

Correlaciones entre métodos convencionales y alternativos para estimar la resistencia y compactación de suelo



Abstract

The present work has as objective to establish correlations among results of tests of soils for conventional and alternative methods. This with the purpose of offering an appropriate use of some alternative methods for tests in the soils to little depth, being a tool more with which the engineer inspector counts to speed up and to control a field project.

The teams used to carry out the alternative methods in this study are known as: dynamic cone, proving ring penetrometer and impact test soil.

With these teams correlations have settled down on the part of the makers that are necessary to validate in our means. For the elaboration of the project the following ones were contemplated: for the dynamic cone the test SPT; for the proving ring penetrometer the test CBR and density in place (Proctor); finally for the impact test soil the density in place (Proctor) and the CBR.

To check the reaches of the teams before mentioned it was necessary to choose three soil types, which were subjected to rehearsals with this teams (according to their use manuals and norms ASTM) and the conventional rehearsals according to the norms of the American Society Testing and Materials (ASTM). With the obtained data it was possible to elaborate curved that allowed to settle down and to check the existent correlation among these.

Also settles down as an objective, the power to provide of the translation from the use manuals to the different teams.

Key words: dynamic cone, proving ring penetrometer, impact test soil, SPT, CBR, Proctor.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo establecer correlaciones entre resultados de pruebas de suelos por métodos convencionales y alternativos. Esto con el fin de procurar un uso adecuado de algunos métodos alternativos para pruebas en los suelos a poca profundidad, siendo una herramienta más con que cuenta el ingeniero inspector para agilizar y controlar un proyecto de campo.

Los equipos utilizados para realizar los métodos alternativos en este estudio son conocidos como: cono dinámico, penetrómetro con anillo de carga y compactómetro electrónico.

Con estos equipos se han establecido correlaciones por parte de los fabricantes, que son necesarias validar en nuestro medio. Para la elaboración del proyecto se contemplaron las siguientes: para el cono dinámico la prueba SPT; para el penetrómetro con anillo de carga la prueba CBR y densidad en sitio (Proctor); finalmente para el compactómetro electrónico la densidad en sitio (Proctor) y el CBR.

Para comprobar los alcances de los equipos antes mencionados fue necesario elegir tres tipos de suelo, los cuales fueron sometidos a ensayos con dichos equipos (de acuerdo a sus manuales de uso y normas ASTM) y los ensayos convencionales según las normas de la American Society Testing and Materials (ASTM). Con los datos obtenidos fue posible elaborar curvas que permitieron establecer y comprobar la correlación existente entre estos.

También se establece como un objetivo, el poder proveer de la traducción de los manuales de uso a los diferentes equipos.

Palabras claves: cono dinámico, penetrómetro con anillo de carga, compactómetro electrónico, SPT, CBR, Proctor.

Correlaciones entre métodos convencionales y alternativos para estimar la resistencia y compactación de suelos

Dania Navarro Martínez
Francisco Gómez Gómez

Febrero del 2004

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO.....	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	2
INTRODUCCION.....	6
MARCO TEORICO.....	7
METODOLOGIA.....	15
RESULTADOS.....	23
ANALISIS DE RESULTADOS.....	28
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES.....	48
APENDICES.....	49
REFERENCIAS.....	50

Prefacio

El suelo es un material complejo que varía sus propiedades de acuerdo a su formación y composición mineralógica, lo que hace posible que exista una gran cantidad de comportamientos distintos que no permite establecer rangos estrictos en los mismos. Es de tomar en cuenta también que la mecánica de suelos (rama dedicada a establecer las propiedades de dicho material) se formó a principios del siglo pasado y que muchas de sus suposiciones están basadas en la experimentación.

Por medio de la normalización de métodos de prueba, se ha hecho posible establecer valores que son aceptados de uso universal, para manejar las variables que podría presentar un tipo de suelo. El manejo adecuado de estas variables colabora con la correcta ejecución de un proyecto.

En algunos tipos de obras donde la obtención de estos datos puede volverse tediosa, por la cantidad de pruebas a realizar y el tiempo consumido, pueden utilizarse métodos alternativos que den lugar a una estimación bastante cercana a lo esperado.

Por lo tanto, el uso de equipos como los que se analizaron en este trabajo, se convierten en una herramienta eficaz para el manejo de los recursos; ya que aportan mayores criterios al ingeniero de campo en el proceso de dirección e inspección. Algunas características básicas de los equipos se detallan en los siguientes párrafos.

El cono dinámico es una herramienta útil para el control de la construcción y exploraciones de campo para estructuras pequeñas donde no se cuenta con un presupuesto para realizar un estudio de suelo que requiera equipo de perforación especializado o en donde no hay acceso para una máquina perforadora.

El penetrómetro con anillo de carga es una herramienta que puede ser usada en un sin número de aplicaciones. Se utiliza de una forma rápida para determinar la resistencia a la penetración de los suelos en trabajos de

exploración poco profundos. Los ensayos de campo y laboratorio con este equipo han probado ser una herramienta muy útil y rápida, para revisar y reemplazar otros ensayos que consumen mucho tiempo.

El compactómetro electrónico se convierte en una alternativa práctica, rápida y de fácil manipulación, para determinar la densidad en sitio y establecer una relación con el CBR. Es igualmente factible para uso en sitio o en el laboratorio.

Recientemente el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO), adquirió equipos alternativos para la realización de ensayos de suelos como los son el cono dinámico, el penetrómetro con anillo de carga y el compactómetro electrónico. En ese sentido el objetivo de este trabajo fue establecer correlaciones entre métodos convencionales y los alternativos utilizando los equipos adquiridos para estimar la resistencia y compactación de los suelos. Dichas correlaciones pretenden ser de uso general para cualquier institución o profesional que necesite utilizar los equipos antes mencionados.

Un agradecimiento a las instituciones y personas que hicieron posible la realización de este proyecto. Al Instituto Tecnológico de Costa Rica, por medio del CIVCO. Al profesor Ing. Roberto Vega Guzmán por la guía prestada durante el trabajo, a los técnicos del laboratorio: Juan Carlos Coto, Heiner Navarro Mena y Eduardo Arce Mena por la ayuda incondicional.

Resumen ejecutivo

El proyecto se enmarcó en el área de la mecánica de suelos, en lo referente a la evaluación de pruebas de campo y laboratorio. Se pretendió establecer correlaciones entre métodos convencionales y alternativos para estimar la resistencia y compactación de los suelos.

Los equipos empleados en este estudio son: cono dinámico, penetrómetro con anillo de carga y compactómetro electrónico.

El cono dinámico es una herramienta útil para el control del proceso constructivo de estructuras pequeñas, donde no se cuenta con un presupuesto, para realizar un estudio de suelo que requiera equipo de perforación especializado o en donde no hay acceso para una máquina perforadora.

El penetrómetro con anillo de carga es una herramienta que puede ser usada en un sin número de aplicaciones. Se utiliza de una forma rápida, para determinar la resistencia a la penetración de los suelos en trabajos de exploración poco profundos. Los ensayos de campo y laboratorio con este equipo, han probado ser una herramienta muy útil y rápida para revisar y reemplazar a otros ensayos que consumen mucho tiempo y mayor costo.

El compactómetro electrónico se convierte en una alternativa práctica, rápida y de fácil manipulación, para determinar la densidad en sitio y establecer una relación con el CBR. Es igualmente factible para uso in situ o en laboratorio.

En el desarrollo del proyecto se realizaron las siguientes correlaciones entre equipos, de acuerdo a la información ofrecida por los fabricantes.

Cuadro RE1: Correlaciones propuestas por los fabricantes para los equipos alternativos.

Equipo de campo	Correlación con
Cono dinámico	SPT
Anillo de carga	Proctor y CBR
Compactómetro	Proctor y CBR

Los equipos analizados, se convierten en una herramienta eficaz para el manejo de los recursos; ya que aportan mayores criterios al ingeniero de campo en el proceso de dirección e inspección. El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en cuatro etapas:

- I. Recolección de las muestras de suelos y realización de los ensayos de SPT y cono dinámico.
En esta etapa se recolectaron muestras de suelo de tres lugares diferentes para las pruebas de laboratorio y a la vez se realizaron las pruebas de penetración con el SPT y cono dinámico.
- II. Clasificación de las diferentes muestras recolectadas en el sitio.
Una vez establecida la clasificación de las tres muestras, se procedió a realizar las pruebas convencionales (Proctor modificado y CBR); luego se procedió a realizar los ensayos con los equipos alternativos (penetrómetro con anillo de carga y compactómetro electrónico).
- III. Realización de los ensayos convencionales (Proctor modificado, CBR) y con los equipos de campo (penetrómetro con anillo de carga y compactómetro electrónico).
Con las muestras recolectadas en la fase anterior se realizaron las pruebas necesarias para su clasificación: análisis de límites de consistencia (Atterberg) y granulométrico.

- IV. Análisis de resultados para determinar y establecer las correlaciones correspondientes entre los resultados.

Los métodos de prueba convencionales se realizaron de acuerdo a las normas ASTM. Las pruebas con los equipos de campo se realizaron según los manuales y normas ASTM.

Ensayos realizados

En los siguientes cuadros se presenta un resumen de los ensayos realizados. La numeración utilizada para los suelos fue del número 1 al 7.

Cuadro RE2: Pruebas de clasificación de suelos y por métodos convencionales.

Prueba realizada	Lugar	Muestra	N° de pruebas
Granulometría	ITCR	1	1
		2	1
		3	1
		4	1
	Tobosi	5	1
	Tablón	6	1
		7	1
Límites de consistencia	ITCR	1	1
		2	1
		3	1
		4	1
	Tobosi	5	1
	Tablón	6	1
		7	1
SPT	ITCR	1	1
		2	1
		3	1
	Tobosi	5	1
	Tablón	7	1
Proctor modificado	ITCR	4	1
	Tobosi	5	1
	Tablón	6	1
CBR	ITCR	4	2
	Tobosi	5	2
	Tablón	6	2

Cuadro RE3: Pruebas con métodos alternativos

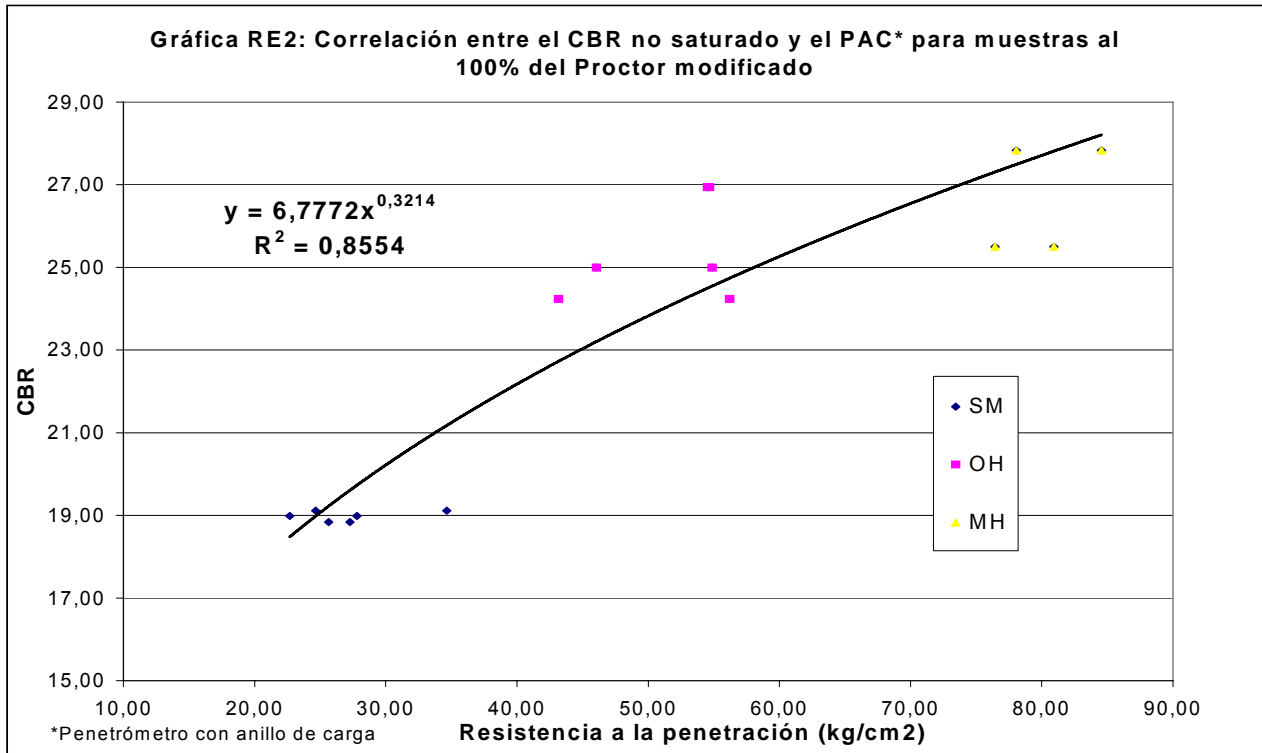
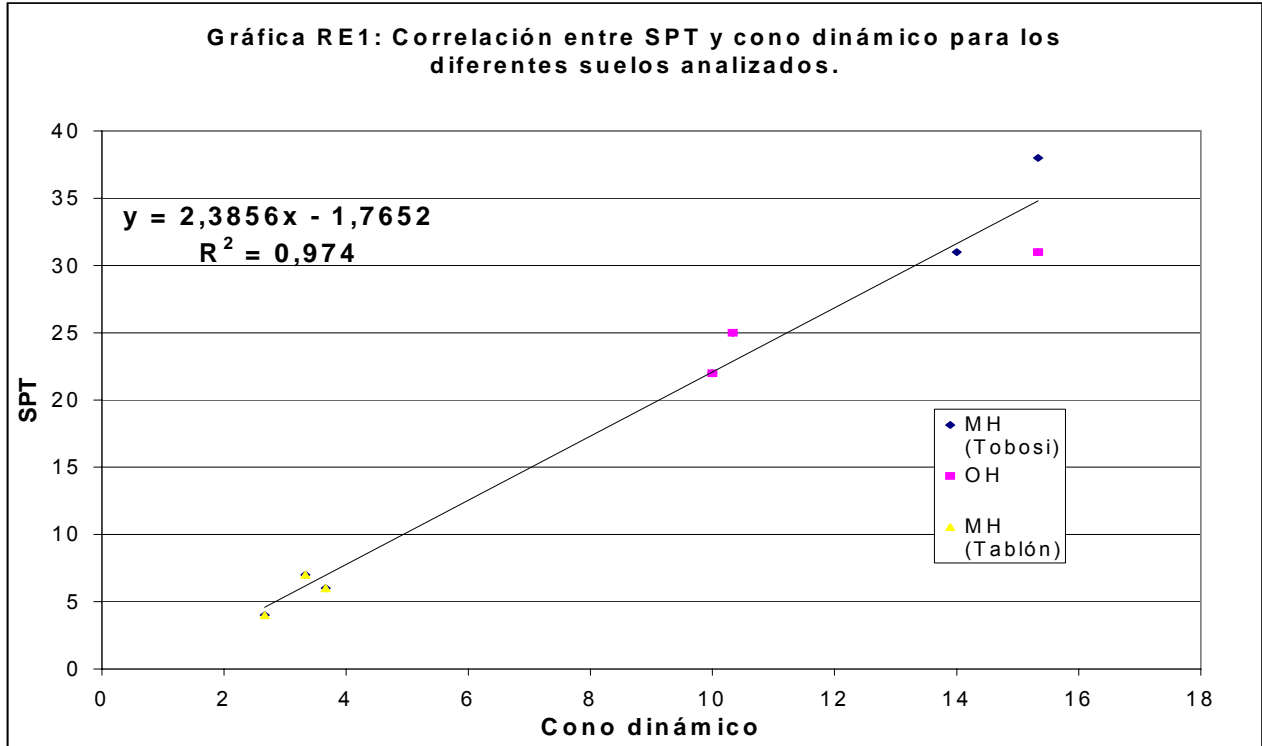
Equipo	Correlac. Con	Muestra	N° de Pruebas	
Cono dinámico.	SPT	1	3	
		2	3	
		3	3	
		5	9	
		7	9	
Penet. con anillo de carga	Densidad seca máxima Y CBR	4	6	
		5	6	
		6	6	
Comp. electrónico	Densidad seca máxima y CBR	4	7	
		5	7	
		6	7	7
			8	7

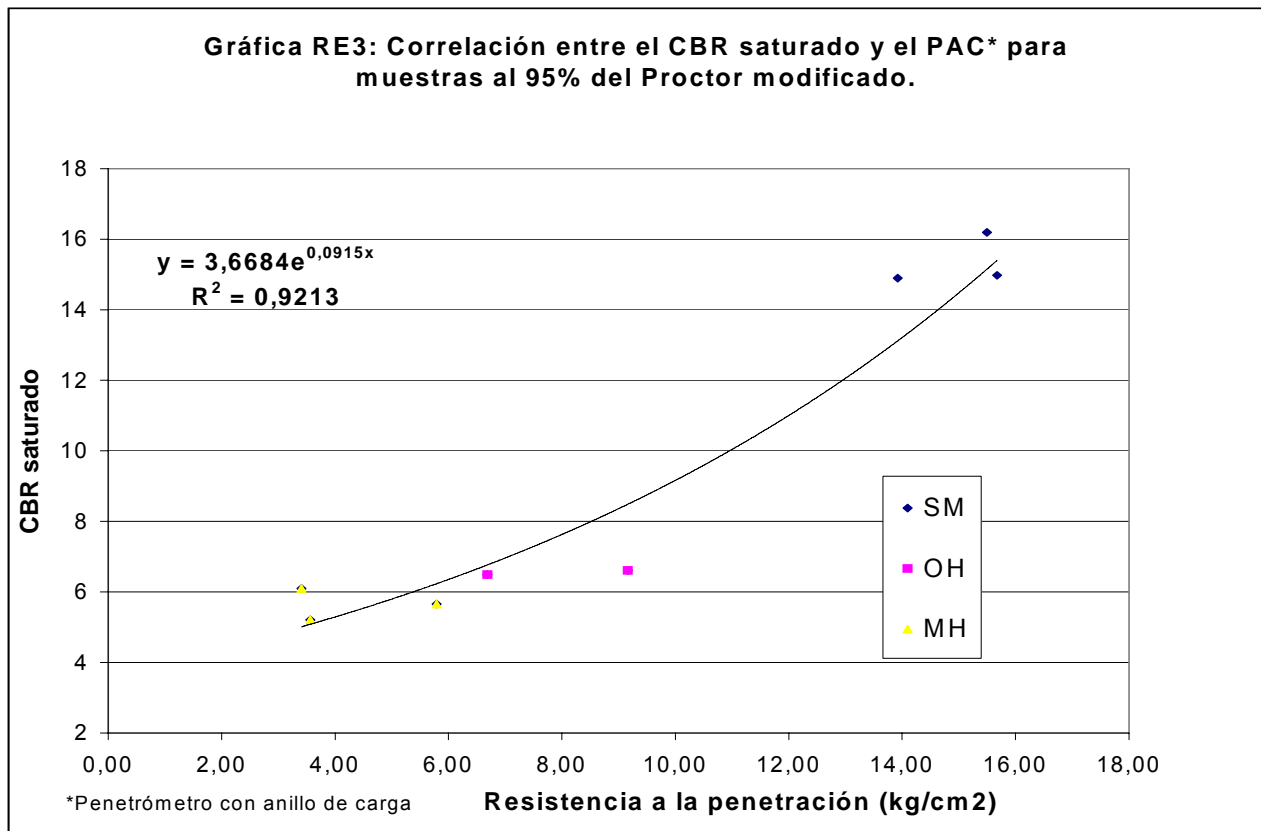
De la clasificación se obtuvieron los siguientes tipos de suelos.

Cuadro RE4: Tipos de suelo de las muestras.

Número de muestra	Profundidad (m)	Tipo de suelo
1	0,50	OH
2	0,95	OH
3	1,40	OH
4	0,25	OH
5	0,50	MH
6	0,50	SM
7	0,50	MH

Con los resultados de las pruebas se realizaron gráficas y se obtuvieron las correlaciones deseadas; de las cuales se muestran las más importantes para efectos del presente trabajo.





Las gráficas anteriores mostraron un comportamiento de los resultados similar a lo esperado, otorgando una mayor confiabilidad a las pruebas que se realicen con los equipos alternativos.

Entre las conclusiones del trabajo realizado se destacan las siguientes:

- El cono dinámico es una herramienta confiable para establecer correlaciones con el ensayo SPT, ya que con la función obtenida ($y=2,3856x-1,7652$), se obtuvo un coeficiente de correlación de correlación $R^2=0,974$. Tal y como se muestra en la gráfica RE1.
- Se presenta un buen comportamiento al relacionar el penetrómetro con anillo de carga (para moldes al 100% del Proctor modificado) con el CBR no saturado, según la ecuación que se obtuvo $y=6,7772x^{0,3214}$ de la cual se obtuvo un coeficiente de correlación $R^2=0,8554$, que se refleja en la gráfica RE2.
- El penetrómetro con anillo de carga (para moldes al 95% del Proctor modificado y sumergidos) demostró ser eficaz para lograr correlaciones con el CBR saturado a partir de la ecuación $y= 3,6684e^{0,0915x}$, obteniéndose un coeficiente de correlación $R^2=0,9213$, según se observó en la gráfica RE3.
- Con el compactómetro electrónico no fue posible establecer correlaciones con los diferentes tipos de suelos en forma generalizada, sin embargo fue posible establecer buenas correlaciones de acuerdo a la norma ASTM D-5874, pero analizando las muestras en forma individual.

Introducción

El proyecto se enmarcó en el área de la mecánica de suelos, en lo referente a la evaluación de pruebas de campo y laboratorio. Con los resultados se pretendió establecer correlaciones entre ensayos según métodos convencionales (SPT, Proctor y CBR) y ensayos con métodos alternativos (cono dinámico, penetrómetro con anillo de carga y compactómetro electrónico) para estimar la resistencia y compactación de los suelos.

Objetivo general

Establecer correlaciones entre resultados de pruebas de suelos por métodos convencionales y con equipos alternativos.

Objetivos específicos

1. Realizar ensayos de resistencia y compactación con los métodos convencionales y alternativos.
2. Establecer correlaciones entre los resultados de los ensayos a efecto de establecer curvas de correlación.
3. Por medio de las correlaciones, proporcionar una herramienta útil a la hora de evaluar resultados de pruebas de campo.
4. Realizar la traducción de los manuales de los equipos utilizados.

De las correlaciones propuestas por el fabricante, se realizaron las siguientes.

Cuadro 11: Correlaciones analizadas de los equipos alternativos.

Equipo alternativo	Correlación con
Cono dinámico	SPT
Anillo de carga	Proctor y CBR
Compactómetro	Proctor y CBR

El proyecto se desarrolló en cuatro etapas:

1. Recolección de las muestras y realización de los ensayos del SPT y cono dinámico.
2. Clasificación de las diferentes muestras recolectadas en el sitio.
3. Realización de los ensayos convencionales (Proctor modificado y CBR) y con los equipos de campo (penetrómetro con anillo de carga y compactómetro).
4. Análisis de resultados y establecimiento de correlaciones

Se espera que los resultados presentados en este documento sirvan como una guía para el ingeniero inspector que le permita evaluar adecuadamente y tomar las decisiones pertinentes. Para facilitar la comprensión de los equipos, se adjuntan en los apéndices, los manuales de uso de los mismos.

Marco Teórico

Métodos convencionales

Penetración estándar (SPT)

El ensayo de penetración dinámica se realiza en el interior de sondeos durante la perforación. Permite obtener un valor N de resistencia a la penetración que puede ser correlacionado con parámetros geotécnicos. En el ensayo también se obtiene una muestra inalterada, para realizar ensayos de identificación en laboratorio.

El ensayo SPT puede ejecutarse prácticamente en todo tipo de suelos, incluso en roca muy alterada, aunque es en los suelos finos donde se realiza preferentemente.

Este se debe hincar en el terreno 45 cm, contando el número de golpes necesarios para hincar tramos de 15 cm. El golpeo para la hincada se realiza con una masa de 63,5 kg, cayendo libremente desde una altura de 76 cm sobre una cabeza de golpeo o yunque. La lectura del golpeo del primer tramo no se debe tomar en cuenta, por la alteración del suelo o derrumbes de las paredes. La suma de los valores de golpeo, segundo y tercero como promedio es el valor N, denominado también como la resistencia a la penetración estándar. En ocasiones dada la resistencia del terreno, no se consigue el avance del muestreador. En estos casos, el ensayo se suspende cuando se exceden 100 golpes para avanzar un tramo de 15 cm, y se considera un rechazo.

El resultado de los ensayos SPT puede verse afectado por factores como:

- Preparación y calidad del sondeo: limpieza y estabilidad de las paredes de la perforación.

- Longitud del varillaje y diámetro del sondeo: condicionan el peso del elemento a hincar y la fricción con las paredes del sondeo.

- Dispositivo de golpeo: puede ser manual o automático, existiendo diferencias notables entre los resultados de ambos. Deben emplearse dispositivos automáticos; pues garantizan la aplicación de la misma energía de impacto en todos los casos.

Compactación de suelos (Proctor)

Compactación es el término que se utiliza para describir el proceso de densificación del material mediante medios mecánicos.

El grado de compactación de un suelo o de un relleno se mide cuantitativamente mediante la densidad seca. La densidad seca que se obtiene mediante un proceso de compactación depende de la energía utilizada durante la compactación, denominada energía de compactación, y también depende del contenido de humedad durante la misma.

Pruebas de compactación

Actualmente existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en el laboratorio unas condiciones dadas de compactación de campo. Además de los distintos factores que gobiernan la compactación de los suelos, uno de los más conocidos es el denominado como prueba Proctor. La prueba consiste en compactar el suelo en tres o cinco capas, dentro de un molde de dimensiones y forma especificadas, por medio de golpes de un pistón, también especificado, que se deja caer libremente desde una altura prefijada.

Con este método se obtiene una energía de compactación que es equivalente a:

$$E_e = Nnwh/V$$

donde:

E_e = energía específica

N= número de golpes por capa

n= número de capas de suelo

w= peso del pistón

h= altura de caída libre del pisón

V= volumen del suelo compactado.

CBR (valor relativo de soporte)

El valor relativo de soporte se obtiene de una prueba de penetración, en la cual un vástago de 19,4 cm² de área se hace penetrar en un espécimen de suelo a razón de 0,127 cm/min. Se mide la carga aplicada para penetraciones que varíen en 0,25cm. El CBR se define como la relación expresada en porcentaje, entre la presión necesaria para penetrar los primeros 0,25cm y la presión para tener la misma penetración en un material arbitrario, adoptado como patrón, que es una piedra triturada en la cual se tienen las presiones en el vástago para las penetraciones indicadas en la tabla.

Cuadro MT1: Presiones en el vástago para el material patrón

Penetración (cm)	Presión en el vástago (kg/cm ²)
0,25	70
0,50	105
0,75	133
1,00	161
1,25	182

Como se menciono; la penetración que se usa para calcular el CBR es la de los primeros 0,25cm. Como regla general, el CBR disminuye cuando la penetración en que se hace el cálculo es mayor, pero a veces si se calcula con la penetración 0,5cm resulta mayor que el calculado con la penetración 0,25cm. En tal caso, se adopta como CBR el valor obtenido con la penetración 0,5cm.

Métodos alternativos

Cono dinámico

El cono dinámico es una herramienta útil para el control del proceso constructivo de estructuras pequeñas, donde no se cuenta con un presupuesto para realizar un estudio de suelo, que requiera equipo de perforación especializado o en donde no hay acceso para una máquina perforadora.

Características

El equipo utiliza un anillo de acero de 6,82 kg de peso, que se desploma a 51 cm por la barra tipo E (ver figura MT1). La punta del cono es alargada para minimizar la resistencia de la barra durante la prueba.

Procedimiento

El ensayo de penetración se hace a través de un agujero hecho con un barrenador de 10 a 15 cm de diámetro, el cual se usa para extraer la muestra que sirve para identificar el suelo, esto es esencial para conocer sobre el tipo de material en que se trabaja y verificar que el estrato sea homogéneo. Después de hacer una perforación de 15 cm de diámetro y a la profundidad deseada (preferiblemente a cada 50 cm desde la superficie) se realiza la prueba. La punta del cono debe hincarse 5 cm en el fondo del agujero para estar seguro, que el cono está completamente empotrado (ver figura M7). La punta del cono debe penetrar 4,4 cm adicionales a los 5 cm de hincas, esto provocado por la caída de 51cm del martillo. Estos golpes se cuentan y se anotan, esto representa según el cono el número "N".

Si es necesario se realiza una segunda y tercera prueba con incrementos adicionales de 4,4 cm en la misma perforación, representando números "N" adicionales. Aunque los fabricantes no consideran totalmente necesario realizar una segunda y tercera prueba con el cono; se considera necesario siempre que se realice este ensayo, tomar las tres lecturas del número "N", para tener una mejor certeza de los resultados.

Esto también permite descartar algún valor en donde se pudo fallar al contar el número de golpes, o no se llevó a cabo adecuadamente el procedimiento.

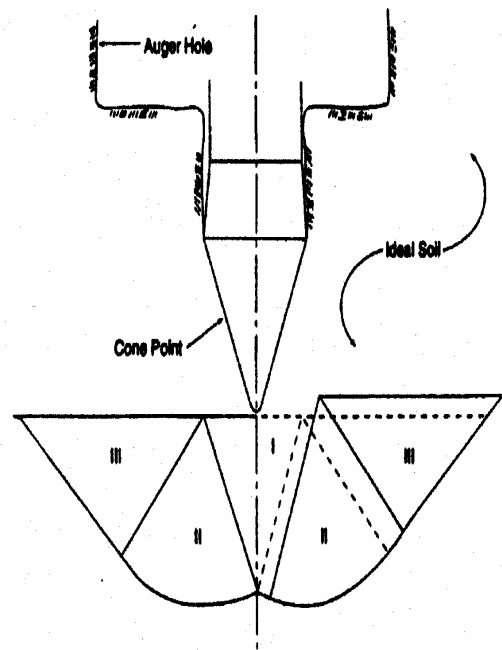
Antes de realizar la prueba es necesario asegurarse que la superficie de hincada de la punta del cono esté libre de material suelto, además, que el instrumento se encuentre vertical y centrado en el agujero, para evitar datos erróneos.

Fundamento teórico

Básicamente el aspecto teórico de las penetraciones sucesivas causadas por la caída del martillo; perfila el estudio clásico de la presión de la falla por la capacidad local y por cortante. Antes de que la punta del cono se introduzca en el sitio del ensayo, el suelo está en un estado de equilibrio elástico. Cuando la punta del cono es introducida dentro de la superficie de prueba, el suelo pasa a un estado de equilibrio plástico (zona I). Asumiendo un suelo ideal y una punta del cono lisa, la zona de equilibrio plástico es subdividida en una zona cono-formada (más tarde desplazada por la punta del cono), una zona anular de corte radial que emana de los bordes exteriores del cono y una zona anular pasiva de Rankine.

En las líneas punteadas al lado derecho de la figura, se indican los límites de la zona 1 y 3 al momento de falla, o movimiento del penetrómetro y las líneas sólidas representan los mismos límites después que la punta del cono está dentro del nivel de prueba. De esta se describe en forma general la condición que existe mientras que la punta del cono penetra; y esto no significa ser una racionalización completa o precisa.

Como se mencionó antes no es necesario y casi imposible formar una hipótesis del funcionamiento de la penetración de la punta del cono, por el mecanismo de las variaciones macro y micro dentro de una masa de suelo.



Fuente: Manual del cono dinámico (ver apéndice III).

Figura MT2: Punta del cono dinámico en forma generalizada.

Limitaciones

Más allá de esta profundidad (13,2 cm), el efecto de fricción en la punta del cono puede ser mayor y la forma del cortante puede alterar la zona, afectando el número de golpes contados.

Es más eficiente usar el penetrómetro en agujeros con profundidades de 4,5 a 6,0 m. Más allá de esto es difícil manipular el peso de la barra y también es posible, que los golpes contados para determinar la resistencia a la penetración sean afectados por la pérdida de energía dinámica debida a la inercia de la barra.

Penetrómetro con anillo de carga

El penetrómetro con anillo de carga es una herramienta que puede ser usada en un sin número de aplicaciones. Se utiliza de una forma rápida para determinar la resistencia a la penetración de los suelos en trabajos de exploración poco profundos. Los ensayos de

campo y laboratorio con este equipo han probado ser una herramienta muy útil y rápida para revisar y reemplazar otros ensayos que consumen mucho tiempo.

Características

El instrumento consta de un mango o agarradera (tipo T), una barra de penetración de 45 cm, una barra de extensión de 90 cm, graduada cada 15 cm, un anillo de medición de 113 kg de capacidad y una punta cónica removible. La punta del cono tiene un área en la base de 6,34 cm² y un área cónica de 12,50 cm². Contiene un indicador que tiene un máximo de lectura (113 kg), un freno que mantiene la lectura hasta que este sea liberado manualmente (ver figura MT3).

Procedimiento

Primeramente se debe seleccionar y limpiar el sitio para hacer el ensayo; de manera que la superficie esté totalmente despejada. Realizado lo anterior, se debe colocar el equipo verticalmente y el indicador se posiciona en cero. Luego se introduce la punta del cono a velocidad constante, hasta que la parte superior del cono quede bajo la superficie. En este instante se obtiene un valor de resistencia a la penetración. La barra viene con divisiones a cada 15 cm, para medir la resistencia a la penetración a esas profundidades; sin embargo el usuario puede realizar el ensayo a la profundidad de interés. Después de que se obtiene la lectura a la profundidad deseada, se presiona el freno para volver el indicador a cero.

El valor obtenido por el dial del anillo es solamente un dato de número de divisiones, el valor de la resistencia se obtiene al multiplicar el número de divisiones por el factor de calibración del anillo; luego este se divide entre el área de la base del cono (ver apéndice manual penetrómetro con anillo de carga).

Fundamento Teórico

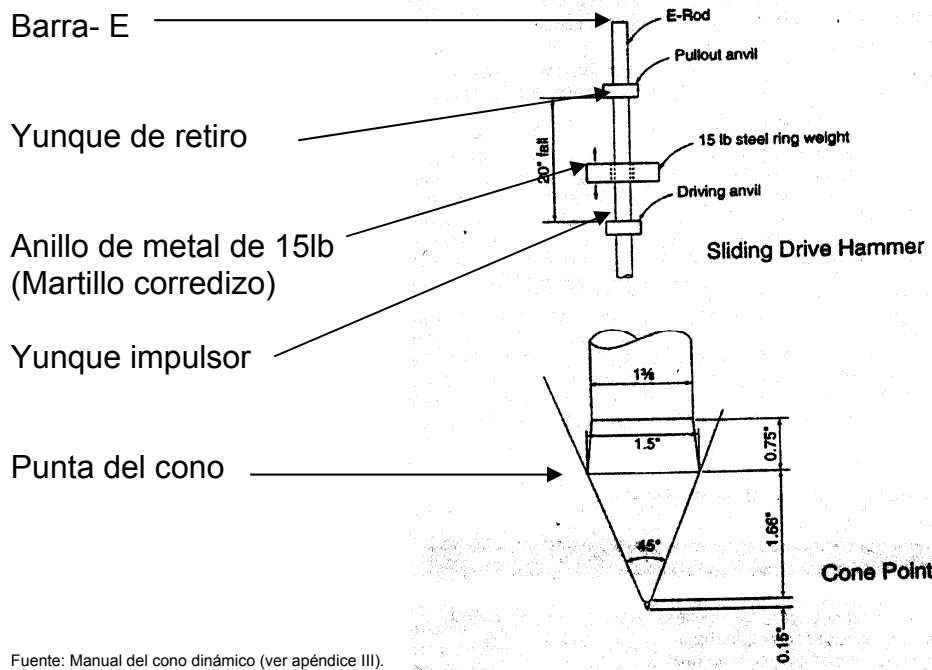
Se encuentra también su fundamento en el estudio clásico de la presión de falla por la capacidad local y por cortante. Antes de que la punta del cono se introduzca en el sitio del ensayo, el suelo está en un estado de equilibrio elástico. Cuando la punta del cono es introducida

dentro de la superficie de prueba, el suelo pasa a un estado de equilibrio plástico (zona I). Asumiendo un suelo ideal y una punta del cono lisa, la zona de equilibrio plástico es subdividida en una zona cono-formada (más tarde desplazada por la punta del cono), una zona anular de corte radial que emana de los bordes exteriores del cono y una zona anular pasiva de Rankine (Ver figura MT2).

Limitaciones

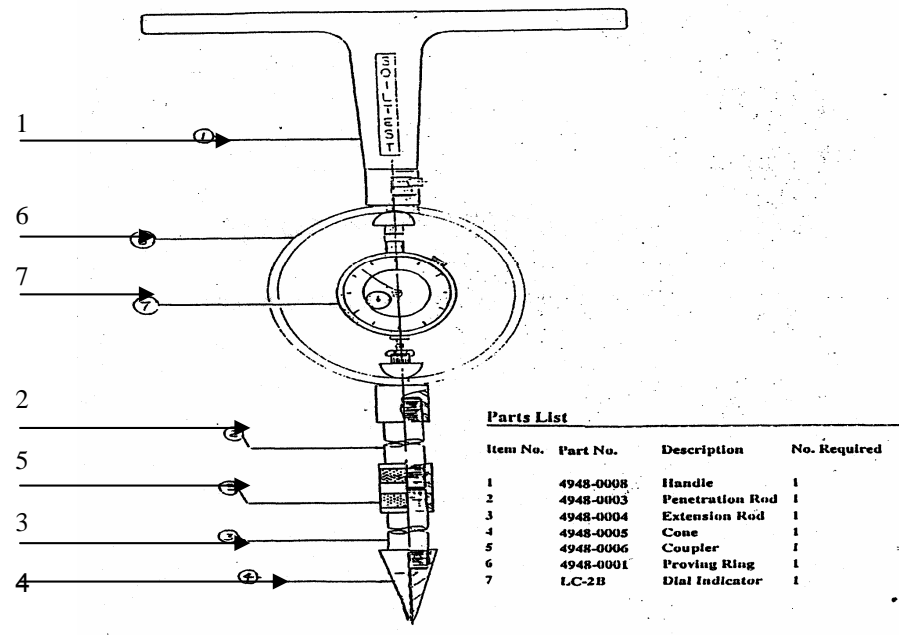
El anillo cuenta con una capacidad máxima de 113 kg.

En suelos de resistencia muy baja puede ser necesario realizar una penetración más profunda. En suelos de resistencia muy alta, donde solo puede llevarse el cono a un medio o a un cuarto de la altura (para no exceder la capacidad límite), la penetración debe ser obtenida, multiplicando la correspondiente lectura de carga por un factor apropiado (ver nota especial en el apéndice manual penetrómetro con anillo de carga).



Fuente: Manual del cono dinámico (ver apéndice III).

Figura MT1: Esquema del cono dinámico.



Fuente: Manual del penetrómetro con anillo de carga (ver apéndice IV).

Figura MT3: Esquema del penetrómetro con anillo de carga.

Partes del penetrómetro con anillo de carga:

1. Mango
2. Barra de penetración
3. Barra de extensión
4. Cono
5. Acople
6. Anillo de prueba
7. Dial indicador

Compactómetro electrónico

El compactómetro electrónico se convierte en una alternativa práctica, rápida y de fácil manipulación, para determinar la densidad en sitio y establecer una relación con el CBR. Es igualmente factible para uso en sitio o laboratorio.

El valor de impacto real (RIV), obtenido del compactómetro, tiene una aplicación directa para diseñar y construir pavimentos y una aplicación general, al mando de consolidación de terraplenes y evaluación de características de fuerza de una gama amplia de materiales, como: agregados y suelo estabilizado. El valor de impacto es una de las propiedades que se puede usar para evaluar la fuerza de una capa de suelo de aproximadamente 150 mm de espesor y por inferencia, indicar la condición de consolidación de esta capa.

Características

El equipo es de construcción simple y se compone de las siguientes partes:

La guía: con un pin de seguridad y una cadena para fijar el martillo de impacto (A).

Martillo de impacto: tiene un peso de 4,5 kg un sensor de impacto integral, un mango para subirlo y bajarlo más un adaptador para el cable de la unidad receptora (B).

La unidad receptora: tiene una pantalla de cristal líquido para el despliegue de datos, una membrana interruptora de prueba y un adaptador para la conexión del cable (C).

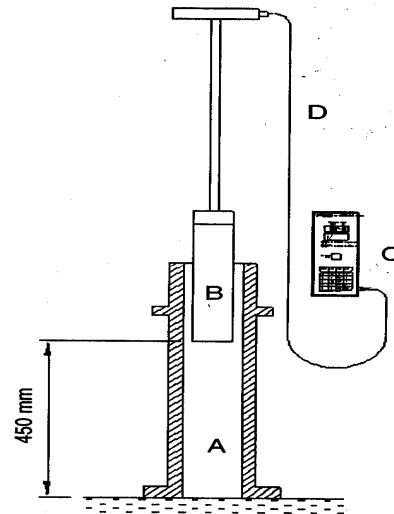
Un cable que se une de la guía a la unidad receptora (D) Además el equipo cuenta con un anillo de prueba (hule) para asegurarse que el equipo este calibrado.

Procedimiento

Se prepara el área de ensayo eliminando cualquier material suelto y proporcionando una superficie nivelada, evitando superficies donde pueda haber piedras o fragmentos aislados. Colocar firme y verticalmente la base de la guía del martillo sobre el área donde se va a realizar el ensayo. Se debe conectar el cable de la unidad receptora del mango del martillo y retirar el pin de seguridad. Apoyar la base de la guía con un pie y levantar el martillo de compactación, hasta la marca que en este se indica, esta posición permite dejar caer el martillo aproximadamente 450 mm hacia la superficie.

El valor de impacto para la superficie es determinado por el almacenamiento de cinco valores consecutivos (A-B-C-D-E), con el botón de encendido de la unidad receptora presionado durante la prueba. Soltando el botón en cualquier momento se regresará a cero para volver a repetir la prueba. El visor de la unidad receptora muestra tres dígitos: los dos primeros dígitos representan el valor de impacto, el tercer dígito representa el número de caídas llevadas a cabo.

Si los valores más bajos ocurren con los golpes subsecuentes al cuarto, esto puede ser debido a que el martillo golpea los lados de la guía o por que existe material suelto que se cae hacia la superficie de prueba.



Fuente: Manual del compactómetro electrónico (ver apéndice V).

Figura MT4: Esquema del compactómetro electrónico.



Figura MT5: Compactómetro electrónico real

Fundamento teórico

El valor de impacto obtenido del compactómetro se deriva de la desaceleración que sufre el martillo de 4,5 kg y 25 cm² de área al impactar en la superficie del suelo.

La desaceleración máxima que es el más alto de los cinco impactos sucesivos (A-B-C-D-E) se toma como el valor de impacto. El máximo valor según se ha podido demostrar a través de experimentos se produce en el cuarto impacto .

Durante las primeras caídas del martillo en la superficie se deben proporcionar valores de impacto bajos. Conforme aumentan las caídas, el suelo se compacta más produciendo un aumento en el valor de impacto, con solo pequeñas diferencias entre los valores.

El análisis de los impactos ha mostrado que el primer y segundo golpe crean una cuña apretada que se compacta; como consecuencia en el suelo se produce un aumento en la desaceleración. En general, la desaceleración

permanece prácticamente inalterada después del tercer o cuarto impacto y los impactos adicionales continúan produciendo una cantidad constante de penetración.

El valor real de impacto (D), se usa para determinar la condición final del suelo.

Limitaciones

Los valores de impacto para las caídas B,C,D,E, nunca deben ser mayor que el número de la caída anterior por una diferencia de 2.

Normalmente se visualizará la palabra "Help" en el visor de la unidad receptora; si los valores de impacto indican una alta presencia de rocas en la superficie del ensayo. También se mostrará este término, si el martillo fue dejado caer en una superficie dura, ya que esto dañaría el sensor de impacto localizado en el martillo.

Correlación y coeficiente de Pearson

El índice numérico más común usado para medir una correlación es el "coeficiente de Pearson". El coeficiente de Pearson (también llamado coeficiente de correlación del producto momento), se representa con el símbolo "R" y proporciona una medida numérica de la correlación entre dos variables.

Se define, a partir de los n pares de observaciones, mediante:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

El coeficiente de Pearson nos indica si dos variables parecen estar correlacionadas o no, la fuerza de la aparente relación y si la aparente relación es positiva o negativa. Se puede observar la interpretación en el siguiente cuadro.

Cuadro MT2: Valores del coeficiente Pearson de correlación

Coeficiente de Pearson	Grado de correlación entre las variables
R=0	Ninguna correlación
R=1	Correlación positiva perfecta
0<R<1	Correlación positiva
R=-1	Correlación negativa perfecta
-1<R<0	Correlación negativa

Su cuadrado R^2 , denominado coeficiente de determinación múltiple, puede interpretarse como el porcentaje de variabilidad de Y explicada o debida a la recta de regresión.

Cuando todos los puntos se encuentran sobre la recta de regresión estimada, “el ajuste es perfecto” y por tanto $R^2=1$.

Metodología

Etapas del proyecto

Para la elaboración del proyecto se llevaron a cabo cuatro etapas principales:

- I. Recolección de las muestras y realización de ensayos de SPT y cono dinámico.
Para esta etapa se recolectaron muestras de tres lugares diferentes (ITCR, Tobosi y Tablón) para las pruebas de laboratorio y a la vez se realizaron las pruebas de penetración con el SPT y cono dinámico.
- II. Clasificación de las diferentes muestras recolectadas en el sitio.
Con las muestras recolectadas en la fase anterior se realizaron las pruebas necesarias para su clasificación: límites de consistencia (Atterberg) y análisis granulométrico.
- III. Realización de los ensayos convencionales (Proctor modificado, CBR) y con los equipos alternativos (penetrómetro con anillo de carga y compactómetro electrónico).
Una vez establecida la clasificación de las tres muestras se procedió a realizar las pruebas convencionales (Proctor modificado y CBR); luego se procedió a efectuar los ensayos con los equipos alternativos (penetrómetro con anillo de carga y compactómetro electrónico).
- IV. Análisis de resultados para determinar y establecer las correlaciones correspondientes entre los resultados.

Los métodos de prueba convencionales se realizaron de acuerdo a las normas ASTM. Las pruebas con los métodos alternativos se realizaron de acuerdo a los manuales y normas ASTM, que hacen referencia a estos equipos.

Toma de muestras

Como un aspecto primordial a la hora de tomar una muestra, es tener una idea clara de la cantidad de pruebas que se requieren, para así poder inferir una cierta cantidad de material necesario para satisfacer el ensayo. Por lo que para realizar estos ensayos, fue necesario utilizar aproximadamente 180 kg de muestra en cada suelo analizado.

Tratamiento de las muestras

A la hora de obtener una muestra alterada del suelo, es necesario cumplir con las normas ASTM, y otorgarle un tratamiento adecuado para su correcta manipulación al momento de realizar la prueba.

Al respecto las muestras en estudio fueron sometidas a: secado al sol o mediante lámparas para lograr la pérdida de humedad. También fue necesario aplicar la técnica de cuarteo; que consiste básicamente en una homogenización y división de la muestra total; (ASTM- D-75). Una vez que se tiene el material sobre el cual se va a trabajar, es necesario si es del caso, disgregar los grumos de suelo por medio de algún tipo de energía mecánica.

Clasificación de muestras

Sistema de clasificación

Para esta investigación se trabajó bajo el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla # 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso, si más del 50% de sus partículas son gruesas; y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso son finas.

Para clasificar las muestras de acuerdo al sistema seleccionado se siguieron los siguientes procedimientos:

Análisis mecánico

Bajo ese título general se comprenden todos los métodos para la separación de un suelo en diferentes fracciones, según sus tamaños. De tales métodos existen dos que merecen atención especial: el cribado por mallas y el análisis de una suspensión del suelo con hidrómetro.

Para estas pruebas se realizó únicamente el primero, que se usa para obtener las fracciones correspondientes a los tamaños mayores del suelo; generalmente se llega así hasta el tamaño correspondiente a la malla #200 (0,074 mm). La muestra de suelos se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices de abertura descendentes, hasta la malla #200; los retenidos en cada malla se pesan y el porcentaje que representan respecto al peso de la muestra total, se suma a los porcentajes retenidos en todas las mallas de mayor tamaño; el complemento a 100% de esa cantidad da el porcentaje de suelo, que es menor al tamaño representado por la malla en cuestión. Así que puede tenerse un punto de la curva acumulativa correspondiente a cada abertura. El método se dificulta cuando estas aberturas son pequeñas y por lo tanto, el cribado a través de la malla #200 suele requerir agua para ayudar el paso de la muestra (procedimiento de lavado). Todo este procedimiento viene detallado explícitamente en la normas ASTM D421 y ASTM-D422.

Límite líquido

Para la determinación del límite líquido se utiliza una copa de bronce con una base de hule duro. La copa de bronce se deja caer sobre la base por una leva operada por una manivela. Se coloca una pasta en la copa. Se corta una ranura en el centro de la pasta del suelo, usando la herramienta de corte estándar. Luego con la leva operada por la manivela, se levanta la copa y se deja caer desde una altura de 10 mm. El contenido de agua, en porcentaje requerido, para cerrar una distancia de 12,7 mm a lo largo del fondo de la ranura a los 25 golpes se define como el límite líquido.

El límite líquido de un suelo de grano fino da el contenido de agua para el cual la resistencia cortante del suelo es aproximadamente 25 g/cm^2 ($2,5 \text{ KN/m}^2$). Es importante mencionar que para efectos de este proyecto, fue necesario realizar dos límites líquidos para cada muestra (a excepción del suelo 6); esto debido a que para poder clasificar el tipo de suelo trabajado, fue necesario realizar el límite con una humedad a temperatura ambiente y otro con la muestra seca al horno.



Figura M1: R Material utilizado para límites de Atterberg (pasando tamiz #40).



Figura M2: Realización de prueba del límite líquido.

Límite plástico

Se define como el contenido de humedad, en términos de porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollitos de 3,2 mm de diámetro, se desmoronan. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba se lleva a cabo, enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo.

El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo.

Tanto el límite plástico como el líquido se realizaron según la norma ASTM- D4318.

Ensayos realizados

El Cuadro M1 presenta un resumen de de los ensayos realizados. La numeración utilizada para los suelos fue del número 1 al 7.

Cabe mencionar que todas las pruebas se llevaron a cabo en el CIVCO ente los meses de agosto a noviembre. La numeración utilizada para los suelos fue del número 1 al 7.

Cuadro M1: Plan para la clasificación de suelos y pruebas según métodos convencionales.

Prueba realizada	Lugar	Muestra	N° de pruebas
Granulometría	ITCR	1	1
		2	1
		3	1
		4	1
	Tobosi	5	1
	Tablón	6	1
		7	1
Límites de consistencia	ITCR	1	1
		2	1
		3	1
		4	1
	Tobosi	5	1
	Tablón	6	1
		7	1
SPT	ITCR	1	1
		2	1
		3	1
	Tobosi	5	1
	Tablón	7	1
Proctor modificado	ITCR	4	1
	Tobosi	5	1
	Tablón	6	1
CBR	ITCR	4	2
	Tobosi	5	2
	Tablón	6	2

Cuadro M2: Plan de pruebas según métodos alternativos

Equipo	Correlac. Con	Muestra	N°. de Pruebas
Cono dinámico.	SPT	1	3
		2	3
		3	3
		5	9
		7	9
Penet. con anillo de carga	Densidad seca máxima Y CBR	4	6
		5	6
		6	6
Comp. electrónico	Densidad seca máxima y CBR	4	7
		5	7
		6	7

Pruebas convencionales

Una vez realizadas las pruebas de clasificación de suelos, se procedió llevar a cabo pruebas convencionales con los ensayos SPT, Proctor y CBR.

Penetración estándar (SPT)

Esta prueba se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM- 1586.

Se tomó la decisión de realizar el ensayo a las profundidades de: 0,50; 0,95 y 1,40 metros de profundidad, obteniéndose así un número “N” para cada profundidad (en totalidad tres para cada tipo de suelo).

Compactación de suelos (Proctor)

La prueba Proctor se llevó a cabo según el procedimiento descrito en la norma ASTM-D1557.

Para la realización de las pruebas de compactación se utilizó el Proctor modificado, debido a su amplio uso. En esta prueba se utiliza una energía de compactación de 2696 KN-m/m³.

Como característica de los ensayos realizados, se debe mencionar que todos los ensayos que implicaban compactación; se realizaron por medio del compactador mecánico; esto con el fin de que las muestras fueran compactadas lo más homogéneamente posible.

El material debía dejarse humedeciendo durante un tiempo mínimo de 16 horas antes de proceder a realizar la prueba. Esto último se debe; a que la curva de peso específico seco vs contenido de humedad que se obtiene de la prueba es diferente, si la prueba se efectúa partiendo de un suelo relativamente seco y se va agregando agua para obtener los diferentes porcentajes de humedades, o si se parte de un suelo húmedo que se va secando por evaporación en el laboratorio, según la prueba progresa.



Figura M3: Compactador mecánico



Figura M4: Incorporación del agua a las muestras para dejar humedeciendo durante 16 horas.



Figura M5: Preparación de especímenes para la prueba CBR.

CBR (valor relativo de soporte)

La prueba se describe detalladamente en la norma ASTM D-1883

En este caso se realizó la prueba de valor relativo de soporte, para una condición saturada y no saturada. Se utilizaron tres energías de compactación diferentes para la condición saturada y cuatro para la no saturada con la humedad óptima, obtenida de la prueba del Proctor modificado.

Cuadro M4: Energías de compactación utilizadas para realizar el CBR saturado.

Número de golpes	Energía (kN-m/m³)
12	575
30	1437
60	2874

Cuadro M5. Energía de compactación utilizada para realizar el CBR sin saturar.

Número de golpes	Energía (kN-m/m³)
30	1437
40	1916
50	2395
60	2874



Figura M6: Determinación de la resistencia a la penetración para pruebas CBR.

Pruebas Alternativas

A continuación se presentan los procedimientos necesarios para operar efectivamente los equipos para las pruebas alternativas.

Cono dinámico

La prueba se realizó en el mismo lugar (tipo de suelo), a igual profundidad y posterior al ensayo del SPT ; esto lógicamente con el fin de encontrar la mejor correlación entre ambos equipos.

De acuerdo al procedimiento de uso del equipo, se tomaron tres lecturas a cada profundidad (como se observa en la tabla M6), esto significa que se obtuvieron tres valores "N" del cono dinámico.

En el caso del suelo tipo SM, no fue posible realizar las pruebas con el cono, debido a que en el terreno existía una gran cantidad de rocas a poca profundidad, lo que podía dañar el equipo.

Cuadro M6: Pruebas realizadas con el cono dinámico.

Muestra	Profundidad (m)	Lecturas realizadas
4	0,50	3
	0,95	3
	1,40	3
5	0,50	3
	0,95	3
	1,40	3
7	0,50	3
	0,95	3
	1,40	3

Penetrómetro con anillo de carga

Para poder llevar a cabo los ensayos con el anillo, fue necesario utilizar un dispositivo mecánico, (celda de carga) que permitiera introducir a una velocidad constante (10 mm/min) la punta del penetrómetro. Por la dificultad de armar en sitio un dispositivo de esta clase, las pruebas no se llevaron a cabo en el campo, sino más bien en el laboratorio, en donde reproducir las condiciones necesarias es mucho más sencillo.

Con este dispositivo se buscaba establecer una relación con los ensayos CBR y

Proctor modificado, por lo que se realizaron ensayos a 18 moldes (distribuidos según la tabla M7); nueve de los cuales fueron moldeados al 95% del Proctor modificado y sumergidos durante 96 horas (para simular condiciones críticas del sitio); los nueve restantes se moldearon al 100% del Proctor modificado. Para lograr la compactación al 95% se utilizaron diferentes número de golpes para cada muestra (tabla M8).

Cuadro M7: Pruebas realizadas con el penetrómetro con anillo de carga.

Muestra	Moldes al 95% y sumergidos	Moldes al 100%
4	3	3
5	3	3
6	3	3

En el caso de los moldes compactados al 100% del Proctor modificado, la prueba se realizó a un $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de la altura del cono, debido a la elevada resistencia que estos presentaban para la escala del instrumento.

Cuadro M8: Energía necesaria para alcanzar la compactación al 95%.

Muestra	Número de Golpes	Energía (KN-m/m ³)
4	52	2285
5	54	2372
6	46	2021



Figura M10: Moldes sumergidos para realizar la prueba con el anillo de carga y compactómetro.



Figura M12: Molde al que se le realizó la prueba con el anillo de carga.

Compactómetro electrónico

Para realizar las pruebas con el compactómetro se prepararon 21 moldes (como se observa en la tabla M9), 9 de ellos se moldearon al 95% del Proctor modificado y se sumergieron durante 96 horas (para simular condiciones críticas del sitio); el resto de los moldes se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D5874, específicamente en lo referente a la correlación del valor real de impacto, con el contenido óptimo de humedad en el Proctor. En la norma se plantea realizar moldes con diferentes energías de compactación, para un contenido de humedad (en nuestro caso el contenido de humedad fue el obtenido como el óptimo en la prueba del Proctor modificado).

Cuadro M9: Pruebas con el compactómetro electrónico.

Muestra	Moldes al 95% y sumergidos	Moldes según ASTM
4	3	4
5	3	4
6	3	4



Figura M11: Muestras sometidas al ensayo del penetrómetro con el anillo de carga.

Cuadro M10: Energía utilizada para realizar la prueba del valor real de impacto según la norma ASTM D5874.

Número de golpes	Energía (kN-m/m³)
30	1437
40	1916
50	2395
60	2874



Figura M14: Pruebas con el compactómetro electrónico.



Figura M15: Molde al que se le realizó la prueba con el compactómetro.

Resultados

En este capítulo se tabularon los resultados, tratando de seguir el mismo orden que se detalla en la metodología; primero los ensayos convencionales luego los alternativos.

Clasificación de muestras

Como primer resultado importante para el trabajo del proyecto; tenemos la clasificación de los tipos de suelo, que se utilizaron durante las pruebas.

De esta manera, se recolectaron y numeraron las muestras de la siguiente forma.

Cuadro R1: Numeración de las muestras.

Lugar	Profundidad (m)	Número de muestra
ITCR	0,50	1
	0,95	2
	1,40	3
	0,25	4
Tobosi	0,50	5
Tablón	0,50	6
	0,50	7

La razón por la cual se tomaron cuatro muestras en el Tecnológico, fue debido a que en el perfil se observaban características físicas diferentes (color , textura), lo que podía indicar un tipo de suelo diferente a las profundidades analizadas. En las otras zonas se podía ver, que el perfil se presentaba homogéneo por lo que solamente se hizo necesario tomar muestras a la profundidad de 0,5 m

Hechas las pruebas para la clasificación de los suelos, se obtuvieron los resultados para la clasificación del tipo de suelo según la clasificación SUCS.

Cuadro R2: Límites de consistencia para muestras de suelos.

Muestra	LL*	LL (seco)**	LP+
1	97,0	61,7	43,5
2	95,3	65,9	44,5
3	82,2	61,3	39,3
4	80,7	58,4	36,9
5	53,0	47,8	32,8
6	-	-	-
7	52,2	43,8	30,6

* Límite líquido

**Límite líquido seco al horno

+Límite plástico

Cuadro R3: Resultados de granulometrías

Muestra	%Retenido tamiz #200	%Pasando tamiz #200
1	13,10	86,90
2	16,76	83,24
3	15,70	84,30
4	11,98	88,02
5	22,40	77,60
6	72,80	27,20
7	46,40	53,60

De acuerdo a los límites encontrados y las granulometrías, para cada zona y prueba se encontraron los siguientes tipos de suelo.

Cuadro R4: Clasificación de las muestras.

Número de muestra	Profundidad (m)	Tipo de suelo
1	0,50	OH
2	0,95	OH
3	1,40	OH
4	0,25	OH
5	0,50	MH
6	0,50	SM
7	0,50	MH

Ensayos convencionales

SPT

En lo referente a los ensayos del SPT se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro R5: Resultados de la prueba SPT.

Tipo de suelo	Profundidad (m)	# Golpes (N)
OH	0,50-0,95	25
	0,95-1,40	31
	1,40-1,85	22
MH	0,50-0,95	38
	0,95-1,40	30
	1,40-1,85	31
MH	0,50-0,95	4
	0,95-1,40	6
	1,40-1,85	7

Proctor modificado

Como paso siguiente en la investigación fue la realización de la prueba ASTM- 1557, con el fin de establecer humedad óptima y densidad seca, para cada tipo de muestra en la energía de compactación modificada. A modo de resumen se puede presentar la siguiente tabla.

Cuadro R6: Peso específico seco y humedad óptima en el Proctor modificada para los diferentes suelos.

Suelo	γ_d (kg/m ³)	% W opt.
OH	1385	33,58
MH	1444	29,63
SM	1795	16,50

CBR

CBR saturado

De los ensayos realizados en correlación con el CBR saturado, se utilizaron muestras compactadas al 95% del Proctor modificado, por lo que de acuerdo a la compactación lograda se obtuvieron los siguientes valores de CBR.

Cuadro R7: CBR obtenido en las muestras compactadas al 95%.

Tipo de suelo	Número de molde	Compactación (%)	CBR
OH	1	95,59	6,49
	2	96,91	7,13
	3	95,84	6,61
	4	95,51	6,64
	5	96,09	6,95
	6	94,20	5,99
MH	7	95,43	5,66
	8	94,41	5,21
	9	95,40	6,10
	10	95,08	5,59
	11	95,97	6,20
	12	96,44	4,76
SM	13	96,16	16,19
	14	96,27	14,98
	15	97,95	14,90
	16	97,77	16,09
	17	97,66	16,01
	18	97,27	15,71

CBR sin saturar

De los moldes realizados en correlación al CBR insaturado, se realizaron muestras al 100% del Proctor modificado, resumiéndose en la tabla, los resultados.

Cuadro R8: CBR obtenido en las muestras al 100% del Proctor modificado.

Tipo de suelo	Número de molde	Compactación (%)	CBR
OH	9	96,88	24,23
	10	97,39	25,00
	12	98,55	26,94
MH	9	99,17	24,38
	12	100,62	25,50
	21	97,68	27,83
SM	9	99,22	18,98
	10	99,94	19,12
	21	99,61	18,84

Para poder encontrar una correlación con el valor de impacto fue necesario obtener los CBR de los moldes para diferentes comparaciones.

Cuadro R9: CBR obtenido para diferentes compactaciones.

Tipo de suelo	Número de molde	Compactación (%)	CBR
OH	10	89,13	17,77
	9	92,25	19,39
	12	94,86	21,68
	21	98,55	26,94
MH	9	94,88	24,45
	10	97,65	24,35
	12	98,82	25,13
	21	101,18	29,10
SM	9	85,79	12,99
	10	94,37	17,50
	12	96,21	17,96
	21	100,67	19,43

Ensayos Alternativos

Cono dinámico

Los resultados obtenidos de la prueba con el cono dinámico fueron:

Cuadro R10: Resultados de la prueba con el cono dinámico.

Lugar	Profundidad (m)	# Golpes
OH	0,50	12
		9
		10
	0,95	15
		15
		16
	1,40	9
		10
		11
MH	0,50	14
		15
		17
	0,95	11
		14
		15
	1,4	13
		15
		14
MH	0,5	2
		3
		3
	0,95	3
		3
		5
	1,40	2
		3
		5

Penetrómetro con anillo de carga

Se obtuvieron los siguientes resultados; producto de la prueba con el anillo de carga, para las muestras moldeadas, sin saturar al 100% del Proctor modificado y también para las muestras sumergidas compactadas al 95%.

Cuadro R9: Resistencia a la penetración de acuerdo al anillo de carga, para pruebas moldeadas sin saturar al 100% del Proctor modificado.

Tipo de suelo	# de Molde	Resistencia (kg/cm ²)
OH	9	43,19
		56,22
	10	32,76
		58,29
		46,06
		54,87
		54,69
	12	45,34
		57,12
		54,51
MH	9	70,15
		77,35
	12	80,94
		71,95
	21	84,54
		78,07
SM	9	8,66
		14,42
		27,81
		19,18
		22,69
	10	12,26
		6,51
		34,65
		24,67
	21	15,50
		4,35
		27,27
		25,66

Cuadro R10: Valores de resistencia a la penetración; según el anillo para las muestras sumergidas y compactadas al 95% del Proctor modificado.

Tipo de Suelo	# de Molde	Resistencia (kg/cm ²)
OH	1	6,69
	2	13,74
	3	9,16
MH	7	5,79
	8	3,56
	9	3,41
SM	13	15,50
	14	13,11
	15	15,68

Compactómetro electrónico

Los resultados obtenidos del compactómetro se detallan a continuación.

Cuadro R11: Valor de impacto para las muestras de los moldes sumergidos y compactados al 95% del Proctor modificado.

Tipo de Suelo	# de Molde	Valor de Impacto
OH	4	11
	5	9
	6	7
MH	10	0
	11	0
	12	0
SM	16	7
	17	8
	18	7

Cuadro R12: Valor de impacto para muestras moldeadas, bajo diferentes energías de compactación.

Suelo	# de molde	# de golpes	Valor de impacto
OH	10	30	11
	9	40	13
	12	50	15
	21	60	17
MH	9	30	13
	10	40	13
	12	50	14
	21	60	15
SM	9	30	11
	10	40	13
	12	50	14
	21	60	15

Análisis de Resultados

Se pretendió corroborar que tan certeras son las correlaciones dadas por el fabricante para los tipos de suelos analizados. Con los resultados obtenidos, lo que se buscó fue obtener comportamientos generales de los suelos. No se buscó mostrar comportamientos específicos de cada tipo de suelo; ya que esto limita a un uso de los datos obtenidos, para un determinado tipo de material. Para los casos donde no se pudo establecer una correlación satisfactoria en forma general, se mostraron comportamientos específicos.

Cono dinámico

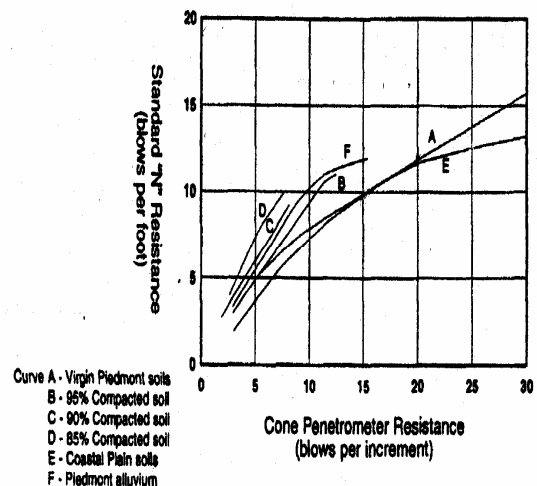
De los datos obtenidos fue posible elaborar una gráfica, en donde consideramos que se muestra claramente la relación entre el cono y el SPT para los suelos analizados.

En el suelo tipo OH y MH (Tobosi), se presentaron comportamientos similares con respecto al número de golpes obtenidos; tanto en la prueba SPT (valores que van de 22 a 38), como en el ensayo con el cono dinámico (valores que van de 9 a 17). Con el suelo MH (Tablón), se obtuvieron resultados más bajos; para el SPT (de 4 a 7 golpes), con el cono dinámico (de 2 a 5 golpes).

De acuerdo con las conclusiones del fabricante, el cono dinámico produce correlaciones buenas en un rango de 4 a 30 golpes. Por lo tanto, se puede ver que la mayoría de los datos se encuentran dentro de ese rango, lo que dio mayor confiabilidad a los resultados obtenidos.

Para el caso de este equipo, se contaba en el manual con una figura que mostraba el comportamiento que presentaba el equipo, para una variedad de condiciones. Según está figura para la mayoría de condiciones estudiadas, se

presento un comportamiento lineal, por lo que era de suponer; que los datos iban a presentar una tendencia similar. Con base a esto se realizó la gráfica.



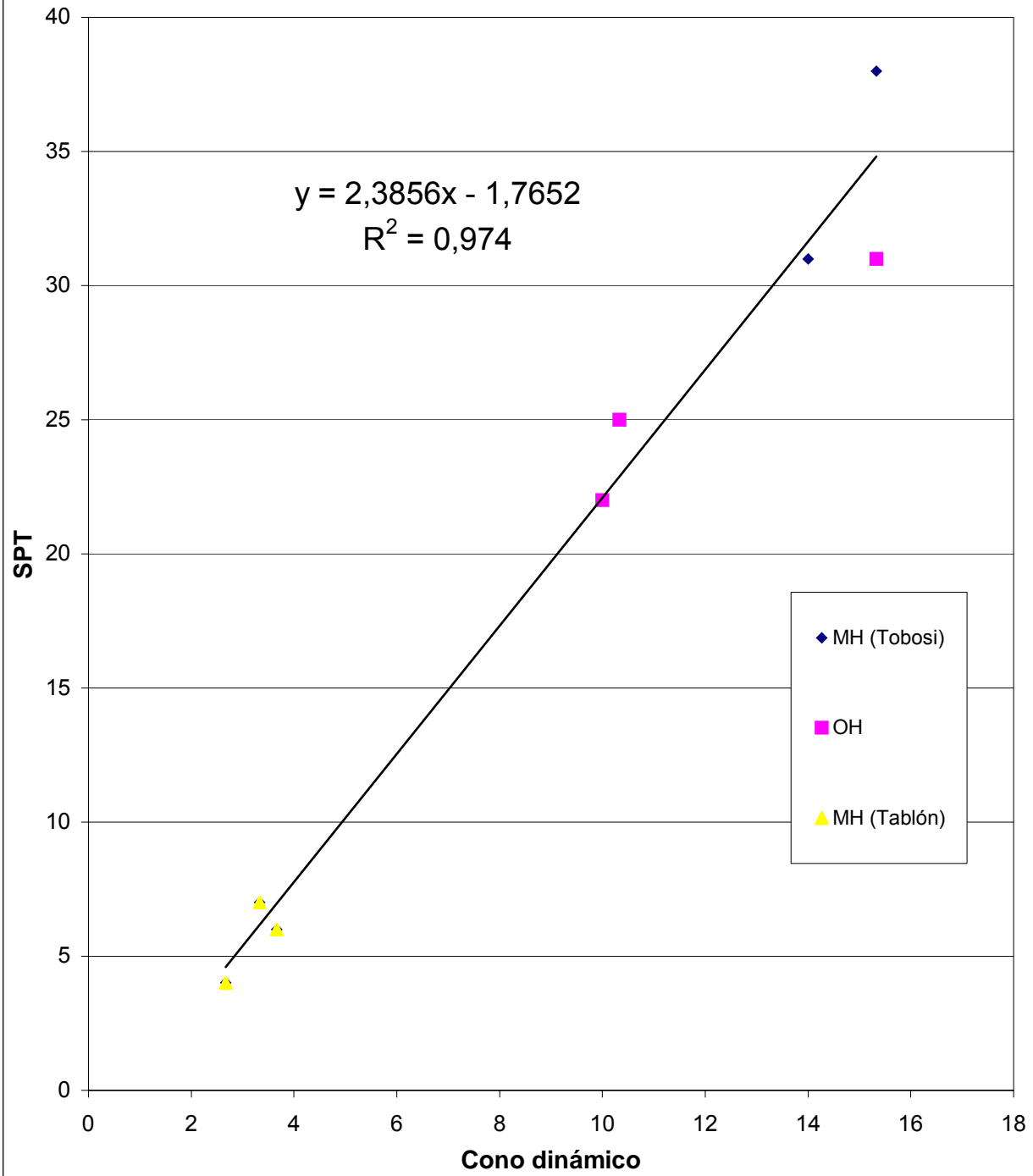
Fuente: Manual del cono dinámico (ver apéndice III).

Figura AR1: Comportamiento del cono dinámico según las pruebas realizadas por el fabricante.

La gráfica AR1 muestra la relación que existe SPT y el promedio de los valores de cada tipo de suelo, a la profundidad que se realizó el ensayo, con el cono dinámico. De la cual se obtuvo un coeficiente de correlación R^2 de 0,974.

Este valor reflejó que entre el ensayo de SPT y cono dinámico existe buena correlación para los suelos estudiados.

Gráfica AR1: Correlación entre SPT y cono dinámico para los diferentes suelos analizados.



Penetrómetro con anillo de carga

Pruebas realizadas al 100% del Proctor modificado

Es importante mencionar; que durante la realización de las pruebas, no fue posible introducir la totalidad de la altura de la punta del cono, debido a que la resistencia, que las muestras presentaban, era mayor a la capacidad de carga del anillo. En estos casos, el fabricante propone introducir la punta del cono a un $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ de la altura total, multiplicando la correspondiente carga por factores de corrección (ver apéndice manual penetrómetro con anillo de carga).

Esta simplificación no es lo más recomendado, para realizar lecturas de penetración, sin embargo, bajo estas condiciones críticas es la mejor aproximación. Las alturas escogidas para ensayo fueron $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de la altura del cono.

En los resultados obtenidos, se puede ver la variación que existe al aplicar estos factores, sin embargo; por la cantidad de pruebas realizadas, se tomó como criterio escoger por cada molde 2 lecturas del penetrómetro. En algunos moldes, solamente se pudo tomar 2 lecturas, en otros fue posible 4 o 5. Esto dependía de la condición que presentaba la muestra, después que se le realizaba la prueba. En algunos casos, se extraía la punta por medio de un movimiento más brusco, alterando una mayor área, lo que impedía realizar más pruebas. Además, la superficie ($176,7\text{cm}^2$) con que se contaba para realizar los ensayos, se consideraba muy reducida, aún más, tomando en cuenta el principio teórico de las penetraciones, donde cada vez que se introduce el cono se ve afectada una porción alrededor de la punta, limitando la cercanía entre las lecturas.

Para la realización de la gráfica fueron tomados en cuenta los siguientes valores:

Cuadro AR1: Valores escogidos por molde para realizar correlaciones.

Tipo de suelo	Número de molde	Resistencia (kg/cm ²)
OH	9	43,19
		56,22
	10	46,06
		54,87
		54,69
MH	12	54,51
		80,94
	21	76,45
		84,54
		78,07
SM	9	27,81
		22,69
	10	34,65
		24,67
	21	27,27
		25,66

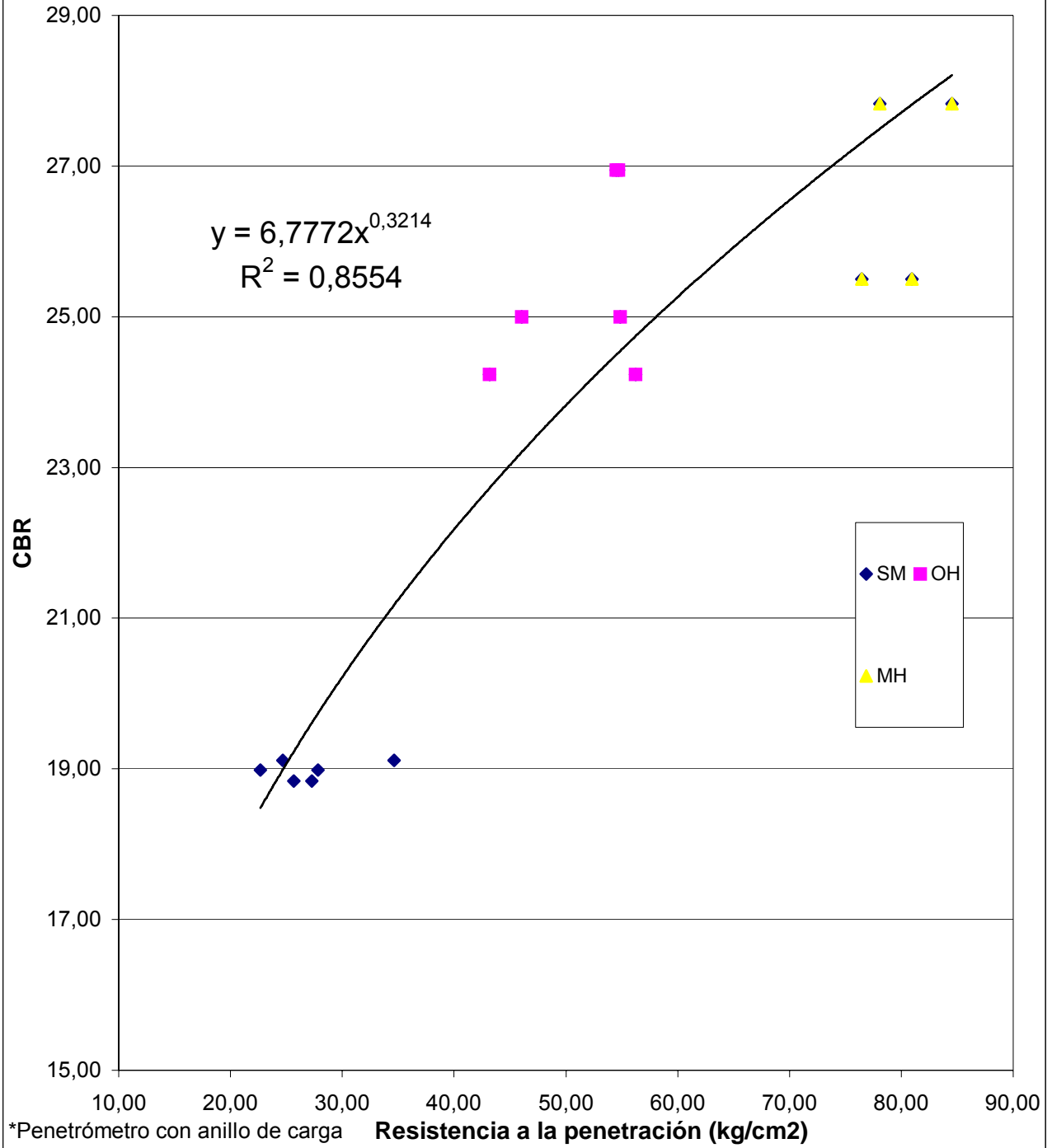
Como se puede ver en el cuadro AR1, para el suelo MH solamente se escogieron dos moldes de los tres ensayados, esto debido a que la diferencia entre la humedad óptima y la del material (molde #9) era apreciable, ya que la muestra presentó un porcentaje de humedad de 24,85 y el óptimo se encontró alrededor de 29,36; estando muy por fuera del 0,5% tolerable por la norma, esto se debió a un error a la hora de introducir la humedad a la muestra. En el caso de los dos otros moldes de este tipo de suelo, la humedad se salió un poco del rango; pero aún así, se considera de mucha importancia el poder tomar sus lecturas.

Como primera correlación se tiene la que se da entre el valor de CBR no saturado, con el valor de resistencia obtenido del anillo, ésta se puede observar en la gráfica AR2. El coeficiente R^2 obtenido es de 0,8554.

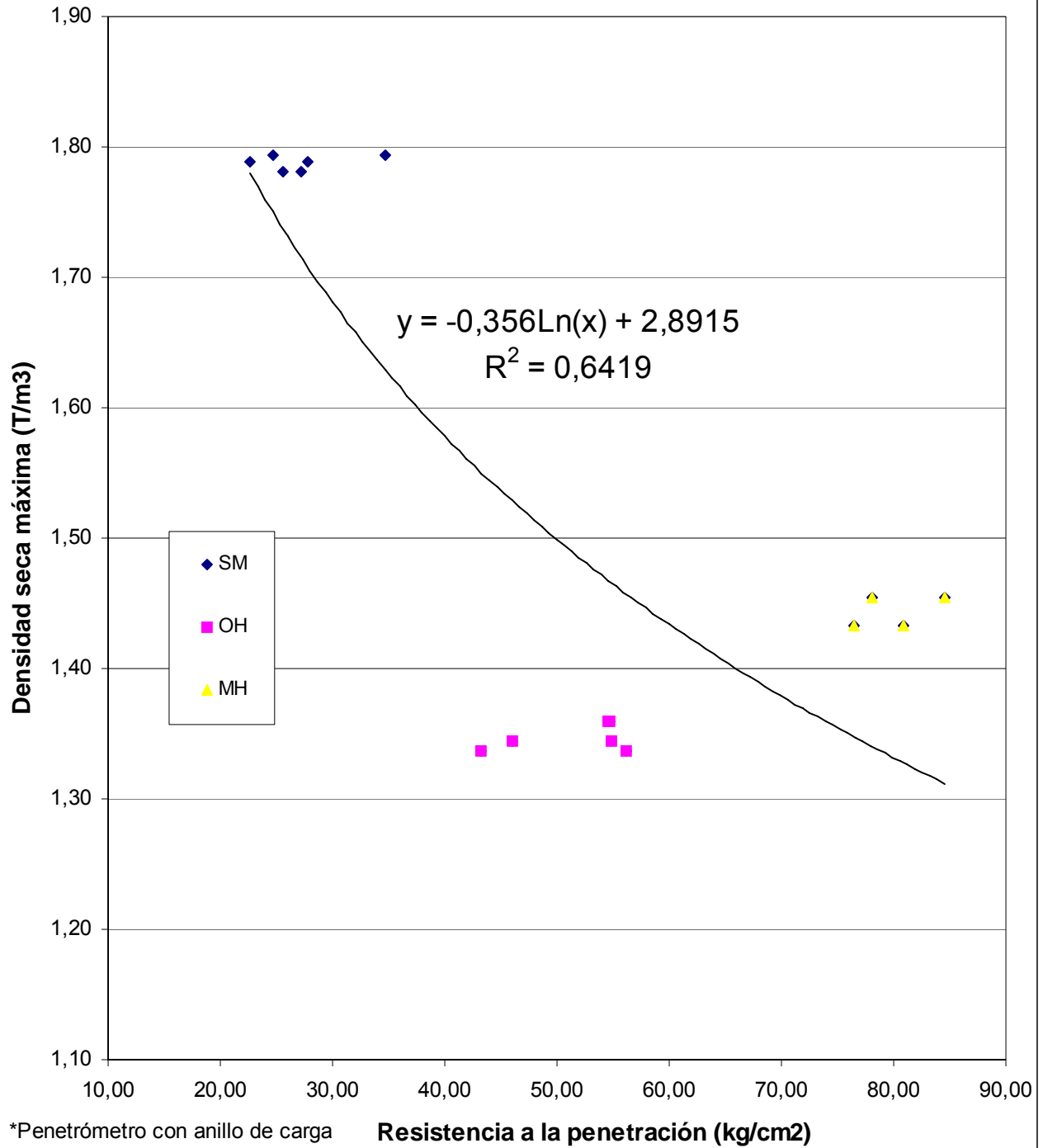
Este valor muestra, que de acuerdo a los resultados obtenidos, existe una buena correlación entre las condiciones graficadas.

Se estableció otra relación, para el equipo entre la densidad seca máxima y la resistencia a la penetración del anillo. Esta se puede observar en la gráfica AR3. El coeficiente R^2 es de 0,6419. De la gráfica se deduce; que no existe una correlación útil para ser utilizada en la práctica. Una razón de esto puede ser la influencia de la

Gráfica AR2: Correlación entre el CBR no saturado y el PAC* para muestras al 100% del Proctor modificado



Gráfica AR3: Correlación entre la densidad seca máxima y el *PAC para muestras al 100% del Proctor modificado



cohesión para los suelos plásticos (OH y MH), en donde se presenta una resistencia mayor a la que presenta el suelo tipo SM (granular), aún cuando este último presenta una densidad mucho mayor que la de los suelos plásticos.

Pruebas realizadas al 95% del Proctor modificado y sumergidas.

Para estos especímenes si fue posible lograr la introducción de la altura del cono en su totalidad. La razón por la que se sumergen las muestras, es para tener una condición similar a los resultados del CBR saturado y poder buscar así la relación.

Se analizaron las lecturas obtenidas de las muestras y se compararon con el CBR, en condición saturada. Cabe mencionar, que para el análisis, no se tomó en cuenta el valor del molde número 2, debido a que se alejaba mucho de los otros valores para este tipo de suelo.

De esta manera, se obtuvo la gráfica AR4 que presenta un coeficiente R^2 de 0,9213. Esto indica que existe una buena correlación entre los resultados obtenidos.

Para esta condición, también se estudió la relación entre la densidad seca máxima y la resistencia a la penetración según el anillo; para este caso, se obtuvo un coeficiente de correlación R^2 de 0,8048 de la gráfica AR5. Este valor podría considerarse como aceptable, si lo que se requiere es una verificación rápida de la densidad del sitio.

Compactómetro electrónico

Pruebas realizadas al 95% del Proctor modificado y sumergidas

De las pruebas realizadas se buscó el comportamiento que podía presentar en forma general el compactómetro, ante una condición saturada. La correlación propuesta por el fabricante de $0.07 \cdot (RIV)^2$, nos presenta una función con un comportamiento potencial, por lo

que las correlaciones se basarán en dicho modelo.

Las relaciones que se establecieron fueron: el valor real de impacto comparado, primero al CBR saturado (gráfica AR6) y segundo a la densidad seca máxima (gráfica AR7), obteniéndose coeficientes de correlación R^2 respectivamente de 0,279 y 0,0904.

Estos valores permiten concluir; que no fue posible establecer una correlación satisfactoria entre estos parámetros para una condición saturada.

Pruebas realizadas de acuerdo a la norma ASTM D-5874

Al igual que en la condición saturada, se buscó establecer una relación del valor de impacto: primero con el CBR no saturado (gráfica AR8) y luego con la densidad máxima seca (gráfica AR9) respectivamente, para esta condición se obtuvieron valores R^2 de 0,4684 y 0,0252.

Tanto para este caso, como el anterior (moldes al 95%), según los datos obtenidos se pudo determinar, que no fue posible establecer una correlación práctica en general para este equipo. Cabe mencionar, que durante la realización de las pruebas; tanto al 95% como por la norma ASTM, no se presentó algún problema de consideración (caída del equipo, mal procedimiento) que pudiera afectar en cierta medida los resultados obtenidos.

Debido a que no fue posible establecer un comportamiento general, se presentarán individualmente los resultados para cada tipo de suelo.

Respectivamente se muestran para cada suelo; la relación con el CBR y la densidad seca máxima, observándose estas de la gráfica AR10 a la AR15.

Las gráficas AR10 y AR11 correspondientes al suelo tipo OH presentan coeficientes de correlación R^2 respectivamente de 0,9235 y 0,9896.

Las gráficas AR12 y AR13, pertenecientes al suelo MH, nos dan R^2 con valores de 0,871 y 0,807.

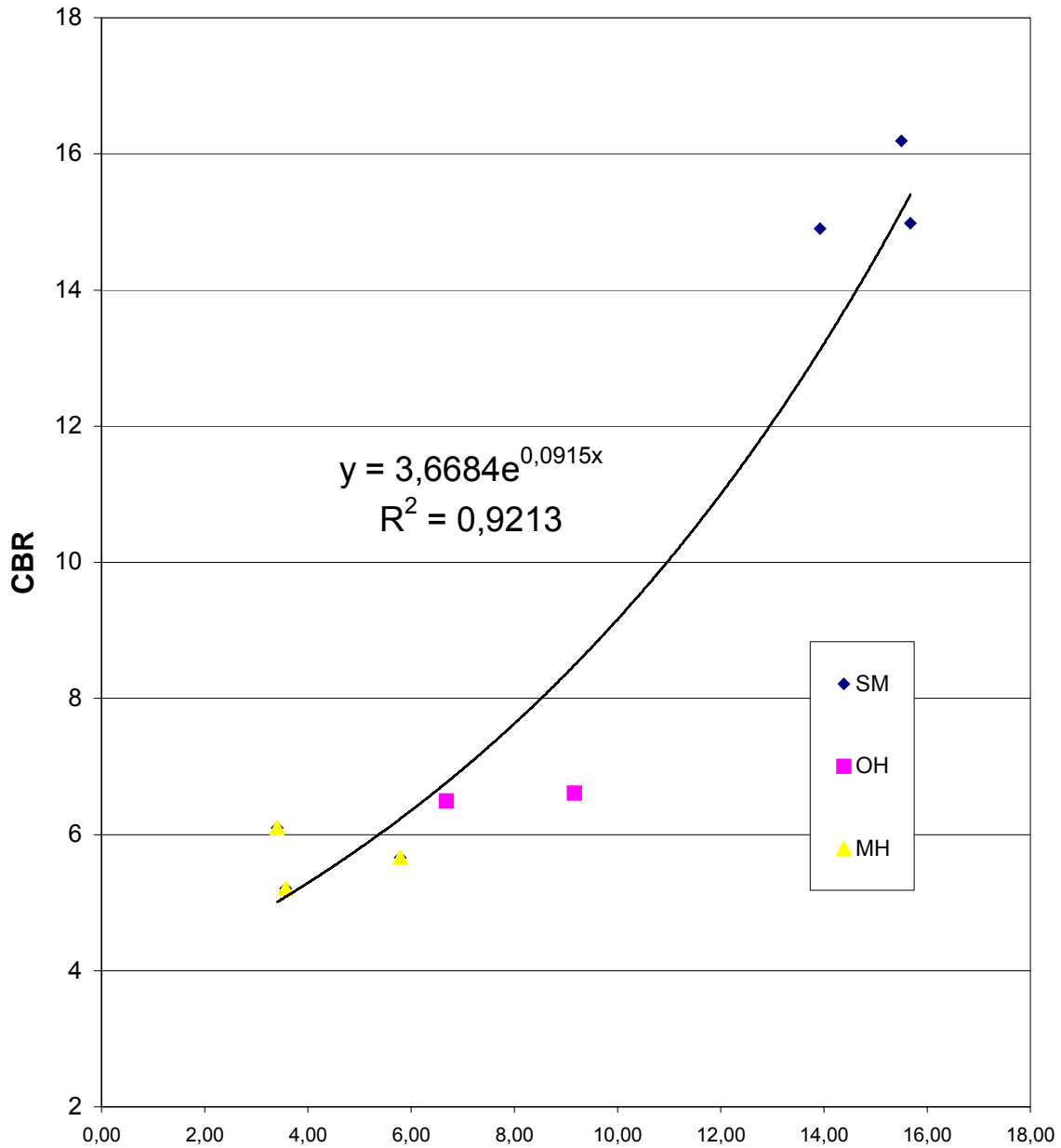
De las gráficas AR14 y AR15 del suelo SM se obtuvieron R^2 de 0,9506 y 0,9875.

Como se puede observar; en este caso las correlaciones obtenidas en su mayoría, son bastante buenas; sin embargo como se menciono

al principio del análisis, solo ayudan en casos específicos.

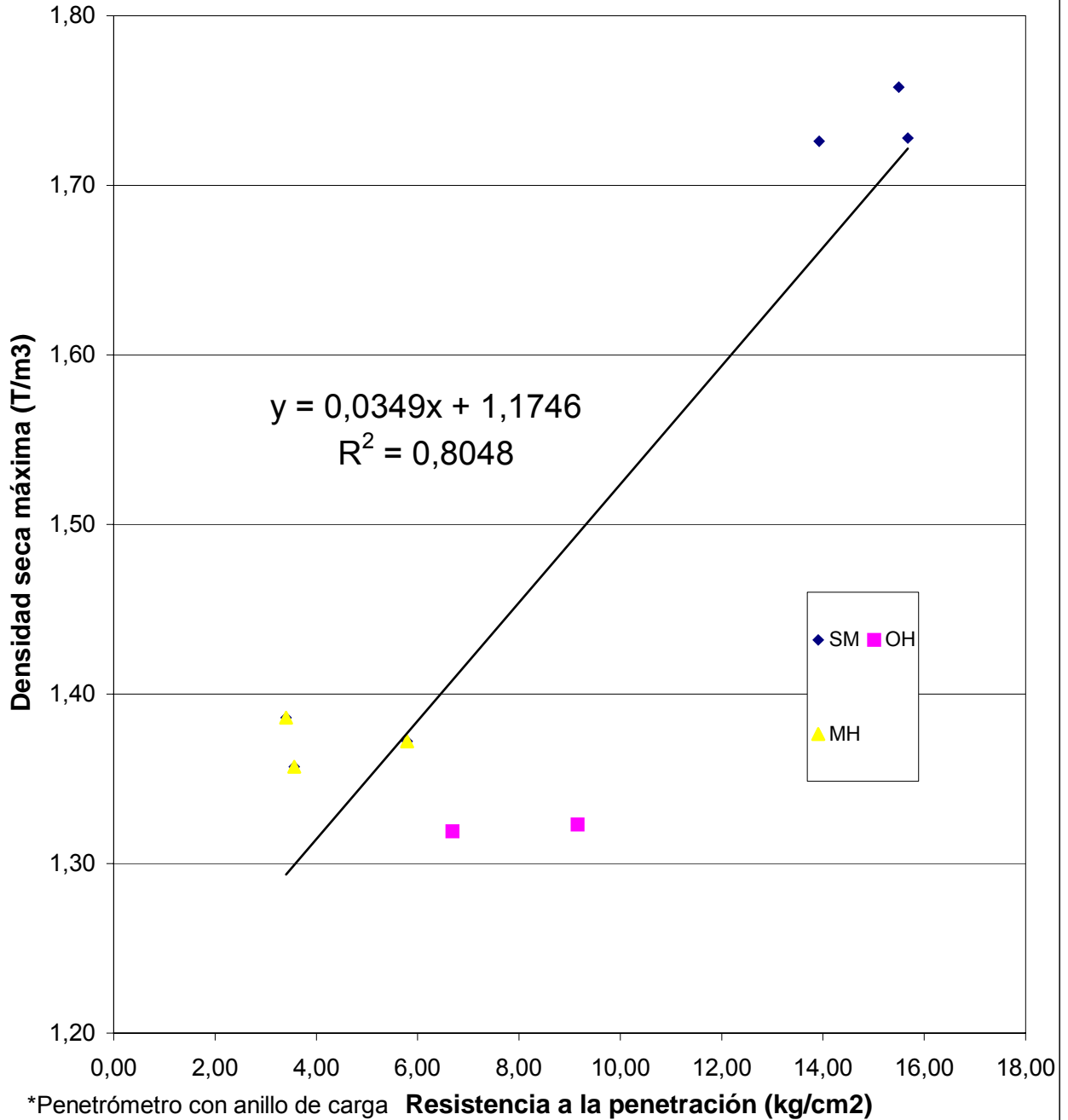
Es importante mencionar que la totalidad de pruebas demandaron mucho tiempo con respecto a la duración del proyecto. Lo que obligó a que los análisis de resultados se enfocaran a cumplir con el objetivo del proyecto; sin extenderse a otros usos o aplicaciones que se pueden lograr con estos.

Gráfica AR4: Correlación entre el CBR saturado y el PAC* para muestras al 95% del Proctor modificado y sumergidas

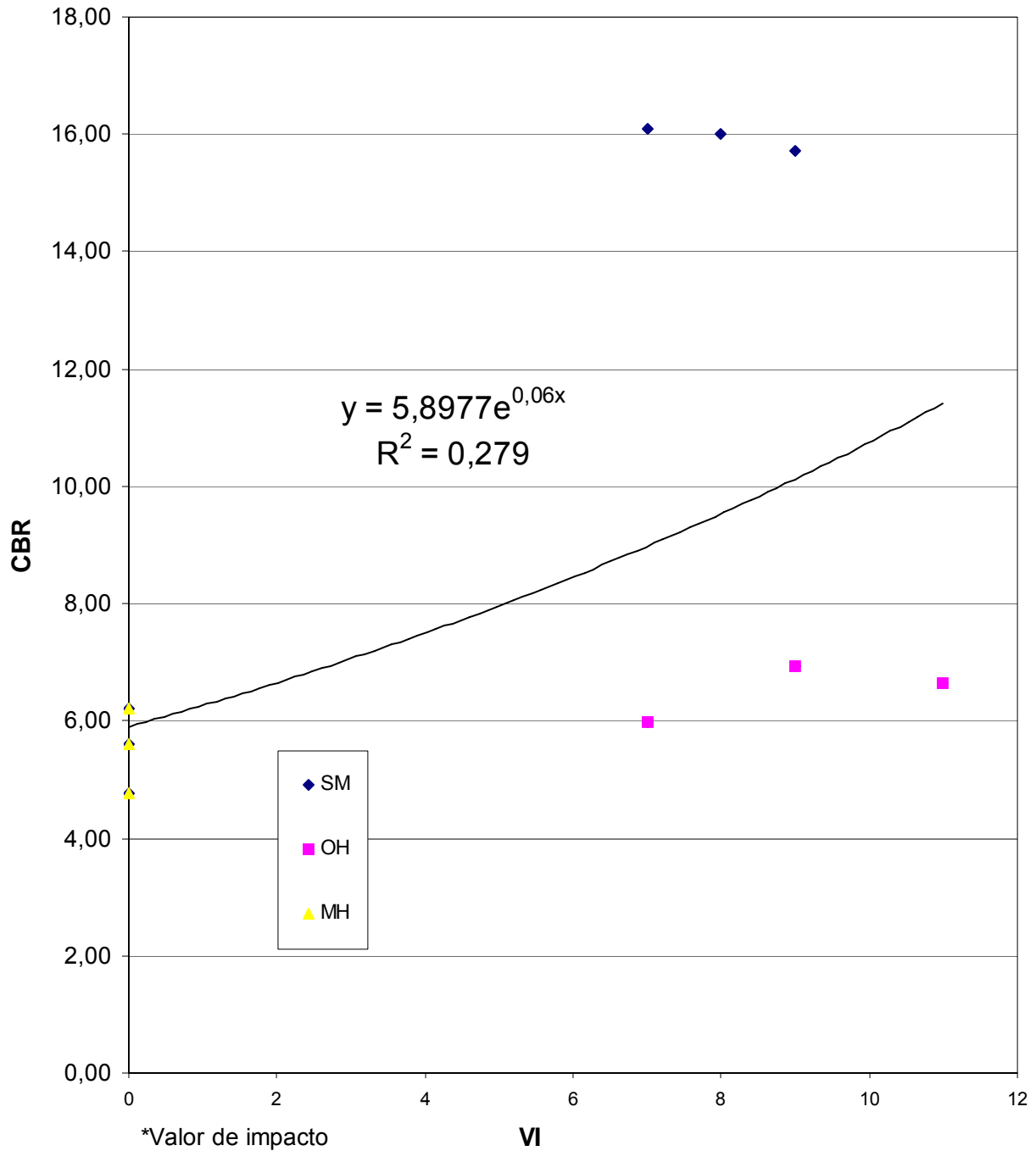


* Penetrómetro con anillo de carga **Resistencia a la penetración (kg/cm²)**

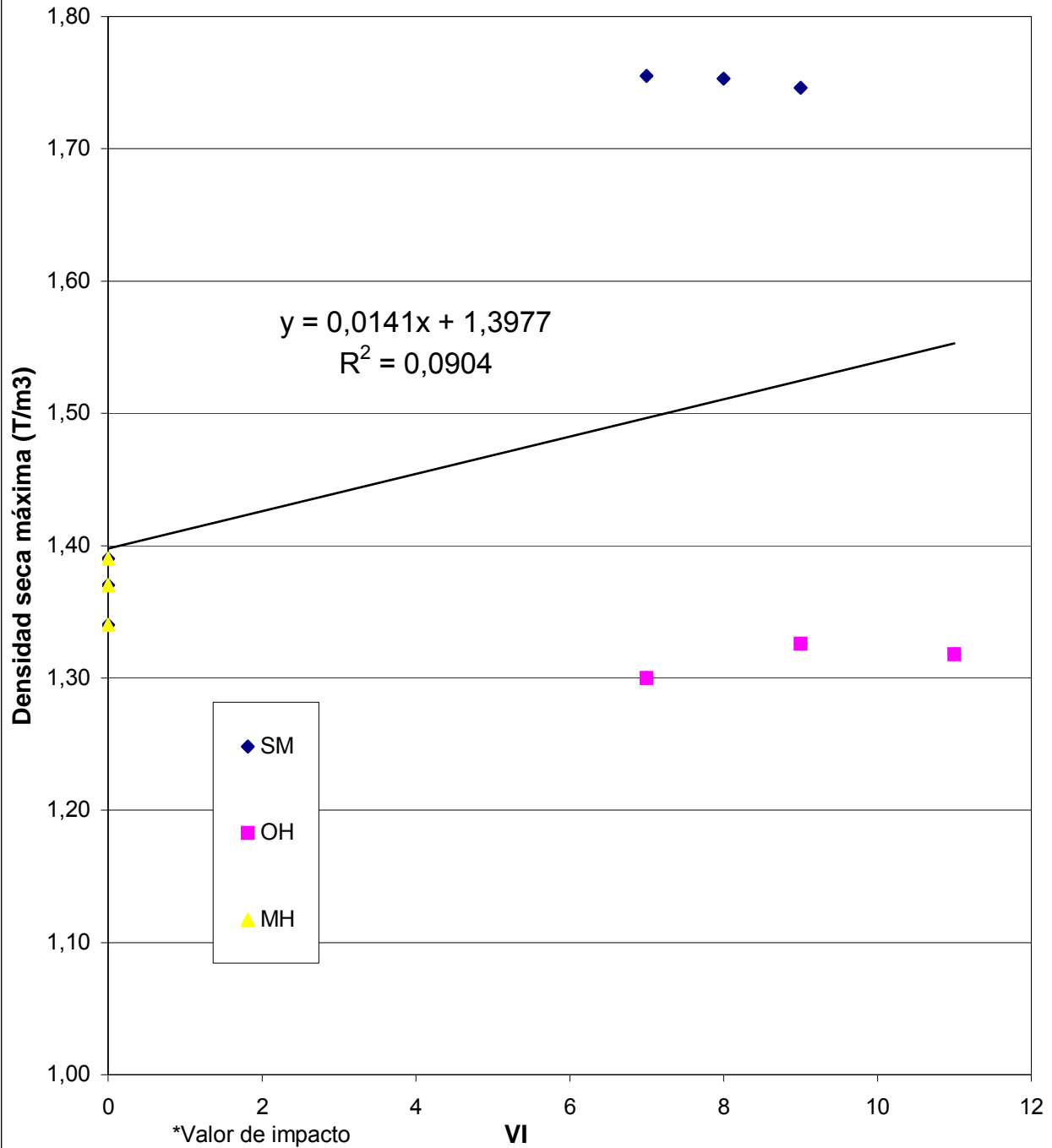
Gráfica AR5: Correlación entre la densidad seca máxima y el PAC* para muestras al 95% del Proctor modificado y sumergidas



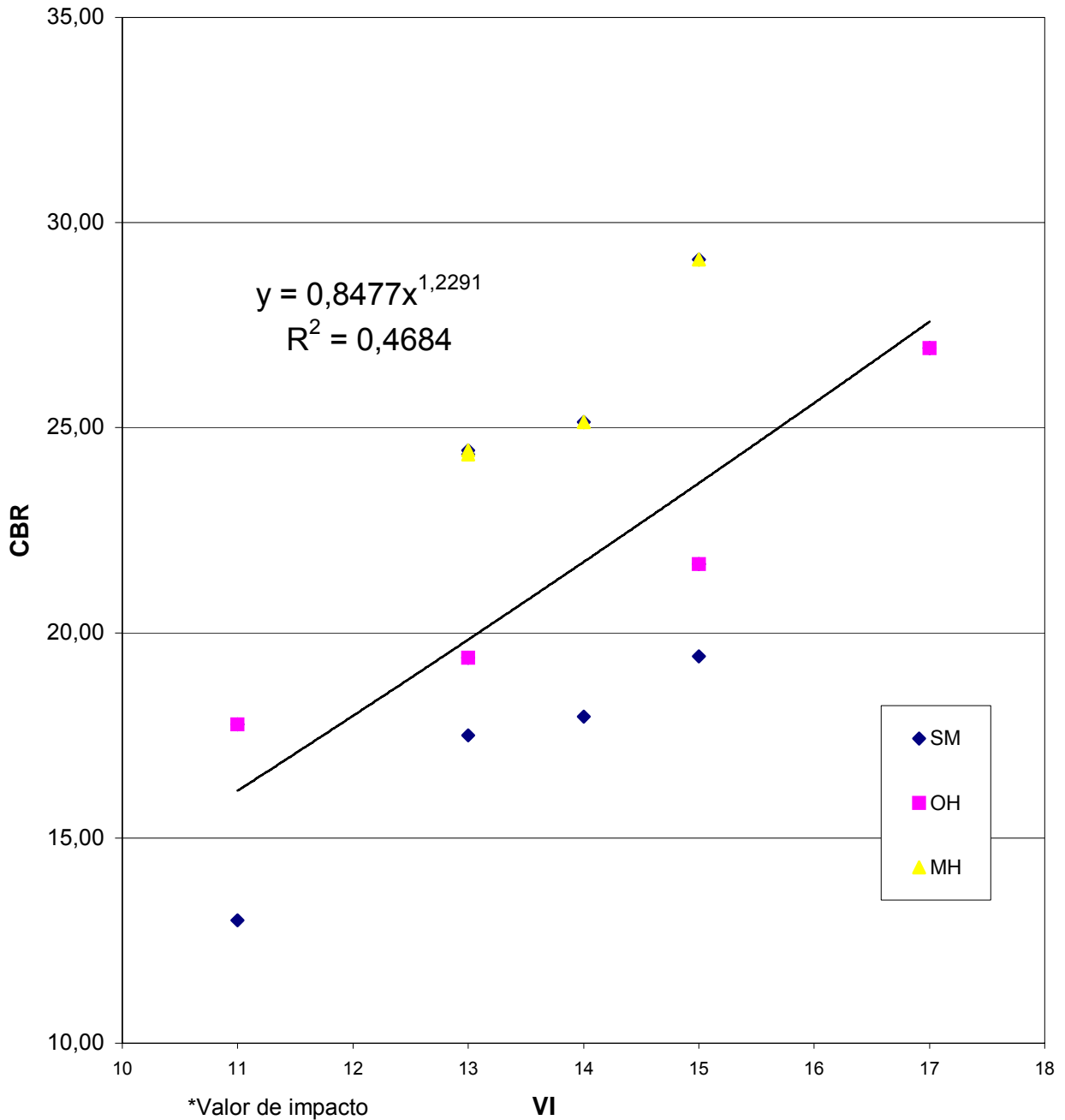
Gráfica AR6: Correlación entre el CBR saturado y el VI* para muestras al 95% del Proctor modificado y sumergidas



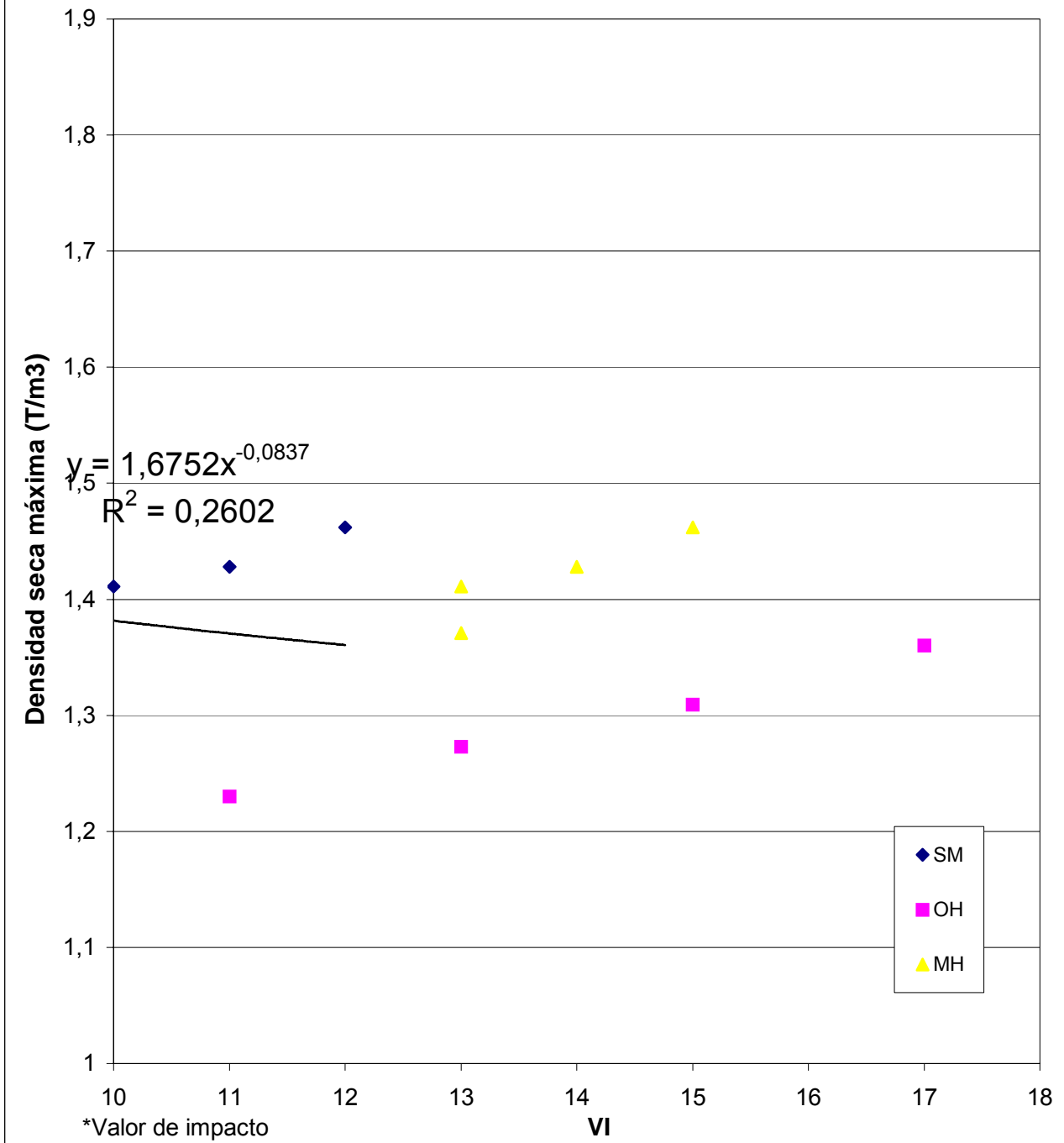
Gráfica AR7: Correlación entre la densidad seca máxima y el VI* para muestras al 95% del Proctor modificado y sumergidas.



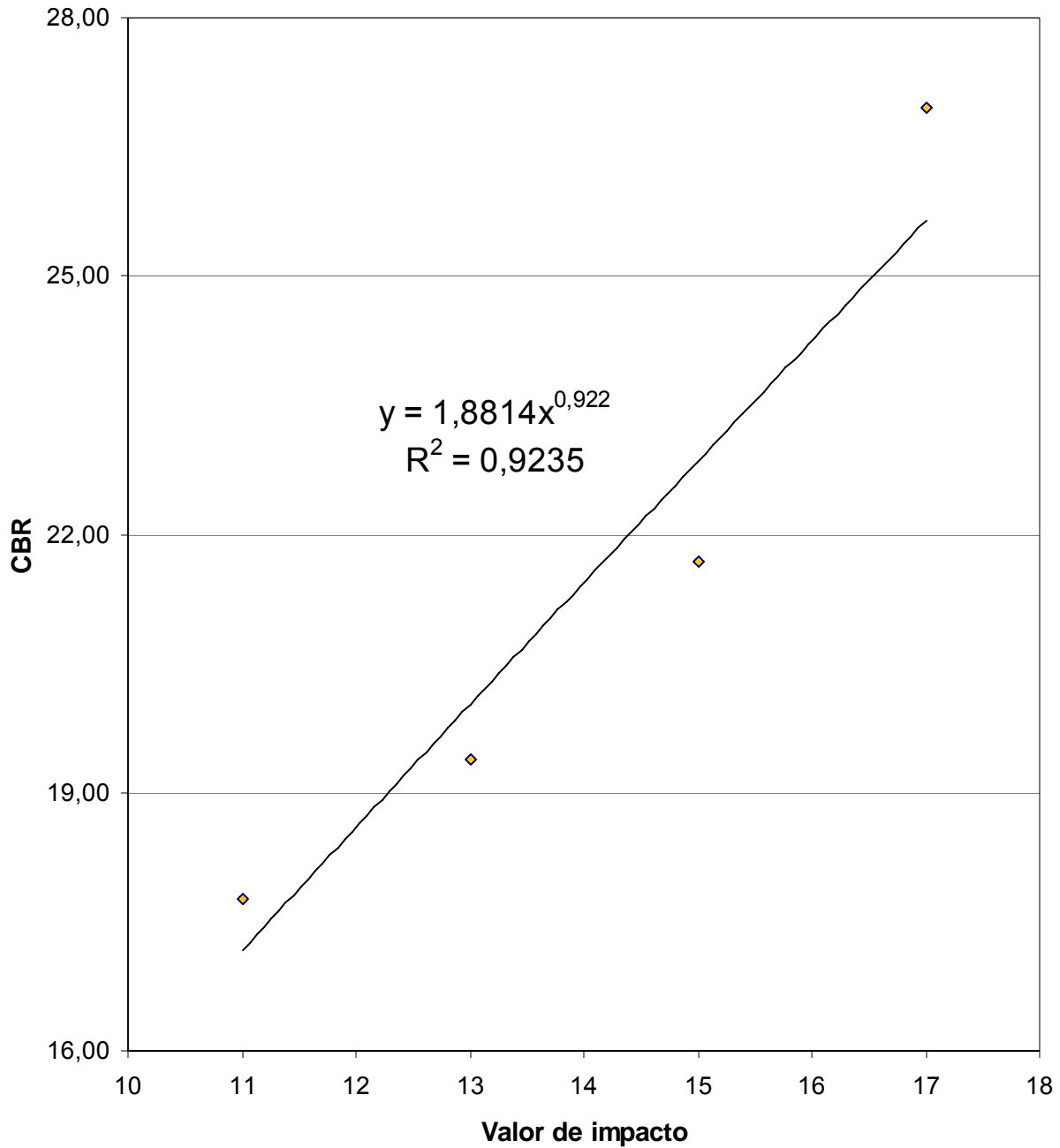
Gráfica AR8: Correlación entre el CBR no saturado y el VI* para muestras al 100% del Proctor modificado



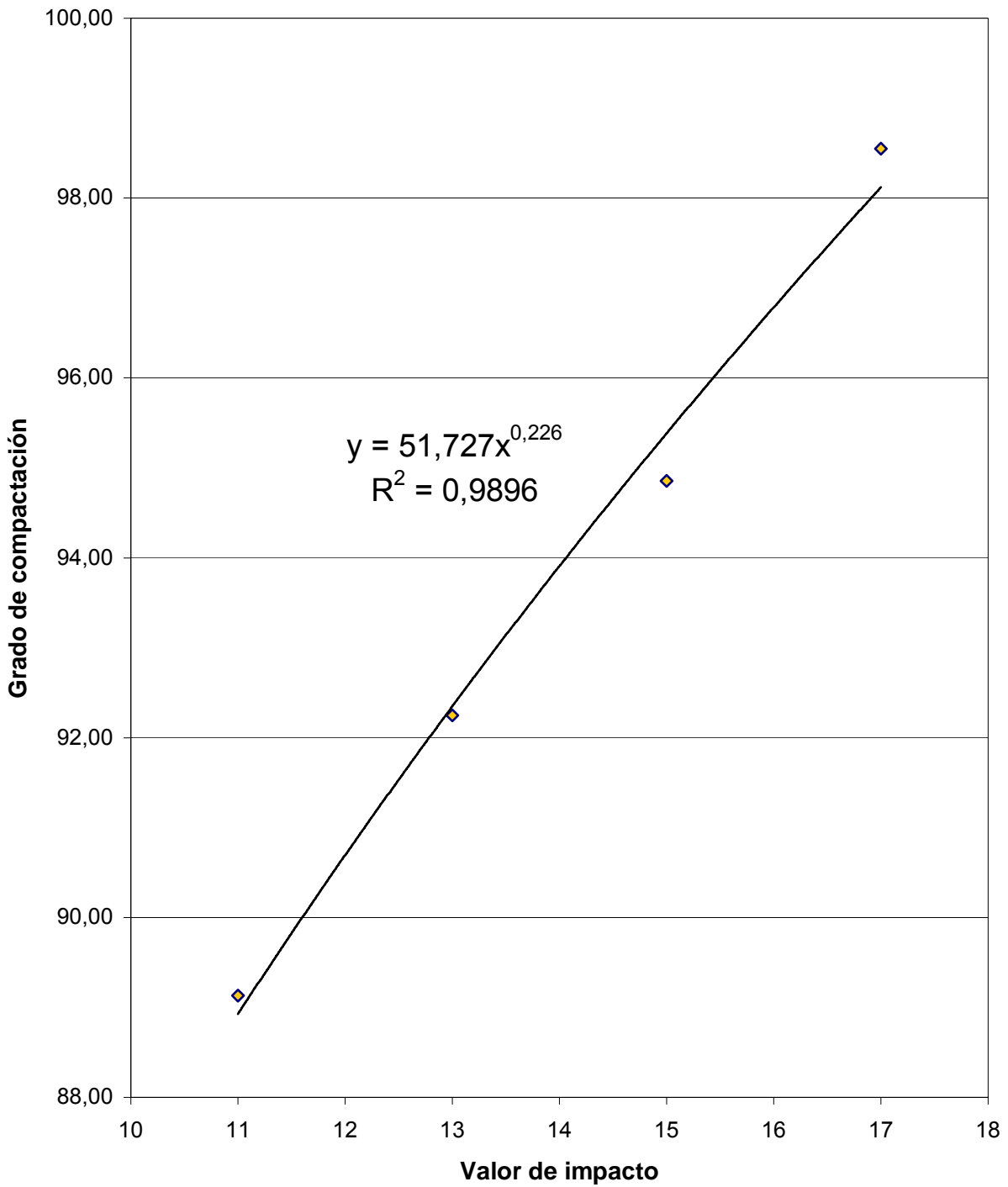
Gráfica AR9: Correlación entre la densidad seca máxima y el VI* para muestras al 100% del Proctor modificado



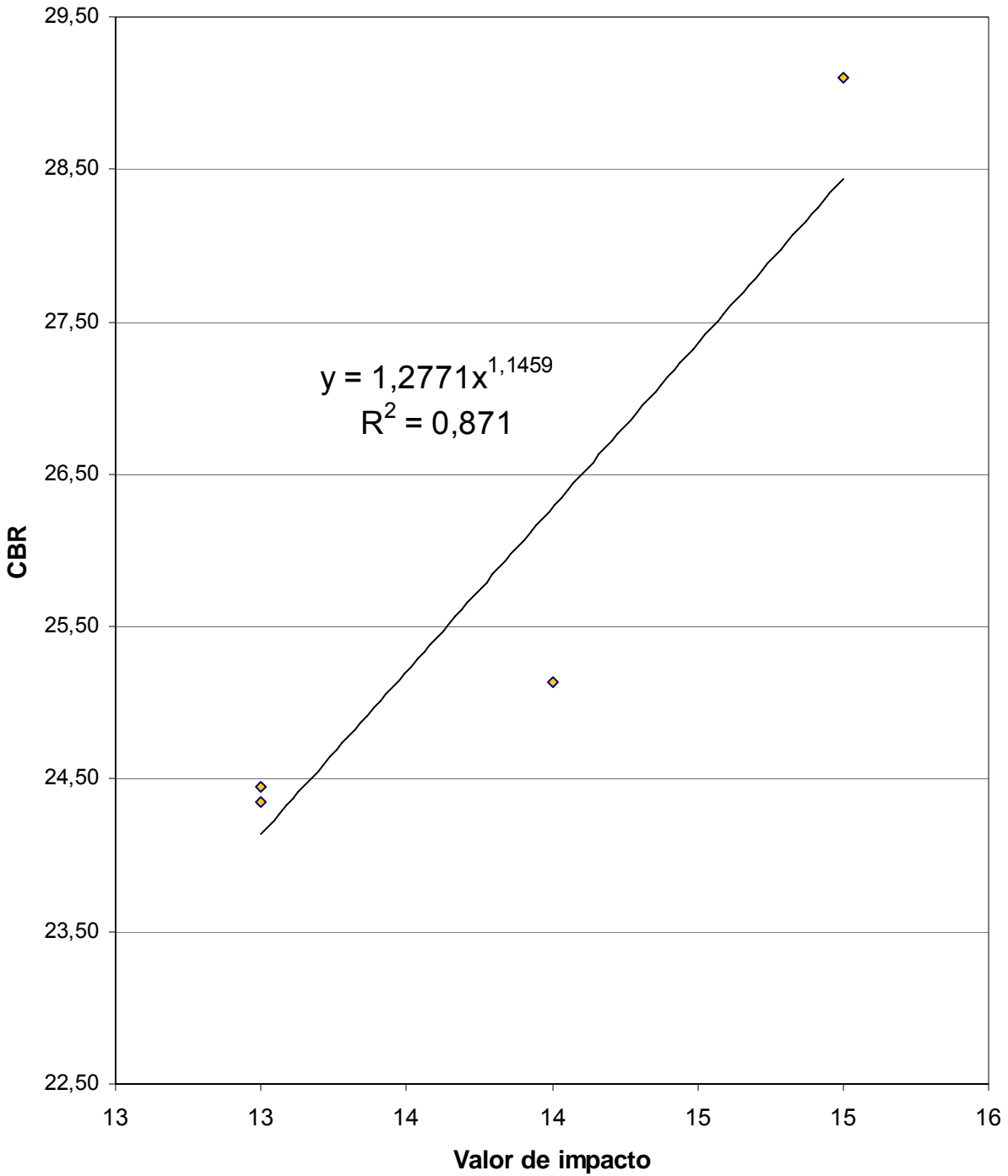
Gráfica AR10: Correlación entre el CBR y el valor de impacto para suelo tipo OH



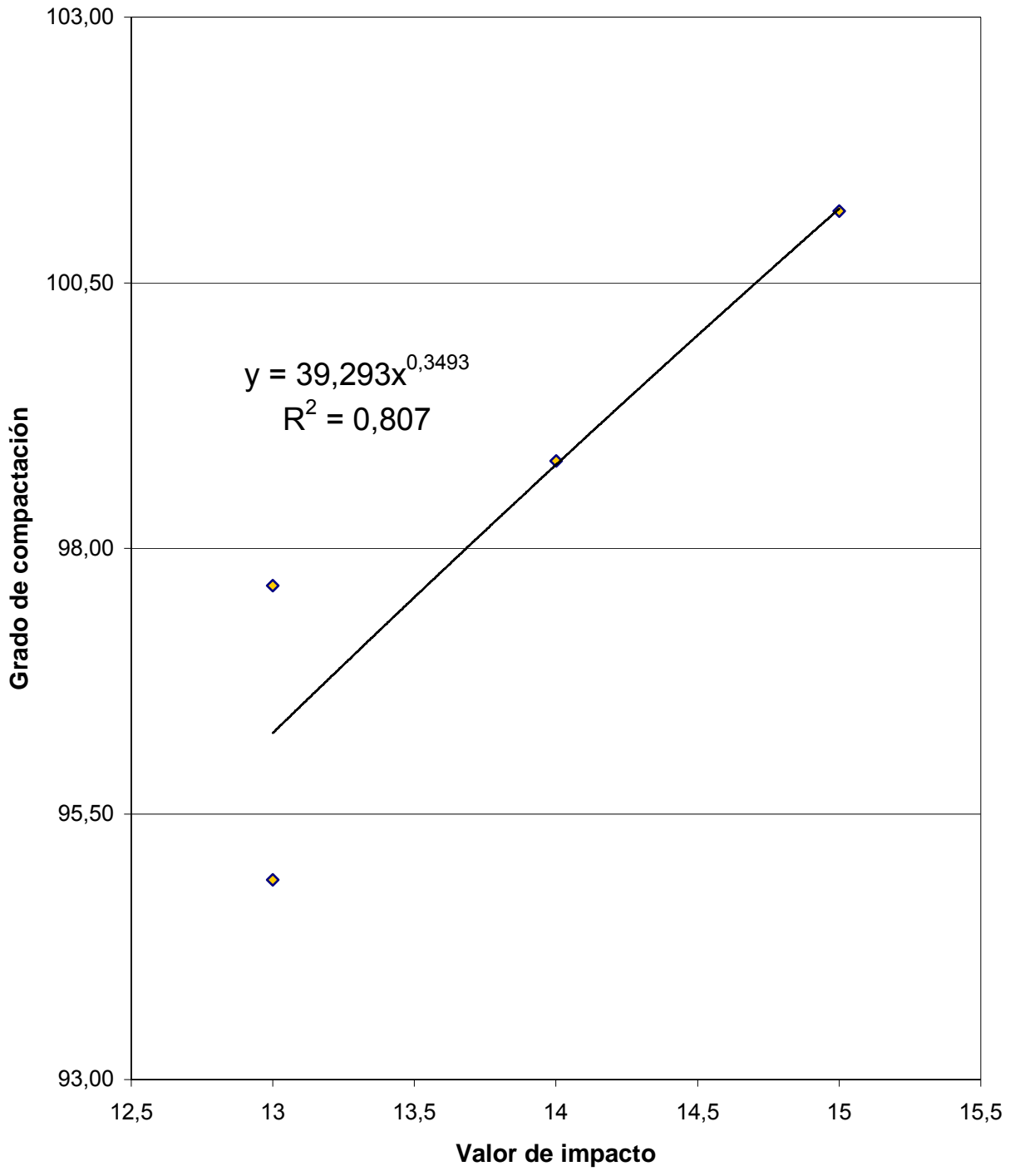
Gráfica AR11: Correlación entre el grado de compactación y el valor de impacto para suelo tipo OH



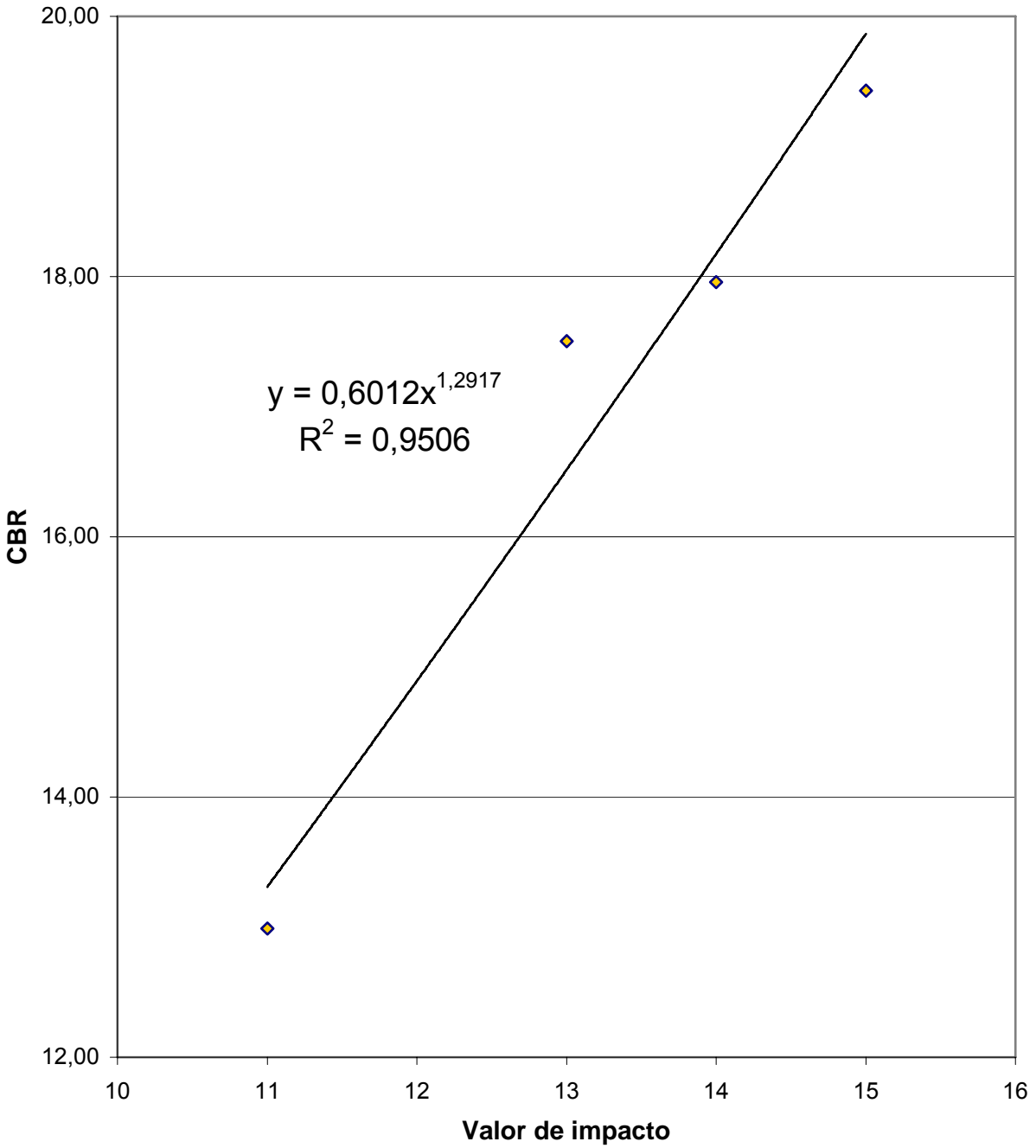
Gráfica AR12: Correlación entre el CBR y el valor de impacto para suelo tipo MH



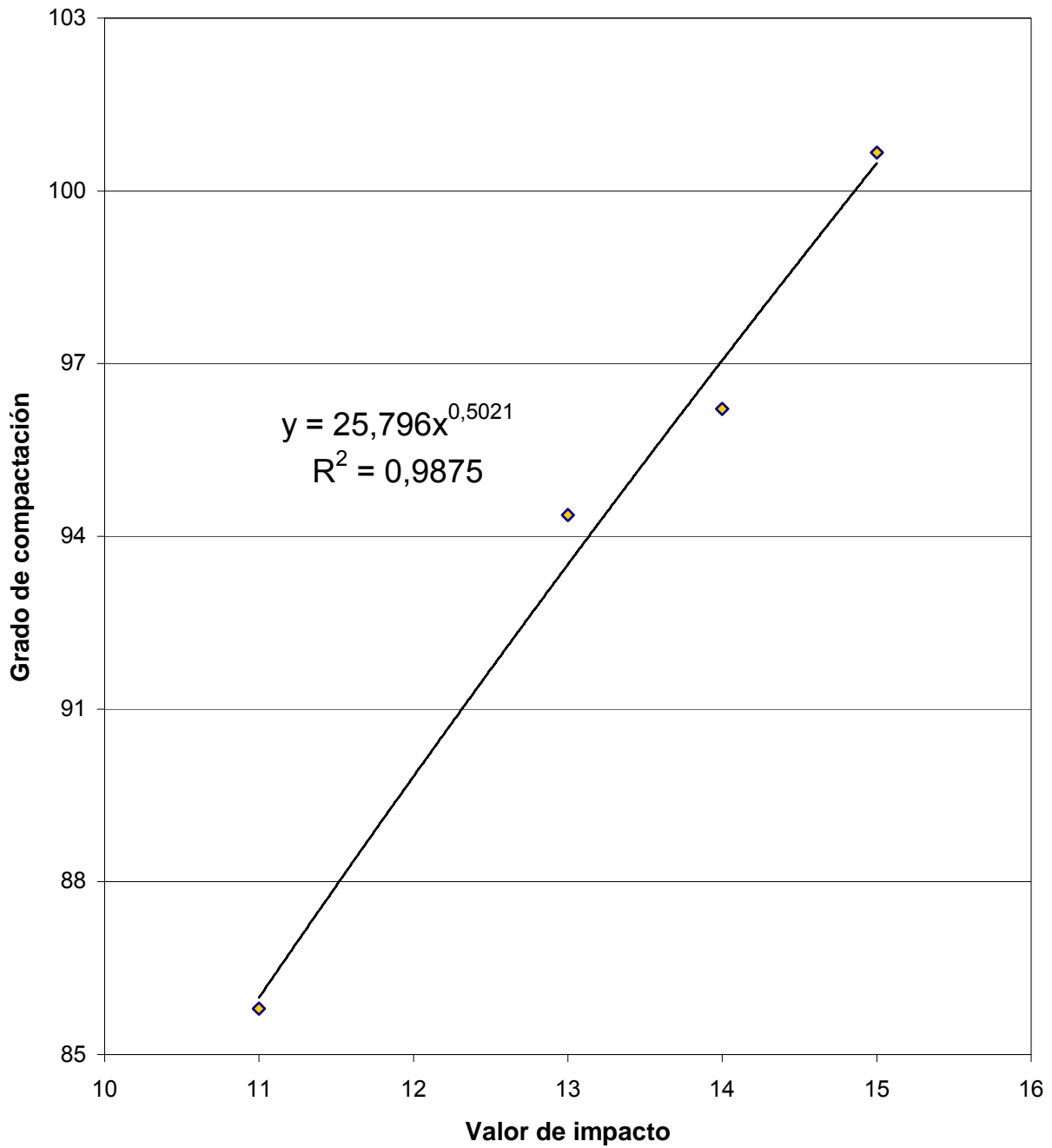
Gráfica AR13: Correlación entre el grado de compactación y el valor de impacto para suelo tipo MH



Gráfica AR14: Correlación entre el CBR y el valor de impacto para suelo tipo SM



Gráfica AR15: Correlación entre el grado de compactación y el valor de impacto para suelo tipo SM



Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos y análisis realizados se puede concluir que:

- El cono dinámico es una herramienta confiable para establecer correlaciones con el ensayo SPT, ya que con la correlación propuesta ($y=2,3856x-1,7652$), se obtuvo un coeficiente $R^2=0,974$.
- Al correlacionar el penetrómetro con anillo de carga (para moldes al 100% del Proctor modificado) con el CBR no saturado, se propuso la ecuación $y=6,7772x^{0,3214}$, obteniéndose un coeficiente $R^2=0,8554$; lo cual demostró que el equipo es apto bajo estas condiciones.
- Al establecer la correlación $y = -0,356\ln(x) + 2,8915$ entre el penetrómetro con anillo de carga (para moldes al 100% del Proctor modificado) y la densidad seca máxima, el valor R^2 fue de 0,6419. En este caso la correlación no fue satisfactoria..
- Al correlacionar el penetrómetro con anillo de carga (para moldes al 95% del Proctor modificado y sumergidos) con el CBR saturado, a partir de la ecuación $y= 3,6684e^{0,0915x}$, se obtuvo un coeficiente $R^2=0,9213$; reflejando ser un instrumento eficaz para tal efecto.
- Al establecer la correlación $y=0,0349x +1,1746$ entre el penetrómetro con anillo de carga (para moldes al 95% del Proctor modificado y sumergidos) y la densidad seca máxima, el valor R^2 fue de 0,8048. Con lo anterior se mostró que el equipo podría utilizarse para chequeos preliminares en esa condición; no así para

obras que requieran un chequeo más estricto.

De las correlaciones obtenidas del compactómetro electrónico (en donde se incluyen todas las muestras) con el CBR saturado y de acuerdo a la norma ASTM D-5874, no fue posible establecer correlaciones prácticas para un uso apropiado.

- Con el compactómetro electrónico fue posible establecer buenas correlaciones de acuerdo a la norma ASTM D-5874, analizando las muestras individualmente.

La cantidad de suelos analizada y la cantidad de pruebas se limitó a verificar las especificaciones del fabricante, sin embargo en algunos casos no se logró. Por esa razón las correlaciones obtenidas no se pueden tomar como definitivas.

Recomendaciones

- Realizar las mismas pruebas llevadas a cabo para el presente estudio, a otros tipos de suelos, para ampliar la cantidad de resultados y poder establecer correlaciones más precisas.
- Analizar los resultados tratando de establecer otras correlaciones, de forma tal que si se puede determinar la existencia de esas correlaciones, se amplíe con ello el uso de estos equipos. Por ejemplo:

Métodos alternativos	Correlación con
Cono dinámico	Densidad
Penetrómetro	SPT
Compactómetro	Porcentaje de humedad

- Se sugiere realizar pruebas in situ, utilizando el penetrómetro con anillo de carga, ya que los moldes utilizados en el laboratorio presentan poca área ($176,2 \text{ cm}^2$), debido al confinamiento que representa el molde.
- En el caso de este estudio el análisis se orientó a correlaciones en forma general. Sin embargo, en donde no se obtuvo una correlación satisfactoria, sería recomendable (con la ayuda de los mismos datos sobre otras muestras) realizar curvas específicas para suelos granulares y finos ó elaborar curvas características para cada tipo de suelo.
- El análisis contemplado en este proyecto cumplió con el objetivo del mismo, sin embargo se considera que los resultados son sujetos de más análisis y así poder obtener de ellos mayor valor agregado. En ese sentido se recomienda haya una continuidad de este estudio por medio de otro proyecto. Para ello, con este informe, se pone a disposición un disco compacto con los resultados de pruebas y análisis realizados.

Apéndices

[Apéndice I.](#) Resultados de clasificación de las muestras

[Apéndice II.](#) Resultados obtenidos de las pruebas de CBR y Proctor Modificado

[Apéndice III.](#) Traducción del manual de uso del Cono Dinámico

[Apéndice IV.](#) Traducción de manual de uso del penetrómetro con Anillo de Carga

[Apéndice V.](#) Traducción del manual de uso del Compactómetro Electrónico

Referencias

Juárez Badillo, E.; Rico Rodríguez, A.
2002. **MECÁNICA DE SUELOS**.
Tomo 1. México D.F. :
Editorial Limusa.

Juárez Badillo, E.; Rico Rodríguez, A.
2002. **MECÁNICA DE SUELOS**.
Tomo 2. México D.F. :
Editorial Limusa.

Berry , Peter L.; Reid, D. 2001. **MÉCANICA
DE SUELOS** . Santafé de Bogota:
Editorial McGraw Hill
Interamericana S.A..

Braja M. Das. 2001. **FUNDAMENTOS DE
INGENIERÍA GEOTÉCNICA**. México:
Thomson Editores S.A..

COMPACTED SOILS, Vol. 04.08.

ASTM D 2487-00: **STANDARD PRACTICE FOR
CLASSIFICATION OF SOIL FOR
ENGINEERING PURPOSES (UNIFIED
SOIL CLASSIFICATION SYSTEM)**, Vol.
04.08.

ASTM D 4318-00: **STANDARD TEST METHOD
FOR LIQUID LIMIT, PLASTIC LIMIT,
AND PLASTICITY INDEX OF SOILS**, Vol.
04.08.

ASTM D 5874-95: **STANDARD TEST METHOD
FOR DETERMINATION OF THE IMPACT
VALUE (IV) OF A SOIL**, Vol. 04.09.

ASTM D 421-85: **STANDARD PRACTICE FOR
DRY PREPARATION OF SOIL
SAMPLES FOR PARTICLE-SIZE
ANALYSIS AND DETERMINATION OF
SOIL CONSTANTS**, Vol. 04.08.

ASTM D 422-63: **STANDARD TEST METHOD
FOR PARTICLE-SIZE ANALYSIS OF
SOILS**, Vol. 04.08.

ASTM D 1557-00: **STANDARD TEST METHOD
FOR LABORATORY COMPACTION
CHARACTERISTICS OF SOIL USING
MODIFIED EFFORT**, Vol. 04.08.

ASTM D 1586-99: **STANDARD TEST METHOD
FOR PENETRATION TEST AND SPLIT-
BARREL SAMPLING OF SOILS**, Vol.
04.08.

ASTM D 1883-99: **STANDARD TEST METHOD
FOR CBR (CALIFORNIA BEARING
RATIO) OF LABORATORY-**