

Ciudad Obregón, Sonora, a 06 de Enero de 2012

Instituto Tecnológico de Sonora
P r e s e n t e.

El que suscribe Daniel Mauricio Rey Romero, por medio del presente manifiesto bajo protesta de decir verdad, que soy autor y titular de los derechos de propiedad intelectual tanto morales como patrimoniales, sobre la obra titulada: “Usos y aplicaciones del penetrómetro de cono CN-973”, en lo sucesivo “LA OBRA”, misma que constituye el trabajo de tesis que desarrolle para obtener el grado de Ingeniero Civil en ésta casa de estudios, y en tal carácter autorizo al Instituto Tecnológico de Sonora, en adelante “EL INSTITUTO”, para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios del objeto del Instituto, es decir, sin fines de lucro, por lo que la presente autorización la extiendo de forma gratuita.

Para efectos de lo anterior, EL INSTITUTO deberá reconocer en todo momento mi autoría y otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente de LA OBRA.

De igual forma, libero de toda responsabilidad a EL INSTITUTO por cualquier demanda o reclamación que se llegase a formular por cualquier persona, física o moral, que se considere con derechos sobre los resultados derivados de la presente autorización, o por cualquier violación a los derechos de autor y propiedad intelectual que cometa el suscrito frente a terceros con motivo de la presente autorización y del contenido mismo de la obra.

Daniel M. Rey Romero
Daniel Mauricio Rey Romero
(Nombre y firma del autor)



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

**“USOS Y APLICACIONES DEL
PENETRÓMETRO DE CONO CN-973”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

DANIEL MAURICIO REY ROMERO

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres por todo lo que me han dado, por sus sabios consejos, ejemplos dignos de superación y entrega, por estar a mi lado en los momentos más difíciles, gracias por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y como estudiante, gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta y siempre estaré agradecido.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que participaron e hicieron posible la elaboración de este proyecto, por que sin su valiosa aportación no hubiera sido posible este trabajo.

Í N D I C E

	Página
RESUMEN	
I INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	5
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Justificación.....	7
1.5 Limitaciones del estudio.....	7
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Historia.....	9
2.2 Penetrómetros.....	11
2.3 Tipos de penetrómetros.....	13
2.3.1 Penetrómetro dinámicos.....	13
2.3.2 Penetrómetro estático.....	18
2.4 Penetrómetro de cono CN-973.....	21
III MÉTODO	
3.1 Antecedentes.....	26
3.2 Operación y descripción del Penetrómetro de cono CN-973.....	27
3.2.1 Información general.....	27
3.2.2 Operación.....	27
3.2.3 Cuidado y ajustes del Penetrómetro.....	29
3.2.4 Recalibración del anillo de prueba.....	29
3.2.5 Especificaciones.....	31
3.3 Muestreo del suelo.....	33
3.4 Clasificación del suelo.....	33
3.5 Aplicación del Penetrómetro de cono CN-973 en algunos suelos típicos de la región.....	33
3.6 Correlación entre el IRC, con el peso específico seco, húmedo y contenido de humedad de un suelo.....	37
IV RESULTADOS	
4.1 Clasificación del suelo.....	43

a) Granulometría: Porcentaje de arenas y finos.....	43
b) Prueba límite líquido.....	44
c) Prueba límite plástico.....	45
d) Clasificación de los suelos por el método SUCS.....	45
4.2 Aplicación del Penetrómetro de cono CN-973 en un suelo típico de la región.....	46
4.3 Correlación entre el IRC, con el peso específico seco, peso específico húmedo y contenido de humedad de un suelo.....	46
 V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1 Conclusiones.....	53
5.2 Recomendaciones.....	55

ANEXOS**LITERATURA CITADA**

RESUMEN

Los penetrómetros son dispositivos que pueden ser introducidos en el suelo o en una muestra de éste y medir la resistencia que ofrece a la penetración, presentándose así como una herramienta que permite detectar entre otras cosas, cambios en la densidad aparente del suelo, debidos a la compactación y obtener con esto una evaluación indirecta del suelo. Debido a que es muy poca la información que se puede encontrar en libros, artículos, revistas, etc. Se recurrió a internet y resultó ser la fuente que contaba con más información para estructurar esta tesis con recopilación de información de diferentes páginas que se relacionaban con el tema en cuestión.

El tipo de penetrómetro que se utilizó en este trabajo, es un penetrómetro estático de cono modelo CN-973 normalizado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de América (EUA). Consiste de un cono de 30 grados, $\frac{1}{2}$ pulg² (3.22 cm²) de base, 18 pulg (45.72 cm) de extensión de vara, un anillo de prueba y un manipulador. Es un instrumento usado para evaluar la calidad de los suelos y actúa de forma en la cual el cono es forzado en el suelo, el anillo de prueba es deformado en proporción a la fuerza aplicada, esta herramienta presenta ventajas importantes (por ejemplo la determinación de la resistencia a la penetración de manera sencilla y rápida, lo que la hace factible de ser utilizada como evaluación de rutina. Además, permite realizar un gran número de observaciones, reduciendo así los problemas de variabilidad, en especial de las propiedades físicas de los suelos) en comparación con otros métodos más complejos y exactos llevados a cabo en laboratorio. De esta forma surge la necesidad de presentar su uso y aplicación para ver los beneficios y/o ventajas que ofrece el penetrómetro estático en comparación con otros métodos existentes.

Entre los objetivos específicos de la tesis, está el de presentar una herramienta que ayuda a determinar las propiedades físicas de los suelos de forma rápida y económica además de presentar la aplicación del penetrómetro en un suelo típico de la región que fue muestreado en la Calle Francisco E. Kino al costado de la colonia San Juan Capistrano. Siguiendo la metodología que presenta el manual de operación del Penetrómetro de cono CN-973 y utilizando como herramienta principal el mismo

además de una serie de instrumentos que apoyaron la realización de pruebas tanto en campo como en laboratorio se obtuvieron los resultados necesarios que determinaron la calidad del suelo estudiado, además se han presentado una serie de 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, para un suelo con características similares al estudiado en este trabajo. Finalmente es necesario destacar que el comportamiento del Penetrómetro estático de cono CN-973 siempre va a depender del estado natural del suelo en cuestión, obteniéndose mejores resultados cuando se trate de un suelo blando.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

Los penetrómetros son una útil herramienta de reconocimiento y análisis de la densidad aparente del suelo debidos a la compactación que ha adquirido gran desarrollo, existiendo una diversidad; tanto de tipos como de teorías o reglas para interpretar sus resultados. Todos esos medios constituyen un arsenal de difícil selección para los técnicos no familiarizados con los reconocimientos geotécnicos.

En relación al año de 1948, sobre un tema de mecánica de suelos, se refiere Kirkland a sus primeros pasos profesionales con la frase: "...mi primera experiencia de la ciencia fue el vistazo a un solar acompañado del ingeniero-jefe, quien clavó su paraguas en el suelo y dijo: 2.5 Kg/cm²..." Este método sensitivo, como clavar una barra o accionar con un pico, eran los medios habituales para estimar la capacidad de carga de los suelos y son los antecedentes del penetrómetro. Los primeros ensayos con varillas empalmadas y cargadas estáticamente de forma creciente con columna de pesos, tuvieron lugar en 1917 en Suecia.

En el año 1927 Terzaghi manifestaba: “La idea básica es esta: Primero inventar un ensayo simple, cuyos resultados dependan de la consistencia del material y luego correlacionar ese coeficiente obtenido por el ensayo, con la capacidad de soporte del suelo”. En 1928 realizó Terzaghi la primera penetración estática de un cono, combinada con inyección de agua a través de él con el objeto de eliminar el efecto de profundidad. La figura I.1 muestra un ejemplo de un tipo de penetrómetro de cono.



Figura I.1 Penetrómetro de cono (CPT) de empuje hidráulico y de medición continua de esfuerzos para realización de trabajos in situ.

Los penetrómetros son dispositivos que pueden ser introducidos en el suelo o en una muestra de éste y medir la resistencia que ofrece a la penetración (Campbell y O’Sullivan, 1991). Existe una gran variedad de este tipo de instrumentos, cada uno con características particulares, y adaptados para fines específicos. De esta manera el penetrómetro se constituye en una herramienta que permite detectar entre otras cosas cambios en la densidad aparente del suelo, debidos a la compactación (Montavalli, P. y col., 2003; Vázquez, L. y col., 1991) y obtener así una evaluación indirecta de la degradación física, contribuyendo a definir requerimientos de manejo de los suelos (Sfeir y Piscitelli, 1996).

Los penetrómetros pueden ser empleados tanto a campo como en laboratorio, (Nacci y Pla Sentis, 1992) y en este último caso para el análisis comparativo de estratos superficiales (Nishimura y col. 1993). El estudio y caracterización de estratos

superficiales constituye una temática abordada de forma amplia en los últimos años, aunque en general el análisis de la resistencia a la penetración no ha resultado una herramienta comúnmente empleada. A continuación se muestra en la figura I.2 la herramienta con algunos elementos complementarios.

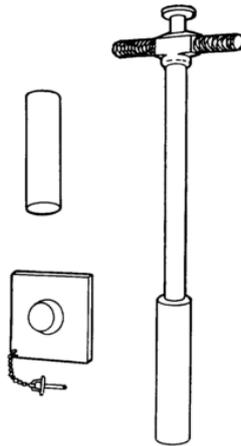


Figura I.2 Penetrómetro de cono CN-973 y herramientas complementarias

Un tipo de penetrómetro estático, del cual hablaremos específicamente dentro de este trabajo es el penetrómetro de cono normalizado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de America (EUA) modelo CN-973, (posteriormente se muestra la imagen del aparato en cuestión) es el principal instrumento usado para evaluar la calidad del suelo. Consiste de un cono de 30 grados, $\frac{1}{2}$ pulg² (3.22 cm²) De base, 18 pulg (45.72 cm) de extensión de vara, una anillo de prueba y un manipulador, como lo ejemplifica la figura I.3.



Figura I.3 Penetrómetro de cono CN-973

Cuando el cono es forzado en el suelo, el anillo de prueba es deformado en proporción a la fuerza aplicada. La cantidad de fuerza requerida para mover el cono lentamente a través de un material dado es indicado en el marcador dentro del anillo. Esta fuerza es considerada a ser un índice de la resistencia cortante (IRC) del suelo en ese plano. El rango del marcador es 150 libras (68.1 kg) de carga y está marcado 0 - 300 libras/pulg² (0 – 21.11 kg/cm²) desde la base del cono es ½ pulg² (3.22 cm²). La figura I.3 ejemplifica lo anteriormente descrito para el uso del penetrómetro de cono CN-973.

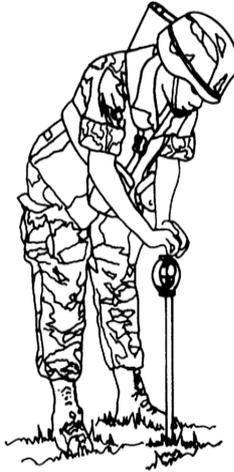


Figura I.3 Penetrómetro de cono CN-973 en su uso por elementos del ejército

Ventajas

Para obtener información sobre la dinámica en el espacio y en el tiempo, de las propiedades físicas, en este sentido, no es importante el tipo de equipo que se utilice para obtener el dato, ya que un equipo poco costoso como el penetrómetro de impacto puede ser utilizado tan efectivamente como uno mucho más costoso con registros automatizados.

Una de las mayores ventajas que presentan los equipos de penetrometría es su versatilidad para ser utilizado en campo directamente, pudiéndose en poco tiempo realizar un gran número de lecturas, por lo que resulta muy adecuado para obtener valores índices de la situación estudiada. La determinación de la resistencia a la

penetración es muy sencilla y rápida, lo que la hace factible de ser utilizada como evaluación de rutina. Además, una determinación tan simple y que se trace directamente en el campo, permite realizar un gran número de observaciones, reduciendo así los problemas de variabilidad especial de las propiedades físicas de los suelos.

Por todo lo anterior, se recomendaría extender e intensificar el uso de equipos y determinaciones de penetrometría como los propuestos, estableciéndose correlaciones con otras características y propiedades del suelo, y respuestas en el desarrollo y actividad radical, para diferentes suelos, climas y sistemas de manejo.

- Disponible en todo el mundo.
- Funcionalidad en varios tipos de suelos.
- Se puede utilizar en rocas blandas (refiriéndose al penetrómetro de cono).

Desventajas

- Sin embargo, dada la complejidad del efecto que evalúa debe ser complementado y calibrado con otras mediciones en suelos.
- Presenta valores aproximados para el análisis.
- Variabilidad e incertidumbre.

1.2 Planteamiento del problema

Los penetrómetros son dispositivos que pueden ser introducidos en el suelo o en una muestra de éste y medir la resistencia que ofrece a la penetración. Existe una gran variedad de este tipo de instrumentos, cada uno con características particulares, y adaptados para fines específicos. De esta manera el penetrómetro se constituye en una herramienta que permite detectar entre otras cosas cambios en la densidad aparente del suelo, debidos a la compactación y obtener así una evaluación indirecta de la degradación física, contribuyendo a definir requerimientos de manejo de los suelos. El penetrómetro estático de cono CN-973 es un instrumento usado para evaluar la calidad de los suelos y actúa de forma en la cual el cono es forzado en el

suelo, el anillo de prueba es deformado en proporción a la fuerza aplicada. La cantidad de fuerza requerida para mover el cono lentamente a través de un material dado es indicado en el marcador dentro del anillo. Esta fuerza es considerada a ser un índice de la resistencia cortante (IRC) del suelo en ese plano. Esta herramienta presenta ventajas importantes en su uso en comparación con otros métodos más complejos y exactos llevados a cabo en laboratorio, así como también, desventajas dentro de las cuales podemos destacar la variabilidad, incertidumbre y confiabilidad total de los resultados obtenidos. Surge así, la necesidad de presentar su uso y aplicación para ver los beneficios y/o ventajas que ofrece el penetrómetro estático en comparación con otros métodos existentes.

Con relación a lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Mediante el penetrómetro estático de cono modelo CN-973 será posible determinar propiedades físicas a un suelo de forma rápida, económica y con precisión aceptable, mediante la obtención de gráficas de correlación entre estas propiedades?

1.3 Objetivos

Objetivo general.

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.

Objetivos específicos.

- 1) Mostrar el uso del penetrómetro CN-973 o de cono como una herramienta que ayuda a determinar propiedades físicas de los suelos de forma rápida y económica.
- 2) Presentar la aplicación del penetrómetro en un suelo típico de la región.
- 3) Obtener una gráfica del Índice de Resistencia Cortante (IRC) contra la profundidad en la masa de un suelo.

4) Presentar correlaciones entre el IRC, con el peso específico seco, peso específico húmedo y contenido de humedad de un suelo.

1.4 Justificación

Uno de los principales beneficios que muestra este trabajo es mostrar el uso y aplicación, además de las ventajas y desventajas más importantes del penetrómetro estático de cono CN-973, ya que hasta el momento es poco lo que se conoce sobre esta herramienta, de tal manera que esto beneficiará a las partes interesadas (alumnos, maestros y personal), brindándoles una visión más amplia y general acerca de uno los métodos menos utilizados, pero que nos ayuda a determinar la calidad de los suelos de una manera más sencilla y rápida, además de detectar entre otras cosas cambios en la densidad aparente del suelo, debidos a la compactación y obtener así una evaluación indirecta de la degradación física, contribuyendo a definir requerimientos de manejo de los suelos.

De esta forma podemos proporcionar información importante sobre un método que ofrece ventajas reales como la optimización de tiempo, dinero y esfuerzo, para la toma de decisiones en un entorno en el cual es necesaria una herramienta que presente dichas ventajas.

1.5 Limitaciones del estudio.

Las limitaciones que se presentaron, surgieron al momento de realizar la investigación y buscar información acerca de esta herramienta ya que como es un método poco usual, la información se encuentra en escasos artículos y revistas en internet; también al momento de realizar las pruebas de campo en un suelo típico de la región, se presentaron algunos problemas al descubrir que el aparato funciona de mejor manera cuando se utiliza en un suelo blando y no en cualquier tipo de suelo como se intentó de inicio en el terreno y plataformas de cimentación de edificios del instituto tecnológico de sonora campus nainari que presentaba suelos más firmes, de tal forma que se optó por buscar un lugar en específico que contara con las características necesarias para realizar las pruebas de campo, dicho lugar se

encuentra ubicado en la Calle Francisco E. Kino al costado de la colonia San Juan Capistrano, de este lugar se obtuvieron muestras para llevar a cabo las pruebas de laboratorio, con el equipo y los materiales con los que cuenta el laboratorio del Instituto Tecnológico de Sonora.

CAPÍTULO II. MARCO TEORICO

2.1 Historia

En discusión el año 1948, sobre un tema de mecánica de suelos, se refiere Kirkland a sus primeros pasos profesionales con la frase: "...mi primera experiencia de la ciencia fue la vista a un solar acompañado del ingeniero-jefe, quien clavó su paraguas en el suelo y dijo: 2.5 Kg/cm²..." Este método sensitivo, como clavar una barra o accionar con un pico, eran los medios habituales para estimar la capacidad de carga de los suelos y son los antecedentes del penetrómetro. Los primeros ensayos con varillas empalmadas y cargadas estáticamente de forma creciente con columna de pesos, tuvieron lugar en 1917 en Suecia.

En el año 1927 Terzaghi manifestaba: "La idea básica es esta: Primero inventar un ensayo simple, cuyos resultados dependan de la consistencia del materia y luego correlacionar ese coeficiente obtenido por el ensayo, con la capacidad de soporte del suelo." En 1928 realizo Terzaghi la primera penetración estática de un cono,

combinada con inyección de agua a través de él con el objeto de eliminar el efecto de profundidad.

El ensayo S.P.T. (Standard Penetration Test) ideado en 1927 por H. A. Mohr, de la compañía Gow, fue adoptado por Terzaghi y Peck, después de gran número de ensayos realizados en los Estados Unidos y normalizado su empleo e interpretación. Es un penetrómetro dinámico con hincas de un tubo a través de un varillaje y por medio de una energía de golpeo fija. Su utilización se ha extendido con los años, siendo hoy un útil de reconocimientos prácticamente universal, a lo que contribuyó la correlación entre N (número de golpes para penetración de 12") y carga admisible, dada por Terzaghi-Peck en 1948 en su conocido libro llamado "Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica".

En 1930 estudiaba Buisman el principio de la penetración estática de un cono en capas de arena, que fue instrumentado por Barentsen (1936) al idear el acoplamiento del conjunto tubería-varilla-cono. Posteriormente, en 1946, el laboratorio de Delf, en Holanda, desarrolló este penetrómetro con diferentes modelos que han sido comercializados. Las características del suelo en Holanda y Bélgica, favoreció su empleo sistemático en dichos países, extendiéndose su utilización en Europa a partir de 1948.

La penetración dinámica de un cono ha sido normalizada en Alemania (DIN 4094) y correlacionado este ensayo con el S.P.T., por Menzebach en 1959. En suiza, Stump ha desarrollado también un penetrómetro dinámico de cono. Otro aparato semejante, aunque con punta cuadrada denominado "Borro", se utiliza restringidamente en nuestro país (España) y limitado al ámbito de un servicio del Ministerio de Obras Públicas.

El autor (Francisco Zapata) a partir de 1953 ha desarrollado el penetrómetro dinámico, diversificado en varios tipos, según los fines de reconocimiento. El más usual es el tipo normal, caracterizado por un cono de \varnothing 55 mm de borde redondeado

para facilitar la extracción, energía hincas 50 kgm, utilizándose con o sin entubamiento según los suelos y como justificaremos posteriormente, las dimensiones adoptadas facilitan la correlación con el ensayo S.P.T. Para reconocimientos previos de limitada profundidad utilizamos el tipo ligero, cono de \varnothing 40 mm y energía de hincas 12.5 Kgm, que por su reducido peso puede accionarse manualmente y transportarse en la maleta de un coche.

2.2 Penetrómetros

Los penetrómetros son dispositivos que pueden ser introducidos en el suelo o en una muestra de éste y medir la resistencia que ofrece a la penetración (Campbell y O'Sullivan, 1991). Existe una gran variedad de este tipo de instrumentos, cada uno con características particulares, y adaptados para fines específicos. De esta manera el penetrómetro se constituye en una herramienta que permite detectar entre otras cosas cambios en la densidad aparente del suelo, debidos a la compactación (Montavalli, P. y col., 2003; Vázquez, L. y col., 1991) y obtener así una evaluación indirecta de la degradación física, contribuyendo a definir requerimientos de manejo de los suelos (Sfeir y Piscitelli, 1996).

Los penetrómetros pueden ser empleados tanto a campo como en laboratorio, (Nacci y Pla Sentis, 1992) y en este último caso para el análisis comparativo de costras superficiales (Nishimura y col. 1993). El estudio y caracterización de costras superficiales constituye una temática abordada de forma amplia en los últimos años, aunque en general el análisis de la resistencia a la penetración no ha resultado una herramienta comúnmente empleada.

Los ensayos in situ (Ver figura II.1) se están convirtiendo en una herramienta muy importante para la evaluación de asientos en obras con estructuras de gran magnitud, sobre todo si están situados sobre terrenos donde la extracción de muestras representativas para hacer ensayos de laboratorio es difícil. Los motivos de esta dificultad y a veces imposibilidad de tomar muestras son la fragilidad del suelo y la modesta fracción de este que puede ensayarse en laboratorio.



Figura II.1 Evaluación del terreno mediante ensayo In Situ.

Es por este motivo que los ensayos in situ están tomando mucha fuerza en este campo y se usan cada vez más para hacer previsiones de asentos. Existen varios tipos de ensayos que permiten hacer este tipo de estimaciones. Los penetrómetros deben ser diseñados de forma tal que puedan registrar de manera precisa, cambios en la resistencia a la penetración y diversos tipos de espesores. La compactación resulta de la compresión mecánica de partículas de suelo y agregados (muchas partículas de suelo juntas en un solo grupo o trozo). La compactación tiene como resultado el rompimiento de los agregados de suelo más grandes, y la reducción o eliminación de espacios (o poros) entre las partículas de suelo. Mientras más grandes y numerosos sean los agregados del suelo, mayores serán los espacios (poros) dentro del suelo. Esto facilita mayor movimiento de aire y agua, requerido tanto por las raíces de las plantas como por los organismos vivos en el suelo (Ver figura II.2).



Figura II.2 Compactación mecánica del suelo

La compactación del suelo puede medirse con un penetrómetro de suelos. Mientras más profundo y con facilidad penetre el suelo la sonda del penetrómetro de suelo, menor la compactación, y, por consiguiente, mejor el suelo. Una fuerza baja (bajo número de libras) significa que el suelo no está muy compactado. Menos compactación permite el desarrollo de raíces profundas, fácil flujo vertical de agua y aumento en los espacios (poros) de suelo. El aumento de los espacios (o poros) de suelo, también, se correlaciona con una mayor estructura de agregados y un contenido de materia orgánica más elevado.

2.3 Tipos de Penetrómetros

2.3.1 Penetrómetro dinámico

La forma más económica y sencilla de ensayar un terreno en profundidad consiste en la hincada de un varillaje con una punta metálica de forma conveniente. Los resultados obtenidos se deben de tratar con mucho cuidado debido a que el suelo puede refluir por encima de la punta. El varillaje debe de ser de diámetro inferior a la base para así evitar todo lo posible el rozamiento lateral del tren de varillas. El golpeteo es producido por la caída guiada de una masa de peso variable según el penetrómetro que golpea la cabeza de impacto y transmite el golpe a la punta que va atravesando el terreno según su dureza. A continuación se muestran algunos ejemplos de penetrómetros dinámicos (Ver figura II.3).

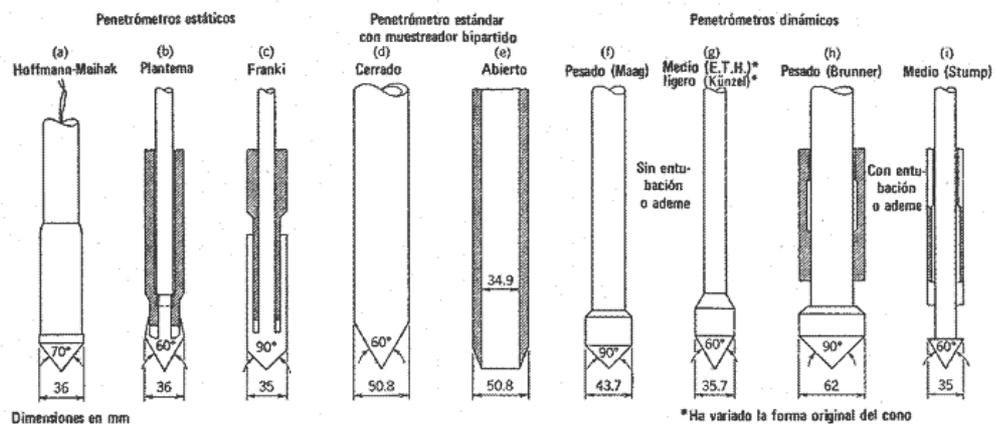


Figura II.3 Ejemplos de penetrómetros estáticos y dinámicos.

Un tipo de penetrómetro dinámico de cono muy usado en España y toda Europa es el que es conocido con el nombre de Borro (NLT-261) este equipo consiste en un varillaje metálico macizo de 32 mm de de diámetro exterior que hinca una puntaza metálica de la forma y dimensiones que se indican en la figura II.4 la hinca se realiza con una masa de 65 kg que cae libremente desde una altura de 50 cm.

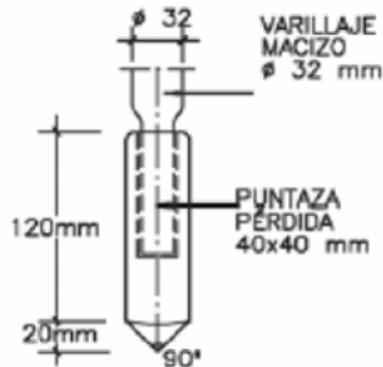


Figura II.4 Penetrómetro dinámico de cono (Borro NLT-231)

Durante la hinca se van contabilizando los números de golpe para hacer avanzar la hinca 20 cm. El resultado se suele presentar en forma de diagrama de ese número de golpes (Nb) obtenido en cada profundidad como lo muestra la figura II.5.

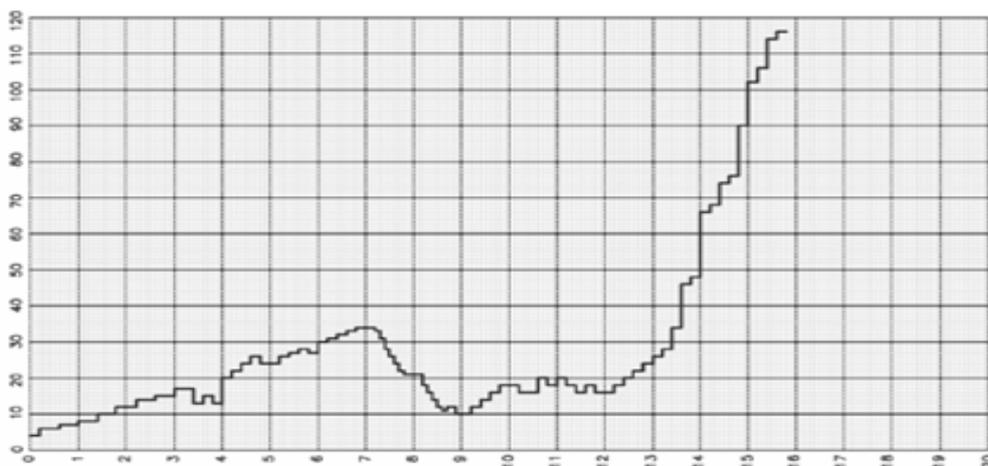


Figura II.5 Diagrama que representa el número de golpes (Nb) contra Profundidad (20cm).

Otro tipo de penetrómetro dinámico de uso común es el “penetrómetro dinámico de cono” o DCP llamado así por sus siglas en inglés (Dynamic Cone Penetrometer), un instrumento simple ampliamente usado para la evaluación, es utilizado para establecer el espesor de los diferentes estratos cuando se ensayan los trabajos de compactación y para determinar la densidad relativa de los rellenos y de los terrenos no cohesivos depositados naturalmente. En general si el suelo no esta demasiado compactado, los ensayos de penetración pueden llevarse a cabo hasta los 8 a 10 metros (Ver figura II.6)



Figura II.6 Penetrometro Dinámico de Cono DCP (Dynamic Cone Penetrometer)

El operador introduce la punta del DCP en el suelo, levantando el mazo deslizante hasta la empuñadura y soltándola luego. Se mide la penetración total alcanzada para un determinado número de golpes y se anota en mm/golpe, una medida que luego se usa para describir la rigidez del suelo, para estimar el CBR in situ, con base

en un cuadro apropiado de correlación, así como otras características. (Ver figura II.7)

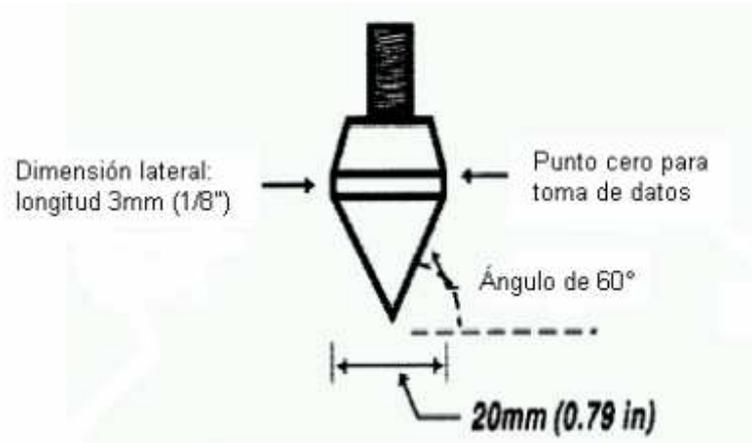


Figura II.7 Punta del Penetrómetro Dinámico de Cono DCP (Dynamic Cone Penetrometer)

Este método de ensayo se usa para evaluar la resistencia en el sitio de suelos inalterados y/o compactados. La razón de penetración del DCP de 8 kg puede ser usada para estimar el CBR in situ (Razón de Soporte de California), para identificar espesores de capas, la resistencia al corte de estratos de suelo y otras características de los materiales.

Existen otros métodos para DCP con pesos de mazos diferentes y con diferentes tamaños de punta-conos, los cuales tienen correlaciones que son únicas para esos instrumentos. El DCP de 8 kg se posiciona verticalmente y por esa razón es usado comúnmente en estructuras constructivas horizontales, tales como pavimentos y losas de piso. Este instrumento se usa comúnmente para evaluar las propiedades de materiales ubicados hasta 1000 mm por debajo de la superficie. La profundidad de penetración puede ser aumentada usando extensiones de barras.

Sin embargo, en caso que se usen extensiones de barras, debe tenerse cuidado a la hora de utilizar los cuadros de correlación para estimar otros parámetros, ya que estas correlaciones sólo son aptas para configuraciones específicas de DCP. La

masa y la inercia del dispositivo cambiarán y se producirá fricción por contacto superficial de las extensiones de las barras.

El DCP de 8 kg puede ser usado para estimar los parámetros de soporte de suelos finos y gruesos, materiales granulares de construcción y estabilizaciones pobres. El DCP de 8kg no puede ser utilizado en materiales altamente estabilizados o cementados o para materiales granulares que contengan un alto porcentaje de agregados mayores que 50 mm.

En el caso de materiales ubicados por debajo de capas de materiales altamente estabilizados, el DCP de 8 Kg. puede ser utilizado luego de perforar o cortar un orificio de acceso, en la losa o carpeta. La medición del DCP en el campo, conduce a una estimación del CBR in situ y normalmente los resultados no establecen una correlación directa con el dato de CBR del laboratorio, en condición saturada. Este ensayo es por lo tanto indicado para evaluar la resistencia de los materiales en el sitio, bajo las condiciones existentes. Existen correlaciones especiales para el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) (Ver figura II.8).

Autor	Correlación	Valores	Observación
Robertson P.K (1998)	$(q_c / p_a) / N_{60}$ $p_a = 1 \text{ atm}$; $(N_1)_{60}$: valor NSPT corregido y normalizado a 1 atm.	1.3 – 2.5	Suelos granulares
Sanglerat (1965)	N / NSPT	2.0	-
Dobry. R (IDIEM)		1.0	Primeros m. prof.
Valor recomendados por la práctica		1.0	Primeros 5 m prof.
		1.3 – 1.5	Prof. superiores a 6 m
Dib. J & Padilla. R (1989)	$NSPT = N - \Delta Y$ $\Delta Y = \text{factor de corrección nivel freático}$	$\Delta Y = 0$ si $h < 1,2 h_{\text{napa}}$ $\Delta Y = 2(h - 1,2 h_{\text{napa}})^2 + 1,2$ si $h > 1,2 h_{\text{napa}}$	Napa de agua < 7 m de profundidad.
	NCP / NSPT	4.0	-
	NCP / N	2.0	-
Chaigneau. L (2001)	qd / qc $qc = \text{resistencia a la penetración pseudo-estática. Ensayo CPT}$	0.90 – 1.10	Cámara de calibración
Villavicencio, G (2006)	qd / N $qd = \text{resistencia de punta. Ensayo PANDA.}$	0.20 – 0.35	Finos < 35% (arenas de relaves)

Figura II.8 Correlaciones del Penetrómetro Dinámico de Cono.

2.3.2 Penetrómetros estáticos

Los penetrómetros estáticos o pruebas o ensayos de penetración estática son un tipo de ensayos de penetración, empleados en la determinación de las características geotécnicas de un terreno, como parte de las técnicas de reconocimiento de un reconocimiento geotécnico. Consisten en hincar una varilla terminada en una punta cónica, materializándose la energía de hincado, mediante gatos generalmente hidráulicos, que proporcionan la fuerza necesaria para profundizar en el terreno. La aplicación de esta fuerza requiere una reacción lo suficientemente elevada, que puede venir dada desde el peso propio de la maquinaria hincadora (penetrómetro en camión), hasta el peso propio de una persona en un terreno con características particulares (Ver figura II.9).



Figura II.9 Penetrómetro mecánico de punta cónica.

Un ensayo de penetración estático (o CPT Cone Penetration Test) muy usado también en Europa sobre todo en España es el llamado cono holandés (UNE-103804) y consiste en una hincada mediante empuje a una velocidad lenta de una varilla con una punta adecuada. El avance del penetrómetro se hace de forma discontinua de modo que se pueda medir la resistencia a la penetración de la punta. Los equipos varían según su capacidad y distintas formas de las puntas, en otros países existen normativas acerca de la ejecución de este ensayo cuya aplicación de igual forma puede resultar de interés.

La resistencia al corte del terreno obtenido mediante estos ensayos es especialmente adecuada para el cálculo de la carga de hundimiento de cimentaciones profundas; A continuación se muestra en la figura II.10 la relación que existe entre la resistencia por punta en el ensayo de penetración estática y la densidad relativa de las arenas.

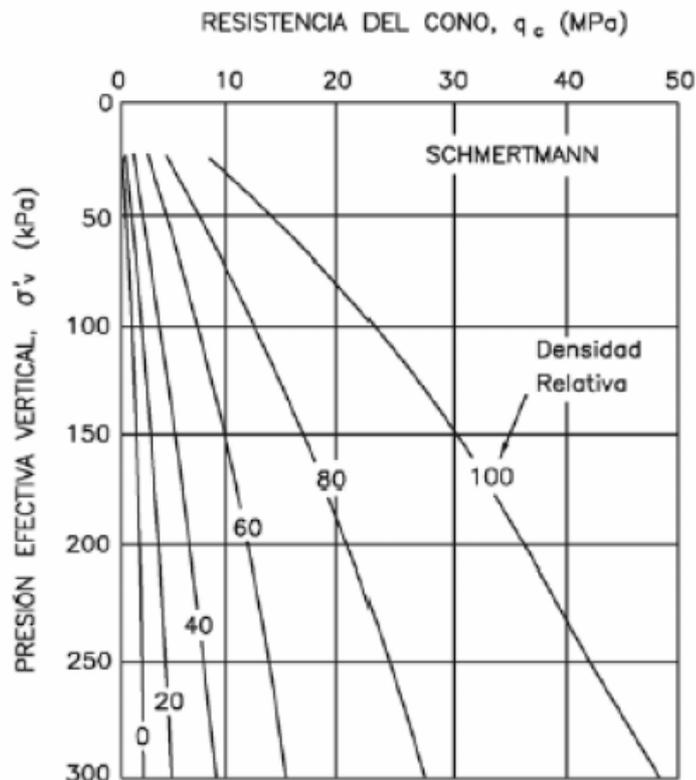


Figura II.10 Relación entre Resistencia del Cono Vs Presión Efectiva vertical

Para suelos granulares existe una correlación evidente entre la resistencia por punta del ensayo de penetración estática y el ángulo de rozamiento interno, aunque, esta correlación depende de varios factores como valor orientativo se puede usar la siguiente expresión dada por Robertson y Campanella:

$$\operatorname{tg} \phi = 0,10 + 0,38 \log \frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

Donde:

- ϕ : ángulo de rozamiento interno.
 q_c : resistencia por punta.
 σ_{v0} : presión vertical total al nivel del ensayo.
 σ'_{v0} : presión vertical efectiva al nivel del ensayo.

Existen bastantes correlaciones para obtener características geotécnicas a partir de los resultados obtenidos en un ensayo de penetración estática, tanto en el caso de suelos arenosos como arcillosos.

La mejor de estas correlaciones corresponde a este último caso, y es la que liga la resistencia al corte sin drenaje de un terreno cohesivo con el valor de la resistencia por punta en el ensayo CPT o CPTU.

Tiene un fundamento teórico, puesto que puede obtenerse mediante la teoría de la plasticidad que la resistencia que opone un terreno a la penetración de punta de un elemento responde a la expresión:

$$q_c = 4.5 q_u = 9 c_u$$

Siendo q_u la resistencia a la compresión simple del suelo, y c_u la resistencia al corte sin drenaje. Como en la hincada de los penetrometros el útil movilizado no es exclusivamente la punta, sino que también existe un faldón superior con una cierta longitud, que se mueve con ella, la resistencia obtenida es algo superior.

Los penetrometros estáticos se pueden clasificar en dos tipos:

- Penetrometros estáticos de punta mecánica: Son los más sencillos y los primeros que se utilizaron. Miden en superficie con un manómetro, de forma analógica o digital, la presión del grupo hidráulico requerida para hincar el penetrometro en el terreno. Este parámetro se convierte, sin más que multiplicar por la sección del pistón, en la fuerza necesaria para la penetración.
- Penetrometros estáticos de punta eléctrica: Las puntas eléctricas permiten medir los parámetros q_c y f_s (Esfuerzo de penetración en punta y Fricción) de forma

directa mediante sensores electrónicos que registran la tensión actuante, tanto en la punta como en el fuste del cono, independizando en todo momento la resistencia a la penetración por punta y fuste en la zona del cono, y ambas respecto a la resistencia por fuste del varillaje.

Los penetrómetros estáticos o pruebas o ensayos de penetración estática son un tipo de ensayos de penetración, empleados en la determinación de las características geotécnicas de un terreno, como parte de las técnicas de reconocimiento de un reconocimiento geotécnico.

El uso de los penetrómetros estáticos está especialmente indicado en los suelos blandos tanto granulares como cohesivos, sobre todo en estos últimos. La presencia de gravas, bolos, suelos cementados o roca, además de producir rechazo en la hinca, puede ocasionar daños graves en los equipos y no está recomendada su utilización.

En si los penetrómetros han tenido un impacto favorable en el mundo debido a que su uso no solo se limita a países del continente americano como: Estados Unidos, México, Chile, Perú, Argentina, Uruguay, Brasil, etc. Para diversos trabajos que requieren de una herramienta con estas características para el estudio de compactación y reconocimiento de suelos, sino que también en el continente Europeo su uso es muy común en países como: España, Francia, Holanda, Bélgica, Alemania, Suiza, Polonia, Italia, etc. En la actualidad va en aumento las empresas que se dedican a rediseñar y mejorar con nuevas tecnologías y sobre todo distribuir esta herramienta por mas países y también los ya mencionados.

2.4 Penetrómetro de cono CN-973

El Penetrómetro de cono CN-973 es el principal instrumento usado para evaluar la calidad del suelo. Este aparato consiste de un cono de 30 grados, con $\frac{1}{2}$ pulg² (3.22 cm²) de base, 18 pulg (45.72 cm) de extensión de vara, un anillo de prueba y un manipulador (Ver figura II.11).



Figura II.11 Penetrómetro de cono CN-973

Cuando el cono es forzado en el suelo, el anillo de prueba es deformado en proporción a la fuerza aplicada. La cantidad de fuerza requerida para mover el cono lentamente a través de un material dado, es indicado en el marcador dentro del anillo. Esta fuerza es considerada un índice de resistencia al cortante del suelo en ese plano. El rango del marcador es 150 libras (68.1 kg) de carga y está marcado 0 - 300 libras/pulg² (0 - 21.11 kg/cm²) desde la base del cono. A continuación se muestran una serie de figuras que ejemplifican el uso adecuado de la herramienta en un suelo con características específicas (Ver figura II.12 a II.17)



Figura II.12 Uso del penetrómetro en un suelo adecuado.



Figura II.13 *Uso del penetrómetro en un suelo adecuado.*



Figura II.14 *Uso del penetrómetro en un suelo adecuado*



Figura II.15 Uso adecuado del penetrómetro de cono CN-973



Figura II.16 Uso adecuado del penetrómetro de cono CN-973



Figura II.17 *Uso adecuado del penetrómetro de cono CN-973*

III. MÉTODO Y MATERIALES

3.1 Antecedentes

En el presente trabajo se presentó la información recopilada en relación con los penetrómetros (historia, usos y aplicaciones, ventajas, desventajas, etc.) en el cual se mostraron, de una forma general, datos e información, que nos brindaron una visión más amplia, acerca de esta herramienta de reconocimiento y análisis de la densidad aparente del suelo, destacando algunos tipos de penetrómetros en específico; Sobre todo se hizo énfasis en un tipo de penetrómetro en específico, el cual tiene por nombre “penetrómetro de cono CN-973” del cual se destacaron las ventajas y desventajas que presenta en comparación con otros métodos o herramientas que tienen la misma finalidad, ofreciendo una descripción de los componentes que conforman esta herramienta en general, así como también, muestra de una manera más sencilla y simple la forma de uso que tiene esta herramienta, mediante una breve explicación. Con lo descrito en este documento se buscó que el usuario tuviera una idea más clara y definida, acerca de los penetrómetros, en específico el “Penetrómetro de cono CN-973” que por

consiguiente, ofrece una opción más, a la hora de tomar una decisión factible y satisfactoria, acerca de la herramienta o método que se utilizó para el reconocimiento y análisis del suelo, debido a que hasta el momento este instrumento de trabajo era muy poco conocido en nuestro entorno. Aunque la información no se presenta de manera abundante en libros, revistas, artículos, etc. por el problema anteriormente descrito, internet resultó ser la herramienta que más ayuda proporcionó a la hora de realizar este trabajo. La información recopilada en este documento tuvo el claro objetivo de presentar una herramienta, que hasta ahora, tiene poca resonancia, para que pudiera competir con otras más usuales, ya que es necesaria una herramienta que proporcione ventajas como estas. Los siguientes pasos permitieron cumplir con los objetivos y dar respuesta al problema planteado.

3.2 Operación y Descripción del Penetrómetro de cono CN-973

3.2.1 Información general

El Penetrómetro de cono CN-973 es el principal instrumento usado para evaluar la calidad del suelo. Este aparato consiste de un cono de 30 grados, con $\frac{1}{2}$ pulg² (3.22 cm²) de base, 18 pulg (45.72 cm) de extensión de vara, un anillo de prueba y un manipulador (Ver figura III.1). Cuando el cono es forzado en el suelo, el anillo de prueba es deformado en proporción a la fuerza aplicada. La cantidad de fuerza requerida para mover el cono lentamente a través de un material dado, es indicado en el marcador dentro del anillo. Esta fuerza es considerada un índice de resistencia al cortante del suelo en ese plano. El rango del marcador es 150 libras (68.1 kg) de carga y está marcado 0 - 300 libras/pulg² (0 - 21.11 kg/cm²) desde la base del cono.

3.2.2 Operación

A.- Inspeccionar el instrumento antes de usarlo, para asegurarse que todas las tuercas, tornillos y uniones estén ajustadas y que la base del contacto del indicador del marcador calibrador, este en contacto con el anillo de prueba (Ver figura III.2).

B.- Permita que el penetrómetro se mantenga vertical a partir de su maniobrador y gire la cara del reloj indicador hasta que el “0” este bajo la aguja. Note que cuando el instrumento se mantiene vertical y se permite descansar en su cono, el marcador registrara cerca de 2.5 libras (1.13 kg) lo cual es el peso total del instrumento cuando la vara de 18 pulg (45.72 cm) es usada (Ver tabla III.1).

C.- Si las varas de extensión son añadidas, o removidas, reinicia el instrumento de nuevo, tal y como se describe en el paso anterior.

D.- Coloca las manos sobre el maniobrador, palmas abajo y aproximadamente a ángulos rectos, para minimizar cargas excéntricas del anillo de prueba y para ayudar a mantener la vara vertical.

E.- Aplique fuerza al oprimir el pecho contra las manos hasta que un movimiento hacia abajo, lento y estable ocurra.

F.- Tome una lectura del reloj indicador justo cuando la base del cono este en contacto con la superficie del suelo. Continúe con el movimiento lento hacia abajo y tome sucesivas lecturas en intervalos de 3 pulg (7.62 cm) hasta una profundidad de 18 pulg (45.72 cm).

NOTA: Un asistente será necesario para registrar las lecturas tomadas por el operador. El operador aprenderá a cambiar su vista de la vara en el suelo al reloj indicador en el momento apropiado, mientras mantiene un grado de penetración constante.

G.- Precauciones:

- Mantenga vertical el instrumento.
- No intente hacer lecturas mayores que la capacidad del reloj indicador puesto que esto podría sobrecargar el anillo de prueba.

- Si la capacidad del reloj indicador es excedida en menos de 18 pulg (45.72 cm) de penetración, haga otra penetración cerca para asegurarse que el cono no está golpeando un fragmento de roca. Nunca jale al instrumento del anillo, siempre hágalo por la vara.

3.2.3 Cuidado y ajustes del “penetrómetro”

A.- Cuidado general.

El penetrómetro necesita de un poco de cuidado, manteniendo al instrumento libre de suciedad y oxidación, además de mantener todas las partes ajustadas, revisarlo frecuentemente y, si es necesario, recalibrar el instrumento. Tome especial precaución en ver si no hay polvo atrapado entre el brazo del extensómetro del reloj indicador y el bloque de montaje más bajo. (Ver figura III.1)

B.- Marcador.

El reloj indicador es un instrumento sensible, el cual debería estar protegido contra el agua y el uso pesado. Nunca lo introduzca en agua. Séquelo lo más rápido posible después de usarlo en un clima lluvioso. Cuando se transporte en automóvil, acojine el marcador, amarrándolo en papel o tela creando una especie de protector firme.

C.- Ajuste del bloque de montaje.

Si uno o ambos bloques (Ver figura III.1) se aflojan o mueven, ajústelos de manera que estos se mantengan en un diámetro del anillo, y luego apriételes de nuevo.

D. Reemplazamiento del cono.

Un uso considerable del cono, podría dar como resultado un desgaste en su punta. Esto no afectara la exactitud del instrumento, pero si la base del cono está excesivamente recubierta o si esta deformada por uso duro, el cono debería ser reemplazado.

3.2.4 Recalibración del anillo de prueba

A menos que el anillo este severamente sobrecargado, deformado por un golpe duro, sujeto a cambios extremos de temperatura o algún otro suceso inusual, la calibración se mantendrá verdadera durante la vida del instrumento. Si el anillo necesita recalibración, deben seguirse los siguientes pasos:

A.- Remueva el reloj indicador y la vara.

B.- Coloque el bloque de montaje (Ver figura III.2) del juego de piezas del anillo en una superficie suave horizontal.

C.- Revisar el alineamiento del bloque de montaje. Al ponerlo sobre una base, el bloque deberá estar fijo sobre esta. En una base triangular o un cuadro de madera podría ser realizada esta operación.

D.- El brazo extensómetro del reloj indicador deberá tener la firmeza en el bloque más bajo, tal que soporte el movimiento máximo posible del brazo para llegar al rango máximo (aproximadamente 1/10 pulg. de deflexión) del anillo de prueba. Para mover el reloj indicador hacia arriba o abajo, ajuste las dos tuercas que mantiene el medidor en posición. Ambas tuercas deberán estar apretadas cuando estén en su posición final.

E.- Poner en cero el reloj indicador rotando su cara de forma que "0" este bajo la aguja.

F.- Agregar cargas de 10 lb (4.54 kg) hasta llegar a 150 lb (68.1 kg), marca o anota la posición de la aguja en el reloj indicador después de agregar cada incremento de carga. Cualquiera de los siguientes métodos podría ser usado:

1. Agrega peso muerto encima del anillo de ensamble. Si un plato es usado para mantener los pesos, su peso debe ser considerado en la primera carga de 10 lb (4.54 kg).

2. Use cualquiera de las máquinas de carga comúnmente usadas en trabajo de laboratorio.
3. Coloca el anillo de ensamble en un juego de balanzas de plataformas. Aplique incrementos de carga con un gato y mida con la balanza de plataformas.

G.- Remueve la carga en decrementos de 10 lb (4.54 kg); anota la posición de la aguja para cada decremento después de remover cada uno de ellos.

H.- Haga que la carga corra por lo menos dos veces, usando el promedio de la posición de la aguja para cada incremento, como el punto final.

I.- Algunas variaciones en la posición de la aguja ocurrirán, pero no serán significativas.

J.- Cuando los intervalos de 10 lb (4.54 kg) han sido establecidos en la escala del reloj indicador, deberán ser marcados con 20, 40, 60 y así sucesivamente hasta llegar a 300 lb (136.2 kg). Cada intervalo debe estar subdividido por separado, desde los arcos de la escala de varios intervalos de 10 lb (4.54 kg), estos no necesariamente serán los mismos.

3.2.5 Especificaciones

- Anillo de prueba.

150 lb (68.1 kg) de capacidad;

Indicador del marcador calibrador directamente en psi (lb/pulg²) Desde 0 hasta 300 psi (0 - 21.11 kg/cm²) en divisiones de 5 psi (0.35 kg/cm²)

- Eje.

$\frac{5}{8}$ Pulg (15.8 mm) diámetro

19 Pulg (483 mm) largo

- Cono.

30 grados; $\frac{1}{2}$ pulg² de área de base.

Peso neto: 2 lbs. (0.9 kg)

Tabla III.1 Tabla de nombres de componentes que conforman el Penetrómetro de cono CN-973

Elemento	Nombre
1	Maniobrador
2	Anillo de prueba
3	Vara
4	Cono
7	Perno de soporte
8	Tuercas de calibración
9	Tornillos de ajuste
10	Bloque de montaje
11	Abrazadera de montaje
12	Reloj indicador

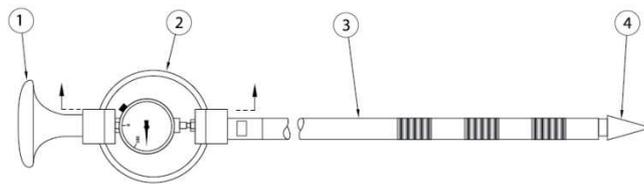


Figura III.1 Vista frontal horizontal del Penetrómetro CN-973

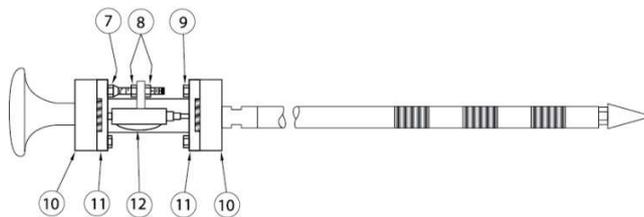


Figura III.2 Vista perfil horizontal del Penetrómetro CN-973

3.3 Muestreo del suelo.

Para las pruebas de campo y laboratorio realizadas en este trabajo fue necesario ubicar un terreno el cual contará con características particulares, las cuales fueran las más apropiadas para el uso en campo del Penetrómetro CN-973, además de tomar una muestra representativa de suelo para llevar a cabo las pruebas correspondientes en el laboratorio. Dicho lugar se localizó por la calle Francisco E. Kino al costado de la calle San Juan Capistrano (Ver figura III.3) el cual contaba con un área extensa de terreno natural con un poco de vegetación. Para la toma de la muestra fue necesario retirar aproximadamente 25 cm de espesor de capa vegetal y partiendo de ahí se obtuvo una muestra alterada de suelo para las pruebas que posteriormente se llevaron a cabo en el laboratorio.

3.4 Clasificación del suelo

Para realizar la clasificación del suelo por el método del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), fue necesario realizar las siguientes pruebas:

a) Granulometría: Porcentaje de arena y finos.

Norma ASTM D422-63

b) Prueba límite líquido.

Norma ASTM D4318

c) Límite plástico.

Norma ASTM D4318 / AASHTO T90

En la sección de anexos (tabla 1) se muestra la tabla de clasificación SUCS.

3.5 Aplicación del Penetrómetro de cono CN-973 en un suelo típico de la región.

Como se mencionó anteriormente las pruebas de campo se llevaron a cabo a un costado de la colonia San Juan Capistrano. Para la realización de las pruebas, se



Figura III.4 Limpia y nivelación del lugar.



Figura III.5 Calibración del Penetrometro de cono CN-973.



Figura III.6 Penetración del aparato en el suelo.



Figura III.7 Uso adecuado del aparato durante su aplicación.



Figura III.8 Uso adecuado del aparato durante su aplicación.



Figura III.9 Extracción del aparato después de su aplicación

Tabla III.2 Tabla de anotaciones

PROFUNDIDAD		PENETRACIÓN 1		PENETRACIÓN 2		PENETRACIÓN 3		IRC PROMEDIO	
Pulg	cm	Psi (lb/in ²)	Kg/cm ²						

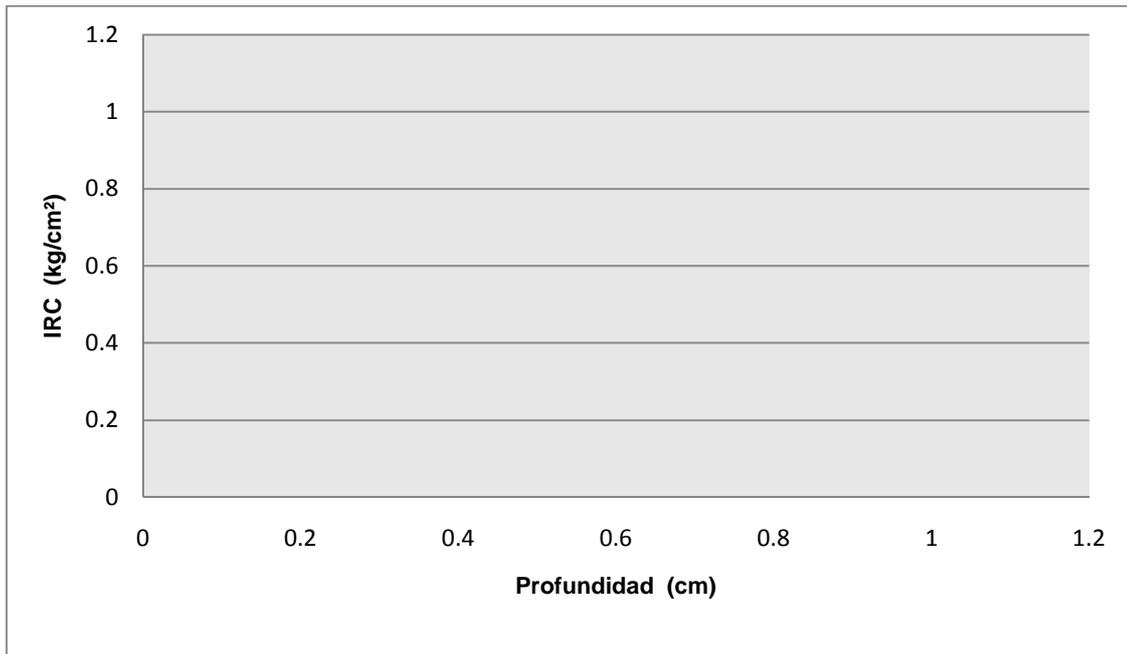


Figura III.10 Profundidad vs IRC promedio

3.6 Correlación entre el IRC, con el peso específico seco, peso específico húmedo y contenido de humedad de un suelo

De la muestra obtenida del lugar de estudio, Se obtuvieron gráficas de correlación entre el IRC, con el peso específico seco, peso específico húmedo y contenido de humedad del suelo, siguiendo la prueba de compactación Proctor Estándar (Norma ASTM D-698).

Procedimiento:

1. Séquese al aire una muestra de 2.5 kg aproximadamente y retírese de ella todo el material mayor que la malla No. 4.
2. Determínese y regístrese el peso de la tara del molde Proctor sin la base ni el collar.
3. Mézclase el suelo con agua suficiente para obtener una muestra ligeramente húmeda, que aun se desmorone cuando se suelte después de ser apretada con la mano.

4. Colóquese el suelo en el molde en capas aproximadamente iguales y compáctese cada capa con el martillo con 25 golpes uniformemente distribuidos. (Ver figura III.11)
5. Cuidadosamente, quítese el collar del molde y enrásese la parte superior del cilindro con una regla metálica.
6. Determínese y regístrese el peso del molde Proctor (sin collar ni base) y el suelo compactado enrasado.
7. Procédase a realizar la prueba de penetración en la muestra húmeda con el Penetrómetro CN-973. (Ver figura III.13). Es necesario poner en cero el reloj indicador (Ver figura III.12).
8. Sobre la superficie del suelo enrasado, insértese el Penetrómetro en dos puntos diferentes para obtener un IRC promedio con ese contenido de humedad siguiendo la metodología de operación del Penetrómetro de cono CN-973 (Ver apartado 3.2.2).
9. Tómese 3 lecturas de 1 cm empezando desde la punta del cono hasta la base y después tómese 2 lecturas más de 1.5 pulg (3.81 cm) desde la base del cono hasta llegar a 3 pulg (7.62 cm) que es el límite de molde.
10. Retírese el penetrómetro de la muestra húmeda tomándolo de la vara y no del anillo (Ver figura III.14).
11. Retírese el suelo del molde y obténgase el contenido de agua con una muestra, obtenida del centro de la muestra. (Ver figura III.15).
12. Compáctese otros especímenes con contenidos de agua crecientes y la aplicación del penetrómetro, como se hizo anteriormente, hasta que el peso húmedo de la muestra compactada vaya decreciendo, hecho que indica que se ha sobrepasado el contenido de agua óptimo.
13. Calcúlese el peso volumétrico seco correspondiente a cada contenido de agua, mediante la fórmula estudiada anteriormente:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{\text{sumado}}}{1 + \left(\frac{W\%}{100}\right)}$$

14. Dibújese los resultados obtenidos en una grafica que tenga como abscisas, los diferentes contenidos de agua en porcentaje resultantes y como ordenadas los pesos específicos secos en kg/cm^3 (curva de compactación) para obtener el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima. Dibújese también la curva de saturación completa en la gráfica anterior.

15. Hacer una tabla que contenga los promedios IRC de las pruebas proctor estándar (Ver tabla III.3) y dibújese los resultados obtenidos en tres gráficas diferentes que contengan como abscisa el IRC promedio y como ordenada a: Peso Específico Seco (Ver figura III.16), Peso Específico Húmedo (Ver figura III.17) y % de humedad respectivamente (Ver figura III.18)



*cción del
tor.*



e del reloj



el suelo en



*cción del
te su aplicación.*



Tabla III.3 Tabla de promedios IRC y resultados

IRC (lb/in ²)	IRC (kg/cm ²)	Peso Específico Seco	Peso Específico Húmedo	% de Humedad

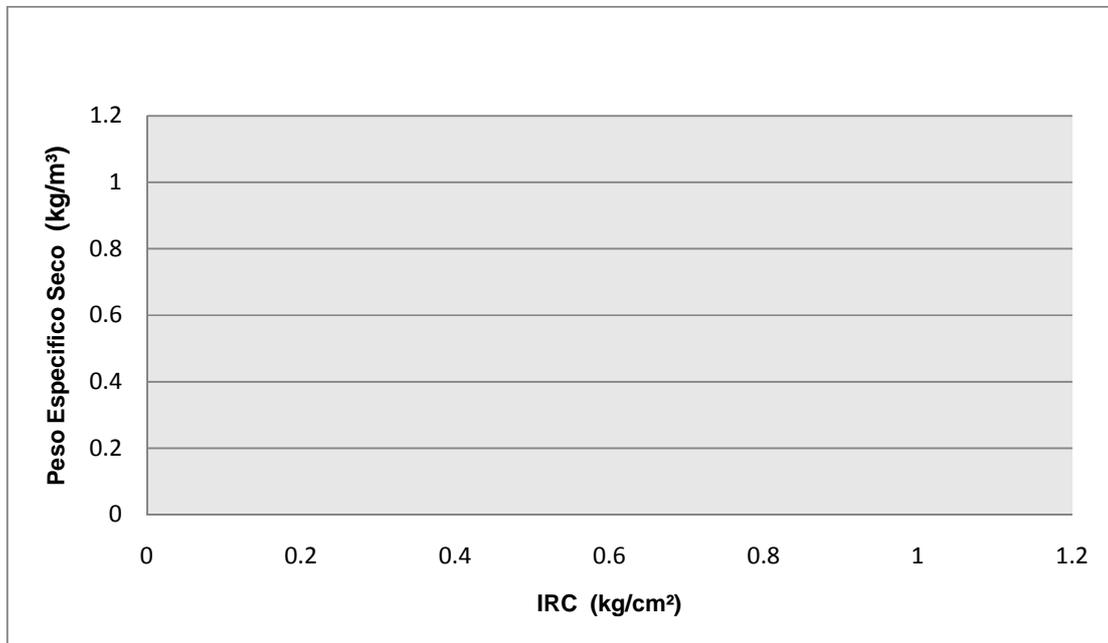


Figura III.16 IRC vs Peso Específico Seco

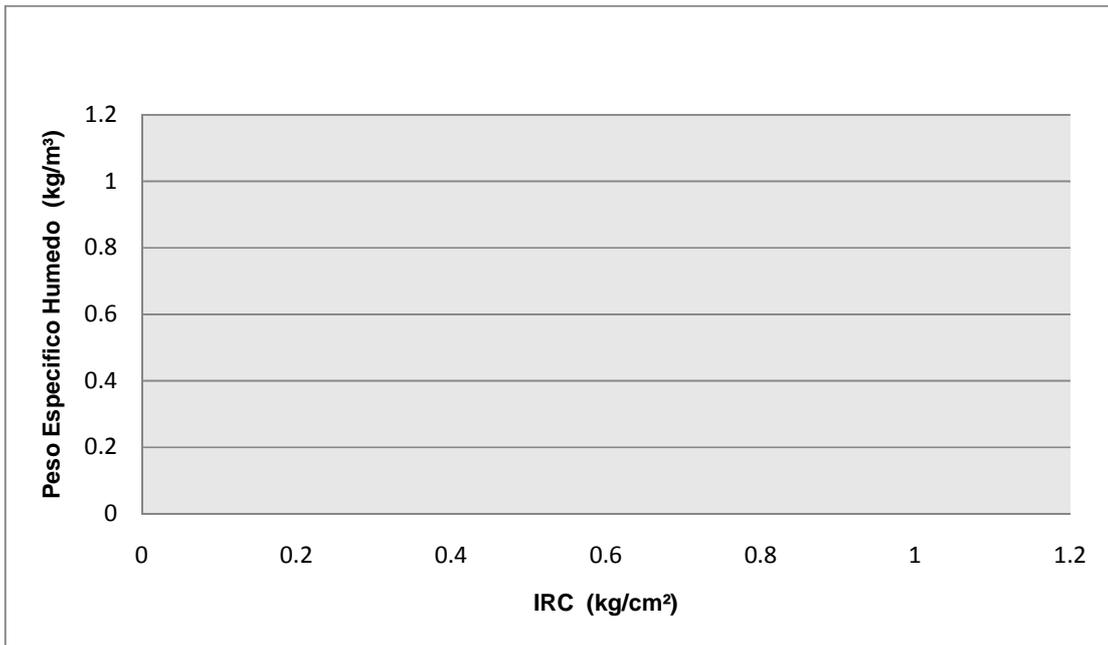


Figura III.17 IRC vs Peso Específico Húmedo

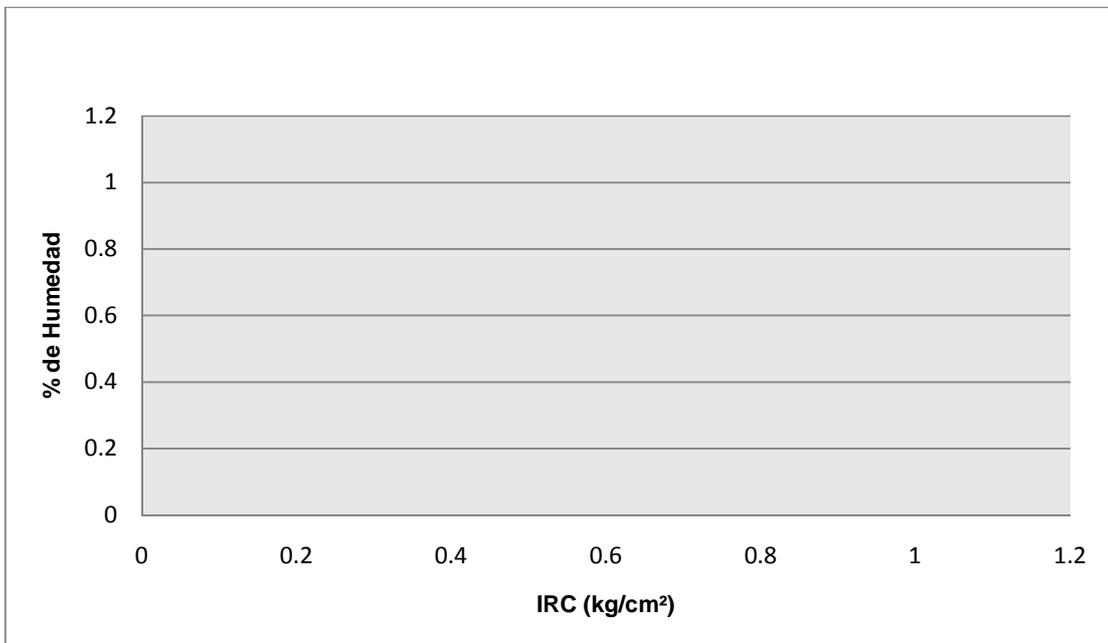


Figura III.18 IRC vs % de Humedad

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Clasificación del suelo

a) Granulometría: Porcentaje de arenas y finos

Suelo Utilizado (gr)	500.00
Peso Tara (gr)	47.17
Peso Muestra Seca Retenido en Malla No. 200 (gr)	55.08
Peso Tara + Muestra Seca Retenido en Malla No. 200 (gr)	102.25

% Arenas	11 %
% Finos	89 %

Contenido de humedad terreno natural

Peso Tara (gr)	101.32
Peso Tara + Muestra Húmeda (gr)	180.77
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	167.00
% de Humedad	20.96

b) Prueba límite líquido

Frasco	Agua Agregada (ml)	Penetración (mm)	Peso Tara (gr)	Peso Tara + Muestra Húmeda (gr)	Peso Tara + Muestra Seca (gr)	% de Humedad
1	81	4	46	75	68	31.81
2	100	10	46	127	104	39.65
3	115	23	52	100	85	45.45
4	120	34	46	110	89	48.83

LÍMITE LIQUIDO	43 %
-----------------------	------

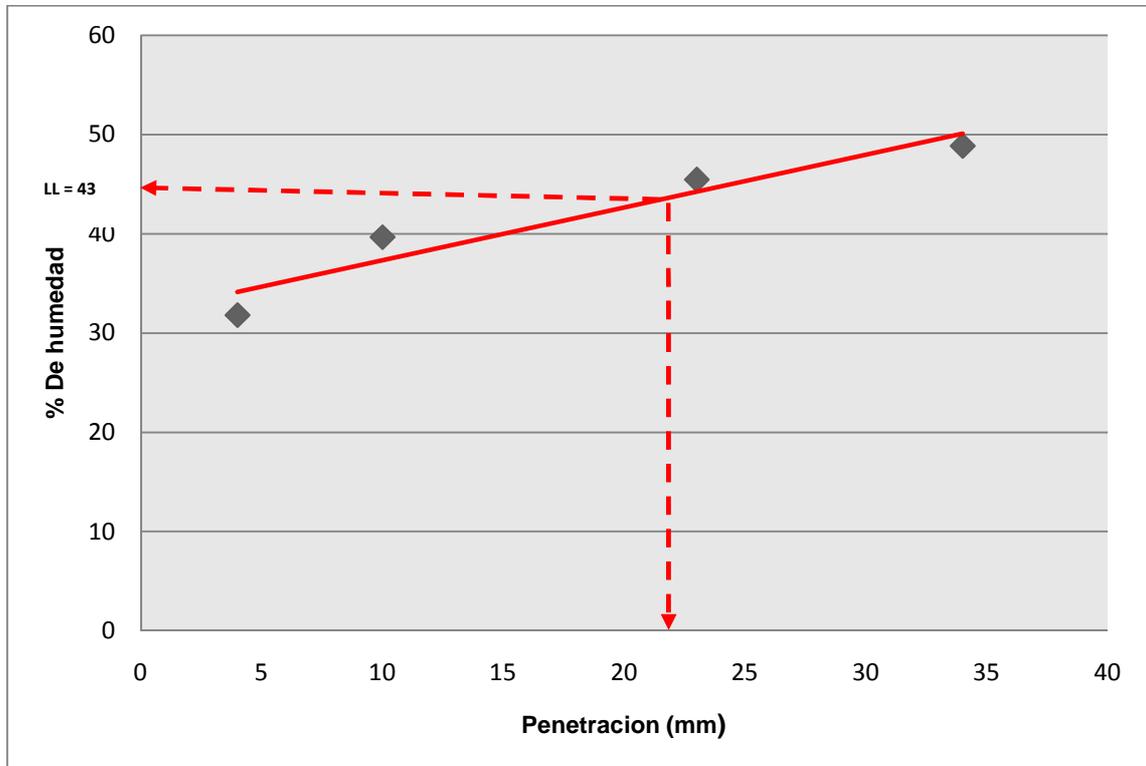


Figura IV.1 Penetración vs % de humedad.

c) Prueba límite plástico

PRUEBA 1	
Peso Tara (gr)	47.0
Peso Tara + Muestra Húmeda (gr)	49.5
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	49.0
% Contenido de Humedad	25.0

PRUEBA 2	
Peso Tara (gr)	47.0
Peso Tara + Muestra Húmeda (gr)	49.4
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	48.9
% Contenido de Humedad	26.3

PRUEBA 1	
Peso Tara (gr)	48.5
Peso Tara + Muestra Húmeda (gr)	51.4
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	50.8
% Contenido de Humedad	26.1

PROMEDIO LIMITE PLASTICO	25.8 %
---------------------------------	--------

IP = LIMITE LIQUIDO – LIMITE PLASTICO	17.2 %
--	--------

d) Clasificación del suelo por el método SUCS

Pertenece a los suelos finos, en donde más de la mitad del material, pasa por la malla No. 200. Arcilla de baja compresibilidad (CL) con un límite plástico menor al 50%. Mezcla de arcilla de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona II de la carta de plasticidad. (Resultado obtenido de tabla 1 y tabla 2 de anexos).

4.2 Aplicación del Penetrómetro de cono CN-973 en un suelo típico de la región

$$1 \text{ Psi (lb/in}^2\text{)} = 0.0703 \text{ kg/cm}^2$$

PROFUNDIDAD		PENETRACIÓN 1		PENETRACIÓN 2		PENETRACIÓN 3		IRC PROMEDIO	
Pulg	cm	Psi (lb/in ²)	Kg/cm ²						
Base (1.5)	Base (3.8)	40	2.81	40	2.81	40	2.81	40	2.81
3.0	7.62	80	5.62	90	6.33	80	5.62	83.33	5.85
4.5	11.43	120	8.44	120	8.44	120	8.44	120	8.44
6.0	15.24	160	11.25	150	10.54	160	11.25	153.33	11.01
7.5	19.05	200	14.06	220	15.46	200	14.06	206.66	14.52

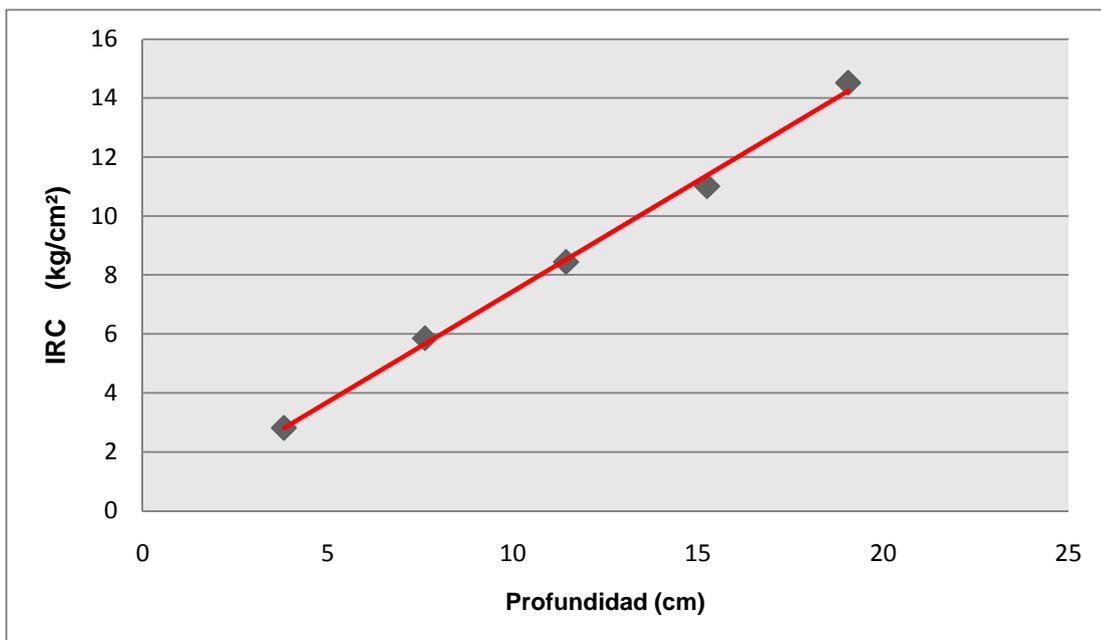


Figura IV.2 Profundidad vs IRC

4.3 Correlación entre el IRC, con el peso específico seco, peso específico húmedo y contenido de humedad de un suelo.

Datos:

Peso Molde: 1.942 kg

Diámetro: 10.1 cm

Altura: 16.7

Volumen: 0.00092777 m³

Prueba 1	
Peso Tara (gr)	60.70
Peso Tara + Muestra Humedad (gr)	121.60
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	116.90
% de Humedad	8.36
Peso Molde + Muestra (kg)	3.334
Peso Volumétrico Húmedo (kg/m ³)	1500.37
Peso Volumétrico Seco (kg/m ³)	1384.82

PENETRACION		IRC	
Cm	Pulg	lb/in ²	Kg/cm ²
1	0.39	200	14.06
2	0.78	----	----
3	1.18	----	----
3.81	1.5	----	----
7.62	3	----	----
	PROM	200	14.06

Prueba 2	
Peso Tara (gr)	88.8
Peso Tara + Muestra Humedad (gr)	169.40
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	160.50
% de Humedad	12.41
Peso Molde + Muestra (kg)	3.422
Peso Volumétrico Húmedo (kg/m ³)	1595.22
Peso Volumétrico Seco (kg/m ³)	1419.11

PENETRACION		IRC	
Cm	Pulg	lb/in ²	Kg/cm ²
1	0.39	160	11.24
2	0.78	180	12.65
3	1.18	----	----
3.81	1.5	----	----
7.62	3	----	----
	PROM	170	11.95

Prueba 3	
Peso Tara (gr)	48.80
Peso Tara + Muestra Humedad (gr)	118.00
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	107.70
% de Humedad	17.48
Peso Molde + Muestra (kg)	3.520
Peso Volumétrico Húmedo (kg/m ³)	1700.85
Peso Volumétrico Seco (kg/m ³)	1447.78

PENETRACION		IRC	
Cm	Pulg	lb/in ²	Kg/cm ²
1	0.39	40	2.81
2	0.78	50	3.51
3	1.18	100	7.03
3.81	1.5	150	10.51
7.62	3	200	14.06
	PROM	108	7.59

Prueba 4	
Peso Tara (gr)	70.40
Peso Tara + Muestra Humedad (gr)	149.20
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	135.90
% de Humedad	20.30
Peso Molde + Muestra (kg)	3.571
Peso Volumétrico Húmedo (kg/m ³)	1755.82
Peso Volumétrico Seco (kg/m ³)	1459.53

PENETRACION		IRC	
Cm	Pulg	lb/in ²	Kg/cm ²
1	0.39	0	0
2	0.78	10	0.70
3	1.18	20	1.41
3.81	1.5	40	2.81
7.62	3	50	3.51
	PROM	24	1.68

Prueba 5	
Peso Tara (gr)	47.00
Peso Tara + Muestra Humedad (gr)	125.60
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	109.80
% de Humedad	25.15
Peso Molde + Muestra (kg)	3.606
Peso Volumétrico Húmedo (kg/m ³)	1793.54
Peso Volumétrico Seco (kg/m ³)	1433.11

PENETRACION		IRC	
Cm	Pulg	lb/in ²	Kg/cm ²
1	0.39	0	0
2	0.78	5	0.35
3	1.18	15	1.05
3.81	1.5	20	1.41
7.62	3	25	1.75
	PROM	13	0.91

Prueba 6	
Peso Tara (gr)	69.00
Peso Tara + Muestra Humedad (gr)	145.20
Peso Tara + Muestra Seca (gr)	128.00
% de Humedad	29.15
Peso Molde + Muestra (kg)	3.520
Peso Volumétrico Húmedo (kg/m ³)	1808.63
Peso Volumétrico Seco (kg/m ³)	1400.41

PENETRACION		IRC	
Cm	Pulg	lb/in ²	Kg/cm ²
1	0.39	0	0
2	0.78	2.5	0.17
3	1.18	5	0.35
3.81	1.5	10	0.70
7.62	3	15	1.05
	PROM	6.5	0.45

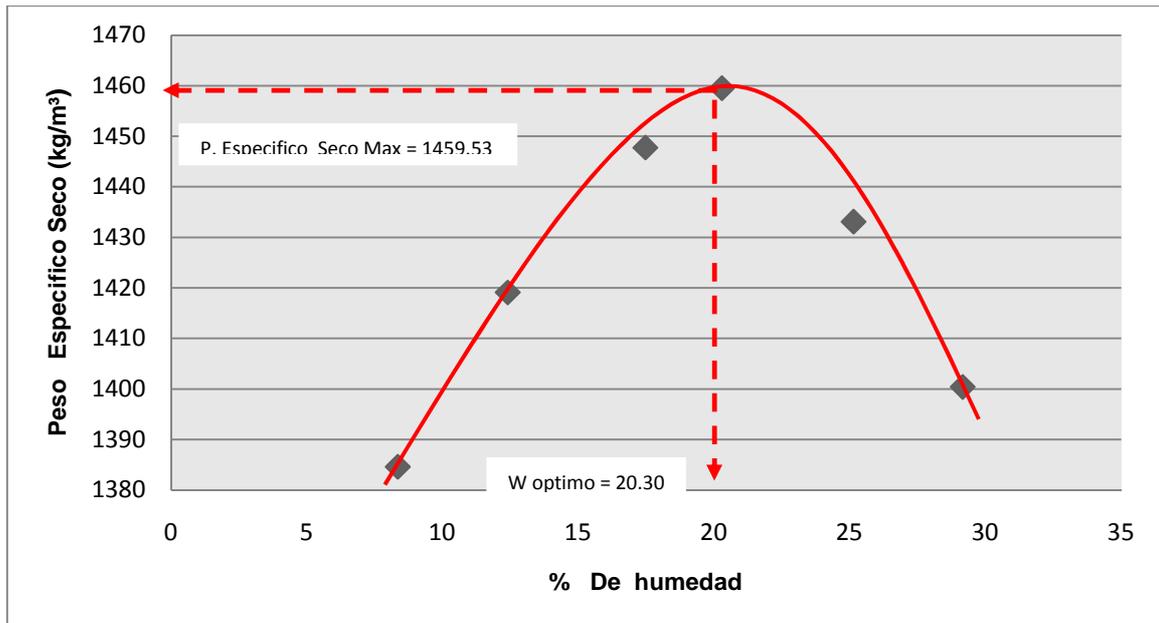


Figura IV.3 % de Humedad vs Peso Volumétrico seco.

IRC (lb/in ²)	IRC (kg/cm ²)	Peso Específico Seco	Peso Específico Húmedo	% de Humedad
200	14.06	1384.82	1500.37	8.36
170	11.95	1419.11	1595.22	12.41
108	7.59	1447.78	1700.85	17.48
24	1.68	1459.53	1755.82	20.30
13	0.91	1433.11	1793.54	25.15
6.5	0.45	1400.41	1808.63	29.15

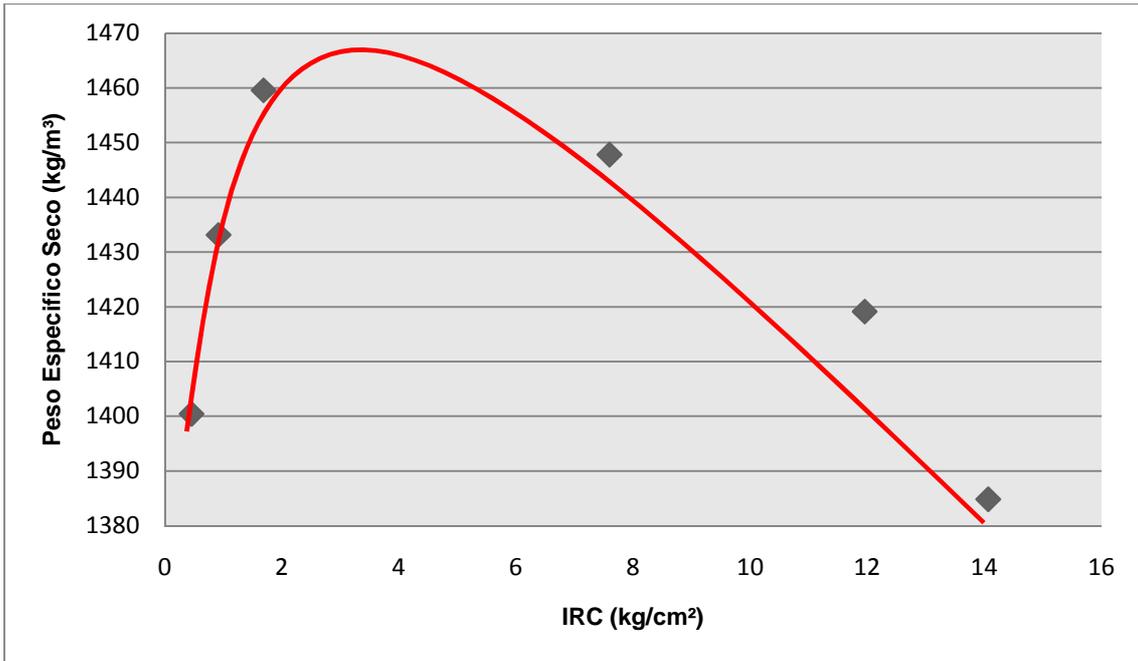


Figura IV.4 IRC vs Peso Especifico Seco.

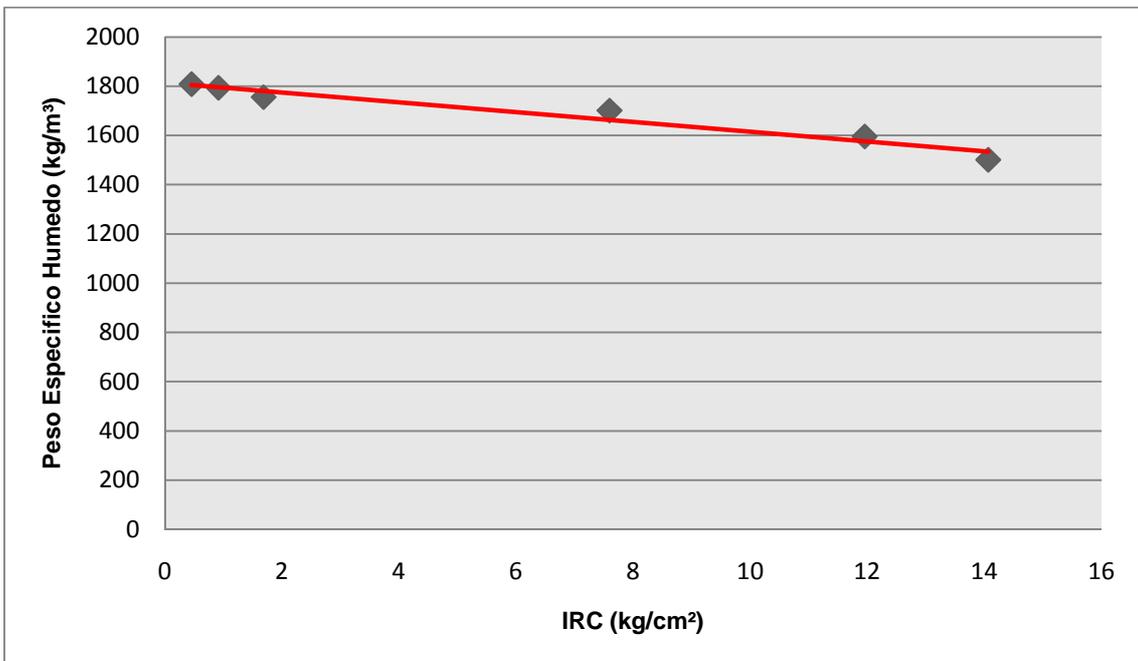


Figura IV.5 IRC vs Peso Especifico Húmedo.

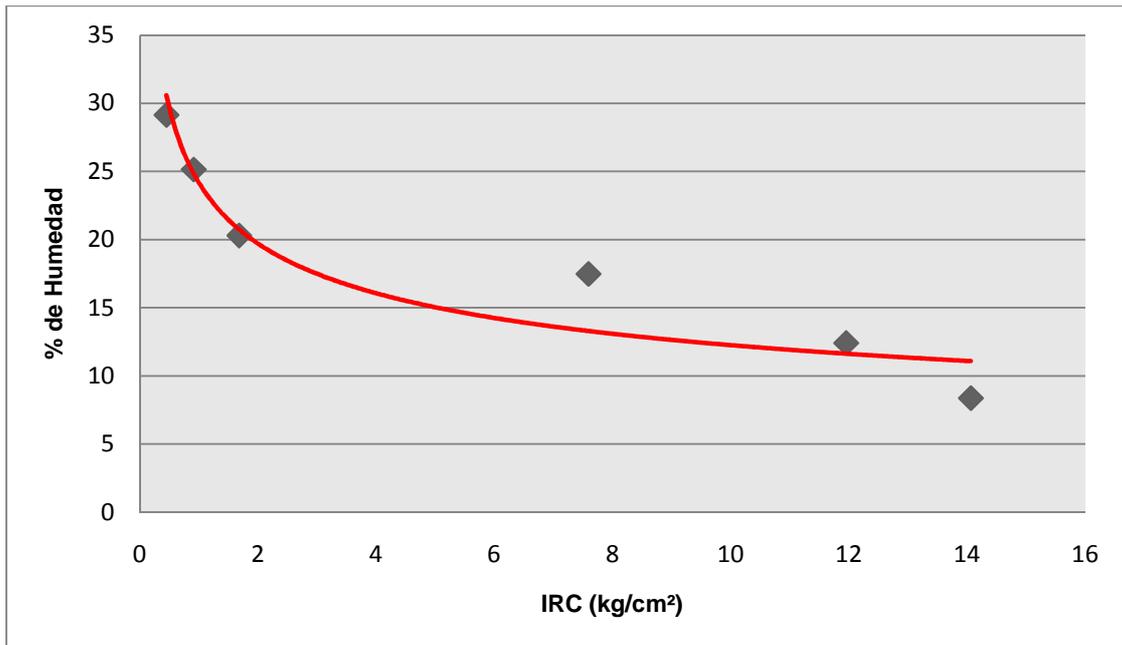


Figura IV.6 IRC vs % de Humedad.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

Después de realizar este trabajo de investigación, podemos concluir que se ha presentado un documento completo en el cual se incluye una recopilación de información, de una manera más clara y concisa, acerca del uso y aplicaciones del Penetrómetro de cono CN-973, así como también las ventajas y desventajas principales que esta herramienta presenta con respecto a otros métodos; Comprobando por medio de pruebas tanto de laboratorio como de campo, las variaciones que puede tener con respecto a la información teórica recopilada, obteniendo consigo resultados satisfactorios y muy similares, además de que dichas pruebas se realizaron en un suelo típico de la región generando un grado mayor de confiabilidad y reafirmando así que el Penetrómetro CN-973 es una herramienta de ayuda para determinar la calidad de los suelos.

Es necesario destacar que el comportamiento del Penetrómetro estático de cono CN-973 siempre va a depender del estado natural del suelo en cuestión, obteniendo mejores resultados cuando se trate de un suelo blando, debido a la capacidad de carga que esta herramienta presenta, tomando esto como una desventaja importante; Además 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, ya que el uso principal de los penetrómetros es su correlación con propiedades físicas del suelo, tal que permitan determinar propiedades preliminares en el terreno de forma rápida y económica, con una razonable aproximación, para que posteriormente con estudios de laboratorio más precisos puedan afinarse estas propiedades.

Las correlaciones obtenidas presentaron comportamientos muy particulares, se pudo observar como el peso específico seco con respecto al IRC fue aumentando hasta llegar a un punto máximo en el cual empezó a decrecer de forma a la curva de compactación Proctor; con respecto al peso específico húmedo se pudo observar un comportamiento un poco diferente, el cual fue de manera lineal y decreciente determinada también por el contenido de humedad en la muestra y en la última correlación que respecta al porcentaje de humedad contra el IRC se pudo observar como este último dependía del porcentaje de humedad ya que conforme este disminuye el IRC aumenta. Con lo anterior podemos decir que el índice de resistencia al cortante es hasta cierto punto dependiente del contenido de humedad que la muestra presente, entre mayor sea este el IRC será menor. También se obtuvo una correlación del IRC contra la profundidad con los datos obtenidos en las pruebas llevadas a cabo en campo, donde se puede observar que a mayor profundidad mayor también el índice de resistencia al cortante (IRC) esto debido a la compactación que el suelo va presentando al profundizar cada vez más el penetrómetro.

5.2 Recomendaciones

- Pueden realizarse correlaciones con otras propiedades diferentes a las tratadas en esta tesis, que pudieran ser temas de futuras investigaciones.
- Para el uso del Penetrómetro se deberá leer el manual de uso que está contenido en este trabajo, debido a que es una herramienta delicada que requiere de cuidados.
- El uso del Penetrómetro debe de ser exclusivo de suelos blandos, debido a la baja capacidad de su anillo de carga
- Para tener buena precisión en el uso del Penetrómetro realizar por lo menos tres aplicaciones en el mismo lugar para obtener lecturas promedio
- Para las pruebas llevadas a cabo en campo y laboratorio es necesario contar con la ayuda de por lo menos 1 persona para el registro de lecturas del Penetrómetro.
- Debe considerarse que entre mayor número de aplicaciones mediante el penetrómetro, las curvas de correlación respecto a las propiedades del suelo, serán mucho más precisas.

LITERATURA CITADA

- Zapata Tejedor, F. (2009), Los penetrómetros, las arenas y sus correlaciones. Revista de obras públicas, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, tomo I, Pág. 587-597
- Departamento de la armada y fuerza aérea de los Estados Unidos de Norteamérica (1994), Manual de uso del Penetrómetro de cono modelo CN-973, FM-5-430-00-1, vol. 1, Pag. 1-9.
- Nacci, S. y Pla Sentís, I. (1991). ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE LOS SUELOS CON EQUIPOS DE PENETROMETRÍA DESARROLLADOS EN EL PAIS Maracay, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Consultado el 14 de Julio de 2011 en: http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at4212/Arti/naccis2.htm
- Denoia, J. y Giubileo, G. (2008). Penetrómetro para el estudio de costras de suelo en laboratorio Argentina: Universidad Nacional de Entre Ríos Argentina, CIENCIA, DOCENCIA Y TECNOLOGÍA. Consultado el 27 de Julio de 2011 en: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/145/14511370009.pdf>
- Ecoplexity teaching ecological complexity, Portland State University. Consultado el 27 de Julio de 2011 en: <http://ecoplexity.org/node/598?page=0,0>

- Baro López, L. (2007). Cálculo de asientos mediante ensayos "in situ" Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, Departamentos de ingeniería del terreno, de cartográfica y de geofísica. Consultado el 18 Agosto de 2011 en:
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6415/5/04.pdf>

- S.L., Brown, R.W., y Porter, J.R.(1994), "Force Projection Site Evaluation Using the Electric Cone Penetrometer (ECP) y "the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)", Reporte Tecnico No. GL-94-17, Air Force Civil Engineering Support Agency, U.S. Air Force, Tyndall Air Force Base, FL. Consultado el 18 de agosto de 2011 en:
<http://www.mopt.go.cr/planificacion/centrodeinformacion/CONTROL-VERIFICACION-KfW/NORMA%20DCP-695103.pdf>

ANEXOS

Tabla 1. Clasificación de suelos basado en SUCS

Tipo	Sub-Tipos	Identificación		Símbolo de Grupo		
Suelos (partículas menores de 7.5 cm)	SUELOS GRUESOS Más de la mitad del material se retiene en la malla N°200 (0.075 mm)	GRAVA Más de la mitad de la fracción gruesa se retiene en la malla N°4	GRAVA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	Grava bien graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (C_u) mayor de 4 y un coeficiente de curvatura (C_c) entre 1 y 3 ^{II} . Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GW	
				Grava mal graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para GW. Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GP	
			GRAVA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Grava limosa; mezcla de grava, arena y limo. Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH (véanse abajo los grupo ML y MH)	GM	
				Grava arcillosa; mezclas de grava, arena y arcilla Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH (véanse abajo los grupo CL y CH)	GC	
			ARENA Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla N°4	ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	Arena bien graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (C_u) mayor de 6 y un coeficiente de curvatura (C_c) entre 1 y 3 ^{II} . Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SW
					Arena mal graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para SW. Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SP
	ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Arena limosa; mezcla de arena, grava y limo. Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH (véanse abajo los grupo ML y MH)		SM		
		Arena arcillosa; mezclas de arena, grava y arcilla Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH (véanse abajo los grupo CL y CH)		SC		
	SUELOS FINOS Más de la mitad del material pasa la malla N°200 (0.075 mm)	LIMO Y ARCILLA Límite líquido	Menor de 50%	Limo de baja compresibilidad; mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava; polvo de roca. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	ML	
				Arcilla de baja compresibilidad; mezcla de arcilla de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona II de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	CL	
				Limo orgánico de baja compresibilidad; mezcla de limo orgánico de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	OL	
			Mayor de 50%	Limo de alta compresibilidad; mezcla de limo de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	MH	
				Arcilla de alta compresibilidad; mezcla de arcilla de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona IV de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	CH	
				Limo orgánico de alta compresibilidad; mezcla de limo orgánico de alta compresibilidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la Carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	OH	
ALTAMENTE ORGÁNICOS				Turba, fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa.	P _t	

Tabla 2. Carta de plasticidad

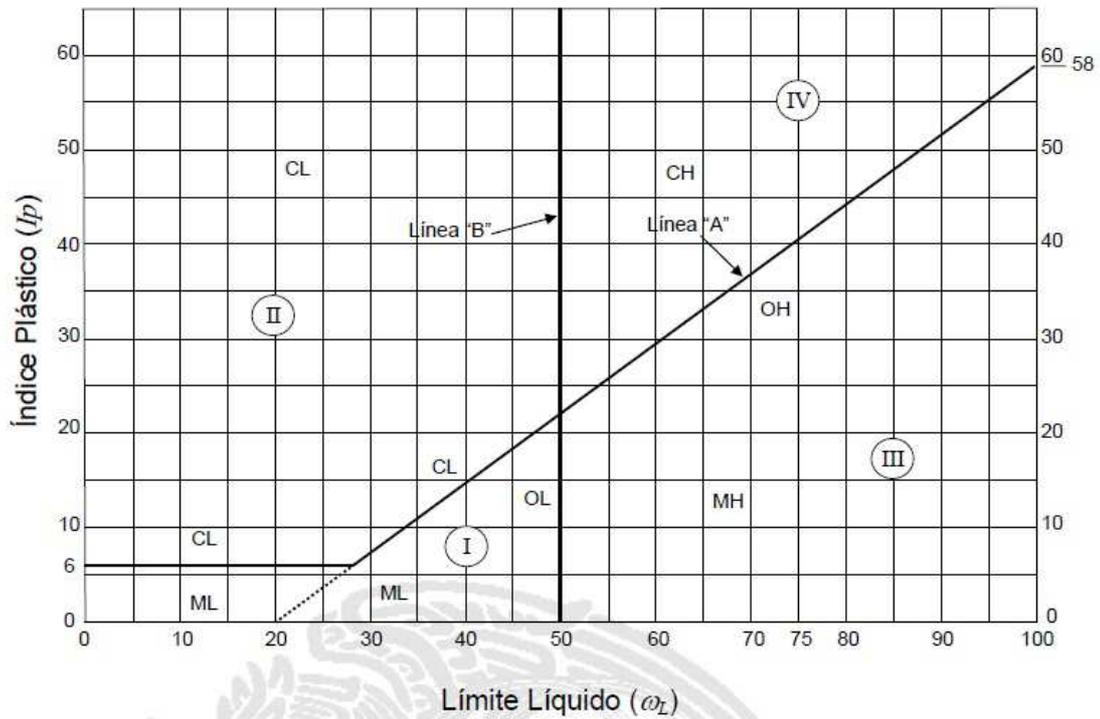


Tabla 3. Estados de consistencia del suelo.

Incremento del contenido de humedad (%)	Límite líquido	Estado líquido: Fácilmente deformable. Tiene una consistencia similar a mantequilla suave.
	Límite plástico	Estado plástico: Se deforma sin romperse. Tiene una consistencia de mantequilla suave a masilla en endurecimiento.
	Límite de contracción	Estado semisólido: Al deformarse no recupera su forma inicial. Su consistencia es quebradiza similar a un queso.
		Estado sólido: Se rompe antes de deformarse. Su consistencia es similar a un dulce duro.