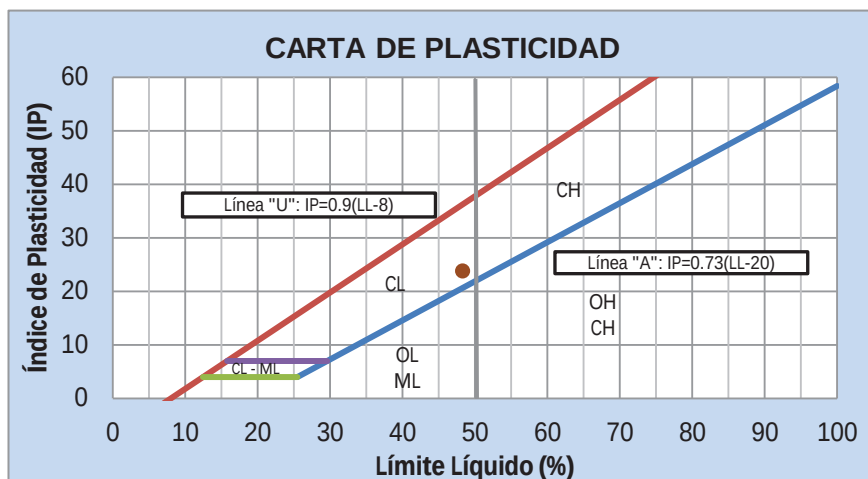
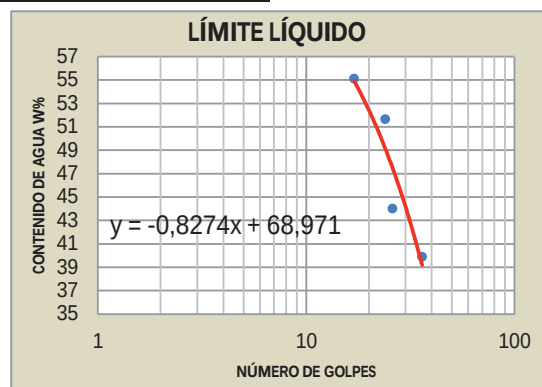
48,3

LÍMITE PLÁSTICO - ASTM D424-59

PESOS \ N° DE ENSAYO	1	2
Peso de la Cápsula (gr)	57,54	59,90
Peso de la Cápsula + suelo húmedo (gr)	63,81	70,68
Peso de la Cápsula + suelo seco (gr)	62,59	68,54
Peso del suelo seco (gr)	5,05	8,64
Contenido de humedad* (w%)	24,16	24,77

LÍMITE PLÁSTICO*** (%) **24,5**

ÍNDICE PLÁSTICO**** IP **23,8**



CLASIFICACIÓN SUCS

CL

Arcilla de baja
Plasticidad

OBS.

CORRESPONDIENTE
A LA PARTE FINA
DEL SUELO

* **Contenido de humedad (W):** Razón entre el peso del agua y el peso del suelo seco. Se expresa en porcentaje:

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

*** **Límite Plástico (Wp):** Contenido de humedad del suelo entre el estado semi - sólido y plástico.

** **Límite Líquido (WL):** Contenido de humedad del suelo entre el estado semi - líquido y plástico.

**** **Índice de Plasticidad (IP):** Es la diferencia entre los límites líquido y plástico. $IP = WL - Wp$

ANEXO C.
ENSAYOS DE PROCTOR
ESTÁNDAR



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

COMPACTACIÓN DE SUELOS POR PROCTOR ESTÁNDAR ASTM-D698

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO C.1

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : Cantera Vicho

Distrito : Oropesa

Provincia : Cusco

Fecha : Agosto del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

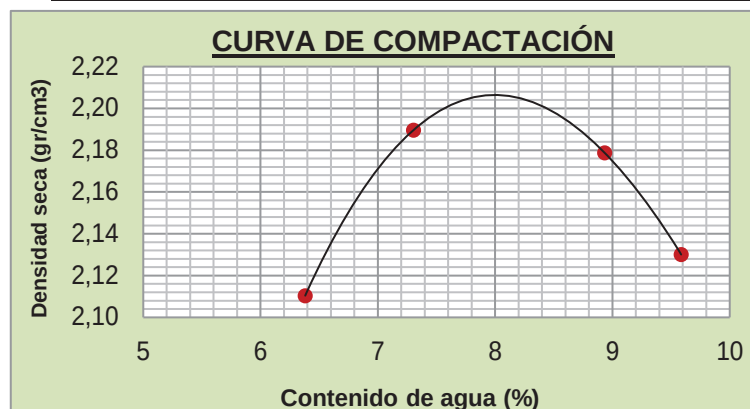
MUESTRA	Grava (G)	Peso del Pisón	5,5 lbf (24,4 N)
ESPECIMEN	MAB-O1	Altura de caída	12 pulg (30,5 cm)
CLASIFICACIÓN SUCS	GP-GC	Energía de Compactación	12 400 lb.pie/pie ³ (600 N.m/m ³)

MÉTODO DE COMPACTACIÓN: MODO "C"

USO : Cuando más del 20% en peso del material se retiene en el tamiz 3/8 pulg (9,53mm) y menos del 30% en peso es retenido en el tamiz 3/4 pulg (19,0mm).

TIPO DE MOLDE	6 Pulgadas de diámetro (152,4 mm)
MATERIAL	El que pasa el Tamiz 3/4 pulgada (19,0 mm)
NÚMERO DE GOLPES POR CAPAS	56 Golpes
NÚMERO DE CAPAS	3 Capas
VOLUMEN DEL MOLDE	2123,76 cm ³

PRUEBA N°			MAB-01-4		MAB-01-5		MAB-01-6		MAB-01-7		
Peso molde			gr	6559,9		6559,9		6559,9		6559,9	
Volumen agua añadida			ml	300		400		500		600	
Peso molde + suelo			gr	11327,9		11549,7		11600,5		11517,4	
Peso suelo húmedo compactado			gr	4768		4989,8		5040,6		4957,5	
Contnido de humedad	Código Cápsula	_____	M1-4-1	M1-4-2	M1-5-1	M1-5-2	M1-6-1	M1-6-2	M1-7-1	M1-7-2	
	Peso de cápsula	gr	60,94	59,18	58,84	58,77	59,44	58,39	60,58	54,71	
	Peso suelo húmedo + cápsula	gr	163,5	160,2	146,8	155,8	165,5	170,24	182,72	181,38	
	Peso suelo seco + cápsula	gr	157,9	153,6	140,7	149,4	157,1	160,75	171,94	170,4	
	Peso del agua	gr	5,6	6,6	6,13	6,45	8,39	9,49	10,78	10,98	
	Peso del suelo seco	gr	96,99	94,45	81,87	90,61	97,63	102,36	111,36	115,69	
	Contenido de agua	%	5,77	6,99	7,49	7,12	8,59	9,27	9,68	9,49	
Contenido de agua Promedio			%	6,38		7,30		8,93		9,59	
Densidad suelo húmedo			gr/cm3	2,25		2,35		2,37		2,33	
Densidad suelo seco *			gr/cm3	2,11		2,19		2,18		2,13	



TIPO DE SUELO	Grava mal gradada con arcilla y arena
DENSIDAD MÁXIMA MDS (gr/cm ³)	2,21
HUMEDAD ÓPTIMA OCH (%)	8%

* Densidad suelo seco (ρ_d) : Es el cálculo de la densidad seca del espécimen Compactado.

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{(1 + w/100)}$$

ρ_d : Densidad seca del espécimen compactado

ρ_m : Densidad húmeda del espécimen compactado

W : Contenido de agua en (%)



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

COMPACTACIÓN DE SUELOS POR PROCTOR ESTÁNDAR ASTM-D698

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO C.2

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : APV 30 de Setiembre

Distrito : San Jerónimo

Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

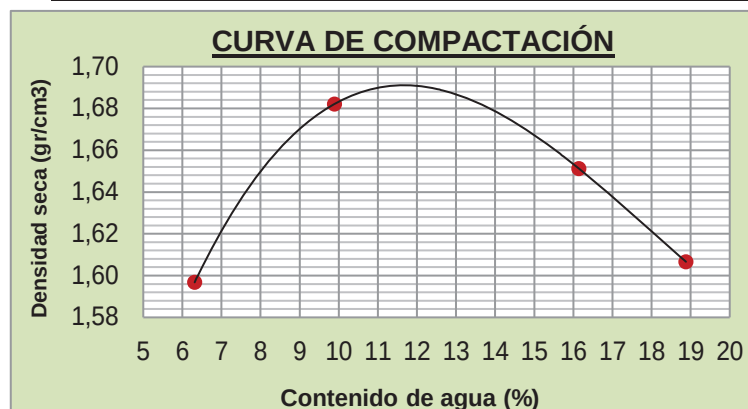
MUESTRA	Arena (S)	Peso del Pisón	5,5 lbf (24,4 N)
ESPECIMEN	MAB-O2	Altura de caída	12 pulg (30,5 cm)
CLASIFICACIÓN SUCS	SM	Energía de Compactación	12 400 lb.pie/pie3 (600 N.m/m3)

MÉTODO DE COMPACTACIÓN: MODO "A"

USO : Cuando el 20% o menos del peso del material es retenido en la Malla N° 4 (4,75 mm)

TIPO DE MOLDE	4 Pulgadas de diámetro (101,6 mm)
MATERIAL	El que pasa el Tamiz N° 4 (4,75 mm)
NÚMERO DE GOLPES POR CAPAS	25 Golpes
NÚMERO DE CAPAS	3 Capas
VOLUMEN DEL MOLDE	942,95 cm3

PRUEBA N°			MAB-02-1		MAB-02-2		MAB-02-3		MAB-02-4		
Peso molde			gr	2032,24		2032,24		2032,24		2032,24	
Volumen agua añadida			ml	60		140		280		380	
Peso molde + suelo			gr	3632,98		3775,25		3840,57		3833,2	
Peso suelo húmedo compactado			gr	1600,74		1743,01		1808,33		1800,96	
Contnido de humedad	Código Cápsula	_____	M2-2-1	M2-2-2	M2-3-1	M2-3-2	M2-4-1	M2-4-2	M2-5-1	M2-5-2	
	Peso de cápsula	gr	58,27	58,56	60,56	59,46	59,79	59,3	57,93	58,85	
	Peso suelo húmedo + cápsula	gr	79,87	81,43	88,04	80,58	90,18	83,74	89,39	82,2	
	Peso suelo seco + cápsula	gr	78,57	80,09	85,58	78,67	86,05	80,27	84,56	78,37	
	Peso del agua	gr	1,3	1,34	2,46	1,91	4,13	3,47	4,83	3,83	
	Peso del suelo seco	gr	20,3	21,53	25,02	19,21	26,26	20,97	26,63	19,52	
	Contenido de agua	%	6,40	6,22	9,83	9,94	15,73	16,55	18,14	19,62	
Contenido de agua Promedio			%	6,31		9,89		16,14		18,88	
Densidad suelo húmedo			gr/cm3	1,70		1,85		1,92		1,91	
Densidad suelo seco *			gr/cm3	1,60		1,68		1,65		1,61	



TIPO DE SUELO	Arena Limosa
MÁXIMA DENSIDAD SECA - MDS (gr/cm3)	1,69
HUMEDAD ÓPTIMA OCH (%)	11,5%

* Densidad suelo seco (ρ_d) : Es el cálculo de la densidad seca del espécimen Compactado.

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{(1 + w/100)}$$

ρ_d : Densidad seca del espécimen compactado

ρ_m : Densidad húmeda del espécimen compactado

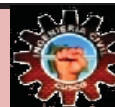
W : Contenido de agua en (%)



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

COMPACTACIÓN DE SUELOS POR PROCTOR ESTÁNDAR ASTM-D698

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO C.3

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : APV 30 de Setiembre

Distrito : San Jerónimo

Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018
Fuente : Elaboración propia
Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino
Bachiller : Milson Morán Moreno

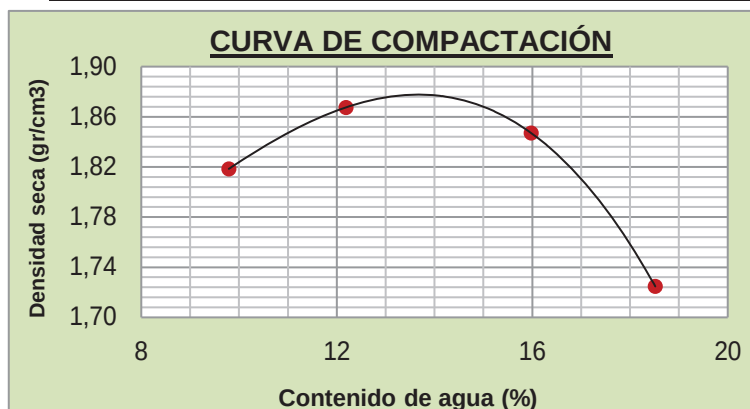
MUESTRA : **Limo (M)** Peso del Pisón : 5,5 lbf (24,4 N)
ESPECIMEN : **MAB-O4** Altura de caída : 12 pulg (30,5 cm)
CLASIFICACIÓN SUCS : **ML** Energía de Compactación : 12 400 lb.pie/pie³ (600 N.m/m³)

MÉTODO DE COMPACTACIÓN: MODO "A"

USO : Cuando el 20% o menos del peso del material es retenido en la Malla N° 4 (4,75 mm)

TIPO DE MOLDE	4 Pulgadas de diámetro (101,6 mm)
MATERIAL	El que pasa el Tamiz N° 4 (4,75 mm)
NÚMERO DE GOLPES POR CAPAS	25 Golpes
NÚMERO DE CAPAS	3 Capas
VOLUMEN DEL MOLDE	942,95 cm ³

PRUEBA N°			MAB-04-1		MAB-04-2		MAB-04-3		MAB-04-4		
Peso molde			gr	2032,23		2032,23		2032,23		2032,23	
Volumen agua añadida			ml	150		250		450		450	
Peso molde + suelo			gr	3914,89		4007,78		4052,2		3959,69	
Peso suelo húmedo compactado			gr	1882,66		1975,55		2019,97		1927,46	
Contrido de humedad	Código Cápsula	_____	M4-1-1	M4-1-2	M4-2-1	M4-2-2	M4-3-1	M4-3-2	M2-4-1	M2-4-2	
	Peso de cápsula	gr	60,57	59,46	59,79	59,31	59,94	58,84	58,55	54,02	
	Peso suelo húmedo + cápsula	gr	88,7	84,84	84,12	82,66	77,25	85,15	81,87	82,75	
	Peso suelo seco + cápsula	gr	86,21	82,56	81,47	80,13	74,74	81,72	78,26	78,22	
	Peso del agua	gr	2,49	2,28	2,65	2,53	2,51	3,43	3,61	4,53	
	Peso del suelo seco	gr	25,64	23,1	21,68	20,82	14,8	22,88	19,71	24,2	
	Contenido de agua	%	9,71	9,87	12,22	12,15	16,96	14,99	18,32	18,72	
Contenido de agua Promedio			%	9,79		12,19		15,98		18,52	
Densidad suelo húmedo			gr/cm3	2,00		2,10		2,14		2,04	
Densidad suelo seco *			gr/cm3	1,82		1,87		1,85		1,72	



TIPO DE SUELO	Limo con arena
DENSIDAD MÁXIMA MDS (gr/cm ³)	1,88
HUMEDAD ÓPTIMA OCH (%)	13,5%

* Densidad suelo seco (ρ_d) : Es el cálculo de la densidad seca del espécimen Compactado.

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{(1 + w/100)}$$

ρ_d : Densidad seca del espécimen compactado

ρ_m : Densidad húmeda del espécimen compactado

W : Contenido de agua en (%)



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

COMPACTACIÓN DE SUELOS POR PROCTOR ESTÁNDAR ASTM-D698

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO C.4

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : Empresa Ladrillera

Distrito : San Jerónimo

Provincia : Cusco

Fecha : Julio del 2018
Fuente : Elaboración propia
Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino
Bachiller : Milson Morán Moreno

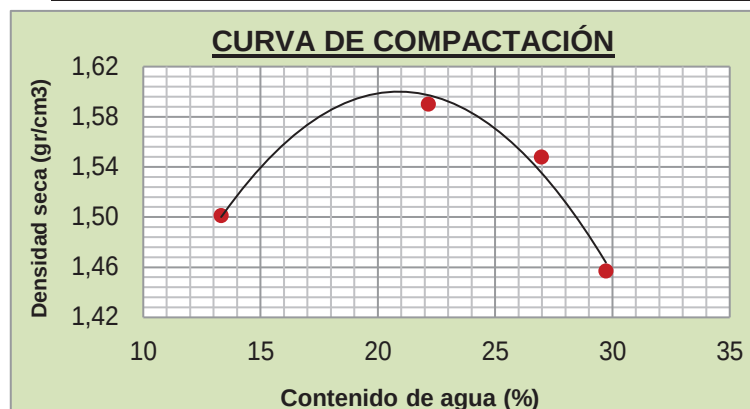
MUESTRA : Arcilla (C) Peso del Pisón : 5,5 lbf (24,4 N)
ESPECIMEN : MAB-O5 Altura de caída : 12 pulg (30,5 cm)
CLASIFICACIÓN SUCS : CL Energía de Compactación : 12 400 lb.pie/pie³ (600 N.m/m³)

MÉTODO DE COMPACTACIÓN: MODO "A"

USO : Cuando el 20% o menos del peso del material es retenido en la Malla N° 4 (4.75 mm)

TIPO DE MOLDE	4 Pulgadas de diámetro (101,6 mm)
MATERIAL	El que pasa el Tamiz N° 4 (4,75 mm)
NÚMERO DE GOLPES POR CAPAS	25 Golpes
NÚMERO DE CAPAS	3 Capas
VOLUMEN DEL MOLDE	942,95 cm ³

PRUEBA N°			MAB-05-1		MAB-05-2		MAB-05-3		MAB-05-4		
Peso molde			gr	2032,17		2032,17		2032,17		2032,17	
Volumen agua añadida			ml	120		250		350		420	
Peso molde + suelo			gr	3636,25		3863,67		3885,68		3814,42	
Peso suelo húmedo compactado			gr	1604,08		1831,5		1853,51		1782,25	
Contnido de humedad	Código Cápsula	_____	M5-1-1	M5-1-2	M5-2-1	M5-2-2	M5-3-1	M5-3-2	M5-4-1	M5-4-2	
	Peso de cápsula	gr	55,71	59,55	62,59	58,99	60,96	59,18	58,82	58,75	
	Peso suelo húmedo + cápsula	gr	90,47	95,15	100,4	99,05	92,35	97,77	86,24	87,56	
	Peso suelo seco + cápsula	gr	86,35	91	93,56	91,78	85,79	89,44	79,9	81,02	
	Peso del agua	gr	4,12	4,15	6,85	7,27	6,56	8,33	6,34	6,54	
	Peso del suelo seco	gr	30,64	31,45	30,97	32,79	24,83	30,26	21,08	22,27	
	Contenido de agua	%	13,45	13,20	22,12	22,17	26,42	27,53	30,08	29,37	
Contenido de agua Promedio			%	13,32		22,14		26,97		29,72	
Densidad suelo húmedo			gr/cm3	1,70		1,94		1,97		1,89	
Densidad suelo seco *			gr/cm3	1,50		1,59		1,55		1,46	



TIPO DE SUELO	Arcilla de Baja Plasticidad
DENSIDAD MÁXIMA MDS (gr/cm ³)	1,60
HUMEDAD ÓPTIMA OCH (%)	21%

* Densidad suelo seco (ρ_d) : Es el cálculo de la densidad seca del espécimen Compactado.

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{(1 + w/100)}$$

ρ_d : Densidad seca del espécimen compactado

ρ_m : Densidad húmeda del espécimen compactado

W : Contenido de agua en (%)

ANEXO D.
DENSIDAD IN SITU
PARA GRAVAS



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

DENSIDAD NATURAL A GRAN ESCALA USBR-7221-89

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO D.1

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : Cantera Vicho

Distrito : Oropesa

Provincia : Cusco

Fecha : Agosto del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamantorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA

Grava (G)

ESTRATO

G-3

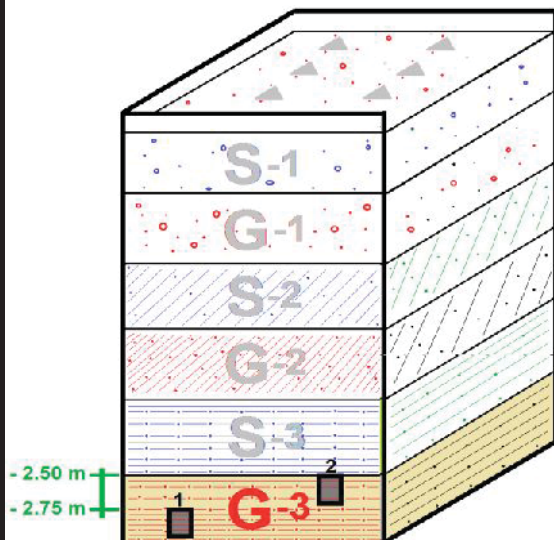
CLASIFICACIÓN SUCS

GP-GC

TIPO DE SUELO

Grava mal gradada con arcilla y arena

ESPÉCIMEN		***	G-3-1		G-3-2	
PROFUNDIDAD		(m)	2,75		2,50	
V1	Peso del bidón + peso del agua	Wb+Wa1 (gr)	16043,4		15368,6	
	Peso del suelo húmedo	Wsh1 (gr)	5366,4		4222,4	
	Peso del bidón + peso del agua restante	Wb+War1 (gr)	12633,1		12038,2	
V2	Peso del bidón + peso del agua	Wb+Wa2 (gr)	16030,0		15336,3	
	Peso del suelo húmedo	Wsh2 (gr)	10034,6		13975,7	
	Peso del bidón + peso del agua restante	Wb+War2 (gr)	8667,0		6162,1	
Volumen del hoyo		cm ³	3952700		5843800	
Densidad natural húmeda		γ_n (t/m ³)	2,54		2,39	
W%	Código del cápsula	***	G-3-1a	G-3-1b	G-3-2a	G-3-2b
	Peso del cápsula	(gr)	54,53	62,28	60,64	59,77
	Peso de cápsula + muestra húmeda	(gr)	165,99	181,48	176,68	200,91
	Peso de cápsula + muestra seca	(gr)	159,05	173,50	171,00	192,60
	Peso del agua	(gr)	6,94	7,98	5,68	8,31
	Peso del suelo seco	(gr)	104,52	111,22	110,36	132,83
	Contenido de humedad	%	6,64	7,17	5,15	6,26
	Contenido de humedad promedio	%	6,91		5,70	
Densidad natural seca		γ_s (t/m ³)	2,37		2,26	



RESUMEN		
ESTRATO	G-3	
ESPÉCIMEN	G-3-1	G-3-2
PROFUNDIDAD (m)	2,75	2,50
DENSIDAD NATURAL (Tn/m ³)	2,54	2,39
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	6,91	5,70
DENSIDAD SECA (Tn/m ³)	2,37	2,26

NOTA: El ensayo emplea el material excavado de un hoyo dentro de un anillo de 25cm de diámetro. Esto permite extraer en la muestra materiales de hasta 3". La medición del volumen del hoyo se realiza por el peso de agua necesario para llenar el hoyo revestido por una delgada membrana impermeable.



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

DENSIDAD NATURAL A GRAN ESCALA USBR-7221-89

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO D.2

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : Cantera Vicho

Distrito : Oropesa

Provincia : Cusco

Fecha : Agosto del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA

Grava (G)

ESTRATO

G-2

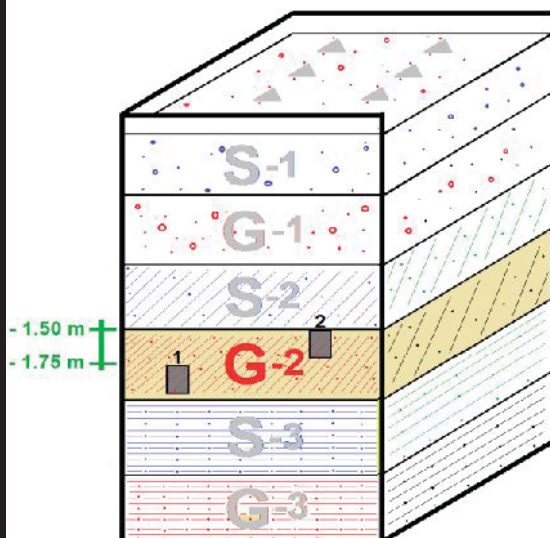
CLASIFICACIÓN SUCS

GP-GC

TIPO DE SUELO

Grava mal graduada con arcilla y arena

ESPÉCIMEN		***	G-2-1		G-2-2	
PROFUNDIDAD		(m)	1,75		1,50	
V1	Peso del bidón + peso del agua	Wb+Wa1 (gr)	14370,3		12503,6	
	Peso del suelo húmedo	Wsh1 (gr)	3869,1		5350,6	
	Peso del bidón + peso del agua restante	Wb+War1 (gr)	11300,8		8735,6	
V2	Peso del bidón + peso del agua	Wb+Wa2 (gr)	15211,4		16460,1	
	Peso del suelo húmedo	Wsh2 (gr)	9806,2		11486,2	
	Peso del bidón + peso del agua restante	Wb+War2 (gr)	7852,0		7477	
Volumen del hoyo		cm ³	4289900		5215100	
Densidad natural húmeda		γ_n (t/m ³)	2,29		2,20	
W%	Código del cápsula	***	G-2-1a	G-2-1b	G-2-2a	G-2-2b
	Peso del cápsula	(gr)	59,77	61,37	61,37	57,66
	Peso de cápsula + muestra húmeda	(gr)	157,93	175,49	156,7	185,26
	Peso de cápsula + muestra seca	(gr)	151,4	167,64	151,61	177,61
	Peso del agua	(gr)	6,53	7,85	5,09	7,65
	Peso del suelo seco	(gr)	91,63	106,27	90,24	119,95
	Contenido de humedad	%	7,13	7,39	5,64	6,38
	Contenido de humedad promedio	%	7,26		6,01	
Densidad natural seca		γ_s (t/m ³)	2,13		2,08	



RESUMEN

ESTRATO	G-2	
ESPÉCIMEN	G-2-1	G-2-2
PROFUNDIDAD (m)	1,75	1,50
DENSIDAD NATURAL (Tn/m ³)	2,29	2,20
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	7,26	6,01
DENSIDAD SECA (Tn/m ³)	2,13	2,08

NOTA: El ensayo emplea el material excavado de un hoyo dentro de un anillo de 25cm de diámetro. Esto permite extraer en la muestra materiales de hasta 3". La medición del volumen del hoyo se realiza por el peso de agua necesario para llenar el hoyo revestido por una delgada membrana impermeable.



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

DENSIDAD NATURAL A GRAN ESCALA USBR-7221-89

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO D.3

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : Cantera Vicho

Distrito : Oropesa

Provincia : Cusco

Fecha : Agosto del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA

Grava (G)

ESTRATO

G-1

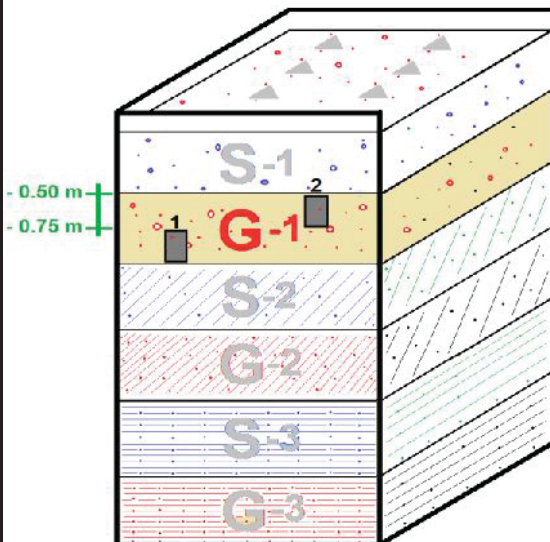
CLASIFICACIÓN SUCS

GP-GC

TIPO DE SUELO

Grava mal graduada con arcilla y arena

ESPÉCIMEN		***	G-1-1		G-1-2	
PROFUNDIDAD		(m)	0,75		0,50	
V1	Peso del bidón + peso del agua	Wb+Wa1 (gr)	10989,3		14070,5	
	Peso del suelo húmedo	Wsh1 (gr)	5125,6		5003,5	
	Peso del bidón + peso del agua restante	Wb+War1 (gr)	7215,2		10294,7	
V2	Peso del bidón + peso del agua	Wb+Wa2 (gr)	15325,0		15882,1	
	Peso del suelo húmedo	Wsh2 (gr)	8880,6		11622,6	
	Peso del bidón + peso del agua restante	Wb+War2 (gr)	7528,6		6703	
Volumen del hoyo		Cm3	4022300		5403300	
Densidad natural húmeda		γ_n (t/m3)	2,21		2,15	
W%	Código del cápsula	***	G-1-1a	G-1-1b	G-1-2a	G-1-2b
	Peso del cápsula	(gr)	59,82	61,39	60,63	61,47
	Peso de cápsula + muestra húmeda	(gr)	168,12	169,28	155,95	177,32
	Peso de cápsula + muestra seca	(gr)	162,28	162,17	148,93	169,29
	Peso del agua	(gr)	5,84	7,11	7,02	8,03
	Peso del suelo seco	(gr)	102,46	100,78	88,3	107,82
	Contenido de humedad	%	5,70	7,05	7,95	7,45
	Contenido de humedad promedio	%	6,38		7,70	
Densidad natural seca		γ_s (t/m3)	2,08		2,00	



RESUMEN

ESTRATO	G-1	
ESPÉCIMEN	G-1-1	G-1-2
PROFUNDIDAD (m)	0,75	0,50
DENSIDAD NATURAL (Tn/m3)	2,21	2,15
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	6,38	7,70
DENSIDAD SECA (Tn/m3)	2,08	2,00

NOTA: El ensayo emplea el material excavado de un hoyo dentro de un anillo de 25cm de diámetro. Esto permite extraer en la muestra materiales de hasta 3". La medición del volumen del hoyo se realiza por el peso de agua necesario para llenar el hoyo revestido por una delgada membrana impermeable.

ANEXO E.
DENSIDAD IN SITU
PARA ARENAS, LIMOS Y
ARCILLAS



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

DENSIDAD NATURAL EN MUESTRA INALTERADA DE ANILLO DE BORDE CORTANTE

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO E.1

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : APV 30 de Setiembre

Distrito : San Jerónimo

Provincia : Cusco

Fecha : Agosto del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA

Arena (S)

ESTRATOS

S-3, S-2 y S-1

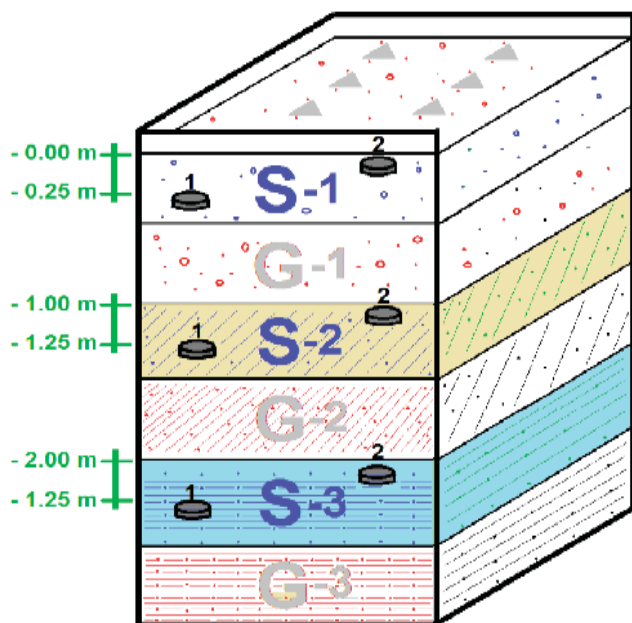
CLASIFICACIÓN SUCS

SM

TIPO DE SUELO

Arena Limosa

ESPÉCIMEN		S-3-1	S-3-2	S-2-1	S-2-2	S-1-1	S-1-2
PROFUNDIDAD	m	2,25	2,00	1,25	1,00	0,25	0,00
NÚMERO DE ANILLO	n°	2	1	1	1	2	1
DIÁMETRO DE ANILLO	cm	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64
ALTURA DE ANILLO	cm	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
ÁREA DEL ANILLO	cm ²	24,98	24,98	24,98	24,98	24,98	24,98
VOLUMEN DEL ANILLO	cm ³	49,97	49,97	49,97	49,97	49,97	49,97
PESO DEL ANILLO	gr	43,20	43,38	43,38	43,35	43,19	43,39
PESO ANILLO + MUESTRA HÚMEDA	gr	130,34	135,36	125,74	119,41	113,38	115,03
PESO MUESTRA HÚMEDA	gr	87,14	91,98	82,36	76,06	70,19	71,64
W%	PESO DE CÁPSULA	gr	62,41	60,59	58,9	59,92	59,89
	CÁPSULA + MUESTRA HÚMEDA	gr	109,87	111,74	94,2	96,01	98,19
	CÁPSULA + MUESTRA SECA	gr	105,68	107,39	91,31	93,49	94,87
	PESO DE AGUA	gr	4,19	4,35	2,89	2,52	3,32
	PESO SUELO SECO	gr	43,27	46,8	32,41	33,57	34,98
	CONTENIDO DE HUMEDAD	%	9,68	9,29	8,92	7,51	9,49
DENSIDAD HÚMEDA		Tn/m ³	1,74	1,84	1,65	1,52	1,43
DENSIDAD SECA		Tn/m ³	1,59	1,68	1,51	1,42	1,31



ESPÉCIMEN	S-1-1	S-1-2
γ_n (t/m ³)	1,40	1,43
HUMEDAD (%)	7,40	9,49

ESPÉCIMEN	S-2-1	S-2-2
γ_n (t/m ³)	1,65	1,52
HUMEDAD (%)	8,92	7,51

ESPÉCIMEN	S-3-1	S-3-2
γ_n (t/m ³)	1,74	1,84
HUMEDAD (%)	9,68	9,29

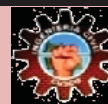
NOTA: El presente sistema de muestreo es uno de los mejores que existe en la mecánica de suelos para los casos en que no existe grava, puesto que al ser la muestra de poca longitud, la fricción entre el suelo y el anillo es poco significativa.



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

DENSIDAD NATURAL EN MUESTRA INALTERADA DE ANILLO DE BORDE CORTANTE

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO E.2

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : APV 30 de Setiembre

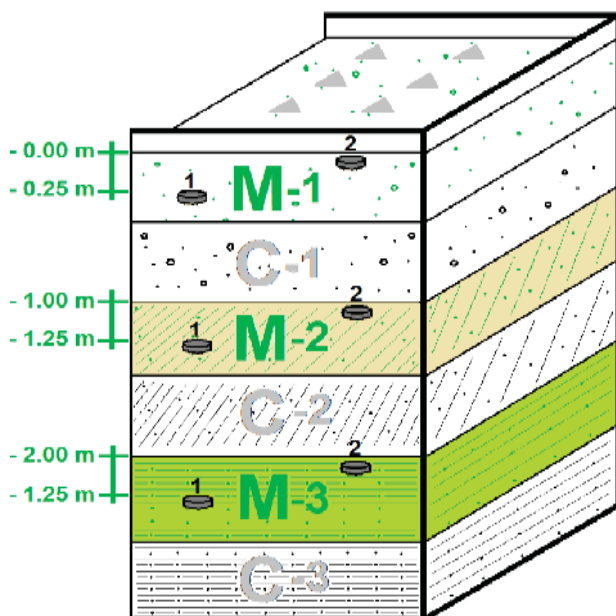
Distrito : San Jerónimo

Provincia : Cusco

Fecha : Agosto del 2018
Fuente : Elaboración propia
Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino
Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA : **Limo (M)** ESTRATOS : **M-3, M-2 y M-1**
CLASIFICACIÓN SUCS : **ML** TIPO DE SUELO : **Limo con arena**

ESPÉCIMEN		M-3-1	M-3-2	M-2-1	M-2-2	M-1-1	M-1-2
PROFUNDIDAD	m	2,25	2,00	1,25	1,00	0,25	0,00
NÚMERO DE ANILLO	n°	1	2	2	2	1	2
DIÁMETRO DE ANILLO	cm	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64
ALTURA DE ANILLO	cm	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
ÁREA DEL ANILLO	cm ²	24,98	24,98	24,98	24,98	24,98	24,98
VOLUMEN DEL ANILLO	cm ³	49,97	49,97	49,97	49,97	49,97	49,97
PESO DEL ANILLO	gr	43,39	43,20	43,19	43,19	43,40	43,19
PESO ANILLO + MUESTRA HÚMEDA	gr	155,12	152,32	143,92	141,87	126,94	128,99
PESO MUESTRA HÚMEDA	gr	111,73	109,12	100,73	98,68	83,54	85,80
W%	PESO DE CÁPSULA	gr	58,35	59,82	58,87	58,35	59,22
	CÁPSULA + MUESTRA HÚMEDA	gr	104,00	99,74	104,10	100,88	104,49
	CÁPSULA + MUESTRA SECA	gr	98,05	95,32	98,87	97,23	99,44
	PESO DE AGUA	gr	5,95	4,42	5,23	3,65	5,05
	PESO SUELO SECO	gr	39,7	35,5	40	38,88	40,22
	CONTENIDO DE HUMEDAD	%	14,99	12,45	13,08	9,39	12,56
DENSIDAD HÚMEDA		Tn/m ³	2,24	2,18	2,02	1,97	1,72
DENSIDAD SECA		Tn/m ³	1,94	1,94	1,78	1,81	1,52



ESPÉCIMEN	M-1-1	M-1-2
γ_n (t/m ³)	1,67	1,72
HUMEDAD (%)	12,56	13,16

ESPÉCIMEN	M-2-1	M-2-2
γ_n (t/m ³)	2,02	1,97
HUMEDAD (%)	13,08	9,39

ESPÉCIMEN	M-3-1	M-3-2
γ_n (t/m ³)	2,24	2,18
HUMEDAD (%)	14,99	12,45

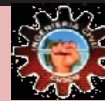
NOTA: El presente sistema de muestreo es uno de los mejores que existe en la mecánica de suelos para los casos en que no existe grava, puesto que al ser la muestra de poca longitud, la fricción entre el suelo y el anillo es poco significativa.



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO

DENSIDAD NATURAL EN MUESTRA INALTERADA DE ANILLO DE BORDE CORTANTE

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



ANEXO E.3

Tesis : "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

Origen suelo : Empresa Ladrillera

Distrito : San Jerónimo

Provincia : Cusco

Fecha : Agosto del 2018

Fuente : Elaboración propia

Bachiller : Roxana Huamanhorcco Merino

Bachiller : Milson Morán Moreno

MUESTRA

Arcilla (C)

ESTRATOS

C-3, C-2 y C-1

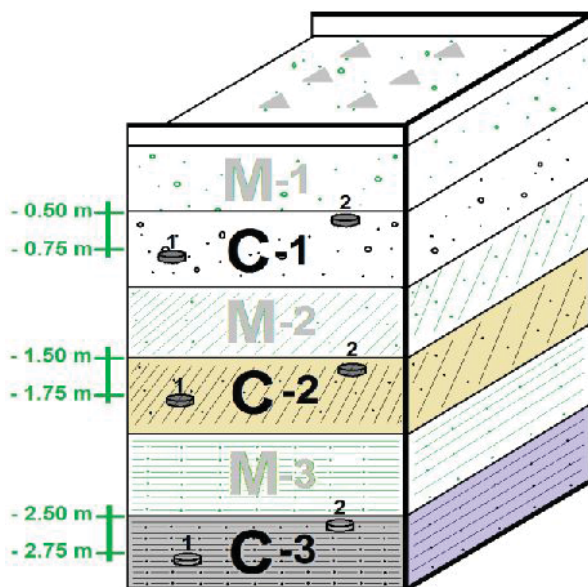
CLASIFICACIÓN SUCS

CL

TIPO DE SUELO

Arcilla de Baja Plasticidad

ESPÉCIMEN		C-3-1	C-3-2	C-2-1	C-2-2	C-1-1	C-1-2
PROFUNDIDAD	m	2,75	2,50	1,75	1,50	0,75	0,50
NÚMERO DE ANILLO	n°	1	2	2	1	1	1
DIÁMETRO DE ANILLO	cm	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64
ALTURA DE ANILLO	cm	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
ÁREA DEL ANILLO	cm ²	24,98	24,98	24,98	24,98	24,98	24,98
VOLUMEN DEL ANILLO	cm ³	49,97	49,97	49,97	49,97	49,97	49,97
PESO DEL ANILLO	gr	43,37	43,18	43,22	43,41	43,40	43,40
PESO ANILLO + MUESTRA HÚMEDA	gr	150,56	146,50	127,82	120,1	110,75	115,11
PESO MUESTRA HÚMEDA	gr	107,19	103,32	84,60	76,69	67,35	71,71
W%	PESO DE CÁPSULA	gr	54,76	62,46	54,72	54,57	57,72
	CÁPSULA + MUESTRA HÚMEDA	gr	90,77	100,65	96,76	103,92	99,42
	CÁPSULA + MUESTRA SECA	gr	85,1	93,93	89,75	97,4	91,48
	PESO DE AGUA	gr	5,67	6,72	7,01	6,52	7,94
	PESO SUELO SECO	gr	30,34	31,47	35,03	37,44	33,76
	CONTENIDO DE HUMEDAD	%	18,69	21,35	20,01	17,41	23,52
DENSIDAD HÚMEDA		Tn/m ³	2,15	2,07	1,69	1,53	1,44
DENSIDAD SECA		Tn/m ³	1,81	1,70	1,41	1,31	1,16



ESPÉCIMEN	C-1-1	C-1-2
γ_n (t/m ³)	1,35	1,44
HUMEDAD (%)	18,98	23,52

ESPÉCIMEN	C-2-1	C-2-2
γ_n (t/m ³)	1,69	1,53
HUMEDAD (%)	20,01	17,41

ESPÉCIMEN	C-3-1	C-3-2
γ_n (t/m ³)	2,15	2,07
HUMEDAD (%)	18,69	21,35

NOTA: El presente sistema de muestreo es uno de los mejores que existe en la mecánica de suelos para los casos en que no existe grava, puesto que al ser la muestra de poca longitud, la fricción entre el suelo y el anillo es poco significativa.

ANEXO F.
RESULTADOS DE
ENSAYOS PDC EN EL
MODELO
EXPERIMENTAL



TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

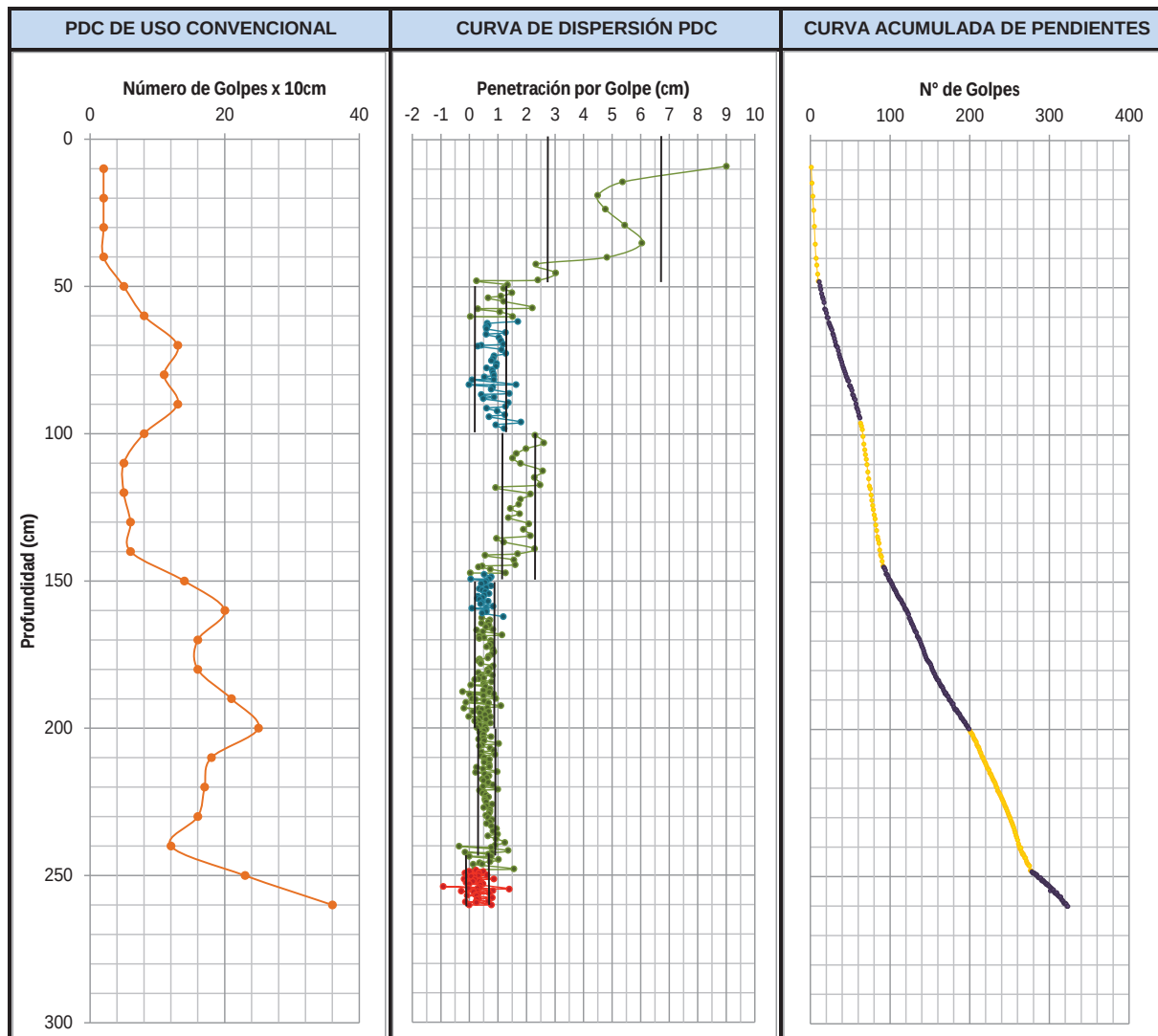
TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

FUENTE: Elaboración propia a partir de pruebas

UBICACIÓN: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES UNSAAC -CUSCO

PUNTO: **C-4** ARENA - GRAVA

LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



PARÁMETROS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS									RESULTADOS PDC			
MUES TRA	CONSISTENCIA		GRANULOMETRÍA			DENSIDAD	HUMEDAD	Z (cm)	Reb	PENDIENTE mm/golpe	e mm	σ mm
	LL (%)	LP (%)	TM(mm)	%G	%S	%F	γn t/m3					
SM	24,75	23,19	2,38	0	82,3	17,7	1,43	9,49	5 S	47,7	[28, 67]	19,8
									10 S			
									15 S			
									20 S			
									25 S			
							1,40	7,40	30 S			
									35 S			
									40 S			
									45 S			
									50 S			
GP-GC	24,30	18,05	12,70	60,7	32,2	7,0	2,15	7,70	55 S	8,9	[4, 13]	4,5
									60 S			
									65 R			
									70 R			
									75 R			
							2,21	6,38	80 R			
									85 R			
									90 R			
									95 R			
									100 R			
SM	24,75	23,19	2,38	0	82,3	17,7	1,52	7,51	105 S	17,3	[12, 23]	5,2
									110 S			
									115 S			
									120 S			
									125 S			
							1,65	8,92	130 S			
									135 S			
									140 S			
									145 S			
									150 R			
GP-GC	24,3	18,05	12,7	60,7	32,2	7,04	2,20	6,01	155 R	5,1	[2, 8]	2,7
									160 R			
									165 S			
									170 S			
									175 S			
							2,29	7,26	180 S			
									185 S			
									190 S			
									195 S			
									200 S			
SM	24,75	23,19	2,38	0	82,3	17,7	1,84	9,29	205 S	6,2	[3, 9]	3,0
									210 S			
									215 S			
									220 S			
									225 S			
							1,74	9,68	230 S			
									235 S			
									240 S			
									245 S			
									250 S			
GP-GC	24,3	18,05	12,7	60,7	32,2	7,04	2,39	5,70	255 RP	2,6	[-1, 6]	3,7
									260 RP			
									265 ***			
									270 ***			
									275 ***			
							2,54	6,91	280 ***			
									285 ***			
									290 ***			
									295 ***			
									300 ***			
C	***	***	***	***	***	***	***	***	305			



TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA
CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

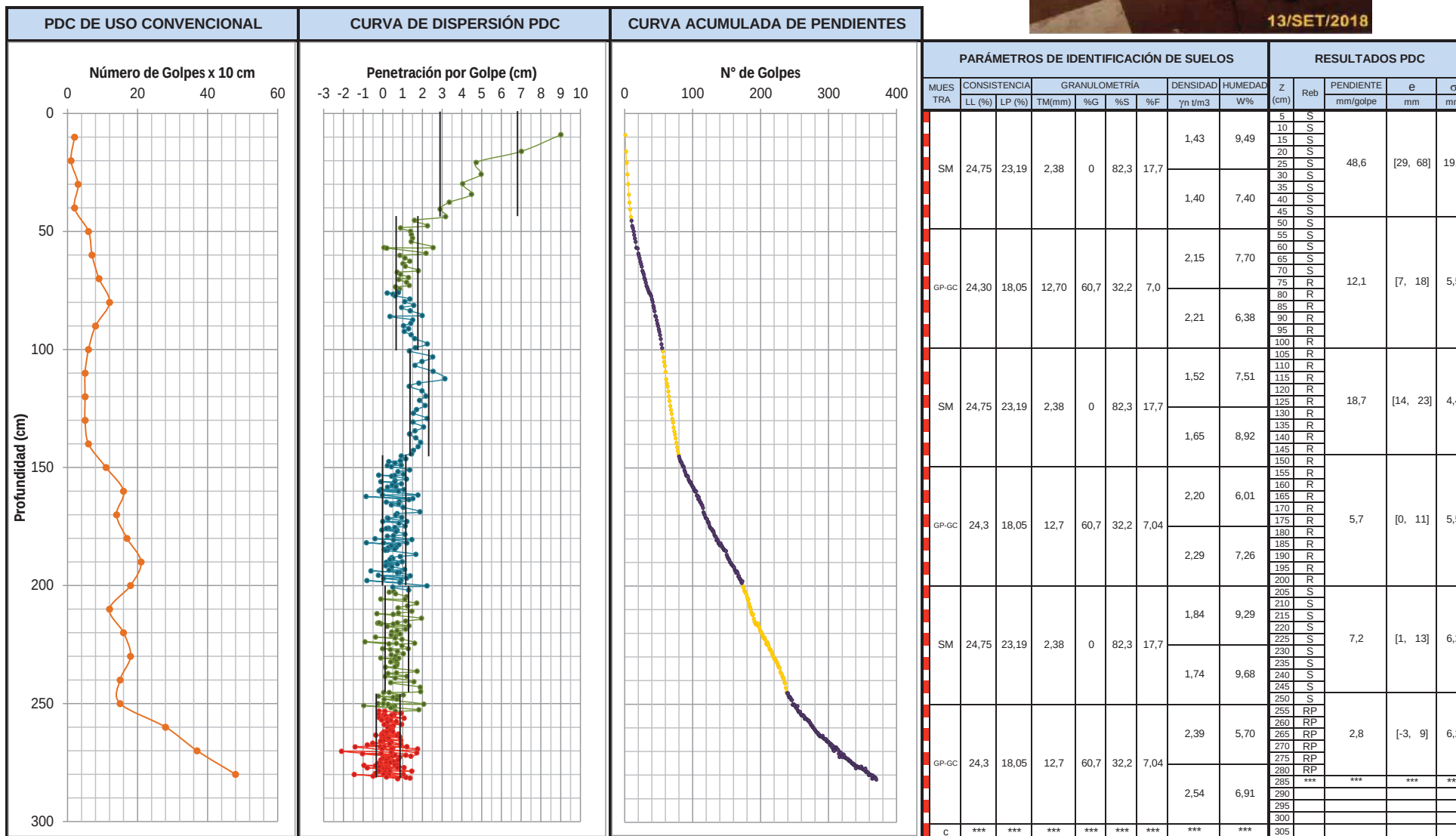
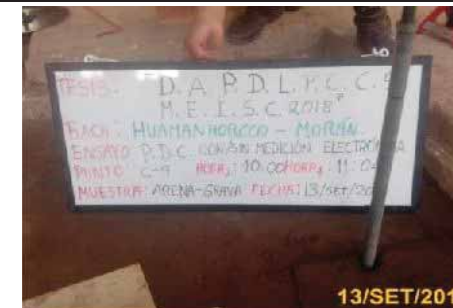
TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

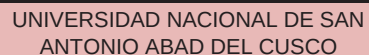
FUENTE: Elaboración propia a partir de pruebas

UBICACIÓN: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES UNSAAC -CUSCO

PUNTO: **C-9** ARENA - GRAVA

LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R')
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTNDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN





RESULTADOS DE ENSAYOS EN EL MODELO EXPERIMENTAL (POZO ESTRATIFICADO) LABORATORIO - UNSAAC

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

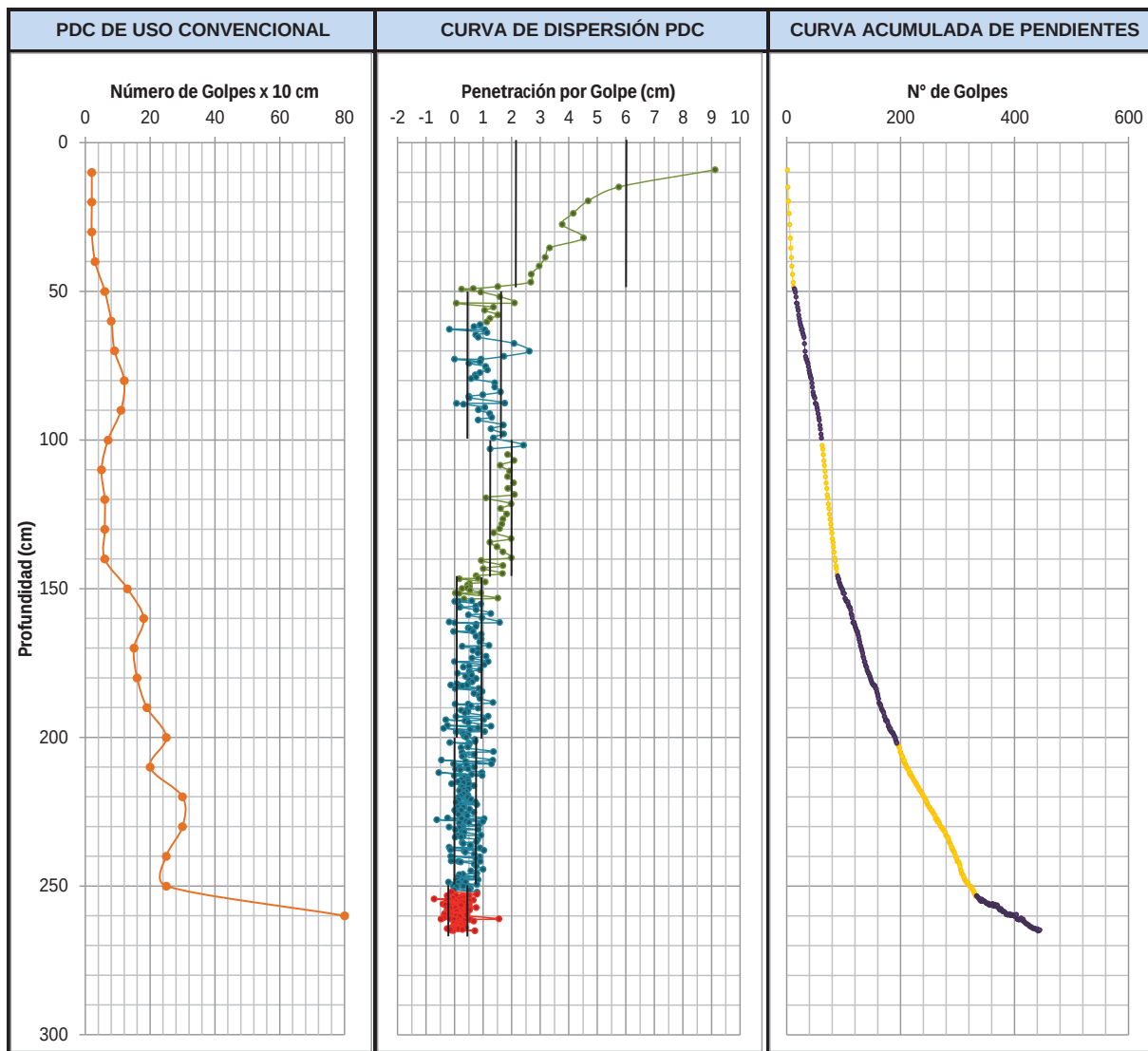
TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

FUENTE: Elaboración propia a partir de pruebas

UBICACIÓN: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES UNSAAC -CUSCO

PUNTO: **F-4** ARENA - GRAVA

LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R')
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



PARÁMETROS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS									RESULTADOS PDC				
MUES TRA	CONSISTENCIA		GRANULOMETRÍA			DENSIDAD	HUMEDAD	Z (cm)	Reb	PENDIENTE	e	σ	
	LL (%)	LP (%)	TM(mm)	%G	%S	%F	γn t/m3	W%		mm/golpe	mm	mm	
SM	24,75	23,19	2,38	0	82,3	17,7	1,43	9,49	5	S	40,3	[21, 60]	19
									10	S			
									15	S			
									20	S			
									25	S			
							1,40	7,40	30	S			
									35	S			
									40	S			
									45	S			
									50	S			
GP-GC	24,30	18,05	12,70	60,7	32,2	7,0	2,15	7,70	55	S	10,4	[5, 16]	5,7
									60	S			
									65	R			
									70	R			
									75	R			
							2,21	6,38	80	R			
									85	R			
									90	R			
									95	R			
									100	R			
SM	24,75	23,19	2,38	0	82,3	17,7	1,52	7,51	105	S	16,9	[13, 20]	3,6
									110	S			
									115	S			
									120	S			
									125	S			
							1,65	8,92	130	S			
									135	S			
									140	S			
									145	S			
									150	S			
GP-GC	24,3	18,05	12,7	60,7	32,2	7,04	2,20	6,01	155	R	5,4	[1, 9]	4,0
									160	R			
									165	R			
									170	R			
									175	R			
							2,29	7,26	180	R			
									185	R			
									190	R			
									195	R			
									200	R			
SM	24,75	23,19	2,38	0	82,3	17,7	1,84	9,29	205	R	3,7	[0, 7]	3,6
									210	R			
									215	R			
									220	R			
									225	R			
							1,74	9,68	230	R			
									235	R			
									240	R			
									245	R			
									250	R			
GP-GC	24,3	18,05	12,7	60,7	32,2	7,04	2,39	5,70	255	RP	1,0	[-2, 4]	3,1
									260	RP			
									265	RP			
									270	***			
									275				
							2,54	6,91	280				
									285				
									290				
									295				
									300				
C	***	***	***	***	***	***	***	***	305				



TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

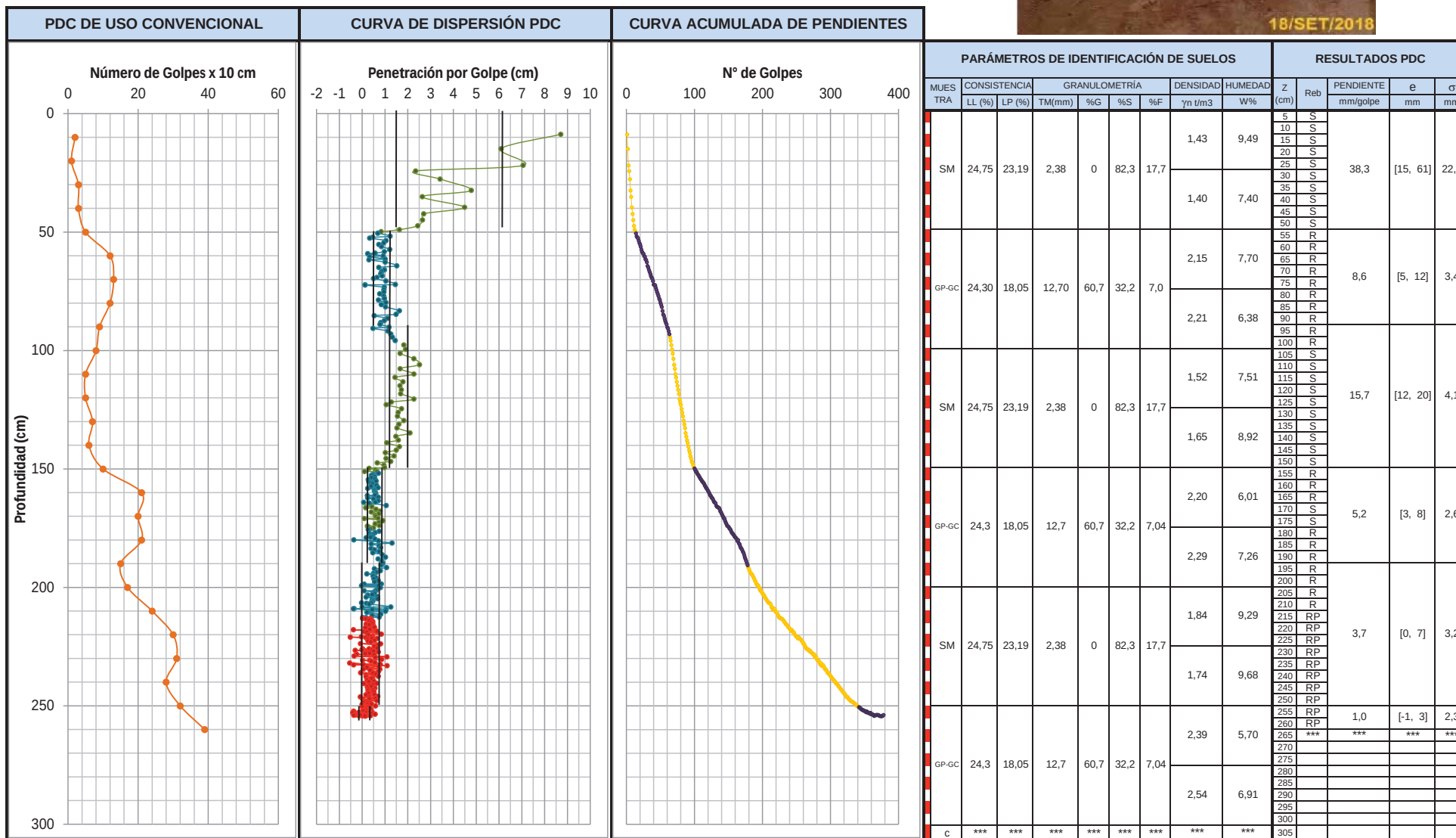
TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

FUENTE: Elaboración propia a partir de pruebas

UBICACIÓN: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES UNSAAC -CUSCO

PUNTO: **F-9** ARENA - GRAVA

LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN





TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA
CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

FUENTE: Elaboración propia a partir de pruebas

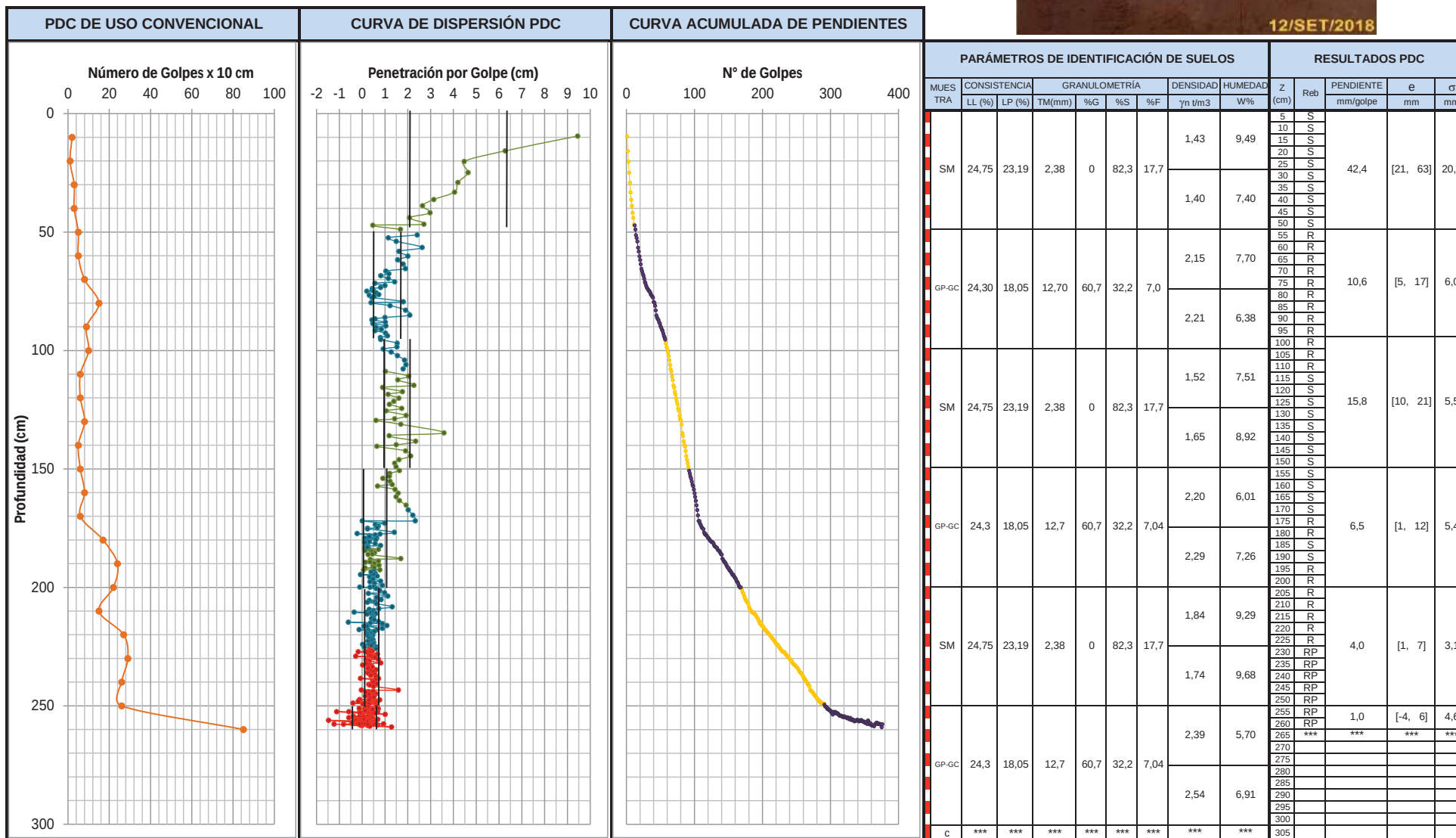
UBICACIÓN: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES UNSAAC -CUSCO

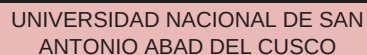
PUNTO: **F-14** ARENA - GRAVA

LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



12/SET/2018





RESULTADOS DE ENSAYOS EN EL MODELO EXPERIMENTAL (POZO ESTRATIFICADO) LABORATORIO - UNSAAC

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

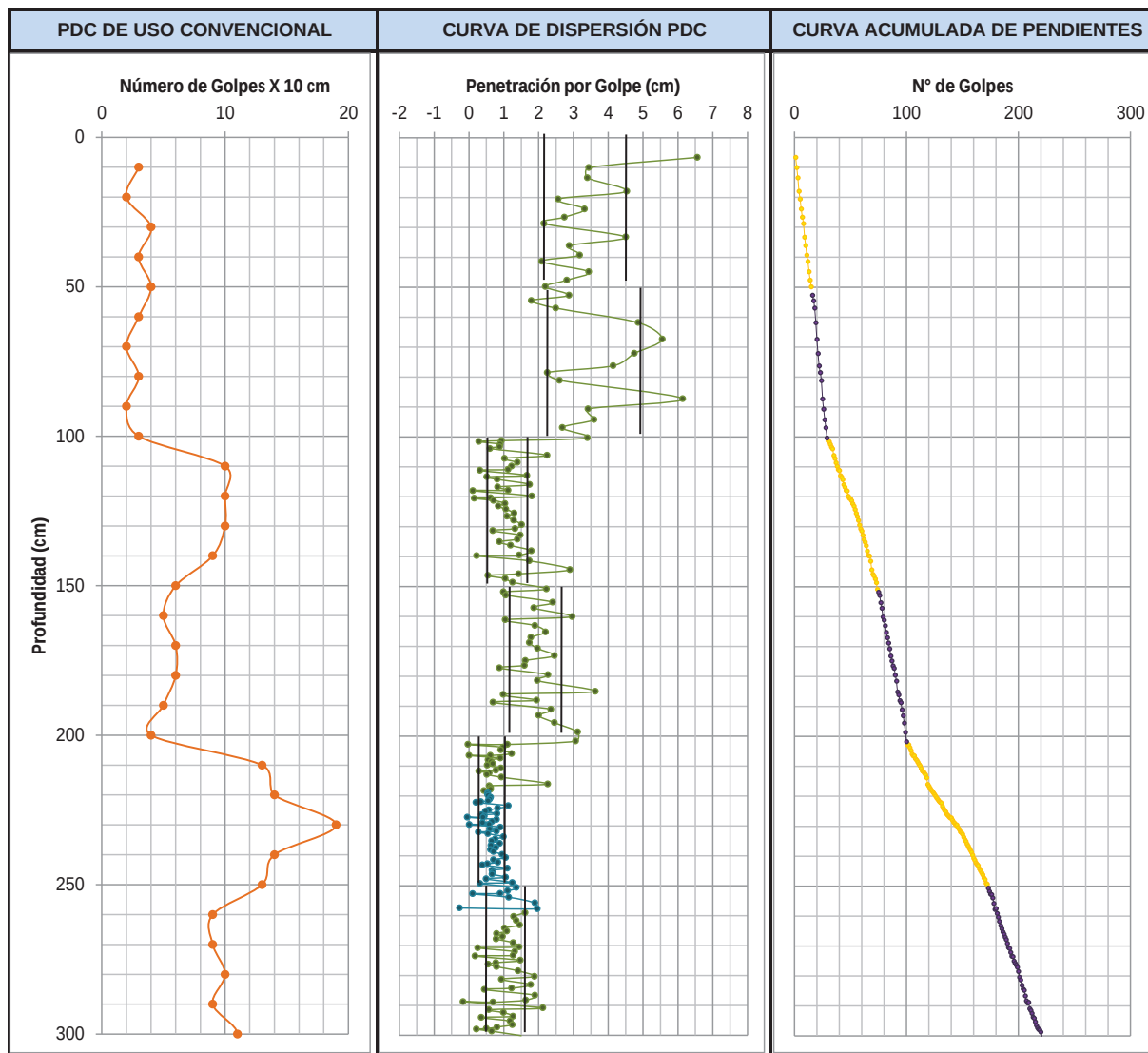
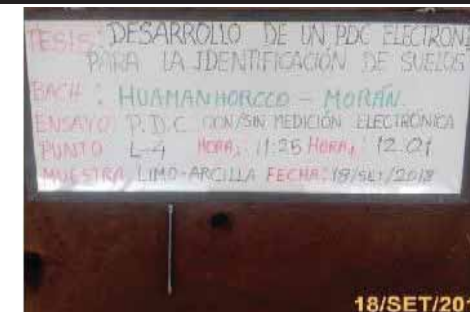
TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

FUENTE: Elaboración propia a partir de pruebas

UBICACIÓN: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES UNSAAC -CUSCO

PUNTO: **L-4** LIMO - ARCILLA

LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R')
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



PARÁMETROS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS										RESULTADOS PDC				
MUES TRA	CONSISTENCIA		GRANULOMETRÍA				DENSIDAD	HUMEDAD	z	Reb	PENDIENTE	e	σ	
	LL (%)	LP (%)	TM(mm)	%G	%S	%F	γs t/m3	W%	(cm)		mm/golpe	mm	mm	
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	1,72	13,16	5	S	33,2	[22, 45]	11,0	
									10	S				
									15	S				
									20	S				
									25	S				
							30	S						
							35	S						
							40	S						
							45	S						
							50	S						
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	1,44	23,52	55	S	36,1	[23, 49]	13,0	
									60	S				
									65	S				
									70	S				
									75	S				
							80	S						
							85	S						
							90	S						
							95	S						
							100	S						
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	1,97	9,39	105	S	11,2	[5, 17]	5,0	
									110	S				
									115	S				
									120	S				
									125	S				
							130	S						
							135	S						
							140	S						
							145	S						
							150	S						
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	1,53	17,41	155	S	19,6	[12, 27]	7,0	
									160	S				
									165	S				
									170	S				
									175	S				
							180	S						
							185	S						
							190	S						
							195	S						
							200	S						
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	2,18	12,45	205	S	6,6	[3, 10]	3,0	
									210	S				
									215	S				
									220	S				
									225	R				
							230	R						
							235	R						
							240	R						
							245	R						
							250	R						
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	2,07	21,35	255	R	10,4	[5, 16]	5,0	
									260	R				
									265	S				
									270	S				
									275	S				
							280	S						
							285	S						
							290	S						
							295	S						
							300	S						
C	***	***	***	***	***	***	***	***	305	S	***	***	***	



TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS. CUSCO - 2018"

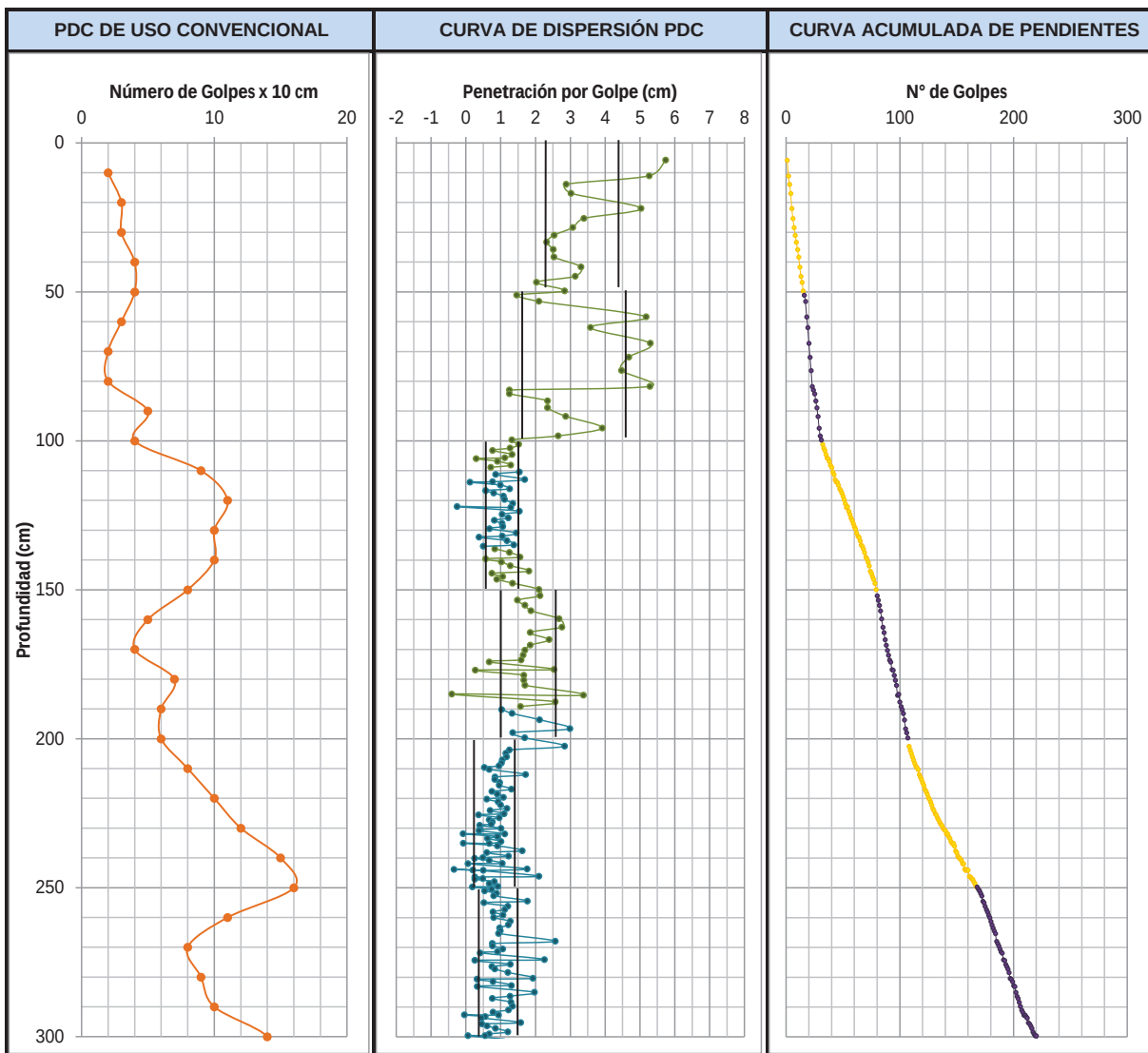
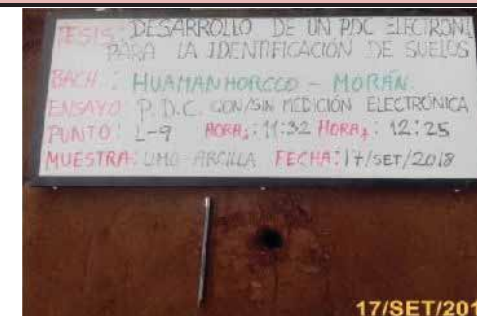
TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

FUENTE: Elaboración propia a partir de pruebas

UBICACIÓN: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES UNSAAC -CUSCO

PUNTO: **L-9** LIMO - ARCILLA

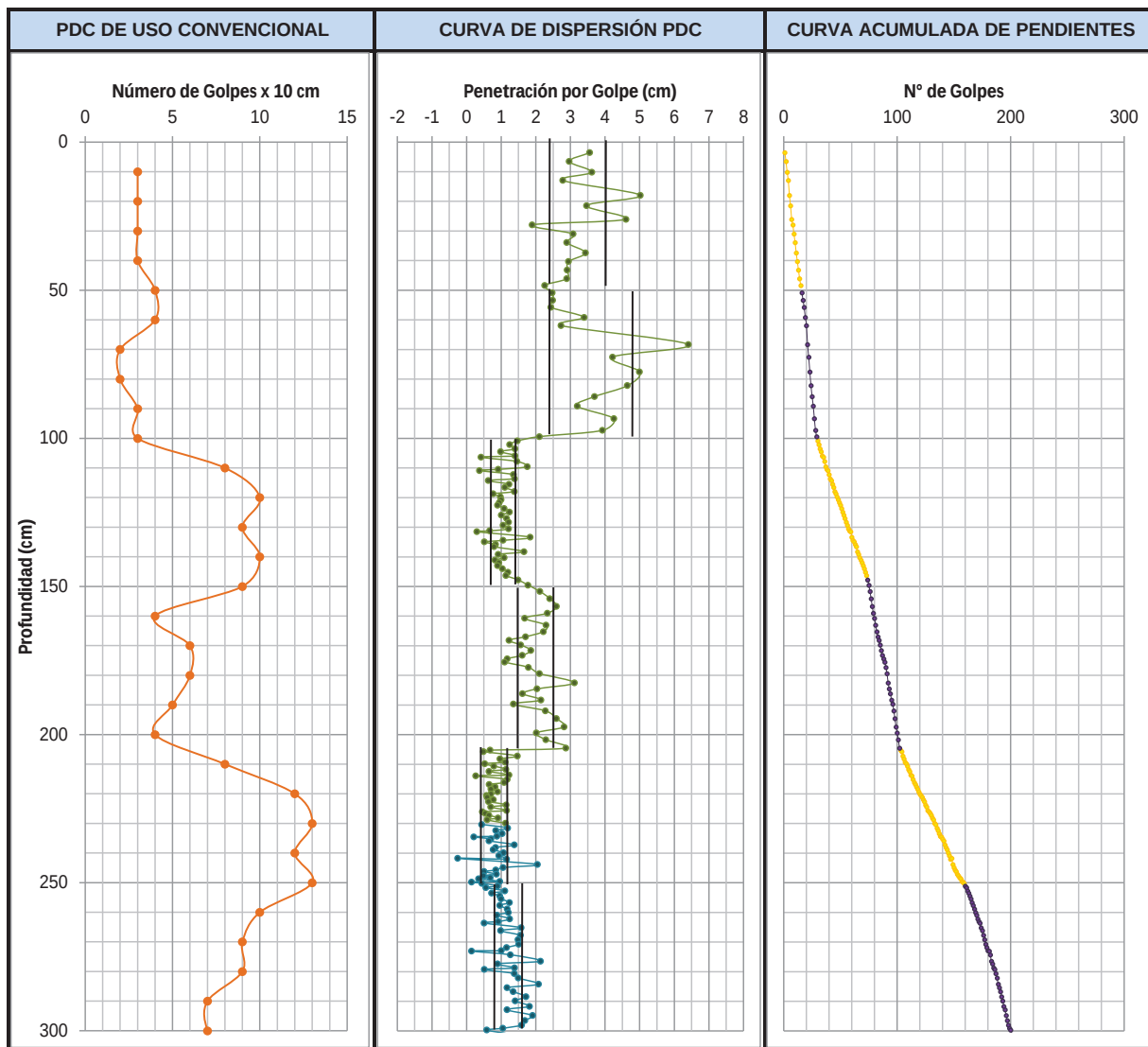
LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



PARÁMETROS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS										RESULTADOS PDC				
MUES TRA	CONSISTENCIA		GRANULOMETRÍA				DENSIDAD	HUMEDAD	Z (cm)	Reb	PENDIENTE mm/golpe	e mm	σ _v mm	
	LL (%)	LP (%)	TM(mm)	%G	%S	%F	γ _s t/m ³	W%						
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	1,72	13,16	5	S	33,1	[22, 44]	11	
									10	S				
									15	S				
									20	S				
							25	S						
							30	S						
							35	S						
							40	S						
1,67	12,56	45	S											
		50	S											
		55	S											
		60	S											
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	1,44	23,52	65	S	31,3	[16, 46]	15	
									70	S				
									75	S				
									80	S				
							1,35	18,98	85	S				
									90	S				
									95	S				
									100	S				
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	1,97	9,39	105	S	10,5	[6, 15]	4	
									110	S				
									115	R				
									120	R				
							2,02	13,08	125	R				
									130	R				
									135	R				
									140	S				
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	1,53	17,41	145	S	17,8	[10, 26]	7	
									150	S				
									155	S				
									160	S				
							1,69	20,01	165	S				
									170	S				
									175	S				
									180	S				
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	2,18	12,45	185	R	8,3	[3, 14]	5	
									190	R				
									195	R				
									200	R				
							2,24	14,99	205	R				
									210	R				
									215	R				
									220	R				
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	2,07	21,35	225	R	9,5	[4, 15]	5	
									230	R				
									235	R				
									240	R				
							2,15	18,69	245	R				
									250	R				
									255	R				
									260	R				
C	***	***	***	***	***	***	***	***	305	R	***	***	***	

PUNTO: **L-14** LIMO - ARCILLA

LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R')
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



PARÁMETROS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS										RESULTADOS PDC				
MUESTRAS	CONSISTENCIA		GRANULOMETRÍA				DENSIDAD	HUMEDAD	Z	Reb	PENDIENTE	e	σ	
TRA	LL (%)	LP (%)	TM(mm)	%G	%S	%F	γs t/m3	W%	(cm)		mm/golpe	mm	mm	
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	1,72	13,16	5	S	32,2	[24, 40]	8,0	
									10	S				
									15	S				
									20	S				
							25	S						
							30	S						
							35	S						
							40	S						
1,67	12,56	45	S											
		50	S											
		55	S											
		60	S											
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	1,44	23,52	65	S	36,4	[24, 48]	12,1	
									70	S				
									75	S				
									80	S				
							1,35	18,98	85	S				
									90	S				
									95	S				
									100	S				
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	1,97	9,39	105	S	10,7	[7, 14]	3,4	
									110	S				
									115	S				
									120	S				
							2,02	13,08	125	S				
									130	S				
									135	S				
									140	S				
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	1,53	17,41	145	S	20,1	[15, 25]	5,2	
									150	S				
									155	S				
									160	S				
							1,69	20,01	165	S				
									170	S				
									175	S				
									180	S				
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	2,18	12,45	185	S	8,0	[4, 12]	3,6	
									215	S				
									220	S				
									225	S				
							2,24	14,99	230	S				
									235	R				
									240	R				
									245	R				
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	2,07	21,35	250	R	12,1	[8, 16]	4,3	
									255	R				
									260	R				
									265	R				
							2,15	18,69	270	R				
									275	R				
									280	R				
									285	R				
C	***	***	***	***	***	***	***	***	290	R	***	***	***	
									295	R				
									300	R				
									305	R				
									310	R				
									315	R				
									320	R				
									325	R				



TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA
CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

FUENTE: Elaboración propia a partir de pruebas

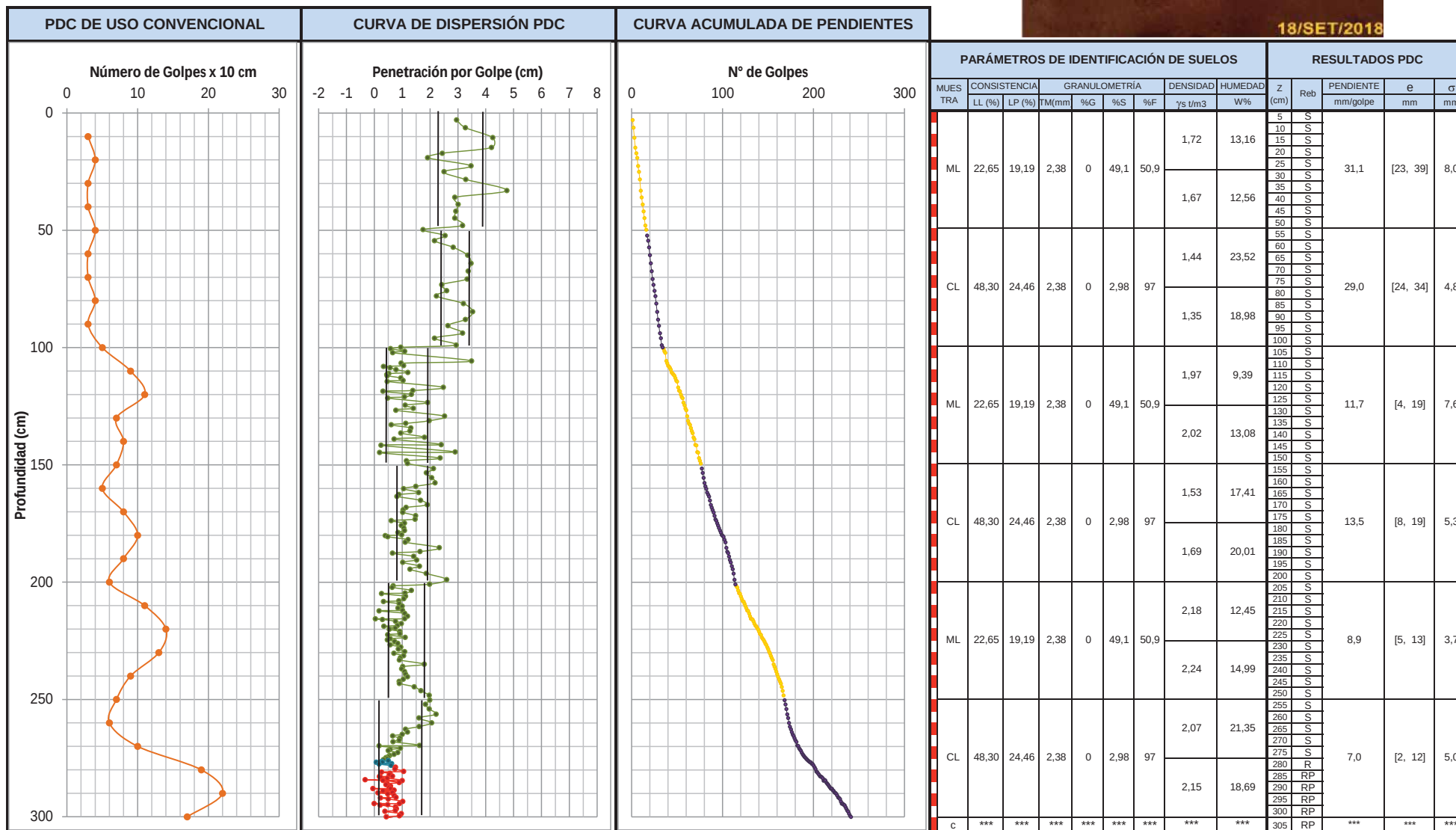
UBICACIÓN: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES UNSAAC -CUSCO

PUNTO: **O-9** LIMO - ARCILLA

LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R')
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTNDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



18/SET/2018





TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

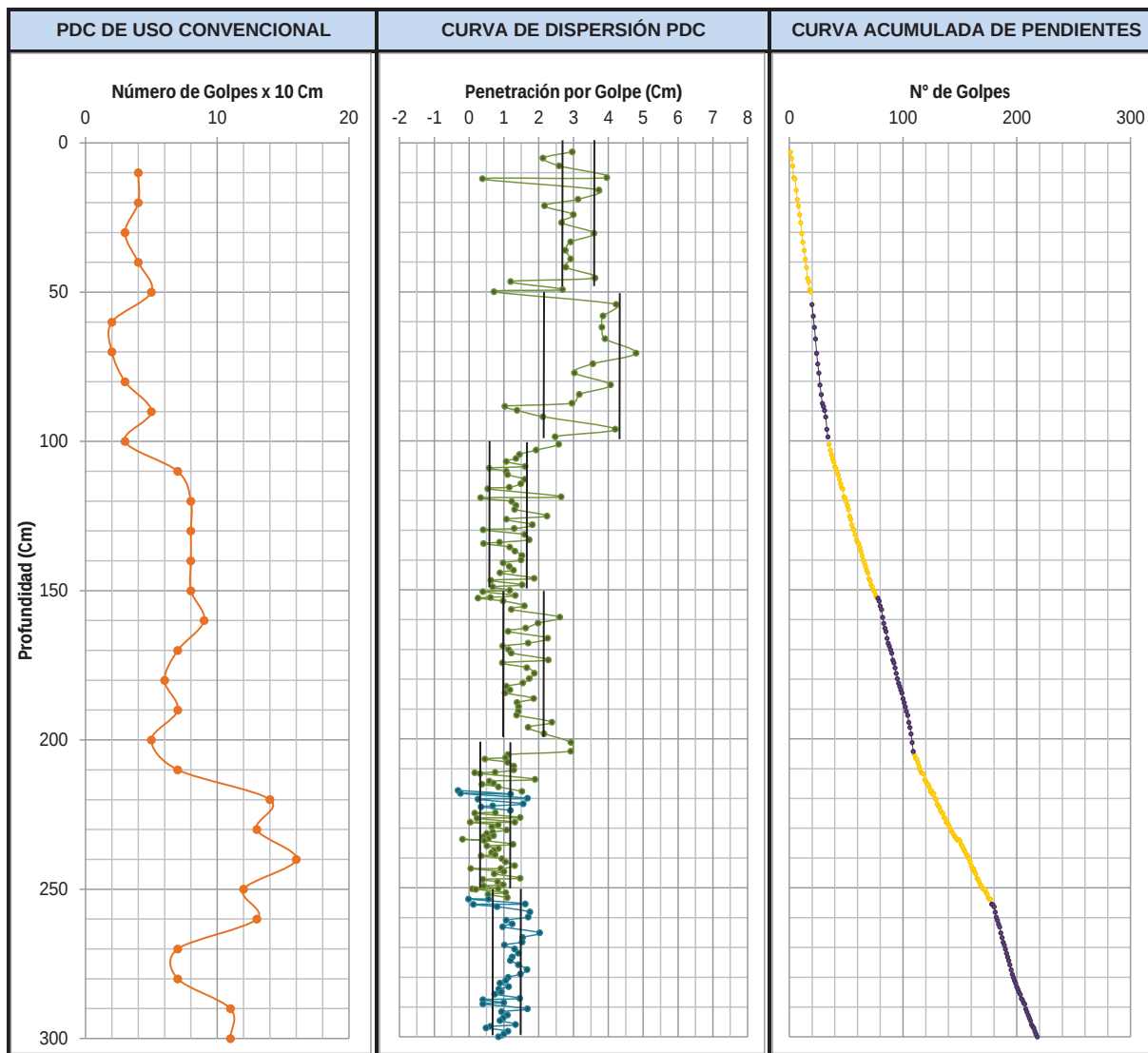
TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

FUENTE: Elaboración propia a partir de pruebas

UBICACIÓN: LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES UNSAAC -CUSCO

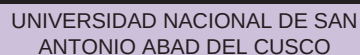
PUNTO: **O-14** LIMO - ARCILLA

LEYENDA	
	CAMBIO DE ESTRATO
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



PARÁMETROS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS									RESULTADOS PDC				
MUES TRA	CONSISTENCIA		GRANULOMETRÍA			DENSIDAD	HUMEDAD	Z (cm)	Reb	PENDIENTE mm/golpe	e mm	σ mm	
	LL (%)	LP (%)	TM(mm)	%G	%S	%F	γs t/m3	W%					
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	1,72	13,16	5	S	26,3	[17, 36]	9,7
									10	S			
									15	S			
									20	S			
									25	S			
							30	S					
							1,67	12,56	35	S			
									40	S			
									45	S			
									50	S			
55	S												
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	1,44	23,52	60	S	32,4	[22, 43]	10,9
									65	S			
									70	S			
									75	S			
									80	S			
							1,35	18,98	85	S			
									90	S			
									95	S			
									100	S			
									105	S			
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	1,97	9,39	110	S	11,3	[6, 17]	5,4
									115	S			
									120	S			
									125	S			
									130	S			
							2,02	13,08	135	S			
									140	S			
									145	S			
									150	S			
									155	S			
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	1,53	17,41	160	S	16,1	[10, 22]	6,0
									165	S			
									170	S			
									175	S			
									180	S			
							1,69	20,01	185	S			
									190	S			
									195	S			
									200	S			
									205	S			
ML	22,65	19,19	2,38	0	49,1	50,9	2,18	12,45	210	S	7,3	[3, 12]	4,8
									215	S			
									220	R			
									225	R			
									230	S			
							2,24	14,99	235	S			
									240	S			
									245	S			
									250	S			
									255	R			
CL	48,30	24,46	2,38	0	2,98	97	2,07	21,35	260	R	11,2	[7, 15]	4,0
									265	R			
									270	R			
									275	R			
									280	R			
							2,15	18,69	285	R			
									290	R			
									295	R			
									300	R			
									305	R			
C	***	***	***	***	***	***	***	***	305	R	***	***	***

ANEXO G.
RESULTADOS DE
PRUEBAS PDC EN
CAMPO



RESULTADOS DE ENSAYOS PDC EN LA PRUEBA DE CAMPO - DELIMITACIÓN DE ESTRATOS

ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS. CUSCO - 2018"

TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

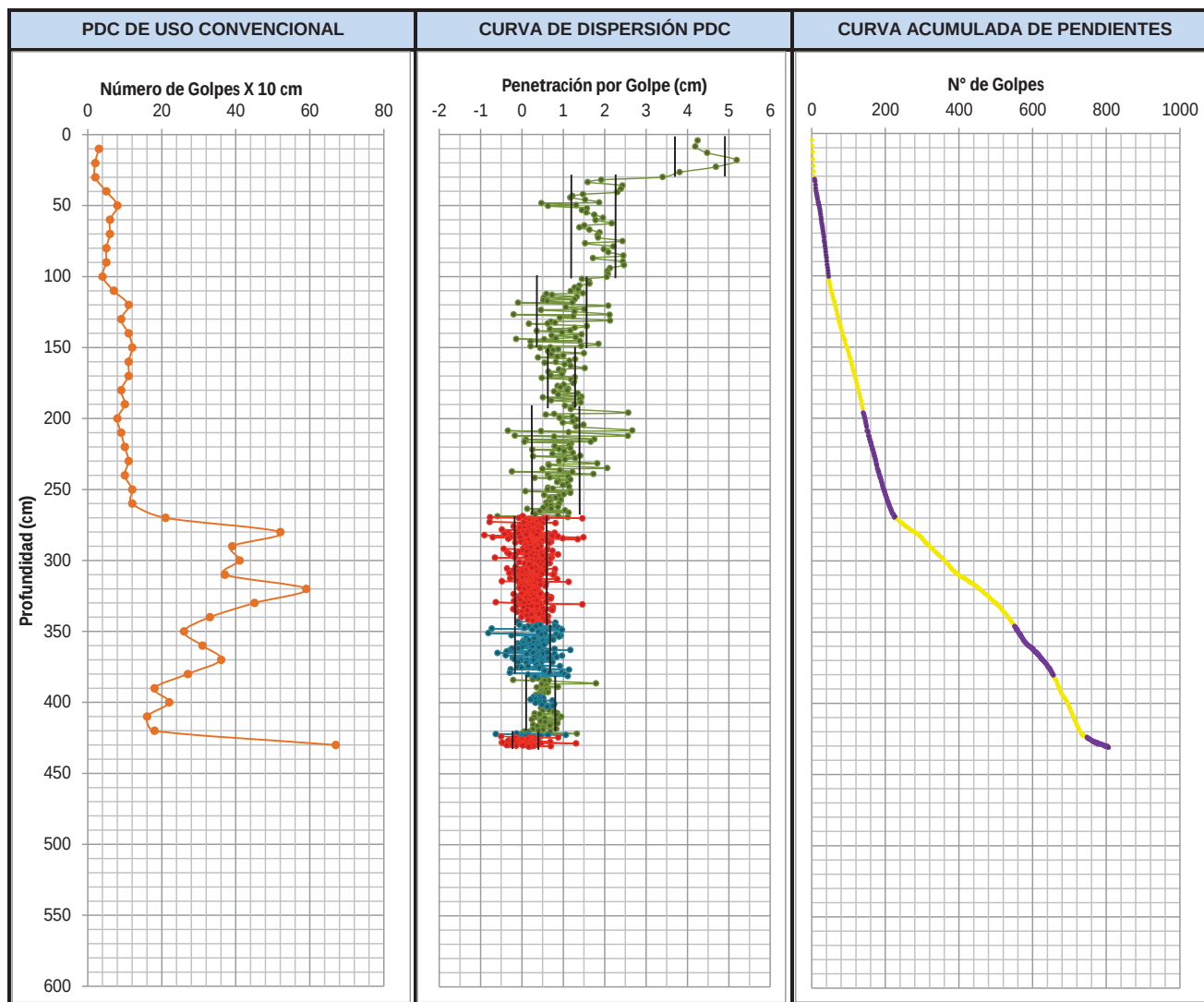
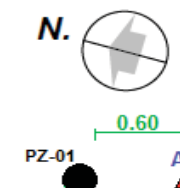
FUENTE: Elaboración propia a partir de ensayos PDC en campo y resultados EMS del proyecto "Edificio Residencial Detecta"

UBICACIÓN: PASAJE MANGLIO CARRASCO N° 202 Y 204 - WANCHAO - CUSCO

POZO: Pz = 01

PUNTO: **A-1**

LEYENDA	
	CAMBIO DE PENDIENTE EN LA CURVA
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



RESULTADOS PDC					RESULTADOS DE PERFORMACIÓN			
Z (cm)	Reb	Pen mm/golpe	e mm	σ mm	Prof. (cm)	Hum W%	DESCRIPCIÓN SUCS	OBSERVACIONES
10	S	42,9	[37, 49]	5,8	35	18,91	CL - ML Arcilla limosa	Arcilla limosa marrón rojiza, Dura compacta.
20	S							
30	S							
40	S							
50	S							
60	S	18,0	[13, 23]	4,7	95	16,78	SM Arena limosa	Arena arcillo limosa marrón rojiza clara presenta concreciones de marga (manchas rojo blanquecino)
70	S							
80	S							
90	S							
100	S							
110	S	10,0	[4, 16]	5,8	135	18,18		
120	S							
130	S							
140	S							
150	S							
160	S		[7, 13]	3,0	185	13,23		
170	S							
180	S							
190	S							
200	S							
210	S	8,6	[3, 14]	5,9			SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina con poco limo marrón rojo claro presenta concreciones carbonatadas (marga) en forma de manchas rosadas.
220	S							
230	S							
240	S							
250	S							
260	S				285			
270	S							
280	RP							
290	RP							
300	RP							
310	RP	2,4	[-1, 6]	3,3	295	18,07	SP Arena mal gradada	Arena fina limpia marrón rojizo clara, con traza de gravilla.
320	RP							
330	RP							
340	RP							
350	R							
360	R	3,3	[-1, 7]	4,0	341			
370	R							
380	R							
390	S							
400	R							
410	R	4,8	[2, 8]	3,2	409	21,33		
420	S							
430	RP							
440								
450								
460		***	***	***	575	23,99	SP - SM Arena mal gradada con limo	Arena fina limosa marrón rojizo clara. Dura compacta.
470								
480								
490								
500								
510		***	***	***	617			
520								
530								
540								
550								
560		***	***	***	575	23,99		
570								
580								
590								
600								



TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA
CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

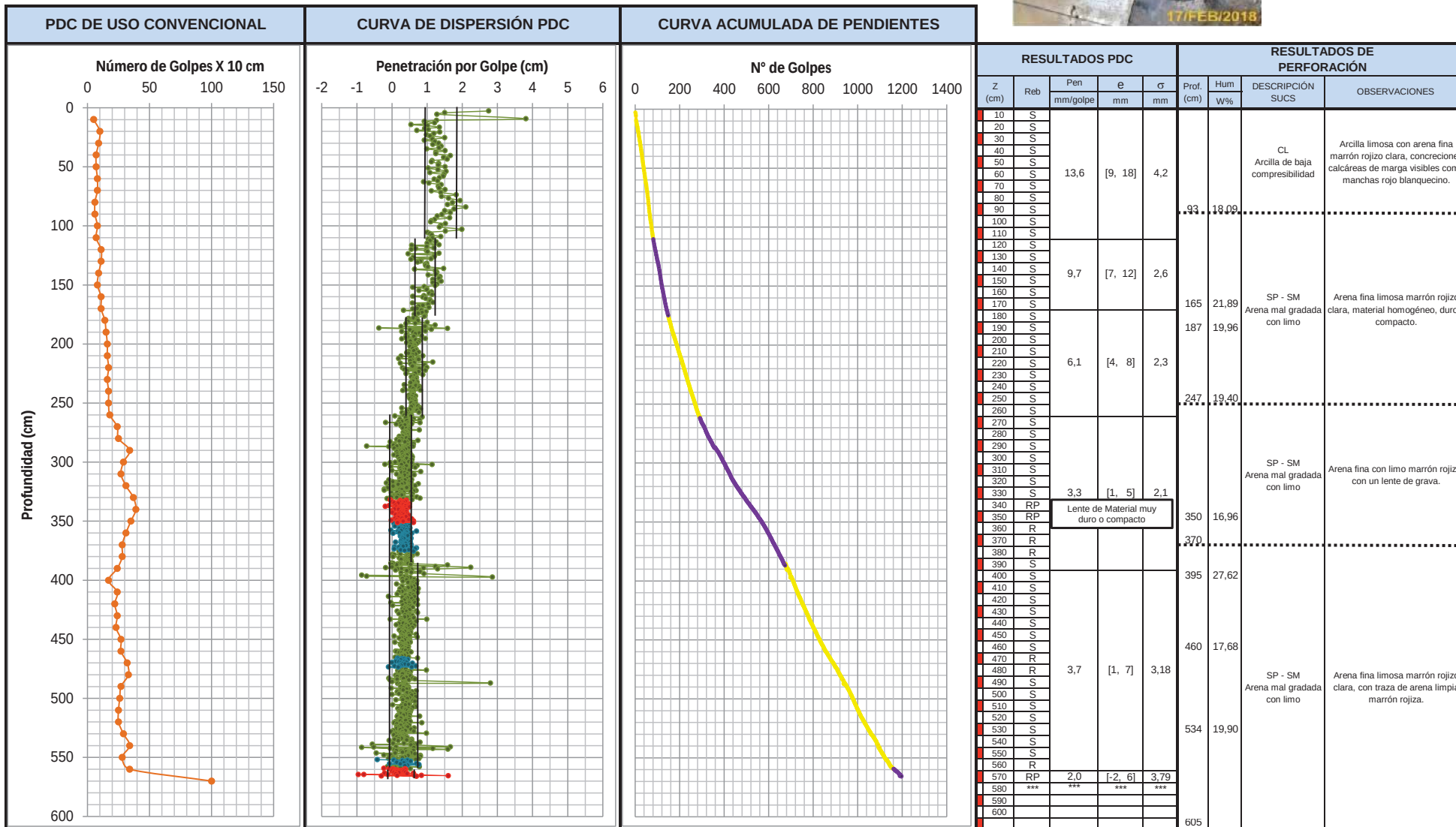
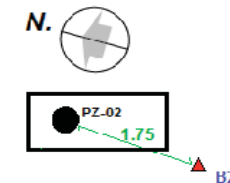
FUENTE: Elaboración propia a partir de ensayos PDC en campo y resultados EMS del
proyecto "Edificio Residencial Detecta"

UBICACIÓN: PASAJE MANGLIO CARRASCO N° 202 Y 204 - WANCHAQ - CUSCO

POZO: **Pz = 02**

PUNTO: **B-1**

LEYENDA	
	CAMBIO DE PENDIENTE EN LA CURVA
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN





TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

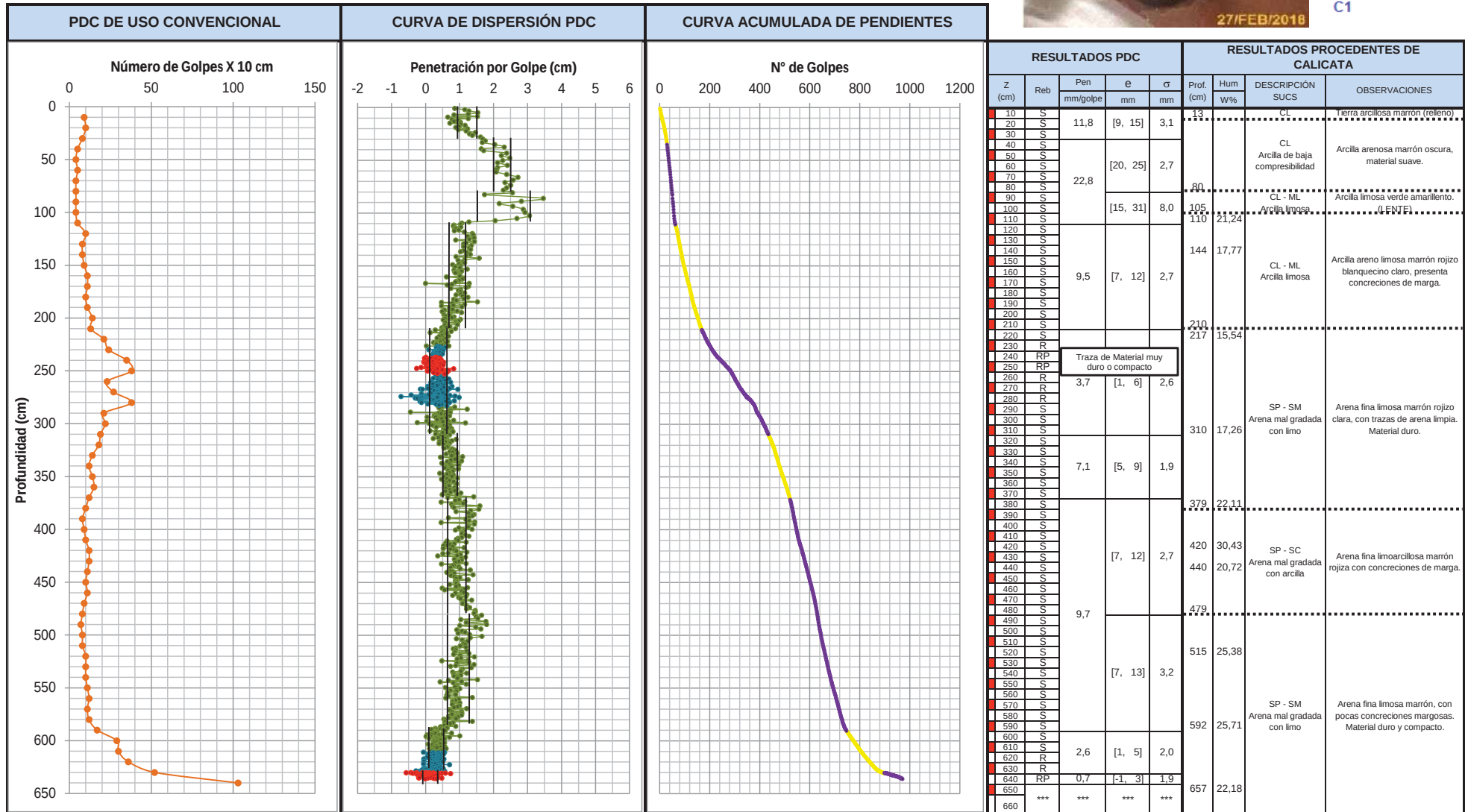
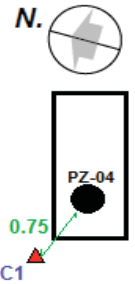
FUENTE: Elaboración propia a partir de ensayos PDC en campo y resultados EMS del proyecto "Edificio Residencial Detecta"

UBICACIÓN: PASAJE MANGLIO CARRASCO N° 202 Y 204 - WANCHAQ - CUSCO

POZO: **Pz = 04**

PUNTO: **C-1**

LEYENDA	
	CAMBIO DE PENDIENTE EN LA CURVA
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTNDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN





TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

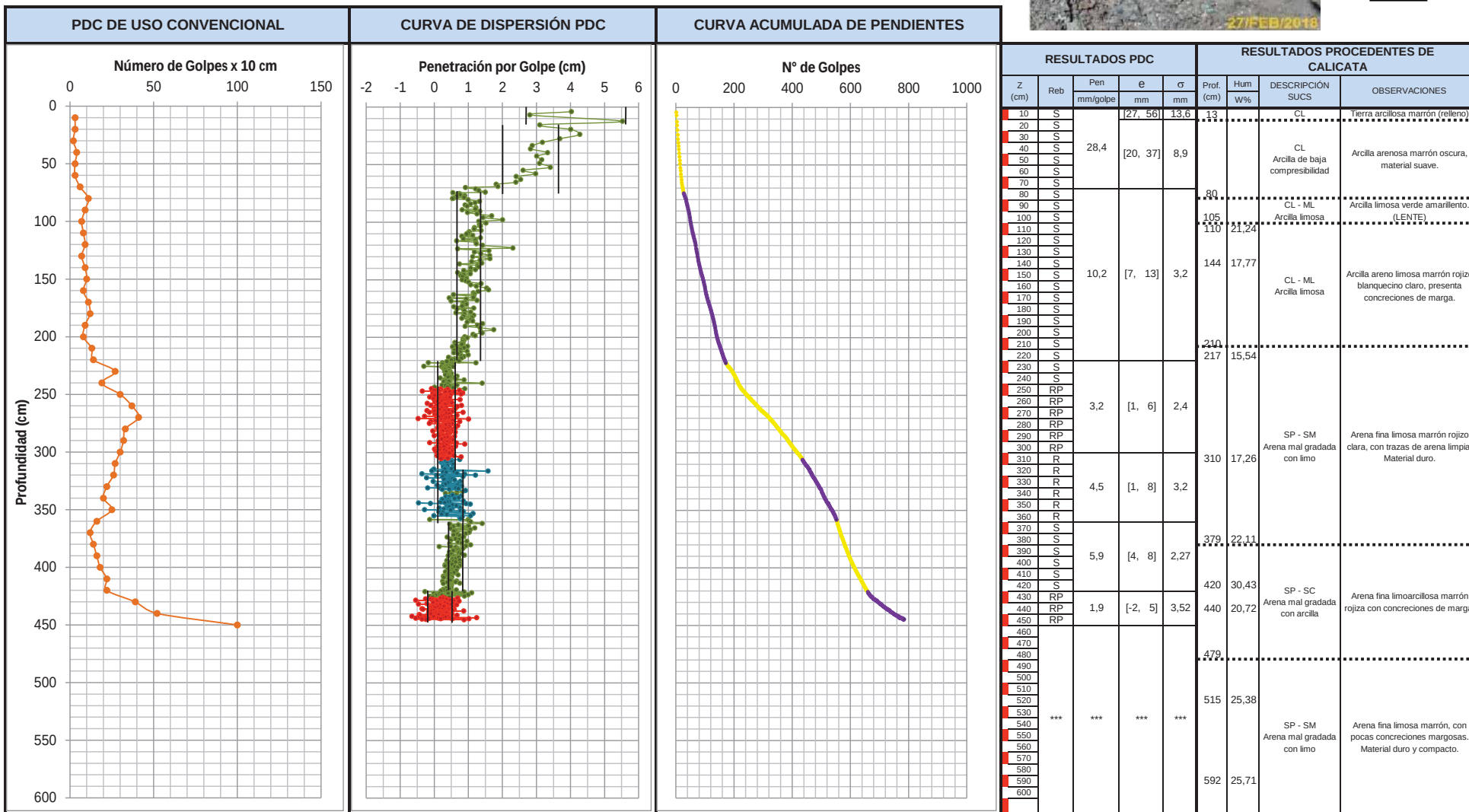
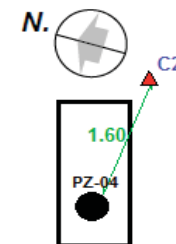
FUENTE: Elaboración propia a partir de ensayos PDC en campo y resultados EMS del proyecto "Edificio Residencial Detecta"

UBICACIÓN: PASAJE MANGLIO CARRASCO N° 202 Y 204 - WACHAQ - CUSCO

POZO: **Pz = 04**

PUNTO: **C-2**

LEYENDA	
	CAMBIO DE PENDIENTE EN LA CURVA
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTNDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN





TESIS: "DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN PENETRÓMETRO DINÁMICO LIGERO DE PUNTA CÓNICA CON Y SIN MEDICIÓN ELECTRÓNICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE SUELOS, CUSCO - 2018"

TESISTAS: BACH. ROXANA HUAMANHORCCO MERINO
BACH. MILSON MORÁN MORENO

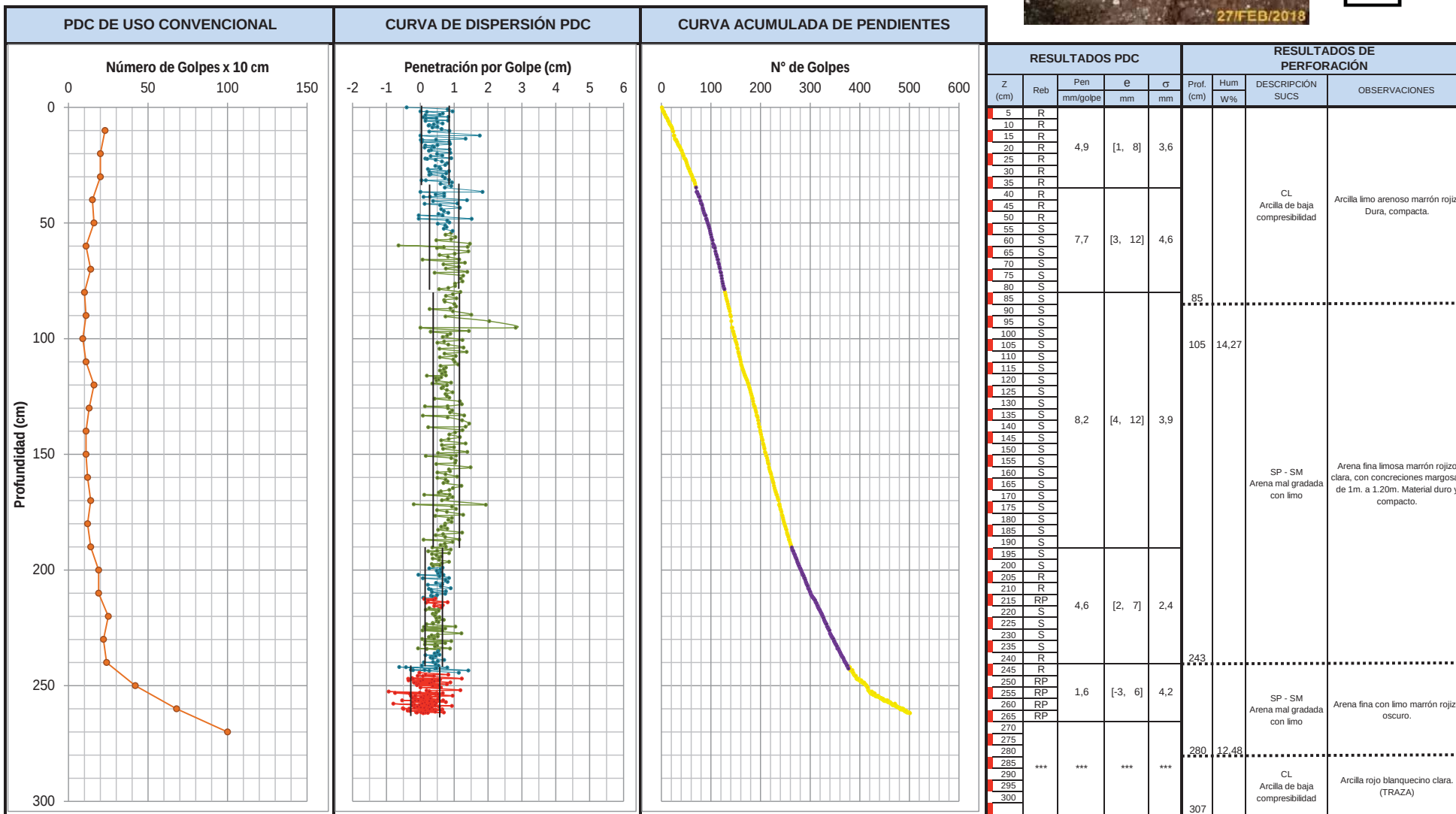
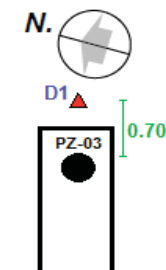
FUENTE: Elaboración propia a partir de ensayos PDC en campo y resultados EMS del proyecto "Edificio Residencial Detecta"

UBICACIÓN: PASAJE MANGLIO CARRASCO N° 202 Y 204 - WANCHAQ - CUSCO

POZO: **Pz = 03**

PUNTO: **D-1**

LEYENDA	
	CAMBIO DE PENDIENTE EN LA CURVA
	GOLPE SECO (S)
	GOLPE CON REBOTE LIGERO (R)
	GOLPE CON REBOTE PRONUNCIADO (RP)
σ	DESVIACIÓN ESTANDAR
e	RANGO DE PENETRACIÓN



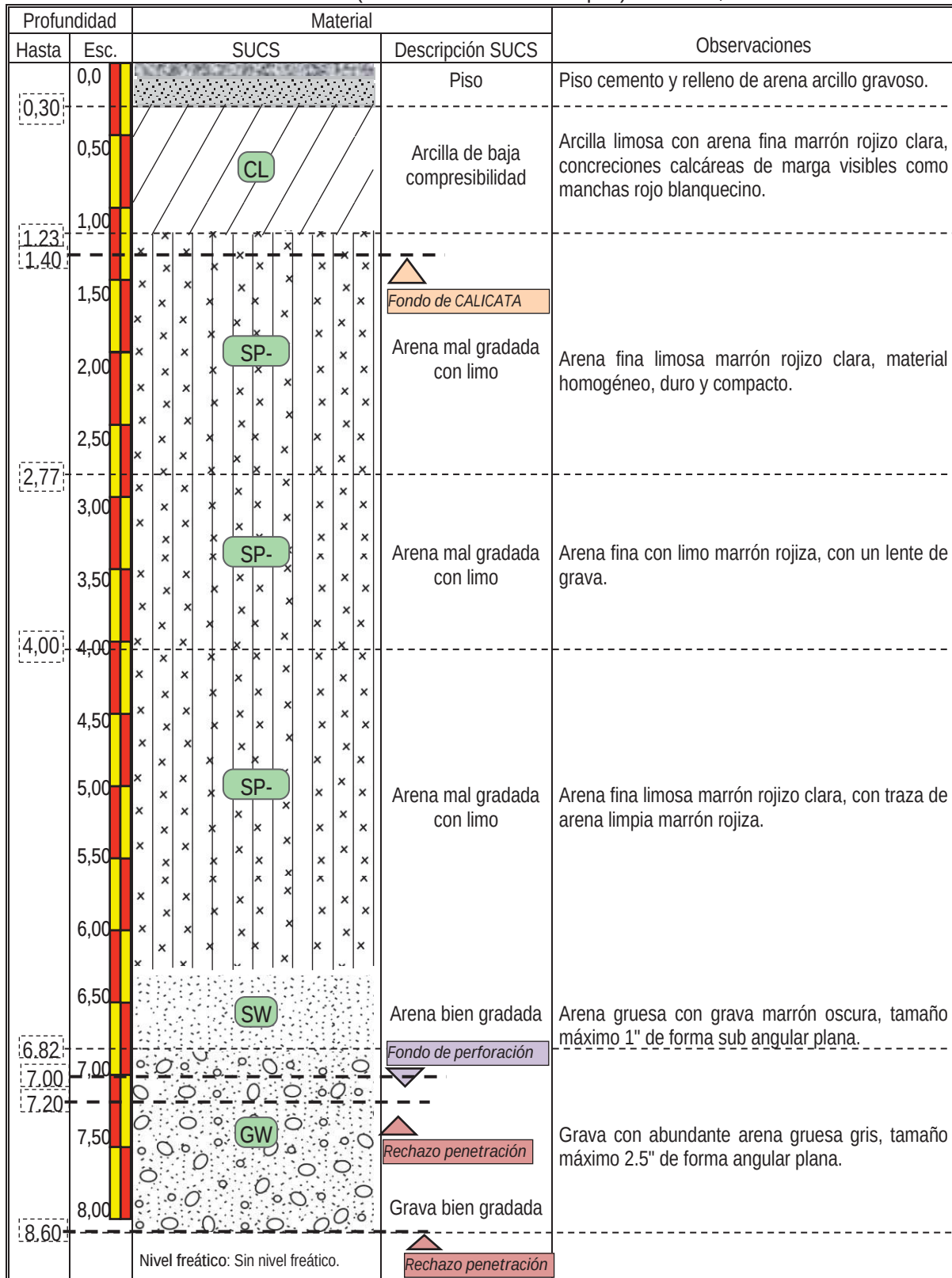
ANEXO H.
RESULTADOS DE EMS-
EDIFICIO RESIDENCIAL
DETECTA

PUNTO: Pz = 01 (Perforación + pdc) NTN= - 0,35m.

Profundidad		Material		Observaciones
Hasta	Esc.	SUCS	Descripción SUCS	
0,0	0,0		---	Entablado sobre listones.
0,15	0,15	CL-	Arcilla limosa	Arcilla limosa marrón rojiza, Dura compacta.
0,50	0,50			
1,00	1,00	SM	Arena arcillosa	Arena arcillo limosa marrón rojizo clara presenta concreciones de marga (manchas rojo blanquecino).
1,50	1,50			
2,00	2,00			
2,50	2,50	SP-	Arena mal gradada con limo	Arena fina con poco limo marrón rojizo claro presenta concreciones carbonatadas (marga) en forma de manchas rosadas.
3,00	3,00			
3,56	3,56	SP	Arena mal gradada	Arena fina limpia marrón rojizo clara, con traza de gravilla.
4,00	4,00			
4,50	4,50			
5,00	5,00	SP-	Arena mal gradada con limo	Arena fina limosa marrón rojizo clara. Dura compacta.
5,50	5,50			
6,00	6,00			
6,32	6,32		Fondo de perforación	
6,45	6,45	GW	Grava bien gradada	Grava arenosa marrón rojizo oscura, tamaño máximo 1.5" de forma sub angular.
7,00	7,00			
7,50	7,50		Rechazo penetración	
8,00	8,00			
Nivel freático: Sin nivel freático.				

Fuente: Extraído del EMS a cargo del MSc. Ing. Carlos Fernández Baca Vidal en los lotes N° 202 y 204 del pasaje Manglio Carrasco, Urb. Chachacomayoc – Wanchaq – Cusco.

PUNTO: Pz = 02 (calicata + Perforación + pdc) NTN= - 0,10m.



Fuente: Extraído del EMS en los lotes N° 202 y 204 del pasaje Manglio Carrasco, Urb. Chachacomayoc – Wanchaq – Cusco

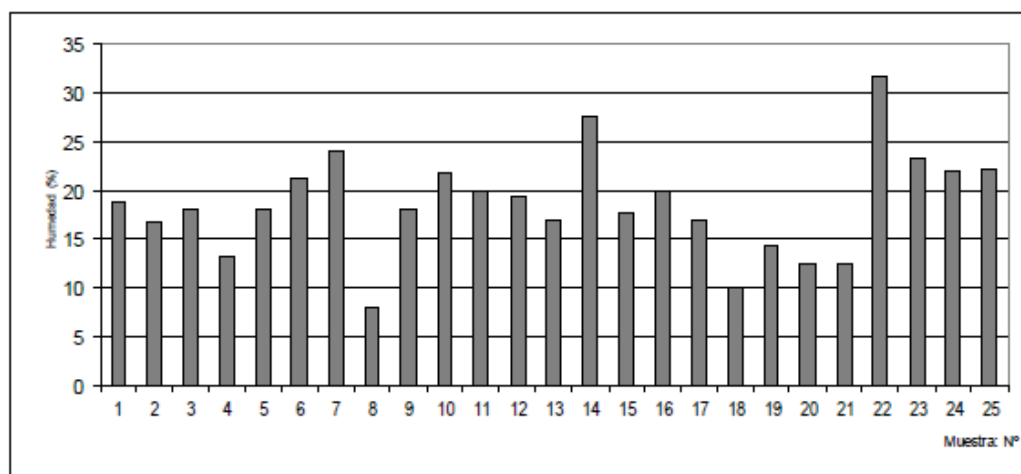
ENSAYO DE HUMEDAD

Proyecto: EDIFICIO RESIDENCIAL DETECTA

Ubicación: CALLE MANGLIO CARRASCO 202 - 204 WANCHAQ

Fecha: FEBRERO DEL 2018

N°	Pz	Prof.	PESOS			w%	DESCRIPCIÓN	ENSAYO
			Lata	L+SH	L.s.Sec			
1	01	0.50	10.50	150.70	128.40	18.91	Arcilla limosa marrón dura compacta.	Hum
2	01	1.10	9.80	162.20	140.30	16.78	Arena arcillo limosa con concreciones marrón rojizo clara.	Hum
3	01	1.50	10.30	144.20	123.60	18.18	Arena arcillo limosa con concreciones marrón rojizo clara.	Hum
4	01	2.00	10.00	166.60	148.30	13.23	Arena arcillo limosa con concreciones marrón rojizo clara.	Hum
5	01	3.10	10.10	148.00	126.90	18.07	Arena fina con poco limo marrón rojiza.	Hum
6	01	4.24	10.30	127.50	106.90	21.33	Arena fina limosa marrón rojiza.	Hum
7	01	5.90	10.10	141.90	116.40	23.99	Arena fina limosa marrón rojizo clara.	Hum
8	01	6.42	9.70	160.20	148.90	8.12	Grava arenosa marrón gris sub angular 1"	Hum
9	02	1.25	9.70	182.00	155.60	18.09	Arcilla marrón rojizo clara con concreciones margosas.	Hum
10	02	1.95	10.30	111.10	93.00	21.89	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	Hum
11	02	2.17	10.10	131.50	111.30	19.96	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	Hum
12	02	2.77	10.30	110.60	94.30	19.40	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	Hum
13	02	3.80	10.20	148.80	128.70	16.96	Arena fina con limo marrón rojiza.	Hum
14	02	4.25	10.20	156.20	124.60	27.62	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	Hum
15	02	4.90	10.30	145.40	125.10	17.68	Arena fina con limo marrón rojiza.	Hum
16	02	5.64	10.10	125.80	106.60	19.90	Arena fina limosa marrón rojizo clara.	Hum
17	02	6.70	10.30	126.80	109.80	17.09	Arena fina con poco limo marrón rojiza.	Hum
18	02	7.00	10.40	160.50	146.80	10.04	Grava arenosa marrón gris sub angular 1.5" planas.	Hum
19	03	1.12	10.30	121.60	107.70	14.27	Arena fina limosa marrón rojizo clara. Dura compacta.	Hum
20	03	2.87	9.90	102.70	92.40	12.48	Arena fina con limo marrón rojiza.	Hum
21	03	3.30	9.90	155.00	138.90	12.48	Grava limosa marrón rojiza sub angular 1"	Hum
22	03	4.30	10.30	174.40	134.90	31.70	Arcilla marrón rojizo clara. Dura compacta.	Hum
23	03	4.95	10.20	134.80	111.30	23.24	Arena fina limosa marrón rojiza. Dura compacta.	Hum
24	03	5.55	10.30	125.80	105.00	21.96	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	Hum
25	03	6.13	10.20	148.70	123.50	22.24	Arena fina limosa marrón rojiza	Hum

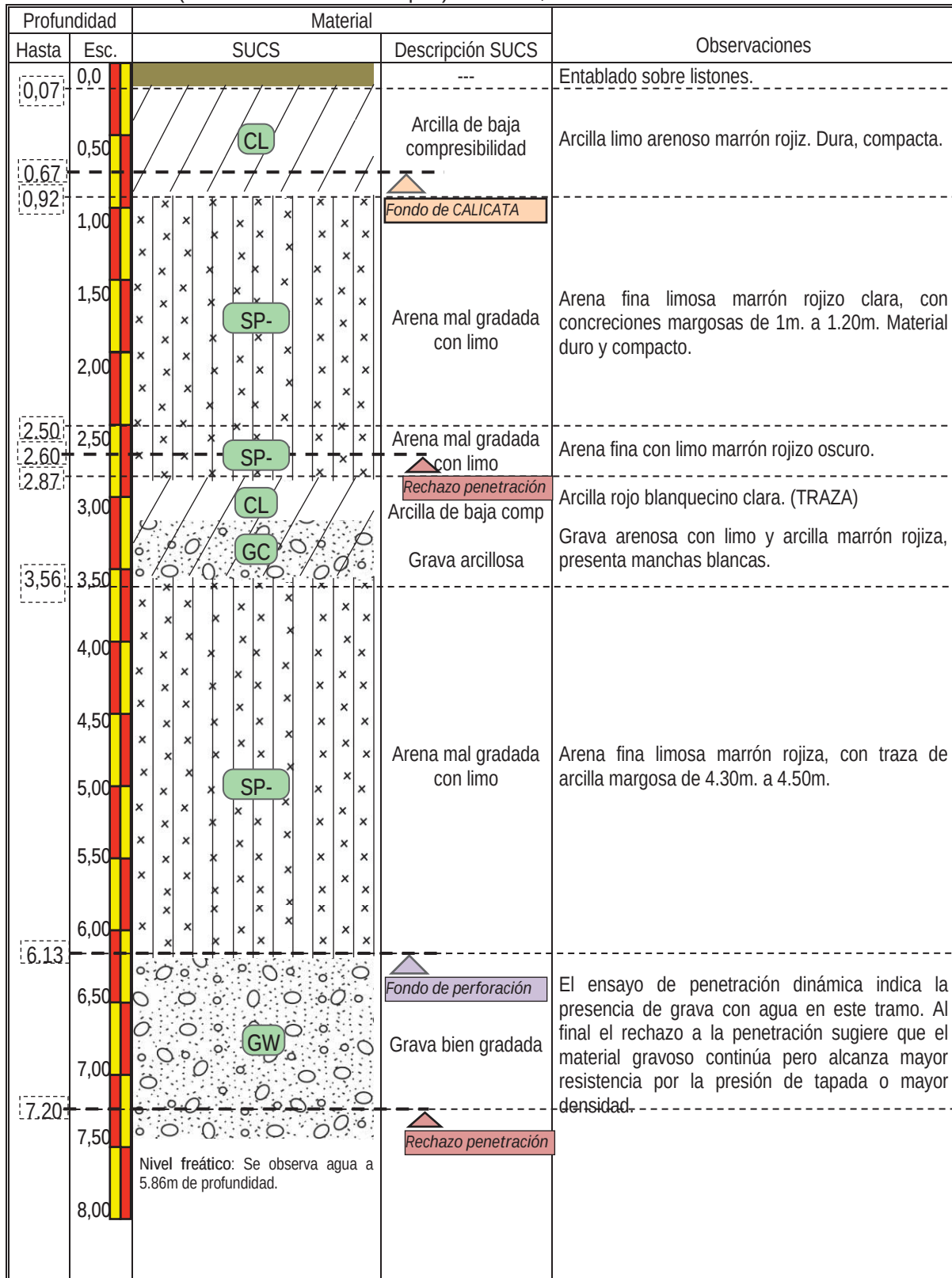


Hum: Muestra sólo para humedad.
DST-G: Corte directo para grava.
Cc-DST: Compresibilidad y corte directo.

Fuente:

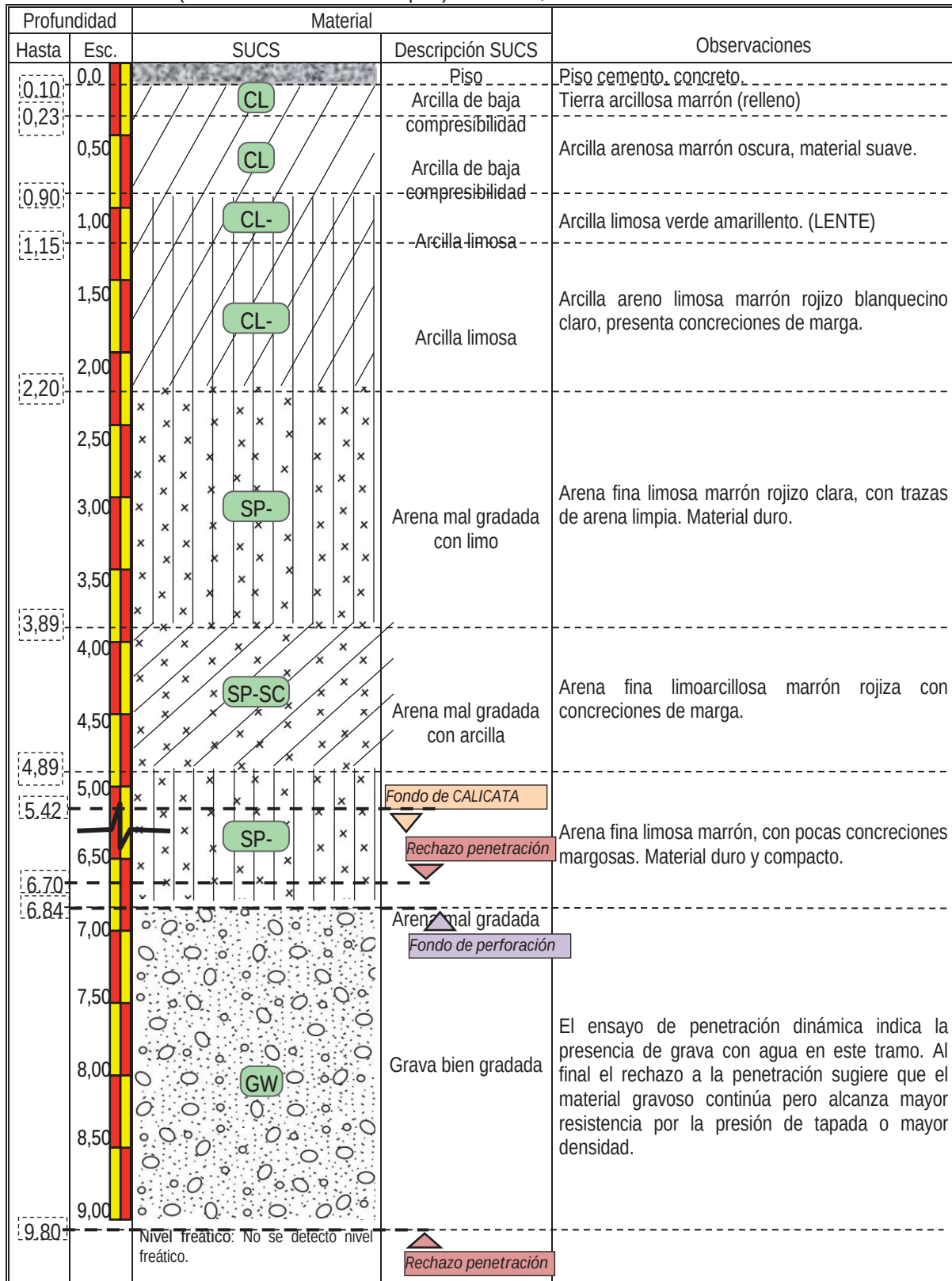
Extraído del EMS en los lotes N° 202 y 204 del pasaje Manglio Carrasco,
Urb. Chachacomayoc – Wanchaq – Cusco

PUNTO: Pz = 03 (calicata + Perforación + pdc) NTN= - 0,55m.



Fuente: Extraído del EMS en los lotes N° 202 y 204 del pasaje Manglio Carrasco, Urb. Chachacomayoc – Wanchaq – Cusco

PUNTO: Pz = 04 (calicata + Perforación + pdc) NTN= - 0,55m.



Fuente: Extraído del EMS en los lotes N° 202 y 204 del pasaje Manglio Carrasco, Urb. Chachacomayoc – Wanchaq – Cusco

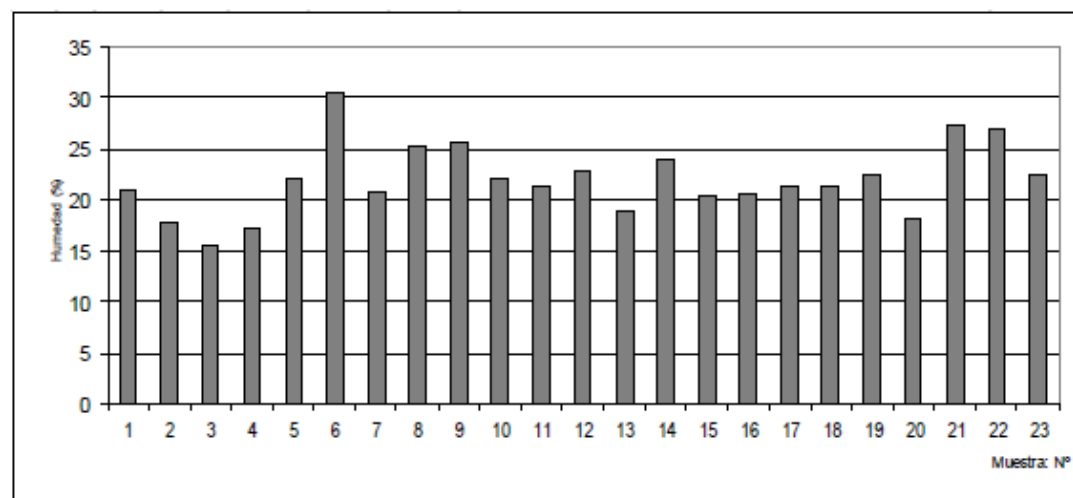
ENSAYO DE HUMEDAD

Proyecto: EDIFICIO RESIDENCIAL DETECTA

Ubicación: CALLE MANGLIO CARRASCO 202 - 204 WANCHAQ

Fecha: FEBRERO DEL 2018

Nº	Pz	Prof.	PESOS			w%	DESCRIPCIÓN	ENSAYO
			Lata	L+SH	L.s.Sec			
1	04	1.20	10.50	162.40	136.00	21.04	Arcilla limosa verduzca con marrón rojiza.	Hum
2	04	1.54	10.20	162.60	139.60	17.77	arena fina limosa marrón rojizo clara. Dura compacta.	Hum
3	04	2.27	10.20	153.70	134.40	15.54	arena fina limosa marrón rojizo clara. Dura compacta.	Hum
4	04	3.20	10.40	159.20	137.30	17.26	arena fina limosa marrón rojizo clara. Dura compacta.	Hum
5	04	3.90	10.30	160.50	133.30	22.11	arena fina limosa marrón rojizo clara.	Hum
6	04	4.30	10.30	130.30	102.30	30.43	arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara. Dura compacta.	Hum
7	04	4.50	9.80	167.70	140.60	20.72	Arena fina limosa marrón rojiza.	Hum
8	04	5.25	9.70	117.90	96.00	25.38	Arena fina limosa marrón rojizo clara.	Hum
9	04	6.02	10.30	137.90	111.80	25.71	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	Hum
10	04	6.67	10.30	103.40	86.50	22.18	arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara. Dura compacta.	Hum
11	04	6.84	9.70	140.20	117.20	21.40	Arena fina limosa marrón rojiza.	Hum
12	02	5.64	0.00	106.20	86.40	22.92	Arena fina limosa marrón rojizo clara.	Hum
13	02	5.64	0.00	110.10	92.60	18.90	Arena fina limosa marrón rojizo clara.	Hum
14	02	5.64	0.00	106.30	85.70	24.04	Arena fina limosa marrón rojizo clara.	Hum
15	03	5.55	0.00	105.90	88.00	20.34	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	Hum
16	03	5.55	0.00	107.40	89.10	20.54	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	DST-G
17	03	5.55	0.00	108.10	89.00	21.46	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	DST-G
18	04	4.40	0.00	104.10	85.70	21.47	Arena fina limosa marrón rojiza, con concreciones margosa.	DST-G
19	04	4.40	0.00	107.30	87.60	22.49	Arena fina limosa marrón rojiza, con concreciones margosa.	DST-G
20	04	4.40	0.00	96.90	82.00	18.17	Arena fina limosa marrón rojiza, con concreciones margosa.	DST-G
21	04	6.67	0.00	102.80	80.70	27.39	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	DST-G
22	04	6.67	0.00	102.40	80.70	26.89	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	DST-G
23	04	6.67	0.00	108.90	88.90	22.50	Arena fina limoarcillosa marrón rojizo clara.	Cc-DST



Hum: Muestra sólo para humedad.
DST-G: Corte directo para grava.
Cc-DST: Compresibilidad y corte directo.

Fuente: Extraído del EMS en los lotes N° 202 y 204 del pasaje Manglio Carrasco, Urb. Chachacomayoc – Wanchaq – Cusco

ANEXO I.
MATRIZ DE
CONSISTENCIA

ANEXO I: MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	FACTORES	SUBFACTORES	INDICADORES	
General:	General:	General:	Independiente (X): Identificación del perfil estratigráfico del suelo	Delimitación de estratos	Cambio de propiedades físico-mecánicas	a) Densidad b) Humedad	
¿Es posible expandir las aplicaciones de un penetrómetro dinámico ligero de punta cónica, implementándolo con un sistema de medición electrónica en el estudio de suelos?	Desarrollar un penetrómetro dinámico ligero de punta cónica de fabricación local implementado con un sistema de medición electrónica. Así, plantear una base de estudio respecto a la correlación de resultados de ensayos PDC con sistema de medición electrónica con la identificación de suelos.	El desarrollo del equipo PDC con sistema de medición electrónica, incrementa las ventajas técnicas de este tipo de ensayos, siendo posible correlacionar los resultados obtenidos a partir de ensayos PDC con la identificación de suelos. Ho: No existe relación alguna entre los parámetros obtenidos por ensayos de penetración dinámica de cono con medición electrónica y los de identificación de suelos.		Tipo de suelo	Granulometría	Proporción de finos y gruesos (%)	
					Límites de consistencia	Límite líquido e índice de plasticidad	
				Dependiente (Y): Resultados de ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con medición electrónica	Longitudes de penetración por cada golpe	variabilidad estadística	parámetros estadísticos
					Profundidad de inspección	límite o rechazo	Tipo de rebote del martillo
Específicos:	Específicos:	Específicos:	Independiente (X): Identificación del perfil estratigráfico del suelo	Delimitación de estratos	Cambio de propiedades físico-mecánicas	a) Densidad b) Humedad	
PE1: ¿Cuáles son los parámetros representativos de las curvas resultantes de un ensayo de penetración dinámica ligera de punta cónica con sistema de medición electrónica?	OE1: Establecer parámetros estadísticos basados en las curvas resultantes obtenidas a partir de ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con sistema de medición electrónica.	HE1: Basados en las curvas resultantes obtenidas a partir de ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con sistema de medición electrónica se puede establecer parámetros estadísticos definidos y generalizados para cualquier cantidad de datos obtenidos de estos ensayos.		Tipo de suelo	Granulometría	Proporción de finos y gruesos (%)	
					Límites de consistencia	Límite líquido e índice de plasticidad	
				Dependiente (indicador) parámetros estadísticos			
PE2: ¿Cómo se relaciona la longitud de penetración por cada golpe con el cambio de estratos continuos, a partir de los ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con medición electrónica?	OE2: Relacionar la longitud de penetración por cada golpe con la diferenciación de estratos para la obtención de perfiles estratigráficos a partir de los ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con medición electrónica.	HE2: Los resultados obtenidos a partir de ensayos PDC con medición automatizada, está relacionada con la diferenciación y caracterización de estratos, siendo factible la obtención de estratigrafías en cuanto a espesor u otras características.		Independiente (X1): Delimitación de estratos	Cambio de propiedades físico-mecánicas	a) Densidad b) Humedad	
			Dependiente (Y1): Longitudes de penetración por cada golpe	variabilidad estadística	parámetros estadísticos		
PE3: ¿Cómo se relacionan los resultados de penetración dinámica ligera de punta cónica con sistema de medición electrónica con la tipología del suelo?	OE3: Asociar los resultados PDC con sistema de medición electrónica con la tipología del suelo.	HE3: Es posible correlacionar los resultados obtenidos a partir de ensayos PDC con sistema de medición electrónica con el tipo de suelo.		Independiente (X2):Tipo de suelo	Granulometría	Proporción de finos y gruesos (%)	
					Límites de consistencia	Límite líquido e índice de plasticidad	
			Dependiente (Y): Resultados de ensayos de penetración dinámica ligera de punta cónica con medición electrónica	Longitudes de penetración por cada golpe	variabilidad estadística	parámetros estadísticos	
				Profundidad de inspección	límite o rechazo	Tipo de rebote del martillo	

ANEXO J.
PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXO J

PANEL FOTOGRÁFICO

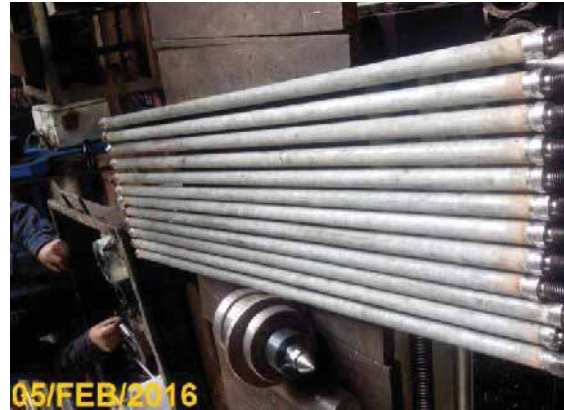


Imagen H.1: Fabricación local punta PDC, tubos PDC, martillo y yunque.
Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.2: Obtención y reconocimiento de elementos electrónicos.
Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.3: Comprobación de lecturas y calibración con el multímetro al sensor de sonido.
Fuente: Fotografías propias.

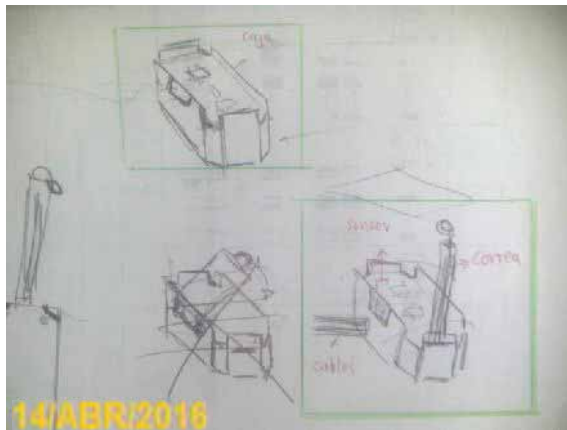
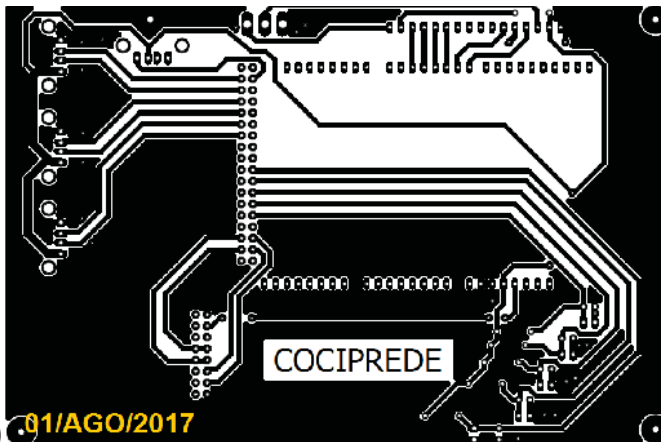


Imagen H.4: Diseño y construcción de caja protectora y gancho metálico que sostienen al sensor de ultrasonido del prototipo PDC-02.

Fuente: Fotografías propias.



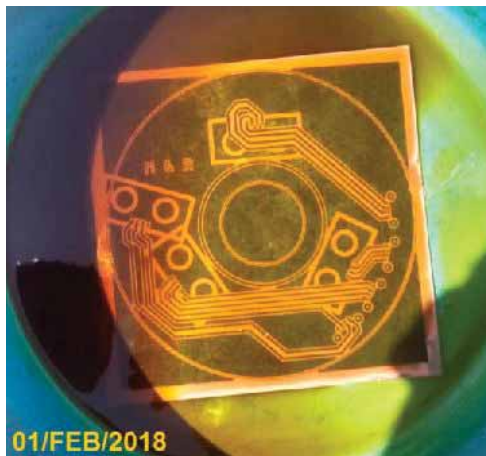
a) 01/AGO/2017



b) 01/AGO/2017

Imagen H.5: Diseño de circuitos impresos para la construcción del prototipo final de: a) Caja de procesamiento. b) Disco de medición.

Fuente: Elaboración propia.



01/FEB/2018



01/FEB/2018

Imagen H.6: Oxidación, limpieza y pulido final de la lámina de cobre con el circuito impreso del disco de medición.

Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.7: Extracción y traslado de muestras de arena y limo a partir de estratos naturales en San Jerónimo, Cusco.

Fuente: Fotografías propias.

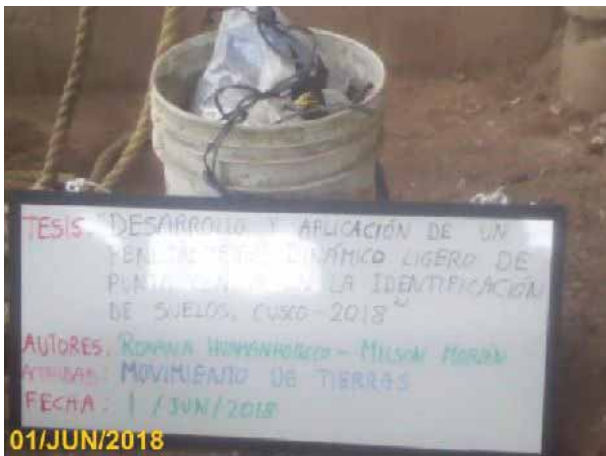


Imagen H.8: Inicio y término del movimiento de tierras en el pozo IC-UNSAAC.

Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.9: Análisis granulométrico por tamizado vía húmeda de muestras de suelo.

Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.10: Ensayo de límites de consistencia para la obtención de: **a)** Límite líquido
b) Límite plástico.

Fuente: Fotografías propias.

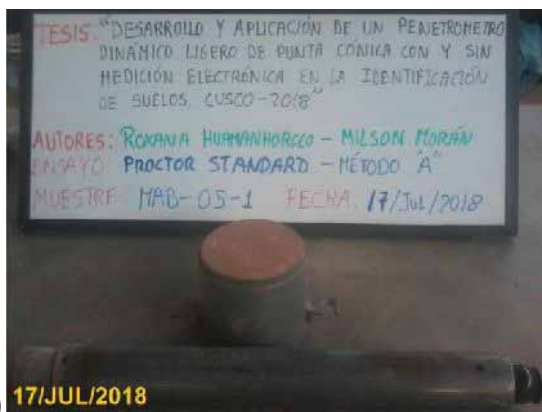


Imagen H.11: Ensayo de Proctor Standard: **a)** Método "A" según granulometría.
b) Método "C" para gravas.

Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.12: Ensayo de densidad a gran escala para gravas.
Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.13: Muestreo inalterado con anillo de borde cortante.
Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.14: Conformación de estratos para el modelo experimental (pozo estratificado).
Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.14: Pozo estratificado del modelo experimental antes y después de ensayos PDC.
Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.15: Ensayos PDC con medición electrónica en el pozo estratificado.
Fuente: Fotografías propias.



Imagen H.16: Perforación con tubos de muestreo continuo (Shellby) en estratos naturales.
Fuente: Fotografías propias.



*Imagen H.17: Ensayos PDC con medición electrónica en estratos naturales.
Fuente: Fotografías propias.*



*Imagen H.18: Extracción de tubos PDC.
Fuente: Fotografía propias.*

ANEXO K.
FLUJOGRAMA DE
ACTIVIDADES

ANEXO K. FLUJOGRAMA DE ACTIVIDADES DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

