

48
209



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**COMPARACION DE INDICES DE
RESISTENCIA (V.R.S.) EN SUELOS
COMPACTADOS EN FORMA
ESTATICA Y DINAMICA**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A N :
MARIO JOSE FRIAS CASTRO
JOSE DANIEL REYES LUNA

DIRECTOR DE TESIS: ING. FERNANDO OLIVERA BUSTAMANTE

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1991



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

COMPARACION DE INDICES

DE RESISTENCIA (V.R.S.)

EN SUELOS

COMPACTADOS EN FORMA

ESTATICA Y DINAMICA

TEMARIO

I.- INTRODUCCION.	.....	4
II.- PLANEACION DE LA INVESTIGACION.	.....	6
III.- DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS.	.....	9
3.1 PRUEBAS INDICE.	.....	9
3.1.1 Determinación granulométrica mediante el uso de mallas.	.....	9
3.1.1.1 Equipo.	.....	9
3.1.1.2 Preparación de la muestra.	.....	10
3.1.1.3 Procedimiento de Prueba.	.....	11
3.1.2 Definición de los límites de plasticidad y de la Contracción Lineal.	.....	14
3.1.3 Determinación del Límite Líquido.	.....	15
3.1.3.1 Equipo.	.....	15
3.1.3.2 Preparación de la muestra.	.....	16
3.1.3.3 Procedimiento de Prueba.	.....	18
3.1.4 Determinación del Límite Plástico.	.....	21
3.1.4.1 Equipo.	.....	21
3.1.4.2 Procedimiento de Prueba.	.....	22
3.1.5 Determinación del Índice Plástico.	.....	24
3.1.5.1 Procedimiento.	.....	24
3.1.6 Determinación de la Contracción Lineal.	.....	25
3.1.6.1 Equipo.	.....	25
3.1.6.2 Preparación de la muestra.	.....	26
3.1.6.3 Procedimiento de prueba.	.....	26

3.2	PRUEBAS DE COMPACTACION.	.....	29
3.2.1	Prueba Proctor Estándar.	.....	32
3.2.1.1	Equipo.	.....	33
3.2.1.2	Preparación de la muestra.	.....	35
3.2.1.3	Procedimiento de prueba.	.....	35
3.2.2	Prueba Porter Estándar.	.....	40
3.2.2.1	Equipo.	.....	41
3.2.2.2	Preparación de la muestra.	.....	42
3.2.2.3	Procedimiento de prueba.	.....	43
3.2.3	Prueba Porter Modificada.	.....	46
3.2.3.1	Equipo.	.....	47
3.2.3.2	Preparación de la muestra.	.....	47
3.2.3.3	Procedimiento de prueba.	.....	48
3.2.4	Prueba de Penetración.	.....	52
3.2.4.1	Procedimiento de la prueba.	.....	52
3.2.5	Método del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.	.....	55
3.2.5.1	Equipo.	.....	55
3.2.5.2	Preparación de la muestra.	.....	58
3.2.5.3	Procedimiento de prueba.	.....	59
IV.-	EJECUCION DE LA INVESTIGACION.	.....	63
V.-	RESULTADOS DE LA INVESTIGACION.	.....	70
5.1	TEPETATE 1 (Instituto de Ingeniería).		
5.1.1	Interpretación de Resultados.	.....	73
5.1.2	Comparación de los Resultados.	.....	75
5.2	TEPETATE 2 (Ixtapaluca).		
5.2.1	Interpretación de Resultados.	.....	76
5.2.2	Comparación de los Resultados.	.....	76

5.3	ARCILLA (Drenaje Profundo).	
5.3.1	Interpretación de Resultados.	..... 78
5.3.2	Comparación de los Resultados.	..... 78
5.4	GRAVA ARENA (San Mateo Atenco).	
5.4.1	Interpretación de Resultados.	..... 80
5.4.2	Comparación de los Resultados.	..... 81
VI.-	CONCLUSIONES.	..... 87
	REFERENCIAS.	..... 90

1.- INTRODUCCION.

En la actualidad en el mundo entero, uno de los factores de gran importancia para el progreso integral de una región incide esencialmente en el desarrollo de las comunicaciones. México, en particular, no se queda atrás en transportación y pretende solucionar sus problemas a través de una comunicación vial rápida y eficiente, ya que el número de vehículos se ha incrementado en forma acelerada; las soluciones al problema del transporte han estado de acuerdo a la época, con programas de investigación en Mecánica de Suelos en relación a la calidad de los materiales más usados en bases, sub-bases y terracerías de caminos.

Como se sabe, la compactación de los suelos constituyen uno de los medios más eficaces y económicos para mejorar las características de resistencia y compresibilidad, siendo motivo de especial preocupación por parte del ingeniero, el establecer un control de este importante aspecto, con el fin de lograr que los materiales empleados en la construcción de terraplenes, en general, adquieran un comportamiento satisfactorio.

Históricamente se reconoce que la primera prueba de laboratorio desarrollada con fines de compactación en el campo, se debió al Departamento de Carreteras de California (1920). Poco después (1933) Proctor dió a conocer, como resultado de sus investigaciones, la prueba que hoy en día conserva su nombre, la cual bajo ciertas modificaciones constituye la prueba que con mayor frecuencia se emplea en el control de la compactación en la obra, así como en la elaboración de especímenes en el laboratorio para la

investigación de sus propiedades mecánicas. Desde entonces hasta la fecha la investigación en este importante campo ha sido muy extensa, habiéndose desarrollado múltiples y variadas pruebas con análogos fines, las cuales pueden englobarse atendiendo a la forma en que los esfuerzos compactantes son aplicados, en los cuatro grupos siguientes :

- 1.- Pruebas dinámicas mediante aplicación de impactos.
- 2.- Pruebas de compresión estática.
- 3.- Pruebas vibratorias.
- 4.- Pruebas mediante la acción de efectos de 'amasado'.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal, el estudio de una posible comparación entre los resultados de las pruebas estáticas y dinámicas de compactación de suelos en el laboratorio, dentro de las limitaciones y alcances que más adelante se precisan.

Mucho se a discutido acerca de que con cual de las pruebas de compactación de suelos, la estática o la dinámica se obtienen buenos resultados, por lo que existen muchas dudas; con lo anterior no se pretende señalar que con el presente trabajo van a quedar aclaradas, por el contrario, la existencia en sí de tan diversas normas para la solución de un problema común, tratamos de hacer una discusión de los algunos factores que afectan los resultados.

En el presente trabajo se utilizó cuatro materiales, a los cuales se les obtuvo sus características de granulometría, límites de Atterberg, contracción lineal, el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima, cuyos resultados se presentan en el capítulo 5.

Por otro lado se realizaron las pruebas Porter Modificada y Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para obtener el valor relativo de soporte (V.R.S.) de cada uno de los materiales en estudio; de las cuales se obtuvieron resultados, los que se compararon y se presentan en el capítulo 5.

Esta investigación se realizó en coordinación con el ingeniero Fernando Olivera Bustamante, en base a su gran experiencia y en los estudios que ha hecho anteriormente sobre vías terrestres.

2.- PLANEACION DE LA INVESTIGACION.

La planeación de la investigación se realizó de acuerdo con las carencias y recursos con los que cuenta los laboratorios, tanto de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, así como el de una empresa privada, lugares en donde se realizaron las pruebas.

La secuencia que se siguió en la planeación fue en base a la disponibilidad de los equipos y a los procedimientos de las pruebas en general.

Para la realización de las pruebas se seleccionaron cuatro tipos de suelos, una arcilla, dos tepetates y una grava-arena, considerando de manera general que los materiales utilizados son representativos de los que se utilizan en la construcción de bases y sub-bases en pavimentos, así como en las cortinas de presas de enrocamiento, etc.

Los tepetates que se utilizaron se obtuvieron de diferentes bancos, uno ubicado en Ixtapaluca (Edo. de México) y el otro de un relleno utilizado en Ciudad Universitaria. La arcilla se obtuvo de la lumbrera del drenaje profundo ubicado entre el eje 3 Oriente y la avenida Río Churubusco. La grava arena de un banco en la zona poniente de la ciudad (San Mateo Atenco).

Para cada uno de los materiales utilizados se les efectuó las pruebas índices (determinación de sus características de granulometría, plasticidad y contracción lineal).

Posteriormente se realizó la prueba Proctor Estándar a los tepetates y la arcilla y, para la grava-arena se realizó la prueba Porter Estándar, con el objeto de obtener el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima, que son datos requeridos para realización de la prueba Porter Modificada.

No se realizó la prueba Proctor Estándar para la grava-arena, debido a que los resultados que se obtenían no eran representativos, ya que en general para materiales inertes gruesos o finos, es difícil la compactación dinámica por que la humedad se acumula en la parte inferior y al golpear el material en un punto, el material del lado opuesto sufre desacomodo; este fenómeno es mayor en la medida que se incrementa la humedad de prueba.

En base los datos obtenidos de las pruebas anteriores se realizó la prueba estática (Porter Modificada) para el 100%, 95%, 90% y 85% de grados de compactación, así como sus respectivos valores relativos de soporte (V.R.S.).

Por último se efectuó la prueba dinámica (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos), para 12, 26 y 56 golpes, para la obtención del peso volumétrico seco máximo, humedad óptima, expansión y valor relativo de soporte (V.R.S.), a cada uno de los materiales.

Posteriormente se compararon los valores relativos de soporte (V.R.S.), de los resultados obtenidos de las pruebas estática y dinámica, determinándose de esta manera sus respectivas conclusiones.

Al final se mencionan las referencias de los textos que se utilizaron, como ayuda a la realización de este trabajo de investigación.

3.- DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS.

3.1 PRUEBAS INDICE.

3.1.1 DETERMINACION DE LA COMPOSICION GRANULOMETRICA MEDIANTE EL USO DE MALLAS.

El análisis granulométrico estándar consiste en calcular el porcentaje en peso, de las diferentes fracciones, separando y clasificando por tamaños las partículas que componen el suelo, utilizando el procedimiento de cribado, es decir, haciendo pasar el material a través de un juego de mallas o tamices de aberturas cuadradas que comprenden de la NÚm. 75.0 mm. (3") a la NÚm. 0.075 mm. (# 200). Se pesan las partículas que se retienen en cada una de ellas y se encuentra el porcentaje respectivo con relación al peso seco total; después se calcula el porcentaje que pasa por las diferentes mallas.

3.1.1.1 Equipo.

- balanza de veinte (20) kilogramos de capacidad y cinco (5) gramos de aproximación,
- balanza de un (1) kilogramo de capacidad y un décimo (0.1) gramos de aproximación,
- charola y cucharón de lámina,
- cepillo de cerdas y de alambre delgado,

- horno con termostato que mantenga una temperatura constante de ciento cinco más menos cinco grados centígrados (105 ± 5 °C),
- desecador de cristal,
- juego de mallas de las siguientes denominaciones: Núms. 75.0 (3.0"), 50.0 (2.0"), 37.5 (1.5"), 25.0 (1.0"), 19.0 (3/4"), 12.5 (1/2"), 9.5 (3/8"), 4.75 (# 4), 2.0 (# 10), 0.85 (# 20), 0.425 (# 40), 0.25 (# 60), 0.15 (# 100) y 0.075 (# 200), en milímetros,
- tapa y fondo para el juego de mallas,
- base de aluminio de un (1) litro,
- agitador de varilla metálica de seis (6) milímetros de diámetro y veinte (20) cm. de longitud,
- agitador mecánico.

3.1.1.2 Preparación de la muestra.

La preparación de las muestras alteradas comprende las operaciones de secado, disgregación y cuarteo, que son necesarias para obtener las porciones representativas adecuadas para efectuar los ensayos correspondientes, las cuales se definen a continuación.

Secado .- Esta operación tiene por objeto facilitar la disgregación y el manejo de las muestras. El secado podrá ser al sol o en el horno; en el primer caso, se extiende la muestra en las charolas o sobre una superficie horizontal, lisa y limpia, para que sea fácil recogerla y evitar la pérdida de finos. Cuando se use el horno, deberá controlarse la temperatura de tal modo que ésta sea del orden de sesenta grados centígrados (60 °C). En ambos casos se revuelve

periódicamente el material para lograr un secado más rápido y uniforme, hasta reducir su humedad a un grado tal que permita su fácil disgregación. Tratándose de materiales con altos porcentajes de finos plásticos, se evitará el secado total, puesto que dará lugar a la formación de grumos no fáciles de disgregar, que dificultan el lavado de la muestra a través de la malla Núm. 0.075 (# 200).

Disgregación .- La disgregación tiene por objeto de separar las diferentes partículas que constituyen la muestra, cuando ésta contiene grumos. La operación es relativamente fácil cuando se refiere a materiales granulares poco cementados, aumentando su dificultad a medida que va siendo mayor la cementación. La disgregación de la muestra deberá efectuarse sin tratar de romper las partículas duras, llevándose a un grado tal que permita reproducir en lo posible las condiciones de utilización del material en el campo.

Cuarteo .- El cuarteo tiene por finalidad obtener de una muestra porciones representativas de tamaño adecuado para efectuar las pruebas de laboratorio que se requieran.

3.1.1.3 Procedimiento de prueba.

De cada muestra se obtiene por cuarteo una porción representativa de quince (15) kilogramos el cual se determina y se anota como W_u con aproximación de un (1) gramo.

Una vez preparada la muestra, se criba ésta en forma manual a través de las mallas Núms. 75.0 (3.0"), 50.0 (2.0"),

37.5 (1.5"), 25.0 (1"), 19.0 (3/4"), 12.5 (1/2"), 9.5 (3/8") y 4.75 (# 4), siguiendo el orden indicado. Para efectuar esta operación deberá imprimirse un movimiento vertical y de rotación, para mantener el material en constante movimiento y permitir que los tamaños menores pasen a través de las aberturas correspondientes.

Se pesan los materiales retenidos en cada una de las mallas y se anotan los respectivos pesos como W_1 .

La fracción que pasa la malla Núm. 4.75 (# 4) se cuarteo y se toma una muestra representativa de doscientos (200) gramos de material seco aproximadamente.

Se coloca esta muestra en un vaso metálico y se agrega aproximadamente quinientos (500) centímetros cúbicos de agua, dejando en reposo durante unas doce (12) horas como mínimo.

Transcurrido ese lapso, se lava la muestra a través de la malla Núm. 0.075 (# 200). El lavado se hará agitando el contenido del vaso durante quince (15) segundos. A continuación se decanta la suspensión sobre dicha malla. Para facilitar el paso de las partículas finas a través de las mallas, deberá aplicarse sobre esta un chorro de agua a baja presión.

Se repite la operación indicada en el párrafo anterior, hasta que el agua decantada salga limpia.

A continuación se regresa al vaso metálico el material que se haya retenido en la malla Núm. 0.075 (# 200), utilizando un poco de agua, la que se decantará del vaso, cuidando que no haya arrastre de las partículas.

Se seca el material en el mismo vaso metálico, dejándolo en el horno un lapso no menor de dieciseis (16) horas, a una temperatura de ciento cinco más menos cinco grados centígrados (105 ± 5 °C), a continuación se saca la muestra del horno y se deja enfriar hasta que tenga la temperatura cercana al ambiente.

Se superponen las mallas a partir de la charola de fondo, en siguiente orden, Núms. 0.075 (# 200), 0.15 (# 100), 0.25 (# 60), 0.425 (# 40), 0.85 (# 20) y la 2.0 (# 10). Se vierte el material sobre la malla superior, se coloca la tapa, y se efectúa la operación de cribado, imprimiendo el juego de mallas un movimiento vertical y de rotación horizontal, durante cinco (5) minutos; en esta operación es conveniente emplear el agitador mecánico.

Se quita la tapa, se separa la malla Núm. 2 (# 10) y se agita sobre una charola, hasta que se estime que el peso del material que pasa dicha malla, no sea mayor de un gramo. Se vierte sobre la malla Núm. 0.85 (# 20) el material que pasó la malla Núm. 2 (# 10) y se deposita en la charola. Se repite este procedimiento de cribado adicional en cada una de las mallas restantes. Las partículas que hayan quedado atoradas deberán regresarse a las porciones retenidas correspondientes, cepillando las mallas por el revés. A continuación se pesan los materiales retenidos en cada una de las mallas y se anotan los pesos respectivos como W_j , en gramos.

En algunos casos a las partículas que pasan la malla Núm. 0.075 (# 200) se les realiza la granulometría por el densímetro o hidrómetro para estudios más profundos referentes a la plasticidad, que el presente trabajo de investigación, está fuera de nuestro alcance.

3.1.2 DEFINICION DE LOS LIMITES DE PLASTICIDAD Y DE LA CONTRACCION LINEAL.

Estos métodos de prueba tienen por objeto conocer las características de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla Núm. 0.425 (# 40), cuyos resultados se utilizan principalmente para la clasificación de los suelos. A continuación presentamos los siguientes conceptos:

Plasticidad .- Es la propiedad de algunos suelos que les permite, bajo ciertas condiciones de humedad, mantener la deformación producida por un esfuerzo que le ha sido aplicado en forma rápida, sin agrietarse, desmoronarse o sufrir cambios volumétricos apreciables, con una resistencia mínima al corte de veinticinco (25) gramos por centímetro cuadrado.

Límite Líquido .- Es el contenido de agua que marca la frontera entre los estados semilíquido y plástico.

Límite Plástico .- Es el contenido de agua que marca la frontera entre los estados plástico y semisólido.

Límite de Contracción .- Es el contenido de agua que marca la frontera del estado semisólido y sólido.

Índice Plástico .- Es la diferencia aritmética entre el límite líquido y el límite plástico.

Contracción Lineal .- Es un índice de la reducción del volumen de un suelo, medida a través de una de sus dimensiones y expresada como porcentaje de la dimensión original, cuando la humedad se reduce desde la correspondiente al límite líquido hasta la del límite de contracción.

3.1.3 DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO.

Para la determinación del límite líquido de un suelo por el método estándar, se emplea el procedimiento de CASAGRANDE, según el cual se define el límite líquido como el contenido de agua de la fracción del suelo que pasa la malla Núm. 0.425 (# 4), cuando al ser colocado en la copa de Casagrande y efectuar en ella una ranura trapecial de dimensiones especificadas, los bordes inferiores de la misma se ponen en contacto en una longitud de trece punto cero (13.0) milímetros, después de golpear la copa veinticinco (25) veces, dejándola caer contra una superficie dura de características especiales desde una altura de un (1) centímetro, a la velocidad de dos (2) golpes por segundo.

En este método estándar el límite líquido se determina mediante la curva de fluidez, la que se obtiene uniendo los puntos que representan los contenidos de agua correspondientes a diversos números de golpes, para lo cual la ranura se cierra en la longitud especificada.

3.1.3.1 Equipo.

- cápsula de porcelana de doce (12 cm.) de diámetro,
- espátula de hoja de acero flexible de siete punto cinco (7.5) centímetros de longitud y dos (2) centímetros de ancho, con punta redonda,
- cuentagotas,
- copa de Casagrande calibrada para una altura de caída de un (1) centímetro, provista de dos (2) ranuradores, uno plano

y otro curvo, con las características indicadas en la figura 3.1,

- vidrios de reloj,
- balanza de mil más menos cero punto un (1000 ± 0.1) gramos, de peso y aproximación,
- horno con termostato que mantenga una temperatura constante de ciento cinco más menos cinco grados centígrados (105 ± 5 °C),
- desecador de cristal,
- vaso o recipiente con capacidad de cero punto cinco (0.5) litros,
- paño absorbente.

3.1.3.2 Preparación de la muestra.

En la preparación para determinar los límites de plasticidad y la contracción lineal, se emplean doscientos cincuenta (250) gramos de material previamente cribado por la malla Núm. 0.425 (# 4), los cuales se toman de una porción representativa.

La muestra se coloca en un recipiente apropiado, se le agrega en la cantidad necesaria para que tome el aspecto de material saturado y se deja en reposo durante veinticuatro (24) horas aproximadamente, en un lugar fresco, cubriendo el recipiente con un paño que se mantendrá húmedo a fin de reducir al mínimo la pérdida de agua por evaporación.

3.1.3.3 Procedimiento de prueba.

Se toma una porción de ciento cincuenta (150) gramos aproximadamente, de la muestra preparada, se coloca en la cápsula de porcelana y se procede a homogenizar la humedad con la espátula.

Logrado lo anterior se coloca en la copa de Casagrande, previamente calibrada, una cantidad suficiente de material para que una vez extendido por medio de la espátula se tenga un espesor de ocho (8) a diez (10) milímetros en la parte central de la muestra colocada. Para extender el material se procede del centro hacia los lados, sin aplicarle una presión excesiva y con el mínimo de pasadas de la espátula.

Se efectúa una ranura en la parte central del material que contiene la copa, con una pasada firme del ranurador, manteniéndolo siempre normal a la superficie interior de la copa. La localización, forma y dimensiones que debe tener la ranura en su parte central se ilustran en la figura 3.2.

Se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa, a razón de dos (2) golpes por segundo y se registra el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de trece (13) milímetros.

Una vez logrado lo anterior se toma con la espátula aproximadamente diez (10) gramos de material de la porción cerrada de la ranura y se colocan en un vidrio de reloj, para proceder de inmediato a determinar su contenido de agua.

VISTAS DE LAS RANURAS EN SECCION

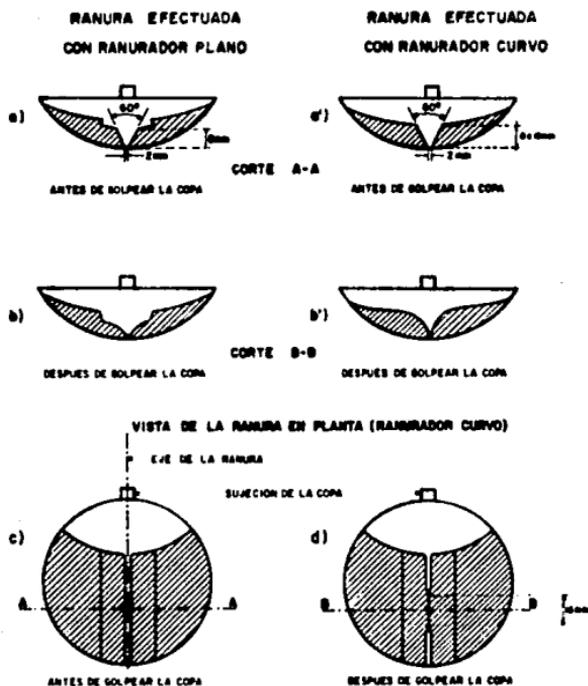


FIGURA 3.2 FORMA Y DIMENSIONES DE LAS RANURAS

A continuación y una vez que se ha tomado la muestra para la determinación de la humedad, se regresa a la cápsula de mezclado el material que contiene la copa, se lavan y secan tanto la copa como el ranurador.

En seguida se agrega agua con el cuentagotas al material contenido en la cápsula, se homogeniza con la espátula y se realizan las etapas de los párrafos anteriormente descritos, para obtener cuatro (4) series de valores, incrementando siempre el contenido de agua para cada proceso.

La cantidad de agua que se adicione al material deberá ser en tal forma que las cuatro (4) determinaciones efectuadas, queden comprendidas entre cinco (5) y cuarenta (40) golpes, siendo necesario obtener dos (2) valores arriba y dos (2) abajo de veinticinco (25) golpes. Para consistencias menores de cinco (5) golpes es difícil identificar el momento de cierre de la ranura en la longitud especificada; por otra parte, para más de cuarenta (40) golpes, se dificulta la ejecución de la prueba.

Se dibujan los puntos correspondientes a cada determinación en un papel semilogarítmico cuyas abscisas representan en escala logarítmica, el número de golpes y en las ordenadas, en escala aritmética, los respectivos contenidos de agua. A continuación se traza la línea recta que pase lo más cerca posible de cuando menos tres (3) de los puntos obtenidos; la línea así trazada se denomina curva de fluidez, cuya ordenada correspondiente a veinticinco (25) golpes, se reporta como el límite líquido del suelo, expresado como contenido de agua en por ciento y redondeando al número entero más cercano.

3.1.4 DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO.

El límite plástico de un suelo se define como el mínimo contenido de agua de la fracción que pasa la malla Núm. 0.425 (# 4), para que se pueda formar con ella cilindros de tres (3) milímetros, sin que se rompan o desmoronen.

3.1.4.1 Equipo.

- cápsula de porcelana de doce (12) centímetros de diámetro,
- espátula de hoja de acero flexible de siete punto cinco (7.5) centímetros de longitud y dos (2) centímetros de ancho,
- placa de vidrio con dimensiones mínimas aproximadas de cuarenta (40) por cuarenta (40) centímetros de lado y cero punto seis (0.6) centímetros de espesor,
- balanza de mil (1000) gramos de capacidad y cero punto cero un (0.01) gramos de aproximación,
- alambre de acero, de tres (3) milímetros de diámetro y diez (10) centímetros de longitud,
- vidrios de reloj,
- horno con termostato que mantenga una temperatura constante de ciento cinco más menos cinco grados centígrados (105 ± 5 °C).

3.1.4.2 Procedimiento de prueba.

Se toma una muestra de material preparado, a la cual se le da la forma de una pequeña esfera de aproximadamente doce (12) milímetros de diámetro, que deberá moldearse con los dedos para que pierda la humedad y se forme un cilindro manipulándola sobre la palma de la mano, aplicando con los dedos la presión necesaria para tal objeto.

A continuación se rola el cilindro con los dedos de la mano sobre la placa de vidrio, dándole la presión requerida para reducir su diámetro hasta que éste sea uniforme en toda su longitud y ligeramente mayor de tres (3) milímetros, tal como se muestra en la figura 3.3.

Si al alcanzar dicho diámetro de tres (3) milímetros, el cilindro no se rompe en varias secciones simultáneamente, su humedad es superior a la del límite plástico. En este caso se debe juntar todo el material y formarse nuevamente una pequeña esfera, manipulándola con los dedos para facilitar la pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma.

Se repiten todas las operaciones descritas en los dos últimos párrafos del presente inciso, hasta que el cilindro se rompa en varios segmentos precisamente en el momento de alcanzar el diámetro de tres (3) milímetros; dicho diámetro se verificará comparándolo con el alambre de referencia.

En seguida se colocan en un vidrio de reloj todos los fragmentos en que se haya dividido el cilindro y se efectúa la determinación de la humedad correspondiente.



Figura 3.3 Operación para formar el cilindro de suelo en la determinación del límite plástico.

Para mayor seguridad en los resultados de la prueba, se deben llevar a cabo por lo menos tres (3) determinaciones sucesivas del límite plástico, en cada muestra.

Se reporta como límite plástico del suelo, el promedio de las humedades que concuerden entre sí; dicho promedio se redondea al número entero más cercano.

3.1.5 DETERMINACION DEL INDICE PLASTICO.

El índice plástico de un suelo mide el intervalo de variación de la humedad, dentro del cual el suelo presenta una consistencia plástica, en donde los límites líquido y plástico corresponden a las fronteras superior e inferior de dicha consistencia, respectivamente.

3.1.5.1 Procedimiento.

Se reporta como índice plástico la diferencia calculada según la expresión siguiente :

$$IP = LL - LP$$

En donde:

IP.- es el índice plástico del suelo, en porcentaje.

LL.- es el límite líquido del suelo, en porcentaje.

LP.- es el límite plástico del suelo, en porcentaje.

3.1.6 DETERMINACION DE LA CONTRACCION LINEAL.

La contracción lineal de un suelo se define como el índice de la reducción de la mayor dimensión de un espécimen de forma prismática rectangular, elaborado con la fracción de suelo que pasa la malla Núm. 0.425 (# 4), cuando su humedad disminuye desde la correspondiente al límite líquido hasta el límite de contracción, expresada dicha reducción como un porcentaje de la longitud inicial del espécimen.

3.1.6.1 Equipo.

- cápsula de porcelana de doce (12) centímetros de diámetro,
- espátula de hoja de acero flexible de siete punto cinco (7.5) centímetros de longitud y dos (2) centímetros de ancho,
- moldes de lámina galvanizada del Núm. 16, con sección de dos (2) por dos (2) centímetros y diez (10) centímetros de longitud,
- calibrador con vernier del tipo máuser,
- horno con termostato que mantenga una temperatura constante de ciento cinco más menos cinco grados centígrados (105 ± 5 °C),
- grasa grafitada.

3.1.6.2 Preparación de la muestra.

Se utiliza una muestra preparada, igual como para la determinación del límite líquido, o bien se aprovechará el material que haya sobrado de ésta.

3.1.6.3 Procedimiento de prueba.

Se agrega a la muestra agua o material menos húmedo tomado de la porción preparada, hasta lograr que la humedad sea la correspondiente a la del límite líquido, lo cual se verifica empleando la copa de Casagrande y cumpliendo con la condición de que la ranura se cierre en una longitud de trece (13) milímetros precisamente a los veinticinco (25) golpes.

Con el material preparado en las condiciones indicadas se procede a llenar el molde de prueba, figura 3.4, al cual se le habrá aplicado previamente una capa delgada de grasa en su interior para evitar que el material se adhiriera a sus paredes.

El llenado del molde se efectúa en tres (3) capas, utilizando la espátula y golpeándolo después de la colocación de cada capa contra una superficie dura, para ésto último, deberá tomarse el molde por sus extremos, procurando siempre que el impacto lo reciba en toda su base, lo cual se logra conservando paralelismo entre dicha base y la superficie sobre la cual se golpea. En cada caso las operaciones de golpeo deberán prolongarse lo suficiente para lograr la expulsión del



Llenado de los moldes para la determinación de la contracción lineal.

Golpeado de los moldes de contracción lineal.



Figura 3.4

aire contenido en la muestra colocada, lo que se pone de manifiesto cuando ya no se aparecen burbujas en su superficie.

A continuación se enrasa el material en el molde utilizando la espátula y se deja orear a la sombra hasta que cambie ligeramente su color, después de lo cual se pone a secar en el horno por un período de dieciocho (18) horas, aproximadamente, a una temperatura de ciento cinco más menos cinco grados centígrados (105 ± 5 °C).

Se extrae del horno el molde con el espécimen, se deja a enfriar a la temperatura ambiente y a continuación se saca la barra del molde.

Finalmente, se mide con el calibrador la longitud media de la barra del material seco y la longitud interior del molde, con aproximación de cero punto cero un (0.01) centímetros, calculándose ésta de acuerdo a la siguiente fórmula :

$$CL = \frac{L_i - L_r}{L_i} \times 100$$

En donde:

CL.- es la contracción lineal aproximada al décimo más cercano, en por ciento.

L_i .- es la longitud inicial del espécimen húmedo, que corresponde a la longitud interior del molde, en centímetros.

L_r .- es la longitud final de la barra de suelo seco, en centímetros.

3.2 PRUEBAS DE COMPACTACION.

Se entiende por compactación al proceso mecánico, por medio del cual se reduce el volumen de los materiales, en un tiempo relativamente corto (horas), con el fin de que sean resistentes a las cargas actuantes y tengan una relación esfuerzo-deformación conveniente durante la vida útil de la obra, por lo tanto, produce el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas, generalmente a costa de la expulsión del volumen de aire por medios mecánicos.

Se distingue de la consolidación de los suelos en que, en este último proceso el peso específico del material crece gradualmente bajo la acción natural de sobrecargas impuestas, durante mucho tiempo, provocando la expulsión de agua y aire por un proceso de difusión; ambos procesos involucran disminución de volumen, por lo que en el fondo son equivalentes.

La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de la resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtiene al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordes de defensa, muelles, pavimentos, etc.

Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen del tipo de materiales con los que se trabaje en cada caso, ya que en base a un experimento sencillo se comprueba que los materiales puramente friccionantes, como la arena, se compactan eficazmente por métodos vibratorios, en tanto que en

los suelos plásticos el procedimiento de carga estática resulta más ventajoso. En la práctica, estas características se reflejan en los equipos disponibles para el trabajo, tales como plataformas vibratorias, rodillos lisos, neumáticos o pata de cabra. En las últimas épocas los equipos de campo han tenido gran desarrollo y hoy existen en gran variedad de sistemas, tamaños y pesos, de manera que el ingeniero tiene la posibilidad de elegir entre muchos, con los implementos adecuados a cada necesidad.

El establecimiento de una prueba simple de compactación en el laboratorio cubre, principalmente, tres finalidades. Por un lado disponer de muestras de suelo compactadas en condiciones tales que nos proporcionen datos de resistencia o índices de resistencia semejantes a las de campo a fin de poder utilizar sus características con fines de proyecto; por otro lado, es necesario poder controlar el trabajo de campo, con vistas a tener la seguridad de que el equipo usado está obteniendo efectivamente las condiciones previstas en el proyecto (peso volumétrico seco) y por último que los trabajos de control de calidad sean los más expeditos posible para no entorpecer el trabajo del equipo.

Al medir el grado de compactación de una capa se debe tener en mente que lo que se requiere es tener en ella un cierto peso volumétrico seco y que para el proyecto se requiere que el resultado de la prueba este debidamente correlacionado con el comportamiento real de los materiales.

Dentro de estos métodos encontramos a la Prueba Proctor Estándar (debido a R.R. Proctor por los años de 1920) conocida también como A.A.S.H.O. (American Association of State Highway Officialls) de la cual han surgido variantes a través del tiempo como Proctor S.C.T, A.A.S.H.O Modificada

tres (3) capas, A.A.S.H.O Modificada cinco (5) capas, Método del Cuerpo de Ingenieros de los E.U.A, etc. clasificadas dentro de las pruebas dinámicas. Por otro lado existen las pruebas clasificadas dentro de la compactación estática, como la Porter Estándar y Porter Modificada (Padrón).

Las pruebas de laboratorio se clasifican principalmente en cuatro tipos: estáticas, dinámicas, por amasado y vibratorias. Las pruebas de compactación, de las cuales sólo haremos referencia de las dos primeras que se mencionaron.

Las pruebas de compactación estática son aquellas en que se compacta el espécimen con una presión que se proporciona al material por medio de una placa que cubre la superficie libre del molde y cuyo principal exponente es la Prueba Porter, ya mencionada. Las pruebas de tipo dinámico son aquellas en las que el espécimen se elabora compactando el material por medio de pisonos, que tiene una área de contacto menor a la sección libre del molde que se usa, el ejemplo típico de las pruebas de este tipo es la Proctor.

3.2.1 PRUEBA PROCTOR ESTANDAR.

La prueba sirve para determinar el peso específico seco máximo y la humedad óptima en suelos que se emplean en la construcción de terracerías. El método consiste esencialmente en preparar especímenes utilizando una misma muestra de material con diferentes contenidos de agua, compactándolos mediante impactos. La prueba tiene cuatro (4) variantes.

- 1.- La variante A, se compacta en molde de 10.16 cm. de diámetro interior y materiales que pasan la malla Núm. 4.75 (# 4).
- 2.- La variante B, se compacta en molde de 15.24 cm. de diámetro interior y materiales que pasan la malla Núm. 4.75 (# 4).
- 3.- La variante C, se compacta en molde de 10.16 cm. de diámetro interior y materiales retenidos en la malla Núm. 4.75 (# 4) y los que pasan la malla Núm. 19.0 (3/4").
- 4.- La variante D, se compacta en molde de 15.24 cm. de diámetro interior y materiales retenidos en la malla Núm. 4.75 (# 4) y los que pasan la malla Núm. 19.0 (3/4").

Para nuestro caso sólo se describirá la prueba con la variante A.

3.2.1.1 Equipo

- un molde estándar de compactación cilíndrico de ciento uno punto seis (101.6) milímetros de diámetro interior y ciento dieciseis punto cuatro (116.4) milímetros de altura, con una extensión o collarín de sesenta punto tres (60.3) milímetros de altura exterior y provistos de una placa base de nueve punto cinco (9.5) milímetros de espesor, como el mostrado en la figura 3.5,
- pisón de compactación del tipo de martillo deslizante, que consiste en un cilindro compacto de acero, de cincuenta punto ocho (50.8) milímetros de diámetro, con un peso de dos mil quinientos (2500) gramos y empuñadura del pisón, acoplado a una guía metálica tubular, para que tenga una caída libre de treinta punto cinco (30.5) centímetros,
- regla metálica de veinticinco (25) centímetros de longitud aproximadamente,
- balanza con capacidad mínima de quince (15) kilogramos y aproximación de cinco (5) gramos,
- balanza con una capacidad mínima de dos (2) kilogramos y aproximación de cero un punto un (0.1) gramos,
- horno para secado de muestras, provisto de un control termostático para mantener una temperatura de ciento cinco más menos cinco grados centígrados (105 ± 5 °C),
- base cúbica de concreto o de otro material de rigidez similar, con dimensiones mínimas de cuarenta (40) centímetros por lado,
- mallas Núms. 19.0 (3/4") y 4.75 (# 4),
- probeta con una capacidad de quinientos (500) centímetros cúbicos, y graduaciones de diez (10) centímetros cúbicos,
- cápsulas metálicas con tapa,
- charolas rectangulares,
- aceite para lubricar las paredes de los moldes.

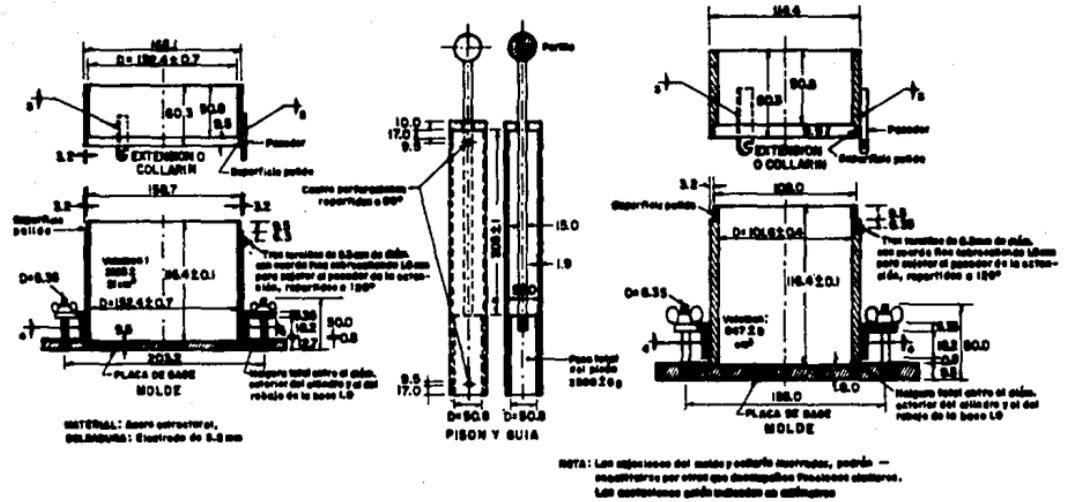


FIGURA 3.5 MOLDES CILINDRICOS Y PISON PARA LA PRUEBA DE COMPACTACION AASHTO ESTANDA

3.2.1.2 Preparación de la muestra.

La preparación de la muestra comprende las operaciones de secado, disgregación y cuarteo, tal como se indica en el inciso 3.1.1.2; en donde se obtiene por cuarteo una muestra de aproximadamente cuatro (4) kilogramos, verificando que hayan pasado todas las partículas la malla Núm. 4.75 (# 4).

3.2.1.3 Procedimiento de Prueba.

Se le agrega a la muestra de prueba, la cantidad de agua necesaria para que al ser repartida uniformemente, se tenga una humedad inferior de cuatro a seis por ciento (4% a 6%) a la óptima estimada, se considera que cumple lo anterior cuando presenta una consistencia tal que, al comprimir una porción de la muestra en la palma de la mano, no deje partículas adheridas en ésta, ni la humedezca y que a la vez, el material comprimido pueda tomarse con dos (2) dedos sin que se desmorone.

Se divide la muestra en el número requerido de porciones, una por cada capa que vaya a usarse, aproximadamente iguales, que se pondrán en el cilindro, se apoya sobre el bloque de concreto y se compacta con veinticinco (25) golpes del pisón, manteniendo la altura de caída de treinta punto cinco (30.5) centímetros y repartiendo en forma uniforme los golpes en la superficie de la capa. Se escarifica ligeramente la superficie de la capa y se repiten estas operaciones con cada una de las dos (2) fracciones restantes de la muestra.

Terminada la compactación, se retira la extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga del cilindro en un espesor promedio de uno punto cinco (1.5) centímetros, pues de lo contrario la prueba deberá repetirse utilizando de preferencia una nueva muestra con peso ligeramente menor que el inicial; se enrasa cuidadosamente el espécimen con la regla metálica y se deposita en una charola el material excedente. A continuación se pesa el cilindro con su contenido y se anota en la hoja de registro su valor W_1 , en gramos.

Se saca el espécimen del cilindro, se corta longitudinalmente y de su parte central se obtiene una porción representativa a la que se le determina su humedad, anotando los datos correspondientes a esta determinación en la hoja de registro.

Se incorporan las fracciones del espécimen al material que sobró al enrasarlo, se disgregan los grumos, se agrega dos por ciento (2%) de agua, aproximadamente, con respecto al peso inicial de la muestra y se repiten los pasos descritos anteriormente.

Con la misma muestra de prueba se repite lo indicado en el párrafo anterior, incrementando sucesivamente su contenido de agua, hasta que la muestra este muy húmeda y el último espécimen elaborado presente una disminución apreciable en su peso con respecto al anterior. Para definir convenientemente la variación del peso específico de los especímenes elaborados, se requiere que las determinaciones sean cuatro (4) o cinco (5); así también, que la segunda determinación, el peso del cilindro con el espécimen húmedo, sea mayor que la primera, y que la penúltima determinación sea mayor que la última.

Se calcula y se reporta el contenido de agua de cada espécimen de acuerdo a la siguiente fórmula :

$$W_i = \frac{W_{\text{húm.}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{seco}}} \times 100$$

En donde :

- W_i .- es la humedad de la muestra en porcentaje.
- $W_{\text{húm}}$.- es el peso del material húmedo del espécimen.
- W_{seco} .- es el peso seco de la porción representativa del material, una vez que se ha secado en el horno durante veinticuatro (24) horas.

Se calcula el peso específico del material húmedo y se anota su valor en la hoja de registro, por medio de la siguiente fórmula :

$$\gamma_n = \frac{W_i - W_t}{V} \times 1000$$

En donde :

- γ_n .- es el peso específico del material húmedo, en kilogramos por metro cúbico.
- W_1 .- es el peso del material húmedo compactado más el peso del cilindro, en gramos.
- W_t .- es el peso del cilindro, en gramos.
- V .- es el volumen del cilindro, en centímetros cúbicos.

Se calcula el peso específico de cada espécimen en estado seco, mediante la siguiente fórmula y se anota el valor en la hoja de registro :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{100 + w} \times 100$$

En donde :

- γ_d .- es el peso específico del espécimen en estado seco, en kilogramos por metro cúbico
- γ_n .- es el peso específico del espécimen húmedo, en kilogramos por metro cúbico.
- w .- es el contenido de agua, en por ciento.

Se determina el peso específico máximo del material en estado seco, partiendo de la curva como la que se ilustra en la figura 3.6, en donde las ordenadas representan los pesos específicos (en kilogramos por metro cúbico) y las abscisas los contenidos de agua en porcentaje, de cada uno de los especímenes. Se reportan el punto más alto de dicha curva que representa el peso específico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x.}$), y la humedad correspondiente (w_o), es la óptima del material.

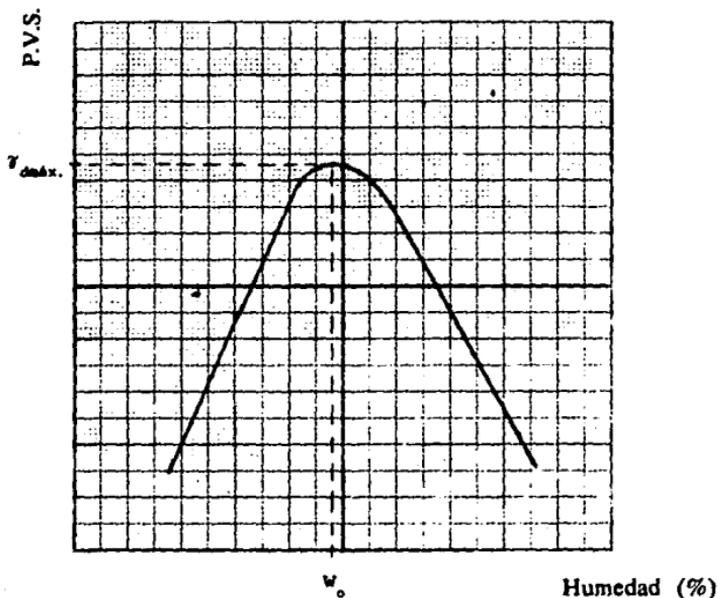


Figura 3.6

3.2.2 PRUEBA PORTER ESTANDAR.

La prueba Porter Estándar sirve para determinar el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima en suelos con partículas gruesas, que se emplean en terracerías, pudiendo efectuarse también en arenas y materiales finos cuyo índice plástico sea menor que seis (6).

El método consiste en preparar especímenes con material que pasa la malla Núm. 25.0 (1.0"), agregándoles diferentes cantidades de agua y compactándolos con carga estática.

La principal aplicación de este procedimiento es la determinación del valor relativo de soporte (V.R.S.), elaborando un espécimen con la humedad óptima del material por estudiar. Dicho espécimen se somete a un periodo de saturación antes de la obtención del valor relativo de soporte (V.R.S.) y, se reporta como dato adicional la expansión del suelo originada por su saturación.

El valor relativo de soporte (V.R.S) se define como la relación de las resistencias en porcentaje, del material en estudio y de un material estándar, al ser penetrados por un cilindro metálico de 19.35 cm² de sección. El material estándar es una caliza triturada, para la cual ya se tienen las resistencias constantes para cualquier penetración.

Para nuestro caso, se efectuó la prueba Porter Estándar, con la única finalidad de obtener el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima a la grava-arena, por la dificultad de compactar este material con la prueba Proctor Estándar, tal como se mencionó en el Capítulo 2. Por

lo tanto sólo se describirá la parte del procedimiento de la prueba, en que se determina el peso volumétrico seco máximo, así como su correspondiente humedad óptima.

3.2.2.1 Equipo.

- molde cilíndrico de compactación de ciento cincuentisiete punto cinco (157.5) milímetros de diámetro interior y de ciento veintisiete punto cinco (127.5) milímetros de altura, provisto de collarín y una base con dispositivo para sujetar el cilindro, figura 3.7,
- máquina de compresión con capacidad mínima de treinta (30) toneladas y aproximación de cien (100) kilogramos,
- varilla metálica de diecinueve (19) milímetros de diámetro y trecientos (300) milímetros de longitud, con punta de bala,
- placa circular para la compactación, con diámetro de ciento cincuenticuatro punto cinco (154.5) milímetros, con dispositivo para sujetarla en la cabeza de aplicación de la carga,
- mallas Núms. 25.0 (1") y 4.75 (# 4),
- balanza con capacidad mínima de veinte (20) kilogramos y aproximación de cinco (5) gramos,
- calibrador con vernier tipo máuser con aproximación de cero punto un (0.1) milímetro,
- cronómetro o reloj.

3.2.2.2 Preparación de la muestra.

De una muestra obtenida y preparada como se indica en el inciso 3.1.1.2, teniendo cuidado de secar el material únicamente lo necesario para facilitar su disgregación, se toma por cuarteo una porción suficiente para obtener aproximadamente dieciseis (16) kilogramos de material que pase

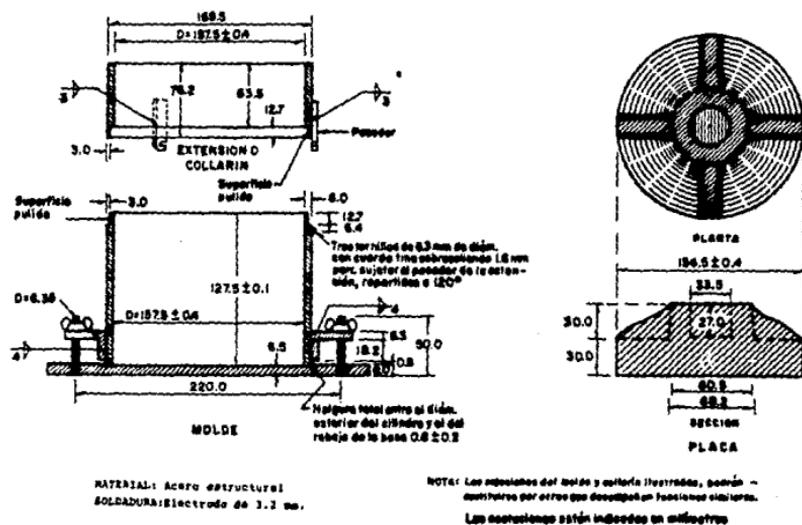


FIGURA 3.7 MOLDE CILINDRICO Y PLACA PARA LA PRUEBA DE COMPACTACION ESTATICA.

la malla Núm. 25.0 (1.0") y se pesa con una aproximación de cinco (5) gramos.

El material retenido en la malla Núm. 25.0 (1.0") se pesa con aproximación de diez (10) gramos y se determina el porcentaje de éste con respecto al total de la porción.

Si dicho porcentaje excede de quince (15%), se reemplaza por una cantidad con peso igual a la del citado retenido, utilizando material de otra muestra, obtenida y preparada como se señala en el inciso 3.1.1.2 y, que pasa la malla Núm. 25.0 (1") y se retiene en la malla Núm.4.75 (# 4).

Luego se forman muestras de prueba, dividiendo la porción obtenida en partes de cuatro (4) kilogramos aproximadamente mediante cuarteo.

Se toma una de las cuatro (4) partes del material y se le incorpora la cantidad de agua necesaria, para que una vez repartida uniformemente presente una consistencia tal, que al ser comprimido en la palma de la mano, la humedezca muy ligeramente. Para favorecer lo anterior en algunos casos será necesario dejar el material en reposo, cubierto con una lona húmeda.

3.2.2.3 Procedimiento de prueba.

Se coloca el material humedecido, dentro del molde con su collarín instalado, en tres (3) capas, aproximadamente del mismo espesor, y se le da a cada una de ellas veinticinco (25) golpes con la varilla metálica, distribuyéndolos en forma uniforme.

Al terminar la colocación de la última capa, se toma el molde que contiene el material, se coloca en la máquina de compresión y se aplica en forma lenta la carga uniforme, hasta alcanzar en un lapso de cinco (5) minutos la presión de ciento cuarenta punto seis (140.6) kilogramos por centímetro cuadrado, equivalente a una carga de veintiseis punto cinco (26.5) toneladas aproximadamente; se mantiene esta carga durante un (1) minuto y se hace la descarga en el siguiente minuto. Al llegar a la carga máxima se observa la base del molde y, si esta humedecida, el material tiene la humedad óptima de compactación y ha alcanzado su peso volumétrico seco máximo.

Si al llegar a la carga máxima no se humedece la base del molde, la humedad con que se preparó la muestra es inferior a la óptima y por lo tanto, se toma otra porción representativa del material y se le adiciona una cantidad de agua igual al del espécimen anterior, más ochenta (80) centímetros cúbicos; se mezcla uniformemente y se repiten los pasos descritos en los párrafos anteriores.

Por el contrario, si antes de llegar a la carga máxima se humedece la base del molde, implica que la cantidad de agua con que se preparó la muestra es superior a la óptima y en este caso se procede como se indica en el párrafo anterior, con la diferencia de que en lugar de adicionar los ochenta (80) centímetros cúbicos de agua, se le disminuirá esta cantidad, en cada nueva porción representativa del material; luego se repite el procedimiento descrito en los dos primeros párrafos del presente inciso.

Terminada la compactación del espécimen preparado con la humedad óptima, se retira el molde de la máquina de compresión y se determina la altura del espécimen, h_s , en

centímetros con aproximación de cero punto un (0.1) milímetros.

Se pesa el molde de compactación que contiene el material compactado y se anota dicho peso W_1 , en kilogramos, con aproximación de cinco (5) gramos.

Se saca el espécimen del cilindro, se corta longitudinalmente y de la parte central se obtiene una muestra representativa, al cual se le determina su humedad w_o , y se anota en la hoja de registro.

Se calculan y se reportan en esta prueba:

- 1.- el volumen del espécimen,
- 2.- el peso volumétrico húmedo,
- 3.- el peso volumétrico seco máximo,
- 4.- la humedad óptima.

3.2.3 PRUEBA PORTER MODIFICADA (PADRON).

La prueba de Porter Modificada tiene por objeto determinar el valor relativo de soporte (V.R.S.) de los suelos compactados en forma estática y sin saturar que se pretenden utilizar en las terracerías, principalmente en la capa sub-rasante, y se lleva a cabo en especímenes con diferentes grados de compactación y en condiciones de humedad estimadas como las más desfavorables, que se considere puedan alcanzar dichos suelos durante la operación de la obra; generalmente se utiliza este valor relativo de soporte en el proyecto o revisión de espesores de pavimentos, teniendo tres (3) variantes, según las cuales los especímenes correspondientes se elaboran ya sea con material que contenga la humedad óptima, con humedad igual o superior a la óptima, o bien con la humedad natural. Para nuestro caso únicamente se describirá la prueba con la segunda variante, donde los especímenes se elaboran con material cuyas características se presentan en el cuadro 3.1, la cual se usan de acuerdo a las condiciones climatológicas :

Precipitación Pluvial	Humedad	Grado de Compactación
BAJA	w_o	100 %
REGULAR	$w_o + 1.5$	95 %
ALTA	$w_o + 3.0$	90 % al 80 %

Cuadro 3.1

3.2.3.1 Equipo.

El equipo necesario es el mismo que se requiere para la prueba Porter Estándar, indicado en el inciso 3.2.2.1, además de éstos se utilizan otros que a continuación se mencionan:

- máquina de compresión con capacidad mínima de tres (3) toneladas y aproximación de diez (10) kilogramos, provista de un (1) pistón de penetración, de acero, con diámetro de cuatro punto noventicinco (4.95) centímetros y sección de diecinueve punto treinticinco (19.35) centímetros cuadrados,
- dos (2) placas circulares de carga con diámetro de quince punto cuatro (15.4) centímetros, teniendo un orificio central de cinco punto cuatro (5.4) centímetros de diámetro y un peso de tres (3) kilogramos cada una,
- extensómetro con carrera de dos punto cincuenta y cuatro (2.54) centímetros y aproximación de cero punto cero un (0.01) milímetro, provisto de una (1) abrazadera para poder acoplarlo al cilindro de penetración.

3.2.3.2 Preparación de la muestra.

La preparación de la muestra se efectúa igual como para la prueba Porter Estándar, indicado en el inciso 3.2.2.2, con la salvedad de que las muestras de prueba deberán tener de cinco (5) a seis (6) kilogramos de peso cada una y, serán en número de cuatro (4) a seis (6), según la cantidad de especímenes que se requiera elaborar.

3.2.3.3 Procedimiento de Prueba.

A una muestra de material por estudiar se le determina su peso específico máximo y su humedad óptima de acuerdo con el tipo de material y el procedimiento de prueba que se utilice (para nuestro caso se utiliza la prueba Proctor Estándar para la arcilla y los dos tepetates y, la Porter Estándar para la grava-arena).

A otra muestra del mismo material, obtenida y preparada de acuerdo al párrafo anterior se le determina su contenido de agua.

A continuación se pesa la porción restante de la muestra a la que se determina su humedad, se anota su peso W_2 , en gramos, y se le agrega la cantidad de agua necesaria para que alcance su humedad óptima de compactación, la cual se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$V_A = W_2 \times \frac{W_2 - W_1}{100 + W_1}$$

En donde:

V_A .- es el volumen de agua por agregar, en centímetros cúbicos.

W_1 .- es el peso del espécimen con su humedad inicial en gramos.

w_2 .- es la humedad óptima, en por ciento.

w_1 .- es la humedad inicial, en por ciento.

A continuación se mezcla el material y se pesa la muestra de prueba que se requiere para llenar el molde sin la extensión, determinando dicha cantidad para el grado de compactación requerido, con la siguiente fórmula:

$$P_w = \frac{C}{100} \times \frac{\gamma_d}{1000} \times \frac{100 + w_2}{100} \times V$$

En donde:

P_w .- es el peso de la muestra de prueba en estado húmedo, en kilogramos.

C .- es el grado de compactación con que se va a elaborar el espécimen, en por ciento.

γ_d .- es el peso específico máximo del material en estado seco, en kilogramos por metro cúbico.

w_2 .- es la humedad óptima, en por ciento.

V .- es el volumen del cilindro de prueba sin collarín, en decímetros cúbicos (litros).

Se coloca la muestra de prueba en tres (3) capas, dentro del molde con el collarín instalado, acomodando cada capa con veinticinco (25) golpes de la varilla metálica, procurando que no haya pérdida de material ni de humedad.

Se instala el molde en la máquina de compresión y se compacta la muestra en forma lenta y uniforme, debiéndose retirar la carga momentáneamente, a cada cinco (5) toneladas, para dar tiempo a que el material se acomode, en esta forma se continúa la aplicación de la carga hasta que el espécimen tenga la altura del cilindro sin collarín y en el momento que ésto ocurra se sostiene la última posición durante un (1) minuto. Si se presenta expulsión de agua antes de tener el espécimen la altura del molde, se mantiene la carga que se esté aplicando en ese momento, hasta que disminuya notablemente la salida del agua, y cuando esto ocurra, se da un pequeño incremento a la carga, repitiendo esta operación no más de tres (3) veces para que el espécimen tenga la altura fijada; de lo contrario la muestra deberá desecharse.

Se retira lentamente la carga del espécimen, se mide en éste el incremento de altura que experimenta y se le aplica otra vez la carga hasta que la cara superior del espécimen baje el doble del incremento citado. Se repite esta operación no más de tres veces, hasta que el espécimen tenga la altura fijada; en el caso de que éste quede con una altura menor, deberá desecharse la muestra, repitiendo la prueba con otra porción de material. Si durante cualquiera de las operaciones de carga hay expulsión de material, se repetirá la prueba con otra porción representativa de la muestra, revisando previamente los cálculos correspondientes.

A continuación se colocan las dos (2) placas de carga, se efectúa la penetración del espécimen (ver inciso 3.2.4) y

se dibuja la gráfica CARGA v.s. PENETRACION correspondiente, determinando la carga $C_{2.54}$, a la profundidad de 2.54 milímetros.

Se repiten en nuevas muestras de material los pasos descritos anteriormente, variando el grado de compactación de los especímenes a valores: del cien por ciento (100%), noventicinco por ciento (95%), noventa por ciento (90%), ochenticinco por ciento (85%) y, a los que se requiera estudiar el material.

3.2.4 PRUEBA DE PENETRACION.

Debido a que el procedimiento de prueba que se usa en la actualidad es el mismo para todos los tipos de especímenes, no es necesario repetirlo al referirse a cada tipo de suelo en general. El procedimiento es aplicable a las pruebas inalteradas y de campo, una vez que la superficie haya sido preparada.

3.2.4.1 Procedimiento de prueba.

Se aplica una sobrecarga sobre todos los suelos, que sea suficiente para producir una intensidad igual al peso del material del pavimento con más menos dos punto veintisiete (± 2.27) kilogramos aproximadamente, pero no menor de cuatro punto cincuenticuatro (4.54) kilogramos. Si la muestra ha sido saturada previamente, la sobrecarga deberá ser igual a la colocada durante el período de saturación. Para evitar el empuje hacia arriba del suelo dentro del agujero de las pesas de sobrecarga, es conveniente colocar un disco con perforación circular de dos punto veintisiete (2.27) kilogramos de sobrecarga sobre la superficie del suelo antes de la colocación del pistón y de la aplicación del peso restante.

Colóquese el pistón de penetración con una carga de cuatro punto cincuenticuatro (4.54) kilogramos y póngase los medidores de deformación y de esfuerzos en cero (0). Esta carga inicial es indispensable para asegurar un asentamiento satisfactorio del pistón, debiéndose considerarse como carga cero cuando se determina la relación PRESION-PENETRACION.

Se aplica carga sobre el pistón de penetración de manera que la velocidad de aplicación sea aproximadamente de cero punto ciento veintisiete (0.127) centímetros por minuto. Obténgase lecturas de carga de penetración a 0.127, 0.254, 0.381, 0.508, 0.762, 1.016 y 1.270 centímetros de deformación.

Se determina el contenido de agua en la capa superior con espesor de dos punto cinco (2.5) centímetros y, en el caso de pruebas de laboratorio un contenido de agua promedio, para la profundidad promedio de la muestra.

Se calcula la carga aplicada por el penetrómetro y se dibuja la curva ESFUERZO-PENETRACION, para obtener las presiones reales de penetración a partir de los datos de la prueba, el punto cero (0) de la curva se ajusta para corregir las irregularidades de la superficie, que afectan la forma inicial de la curva.

Se determinan los valores de la carga corregidos para cero punto doscientos cincuenticuatro (0.254) centímetros de penetración a partir del cual se obtiene el V.R.S. dividiendo entre la estándar de mil trescientos sesenta (1360) kilogramos, en por ciento.

En esta prueba se calcula y reporta el valor relativo de soporte (V.R.S) para cada espécimen, de acuerdo con la siguiente fórmula :

$$\text{V.R.S.} = \frac{C_{2.54}}{1360} \times 100$$

En donde :

V.R.S.- es el valor relativo de soporte.

$C_{2.54}$.- es la carga aplicada al espécimen o la carga corregida, para una penetración de dos punto cincuenticuatro (2.54) milímetros, en kilogramos.

3.2.5 METODO DEL CUERPO DE INGENIEROS DEL EJERCITO DE LOS ESTADOS UNIDOS.

La prueba se efectúa a los suelos que se emplean en la construcción de terracerías y consiste en elaborar especímenes utilizando la fracción del suelo que pasa la malla Núm. 19.0 (3/4"), compactándolos mediante impactos, con diferentes contenidos de agua y variando la energía de compactación, con objeto de cubrir los valores de peso específico y humedad que pueden presentarse en la obra. Dichos especímenes se someten a un período de saturación antes de efectuarles la determinación del valor relativo de soporte, obteniéndose como dato adicional la expansión producida durante este proceso de saturación. El resultado de estas determinaciones se utiliza tanto en el proyecto de espesores de pavimentos, como en la determinación de las condiciones de compactación más desfavorables, o bien, para el estudio de materiales que por sus características y condiciones de uso especiales, requieren ser analizadas con más detalle.

3.2.5.1 Equipo.

- moldes cilíndricos de metal de ciento cincuentidos punto cuatro (152.4) milímetros de diámetro interior y ciento setentisiete punto ocho (177.8) milímetros de altura, provistos de un collarín o extensión de cincuenta punto ocho (50.8) milímetros de altura, una placa base con perforaciones de uno punto seis (1.6) milímetros de diámetro y por cada grupo de moldes una placa base sin perforaciones, figura 3.8,

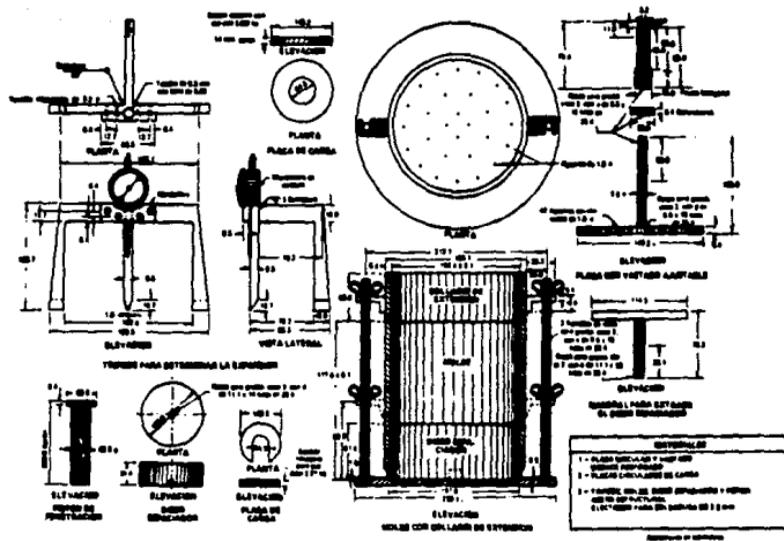


Figura 3.8

Equipo para la prueba de VRS
 del Cuerpo de Ingenieros E.U.A.

- disco espaciador metálico de ciento cincuenta punto ocho (150.8) milímetros de diámetro por sesentiuno punto cuatro (61.4) milímetros de espesor,
- pisón de compactación del tipo de martillo deslizante, consistente en un (1) pie o base cilíndrica de acero, de cincuenta punto ocho (50.8) milímetros de diámetro, con peso de cuatro mil quinientos treintiseis (4536) gramos y empuñadura del pisón, acoplada a una guía metálica tubular, para que tenga una caída libre de cuarenticinco punto siete (45.7) centímetros,
- mallas Núms. 19.0 (3/4") y 4.75 (# 4),
- dispositivo de medición de expansión que consiste en una placa perforada con vástago ajustable, tripode y un extensómetro para medir la expansión del suelo con aproximación de cero punto cero un (0.01) milímetro,
- una (1) placa anular y dos (2) circulares seccionadas, con un peso de dos punto veintisiete (2.27) kilogramos cada una, diámetro exterior de ciento cuarentinueve punto dos (149.2) milímetros y diámetro interior de cincuenticuatro punto cero (54.0) milímetros. Estas placas se utilizarán como sobrecargas , en la superficie del espécimen durante los periodos de saturación y penetración,
- pistón de penetración con diámetro de cuarentinueve punto cinco (49.5) milímetros y longitud de doscientos (200) milímetros,
- dispositivo de aplicación de cargas, consistente en una (1) máquina de pruebas de capacidad mínima de cuatro punto cinco (4.5) toneladas, con marco adaptado para sujetar el pistón de penetración y hacerlo penetrar en el espécimen a una velocidad uniforme de uno punto tres (1.3) milímetros por minuto aproximadamente,
- regla de acero bicelada de treinta (30) centímetros de longitud,
- tanque de saturación,

- balanza con capacidad no menor de quince (15) kilogramos y aproximación de cinco (5) gramos,
- base cúbica de concreto con dimensiones mínimas de cuarenta (40) centímetros por lado, o un cuerpo con rigidez similar,
- horno provisto de control termostático para mantener una temperatura de ciento cinco más menos cinco grados centígrados ($105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$),
- cronómetro o reloj con aproximación de cero punto dos (0.2) segundos,
- papel filtro grueso,
- hojas de plástico delgado y resistente.

3.2.5.2 Preparación de la muestra.

De una muestra obtenida y preparada como se indica en el inciso 3.1.1.2, respectivamente, se toma por cuarteo una porción de cien (100) kilogramos aproximadamente.

De la porción obtenida se separa mediante cribado el retenido en la malla Núm. 19.0 (3/4") y se determina su peso; se desecha dicho retenido y se reemplaza con una fracción igual en peso, de material que pasa la malla Núm. 19.0 (3/4") y se retiene en la Núm. 4.75 (# 4). Esta fracción se obtendrá por cribado del material restante de la muestra original.

Se divide por cuarteo en doce (12) o quince (15) partes iguales la porción de cien (100) kilogramos, en la cual se han sustituido las partículas retenidas en la malla Núm. 19.0 (3/4"); cada una de estas partes constituye una muestra de prueba y con ellas se forman tres (3) grupos de cuatro (4)

o cinco (5) muestras cada uno. Se toma un primer grupo de muestras y se procede con éste como se indica a continuación.

Se ajusta la humedad en las diferentes muestras de prueba en tal forma que sus contenidos de agua se incrementen de una a otra en dos por ciento (2%) aproximadamente, con respecto al peso del material húmedo; para obtener esta relación de incrementos se adicionará agua, o disminuirá ésta mediante secado, pero no se harán estas dos (2) operaciones en la misma muestra y en ningún caso se secarán totalmente. Los contenidos de agua en las muestras de este grupo deberán elegirse en tal forma que cuando menos dos (2) tengan humedad inferior a la óptima y dos (2) superior a ésta.

La humedad óptima aproximada será la mínima, para que el material presente una consistencia tal, que al ser comprimido en la palma de la mano, no la humedezca y que a la vez, pueda formar grumos.

Una vez adicionada la cantidad de agua requerida se mezcla completamente cada muestra de prueba, y se cubre con una lona humedecida para evitar pérdidas por evaporación. En caso de suelos arcillosos será necesario dejar en reposo el material húmedo durante cierto tiempo, cubierto con una lona humedecida, de manera que el agua penetre adecuadamente en el material.

3.2.5.3. Procedimiento de prueba.

Se coloca el disco espaciador sobre la placa de base y se arma el molde, poniendo además una hoja de papel filtro en

la parte superior del disco, quedando éste con la perforación hacia abajo.

Se toma una de las muestras de prueba y se determina su humedad (w_1) anotando su valor en la hoja de registro; a continuación se divide la muestra en cinco (5) partes aproximadamente iguales, se coloca una de ellas en el cilindro de prueba apoyada sobre la base de concreto y se compacta con el pisón dándole cincuentiseis (56), veintiseis (26) o doce (12) golpes, según sea el caso de la energía de compactación que se le quiera proporcionar, manteniendo constante la altura de caída y repitiendo uniformemente los golpes en la superficie en cada una de las cinco (5) capas. Se repite la operación con cada una de las cuatro (4) porciones restantes de la muestra, para formar el espécimen de prueba.

Terminada la compactación se remueve el collarín y se verifica que el material no sobresalga del molde de más de uno punto cinco (1.5) centímetros; de no ser así, la prueba deberá repetirse tomando una nueva muestra de material, corrigiendo el peso de la misma. Se enrasa el espécimen con la regla metálica depositando en una charola el material excedente y se rellenan con material fino las oquedades resultantes.

A continuación se retira el molde de la placa, se pesa con el suelo compactado y sin el disco espaciador, anotando en la hoja de registro su valor W_1 , en gramos.

Se coloca el papel filtro en la placa de base, se invierte el cilindro con el espécimen de tal manera que su fondo sea ahora la parte superior y se fija de nuevo en la placa base; a continuación se coloca sobre el espécimen un papel filtro, la placa perforada y las placas de carga necesarias para producir sobre el espécimen una sobrecarga

igual a la del pavimento más menos dos punto veinticinco (± 2.25) kilogramos de peso, pero no menor de cuatro punto cincuenta (4.50) kilogramos.

Enseguida se introduce al tanque de saturación durante noventiseis (96) horas como mínimo, el molde que contiene el espécimen, colocándolo sobre bloques pequeños para permitir el libre acceso de de agua por la parte inferior y de manera que quede cubierto con el agua con un tirante aproximado de dos (2) centímetros sobre el borde superior del molde.

Se repite en las muestras de prueba restantes del grupo seleccionado, el procedimiento indicado en los párrafos antes mencionados.

A continuación, después de saturar los especímenes, se les determina la expansión a cada uno de ellos, en por ciento con la siguiente fórmula :

$$\text{Exp (\%)} = \frac{L_i - L_f}{h_e} \times 100$$

En donde :

Exp .- es la expansión en porcentaje.

L_i .- es la lectura inicial de la altura de la muestra sin saturar.

L_f .- es la lectura final de la altura de la muestra saturada.

h_e .- es la altura del espécimen en centímetros.

Se efectúa la prueba de penetración de acuerdo al inciso 3.2.4.1 a los especímenes saturados.

Terminada la penetración de cada espécimen, se retira el molde del dispositivo de carga, se remueven las placas de carga, se desmonta la base, se saca el espécimen del molde y se le determina su humedad en los dos punto cinco (2.5) centímetros de la parte superior, anotando el valor en la hoja de registro.

En esta prueba se calcula y reporta el peso específico del material seco de cada espécimen, antes de su saturación y se construye la gráfica PESO ESPECIFICO SECO vs. HUMEDAD.

Se calcula el valor relativo de soporte de cada espécimen, de acuerdo con el inciso 3.2.4.1, así como su expansión, siguiendo los pasos indicados en los párrafos anteriores del presente inciso y se construye la gráfica VALOR RELATIVO DE SOPORTE vs. HUMEDAD (V.R.S. - w), dibujando en un sistema de ejes coordenados los puntos correspondientes a cada espécimen, tomando como ordenada el valor relativo de soporte y como abscisa la humedad de compactación respectiva. Se unen a continuación dichos puntos con una curva para cada energía de compactación.

En forma análoga se grafica la curva EXPANSION vs. HUMEDAD, con la diferencia de que ahora la ordenada es la expansión y la abscisa es la humedad de los especímenes, antes de su saturación, para cada energía de compactación.

4.- EJECUCION DE LA INVESTIGACION.

La realización de las pruebas índice del presente trabajo de investigación se hicieron en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en el cual no hubo ningún tipo de problema, pues el equipo se encuentra en muy buenas condiciones.

Para la realización de las pruebas de compactación se encontraron muchos inconvenientes, como son la falta de equipo en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad, (excepto del equipo para la prueba Proctor Estándar) por lo que optamos en efectuar estas pruebas en el laboratorio de suelos de una empresa privada, adaptando algunos equipos ya que se encontraban en mal estado.

De acuerdo a las Normas para Muestreo y Pruebas de Materiales, Equipos y Sistemas para Carreteras y Aeropistas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Referencia 2) se calculó el número de golpes necesarios en base a las dimensiones reales de los moldes que se usaron mediante la siguiente fórmula :

$$n = \frac{E_n V_o}{N W h} \quad (\# \text{ de golpes})$$

En donde :

- n .- es el número de golpes por capa.
- E_n .- es la energía por unidad de volumen.
- V_o .- es el volumen del molde.
- N .- es el número de capas.
- W .- es el peso del martillo (pisón).
- h .- es la altura de caída libre del martillo.

En nuestro caso los valores que toman cada una de las variables están contempladas en los incisos 3.2.5.1 y 3.2.5.3, para lo cual se obtienen las energías nominales por unidad de volumen para la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, para los diferentes números de golpes y, que se presentan en el cuadro 4.1.

ENERGIA NOMINAL		
E_{12}	5.86	Kg-cm / cm ³
E_{26}	12.70	Kg-cm / cm ³
E_{56}	27.35	Kg-cm / cm ³

Cuadro 4.1

Algunos de los moldes que se utilizaron para esta prueba se encontraban en mal estado, tal como se mencionó anteriormente (superficies rugosas por la oxidación), lo que provocaba que en algunos casos se perdiera humedad en el momento de realizar la prueba, (como cuando se realizó la prueba con la grava-arena) o que se perdiera algo de material fino compactado cuando el espécimen se encontraba en el tanque de saturación.

Por otro lado, todos ellos no cumplían con las dimensiones que marcan las normas de la SCT, por lo que se trató de uniformizar las energías de compactación por unidad de volumen, con el número de golpes reales que debían efectuarse a las capas de cada molde, tomando como factor correctivo la relación del volumen del molde en cuestión, con respecto al volumen nominal, de tal manera que se aproxime a los valores que se muestran en el cuadro 4.1.

A continuación se presentan en el cuadro 4.2, los volúmenes de los moldes utilizados, con sus respectivos números de golpes reales con el que se tenía que realizar la prueba, considerando el volumen nominal de dos mil ciento veintitres punto tres (2123.3) centímetros cúbicos. Como se podrá observar en dicho cuadro, se redondea el producto de la relación de volúmenes (V_1 / V_0) por el número de golpes nominales (n) al entero inmediato superior o inferior según sea el caso (como se muestra en la parte derecha de las columnas 3, 4 y 5) de que la fracción decimal sea mayor o menor que 0.50 respectivamente, arrastrando de esta manera el inevitable error de la inexactitud en la uniformidad de la energía de compactación.

CILINDRO #	VOLUMEN (cm ³)	FACTOR V ₁ / V ₀	Núm. DE GOLPES REALES POR CAPA					
			12		26		56	
1	2433.14	1.146	13.75	14	29.79	30	64.17	64
2	2415.94	1.138	13.65	14	29.58	30	63.72	64
3	2468.31	1.162	13.95	14	30.21	30	65.10	65
4	2454.17	1.156	13.87	14	30.06	30	64.72	65
5	2247.16	1.058	12.70	13	27.52	28	59.27	59
6	2410.77	1.135	13.62	14	29.52	30	63.58	64
7	2492.59	1.174	14.09	14	30.52	31	65.74	66
8	2419.91	1.140	13.68	14	29.63	30	63.82	64
9	2484.16	1.170	14.04	14	30.42	30	65.52	66
10	2414.32	1.137	13.64	14	29.56	30	63.67	64
11	2469.60	1.163	13.96	14	30.24	30	65.13	65
12	2480.50	1.168	14.02	14	30.37	30	65.42	65
13	2483.40	1.170	14.04	14	30.41	30	65.49	65
14	2469.70	1.163	13.96	14	30.24	30	64.14	64
15	2484.40	1.170	14.04	14	30.42	30	65.52	66

Cuadro 4.2

Otros de los inconvenientes de que se nos presentaron durante la realización de las pruebas de compactación (estática y dinámica), fue el del mal estado en que se encontraban los equipos de medición como son : la báscula de precisión, la cual afectaba cuando se deseaba obtener las humedades de los diferentes materiales estudiados. De la misma manera, el gato hidráulico, el cual se utilizaba para realizar la prueba Porter Modificada, así como la prueba de

penetración, pues tenía fugas de aceite por encontrarse en mal estado sus empaques, afectando de esta manera la lectura de la presión real, que actuaba en ese instante.

Para la obtención del peso volumétrico seco máximo, cabe mencionar que se realizó la prueba Proctor Estándar a todos los materiales en estudio, además de la prueba Porter Estándar para la grava-arena.

Cuando se realizó la prueba Proctor Estándar a la grava-arena, se observó la poca trabajabilidad de ésta, debido a que había poco porcentaje de finos (como se ilustra en su respectiva curva granulométrica) ya que éstos actúan como material cementante; es decir, durante la ejecución de la prueba dinámica, se produce el bufamiento del material, debido a la caída del pisón en un punto, dicho de otra manera, el desacomodo del material en el lado opuesto del punto donde se aplicó el impacto del pisón.

Otro de los inconvenientes de los materiales inertes es su alta permeabilidad, debido a la gran cantidad de vacíos, que es una de las características de su estructura, provocando de esta manera que la humedad se filtre al fondo del molde.

Por esta razón la prueba Proctor Estándar (prueba dinámica) no es muy representativa para los materiales inertes, (gravas y arenas y/o con bajo contenido de finos) por lo que se recomienda la ejecución de la prueba Porter Estándar (prueba estática).

Para el caso específico de la grava-arena fue preciso cambiar la preparación de las muestras para ambas pruebas de compactación, la estática y la dinámica, anotados en los incisos 3.2.3.2 y 3.2.5.2 respectivamente. Para el primer caso

sólo se realizó la prueba Porter Modificada para el 100%, 95% y el 90% grados de compactación; no se efectuó para el 85% de grado de compactación, pues en algunos casos la presión estática que se le imprimía al material era casi nula. Por otro lado, para el caso de la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, los especímenes se prepararon con incrementos del uno (1%) de humedad (por el bajo contenido de finos) para que el material sea más trabajable; ya que cuando se procedió como lo indica el inciso en cuestión, la prueba fue prácticamente irrealizable.

Cuando se realizó la prueba de penetración, en algunos de los materiales se presentó una superficie de falla por cortante (bufamiento) debido a la presión que se efectuaba en ese instante, lo que nos dió una idea de la calidad del material.

Respecto a la medición de la expansión de los materiales durante la realización de la prueba dinámica, es preciso señalar que se medían éstos una semana después de haber efectuado la compactación por impactos. Durante este tiempo los moldes se encontraban sumergidos en el tanque de saturación, que además era utilizado por los laboratoristas de la empresa para otros tipos de pruebas, como por ejemplo, la saturación de tabiques recocidos, etc. De esta manera, en algunas ocasiones, cuando se realizaban las mediciones de la expansión de los materiales con el vernier, nos encontramos que los moldes habían sido removidos de sus lugares dentro del tanque, trayendo como consecuencia que posiblemente en algunas veces se movieran las placas perforadas con las pesas, provocando algún tipo de error en la medición de los mismos.

A pesar de que por alguna u otra forma, se encontraron muchos problemas y dificultades para realizar este trabajo de

investigación, fue conveniente repetir tres veces las pruebas de compactación para así poder corroborar los resultados anteriores y, luego de recopilar toda la información se plasmó en los cuadros y gráficas que se presentan en el Capítulo 5.

Por otro lado, es necesario hacer la referencia de que todo el proceso de la investigación (sin considerar las dificultades que ocurrieron) desde la planeación, obtención de materiales y la ejecución de las pruebas, se tornó bastante laboriosa y de larga duración.

Por último, hacemos merecedores de reconocimiento a Laboratorios de Control de Calidad KAPRA S.A. de C.V., que nos ofreció sus instalaciones y que sin ellas no se hubiera podido terminar el presente trabajo de investigación.

5.- RESULTADOS DE LA INVESTIGACION.

Se presentan a continuación, como ejemplo sólo para el tepetate obtenido en Ciudad Universitaria, las hojas de cálculo y gráficas de los resultados de las pruebas índice y de resistencia. Para los demás materiales no fue necesario mostrar todas las hojas de cálculo pues son repetitivas, además de voluminosas.

En general para todos los materiales en estudio, la presentación de los resultados se hicieron mediante cuadros de resúmenes y gráficas que más adelante se explican.

Los resultados de la investigación del material ejemplo antes mencionado (tepetate 1, ensaye 3) se muestran en el orden siguiente:

1.- En las pruebas índice se presentan:

- la granulometría del material, cuadro 5.1.
- los límites de plasticidad, cuadro 5.2, que constan de:

Límite Líquido,
Límite Plástico,
Contracción Lineal.

2.- Referente a las pruebas de resistencia tenemos:

- Prueba Proctor Estándar. Cuadro 5.3 y figura 5.1.
- Prueba Porter Modificada (Padrón), cuadro 5.4 y con sus valores relativos de soporte (V.R.S.), figuras 5.2 y 5.5.

- Prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Cuadro 5.5 para 12 golpes, cuadro 5.6 para 26 golpes y cuadro 5.7 para 56 golpes de energía de compactación respectivamente.

De la prueba Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos se grafica lo siguiente:

- Peso Volumétrico Seco (γ_d) vs. Humedad (w), que se muestra en la figura 5.3.
- Valor Relativo de Soporte (V.R.S.) vs. Humedad (w), que se presenta en la figuras 5.4 ; 5.4.1 y 5.4.2.
- Valor Relativo de Soporte (V.R.S.) vs. Peso Volumétrico Seco (γ_d), obtenido de las figuras 5.3 y 5.4, y que se se presenta en la figura 5.5.
- Expansión (Exp.) vs. Humedad (w), figura 5.6.

Respecto a la figura Peso Volumétrico Seco vs. Humedad (P.V.S.- w) se aprecia que al ir aumentando la humedad de prueba, el peso volumétrico se incrementa hasta llegar a un valor máximo ($\gamma_{d\max}$), al cual le corresponde su respectiva humedad óptima (w_o); a partir del cual estos valores decrecen, debido a que una parte de la energía de compactación es absorbida por el suelo y la otra parte se disipa con el agua.

También se observan en estas gráficas que al aumentar la energía de compactación, se incrementa el peso volumétrico seco máximo disminuyendo su correspondiente humedad óptima. Por eso es conveniente que al manejarse los pesos volumétricos secos máximos, se deben indicar la energía de compactación con que se obtuvieron o la prueba con que se realizó para obtenerlos.

Referente a la gráfica Valor Relativo de Soporte vs. Humedad (V.R.S. - w), como se puede apreciar se asemeja mucho a la curva anterior (P.V.S. - w), en donde la resistencia a la penetración aumenta al ir incrementando la humedad de compactación hasta un cierto punto, en el cual esta resistencia disminuye, debido a la absorción y expansión que sufre el espécimen durante su saturación.

Las gráficas Valor Relativo de Soporte vs. Peso Volumétrico Seco (V.R.S. - P.V.S.) son las familias de curvas para diferentes humedades de compactación, derivadas de la prueba dinámica, y obtenida a partir de las dos gráficas descritas en los párrafos anteriores; para el caso de la prueba Porter Modificada se graficó directamente, el mismo número de ensaye correspondiente a la prueba dinámica, para los diferentes grados de compactación, en las mismas gráficas resultantes (V.R.S. - P.V.S.), llegando de esta manera a sus respectivas comparaciones.

Posteriormente se reportan en forma tabulada los resúmenes de los resultados obtenidos de las características de cada material en estudio, en el siguiente orden:

Material

Ensaye Núm.

‡ pasa malla # 3"

‡ pasa malla # 4

‡ pasa malla # 200

Límite líquido (%)

Límite plástico (%)

Índice plástico (%)

Clasificación S.U.C.S.

Peso volumétrico seco máximo (T/m^3)

Humedad óptima (%)



U. N. A. M.
Facultad de Ingeniería
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS
CLASIFICACION DE SUELOS
GRANULOMETRIA POR MALLAS

OBRA <u>TESIS</u> LOCALIZACION <u>INSTITUTO DE INGENIERIA</u> ENSAYE No. _____ SONDEO No. <u>1</u> MUESTRA No. _____ PROF. <u>OLIVERA</u> DESCRIPCION <u>TEPETATE</u> FECHA _____ OPERADOR _____ CALCULO _____	PESO DE LA MUESTRA (g) <u>300.0</u> RECIPIENTE No. PARA OBTENER ω % _____ PESO RECIP. + SUELO HUMEDO (g) _____ PESO RECIP. + SUELO SECO (g) _____ PESO AGUA (g) _____ PESO RECIPIENTE (g) _____ PESO DE SUELO SECO (g) _____ ω % = _____
---	---

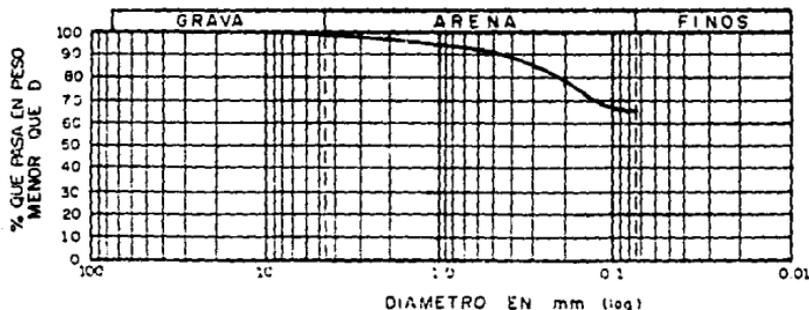
MALLA	ABERTURA	PESO MALLA	PESO MALLA + SUELO RET.	PESO SUELO RET.	RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA MENOR Q. D.
%	mm	g	g	g	%	%
3"	76.20					
2"	50.80					
1 1/2"	38.10					
1"	25.40					
3/4"	19.05					
1/2"	12.70					
3/8"	9.52			0.0	0.0	100.0
4	4.76			1.64	0.55	99.45
8	2.38			5.30	1.77	97.68
18	1.00			8.82	2.94	94.74
30	0.59			8.24	2.75	91.99
50	0.297			18.90	6.30	85.69
100	0.149			38.59	12.86	72.83
200	0.074			23.53	35.01	64.99
SUMA				300.0	100.0	

$>3"$ = _____ %
 G = 0.0 %
 S = 35.01 %
 F = 64.99 %

D_{10} = _____ mm
 D_{30} = _____ mm
 D_{60} = _____ mm

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

$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{\quad}{\quad}$



CLASIFICACION DE LA PORCION GRUESA: _____

OBSERVACIONES: Cuadro 5.1

U. N. A. M.
Facultad de Ingeniería
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



CLASIFICACION DE SUELOS
LIMITES DE PLASTICIDAD
Y CONTRACCION LINEAL

OBRA: TESIS
 LOCALIZACION: INSTITUTO DE INGENIERIA
 SONDEO N°: _____ ENSAYE N°: 3
 MUESTRA N°: _____ PROF.: _____
 DESCRIPCION: TEPETATE

FECHA: _____ OPERADOR: _____ CALCULO: _____
 ALUMNO: _____ GRUPO: _____

LIMITE LIQUIDO

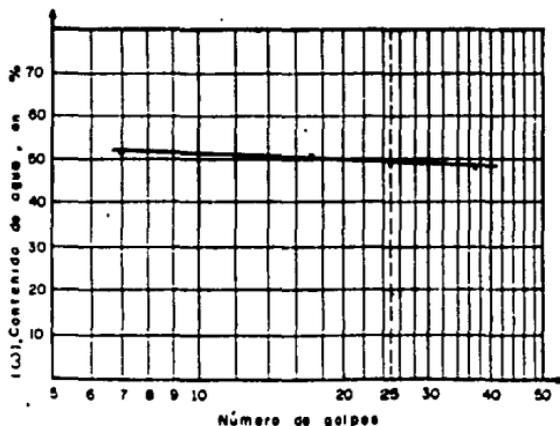
Prueba N°	Cápsula N°	Número de Golpes	Peso cápsula + suelo húm.	Peso cápsula + suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	Contenido de agua (%)
			g.	g.	g.	g.	g.	%
X-9		7	49.73	45.74	3.99	37.94	7.80	51.15
C-8		17	51.70	47.11	4.59	38.00	9.11	50.38
W-0		25	52.32	47.69	4.63	38.28	9.41	49.20
V-1		37	75.43	70.63	4.80	60.72	9.91	48.44

LIMITE PLASTICO

B-0		62.04	61.69	0.35	60.97	1.12	31.25
Z-4		62.23	61.76	0.47	60.25	1.91	31.13

CONTRACCION LINEAL

MOLDE	L. I.	L. P.	C.L. (%)
	10.020	9.375	6.437



$W_p =$ _____ %

$LL =$ 49.50 %

$LP =$ 31.19 %

$I_p =$ 18.31 %

$C_u = \frac{LL - W_p}{I_p} =$ _____

$F_w =$ _____ %

$T_w = \frac{I_p}{F_w} =$ _____

Clasificación de partón fino: _____

OBSERVACIONES: Cuadro 5.2

OBRA : TESIS
 LOCALIZACION: Inst. de INGENIERIA
 DESCRIPCION : TEPETATE
 ENSAYE Núm. : 1
 PROFESOR : Fernando Olivera B.



PRUEBA PROCTOR ESTANDAR

Peso del martillo: 2500 gr. Altura de caída (cm.) : 30.5
 Núm. de capas : 3 Núm. de golpes por capa: 25
 Peso del molde : 4309 gr. Volumen molde (cm³) : 942.7

Determinación Núm.	1	2	3	4	5
P.molde + S.húm. (gr)	5743	5862	5978	5978	5931
P. suelo húm. (gr)	1434	1553	1669	1699	1622
P.especif. húm. (T/m ³)	1.510	1.635	1.757	1.757	1.708
Cápsula Núm.	C-7	A-4	E-0	D-1	F-8
P.cáp. + S.húm. (gr)	177.5	182.2	184.8	223.7	231.6
P.cáp. + S.seco (gr)	164.6	166.7	166.3	194.5	198.7
Peso de agua (gr)	12.91	15.50	18.46	29.20	32.90
Peso de cápsula (gr)	118.2	118.4	113.2	117.5	118.8
Peso suelo seco (gr)	46.39	48.36	53.11	76.97	79.88
Contenido de agua (%)	27.83	32.05	34.76	37.94	41.19
P.especif. seco (T/m ³)	1.181	1.236	1.204	1.274	1.210

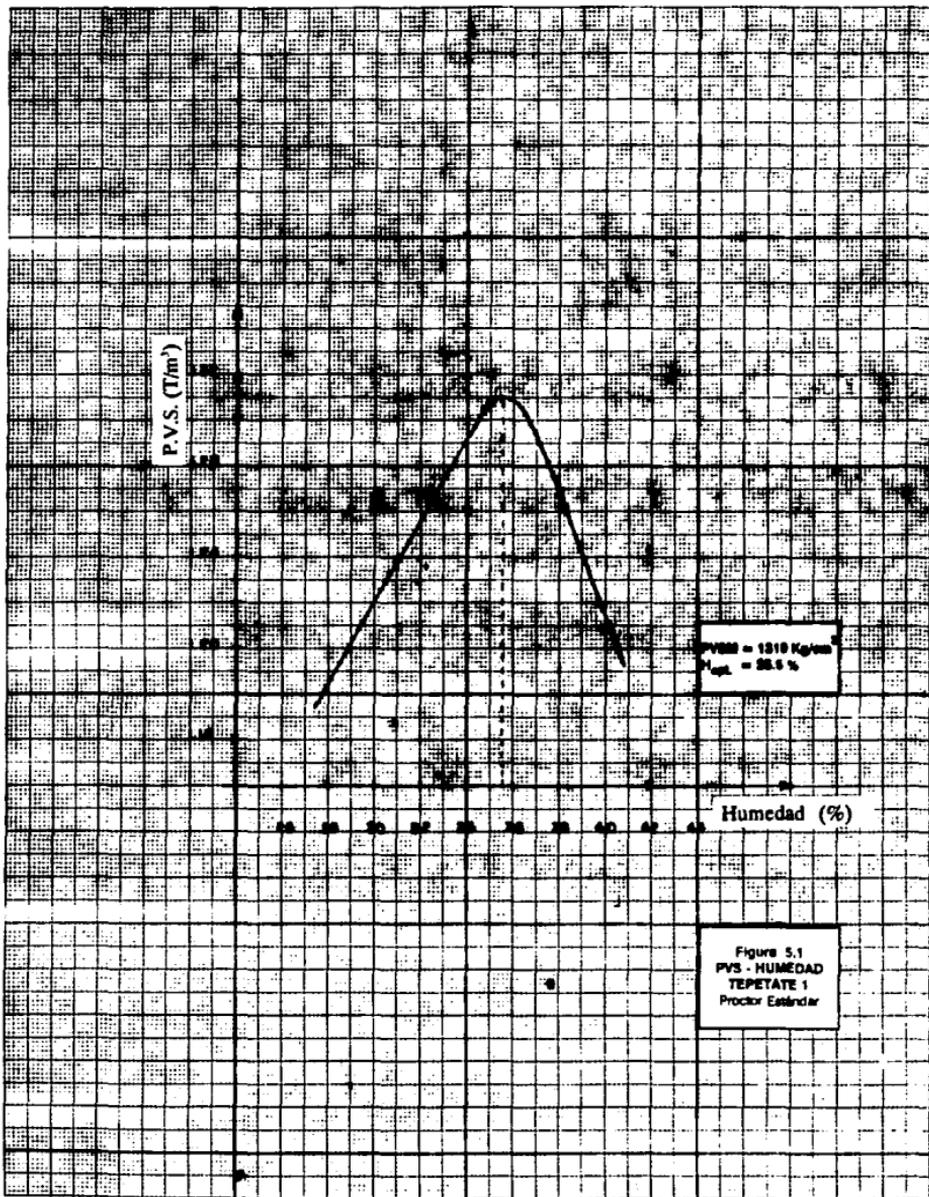


Figure 5.1
 PVS - HUMEDAD
 TEPATE 1
 Proctor Estándar

OBRA : TESIS
 LOCALIZACION: Inst. de INGENIERIA
 DESCRIPCION : TEPETATE
 ENSAYE Núm. : 3
 PROFESOR : Fernando Olivera B.



PRUEBA PORTER MODIFICADA

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO _____ : 1,310 Kg/cm³
 HUMEDAD OPTIMA (W_o) _____ : 35.50 %
 HUMEDAD QUE CONTIENE EL MATERIAL (W₁) _____ : 4.90 %

GRADO de COMPACTACION (%)	100	95	90	85
Molde Núm.	B-2	B-2	B-2	B-2
PVSM (Kg/cm ³)	1310	1245	1179	1114
Humedad de prueba (%) (W ₂)	35.50	37.00	38.50	38.50
Peso material usado (gr)	5000	5000	5000	5000
Volumen del molde (cm ³)	2415.94	2415.94	2415.94	2415.9
Agua por agregar (cm ³)	1480	1552	1624	1624
Peso material húmedo (gr)	4295	4125	3951	3731
Carga de compactación (Kg)	2974	1802	1164	819
Humedad real de prueba (%)	35.73	37.04	38.54	38.43
PVS corregido (Kg/cm ³)	1311	1246	1207	1140
Grado Comp. corregido (%)	100.10	95.10	92.10	87.00
V.R.S. corregido (%)	48.50	36.45	20.60	11.06

Cuadro 5.4

U. N. A. M.
 Facultad de Ingeniería
 LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS



OBRA	TEPETATE		
LOCALIZACION	INSTITUTO DE INGENIERIA		
SONDEO N°	_____	ENSAYE N°	3
MUESTRA N°	_____	PROP.	F. OLIVERA

PRUEBA DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE

FECHA _____ ENSAYE _____ OPERADOR _____

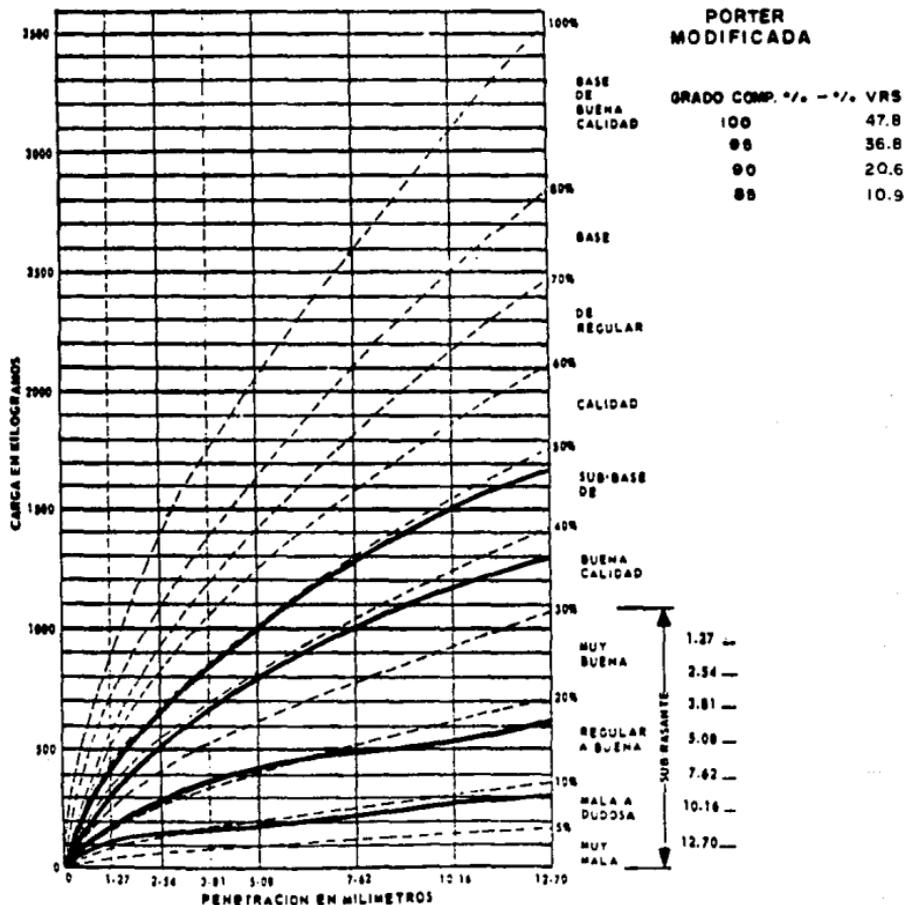


Figura 5.2

OBRA : TESIS
 LOCALIZACION: Inst. de INGENIERIA
 DESCRIPCION : TEPETATE
 ENSAYE Núm. : 3
 PROFESOR : Fernando Olivera B.



CUERPO de INGENIEROS del EJERCITO de los E.U.

Peso del martillo: 4536 gr. Altura de caída (cm.) : 45.7
 Núm. de capas : 5 Núm. de golpes por capa: 12

Determinación Núm.	1	2	3	4	5
Molde Núm.	1	2	3	4	5
Volumen del molde(cm ³)	2433.1	2415.9	2468.3	2247.2	2454.2
P. molde + S.húm. (gr)	11130	10545	10600	11140	10820
P. molde (gr)	7000	6300	6100	7000	6350
P. suelo húm. (gr)	4130	4245	4500	4140	4470
P.especif. húm. (T/m ³)	1.697	1.757	1.823	1.842	1.821
Cápsula Núm.	---	---	---	---	---
P.cáp. + S.húm. (gr)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
P.cáp. + S.seco (gr)	77.35	76.21	74.93	73.88	72.86
Peso de agua (gr)	22.65	23.79	25.07	26.12	27.14
Peso de cápsula (gr)	---	---	---	---	---
Peso suelo seco (gr)	77.35	76.21	74.93	73.88	72.86
Contenido de agua (%)	29.28	31.22	33.46	35.35	37.25
P.especif. seco (T/m ³)	1.313	1.339	1.366	1.361	1.327

Cuadro 5.5

OBRA : TESIS
 LOCALIZACION: Inst. de INGENIERIA
 DESCRIPCION : TEPETATE
 ENSAYE Núm. : 3
 PROFESOR : Fernando Olivera B.



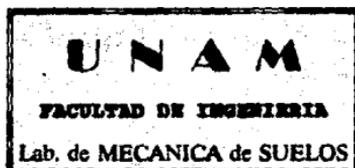
CUERPO de INGENIEROS del EJERCITO de los E.U.

Peso del martillo: 4536 gr. Altura de caída (cm.) : 45.7
 Núm. de capas : 5 Núm. de golpes por capa: 26

Determinación Núm.	1	2	3	4	5
Molde Núm.	1	2	3	4	5
Volumen del molde (cm ³)	2433.1	2415.9	2468.3	2247.2	2454.2
P. molde + S. húm. (gr)	11180	10650	10700	11210	10935
P. molde (gr)	7000	6300	6100	7000	6350
P. suelo húm. (gr)	4180	4350	4600	4210	4585
P. especif. húm. (T/m ³)	1.717	1.801	1.864	1.873	1.868
Cápsula Núm.	---	---	---	---	---
P. cáp. + S. húm. (gr)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
P. cáp. + S. seco (gr)	78.16	76.81	75.75	74.54	73.32
Peso de agua (gr)	21.84	23.19	24.25	25.46	26.68
Peso de cápsula (gr)	---	---	---	---	---
Peso suelo seco (gr)	78.16	76.81	75.75	74.54	73.32
Contenido de agua (%)	27.94	30.19	32.01	34.16	36.38
P. especif. seco (T/m ³)	1.342	1.383	1.412	1.396	1.370

Cuadro 5.6

OBRA : TESIS
 LOCALIZACION: Inst. de INGENIERIA
 DESCRIPCION : TEPETATE
 ENSAYE Núm. : 3
 PROFESOR : Fernando Olivera B.

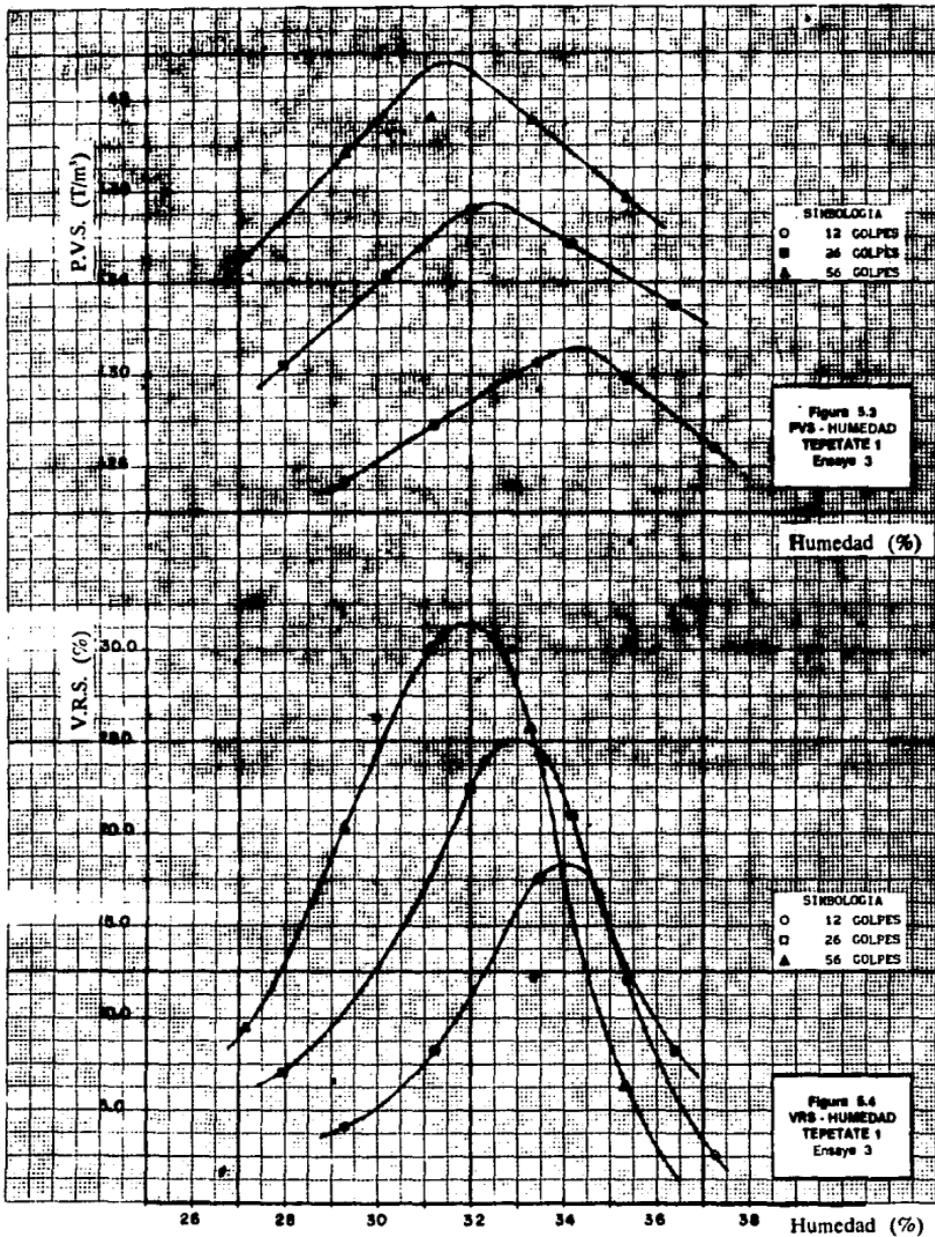


CUERPO de INGENIEROS del EJERCITO de los E.U.

Peso del martillo: 4536 gr. Altura de caída (cm.) : 45.7
 Núm. de capas : 5 Núm. de golpes por capa: 56

Determinación Núm.	1	2	3	4	5
Molde Núm.	1	2	3	4	5
Volumen del molde(cm ³)	2433.1	2415.9	2468.3	2247.2	2454.2
P.molde + S.húm. (gr)	11245	10725	10735	11285	10995
P. molde (gr)	7000	6300	6100	7000	6350
P. suelo húm. (gr)	4245	4425	4635	4285	4645
P.especif. húm. (T/m ³)	1.745	1.832	1.878	1.907	1.893
Cápsula Núm.	---	---	---	---	---
P.cáp. + S.húm. (gr)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
P.cáp. + S.seco (gr)	78.64	77.33	76.26	75.59	73.89
Peso de agua (gr)	21.36	22.67	23.74	24.41	26.11
Peso de cápsula (gr)	---	---	---	---	---
Peso suelo seco (gr)	78.64	77.33	76.26	75.59	73.89
Contenido de agua (%)	27.16	29.32	31.13	33.29	35.34
P.especif. seco (T/m ³)	1.372	1.416	1.432	1.431	1.398

Cuadro 5.7





OBRA:	TESIS		
LOCALIZACION	INSTITUTO DE INGENIERIA		
SONDEO N°	ENSAYE N°	3	
MUESTRA N°	PROP.	F. OLIVERA	

FECHA _____

PRUEBA DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE

CUERPO DE INGENIEROS DEL EJERCITO DE LOS E.E.U.U.

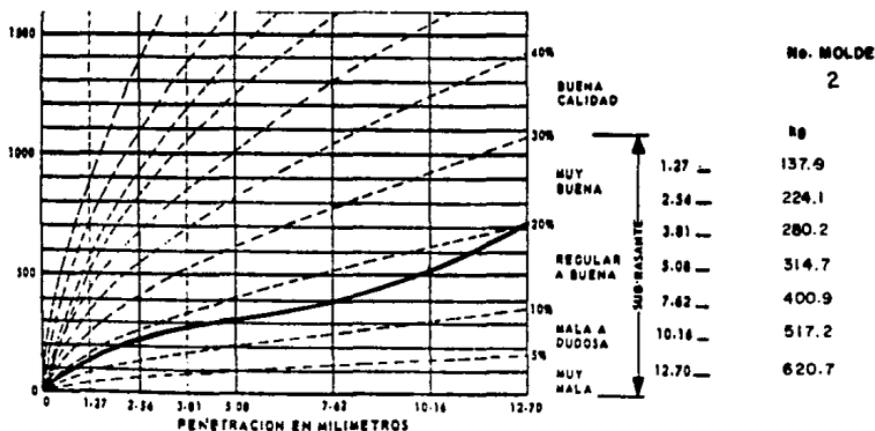
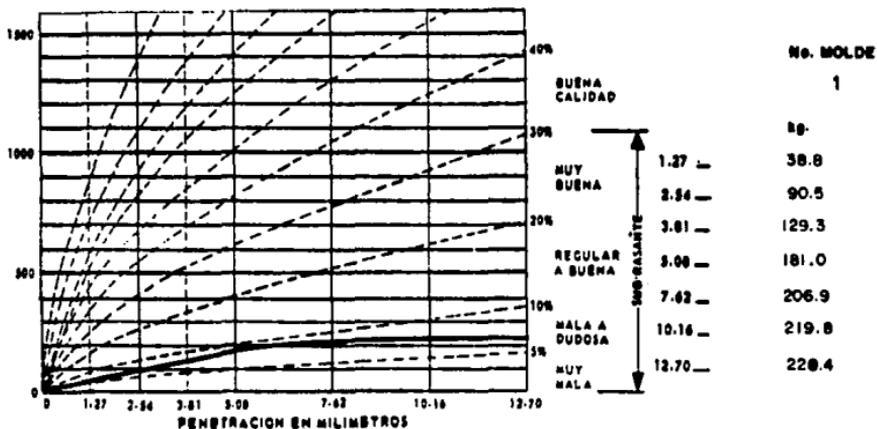
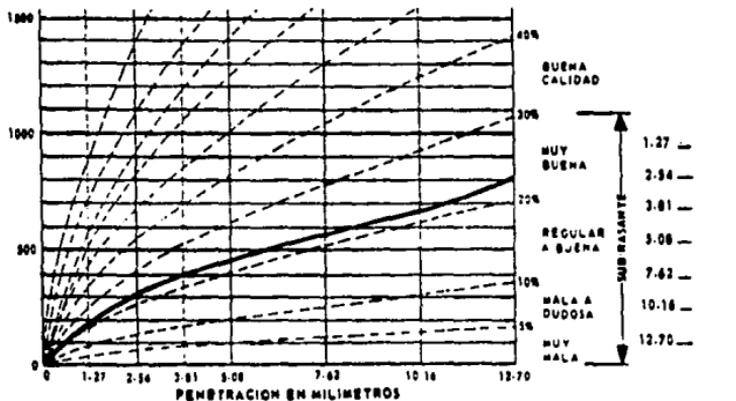
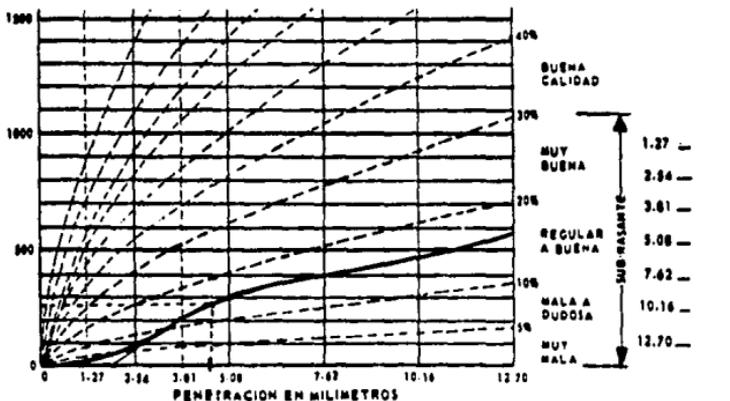


Figura 5.4.1



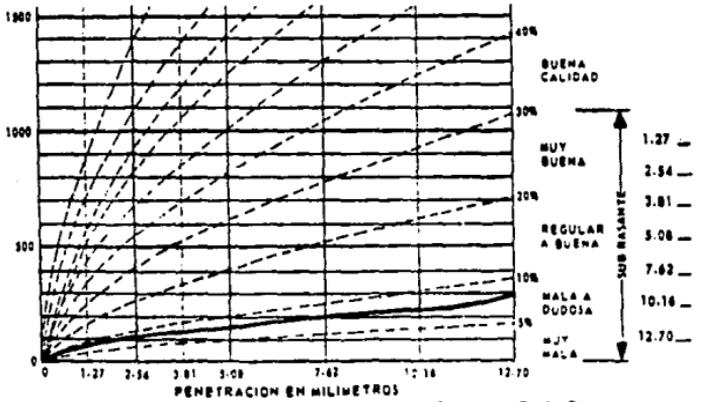
No. MOLDE
3

kg.
181.0
306.0
396.6
461.2
573.3
668.1
810.3



No. MOLDE
4

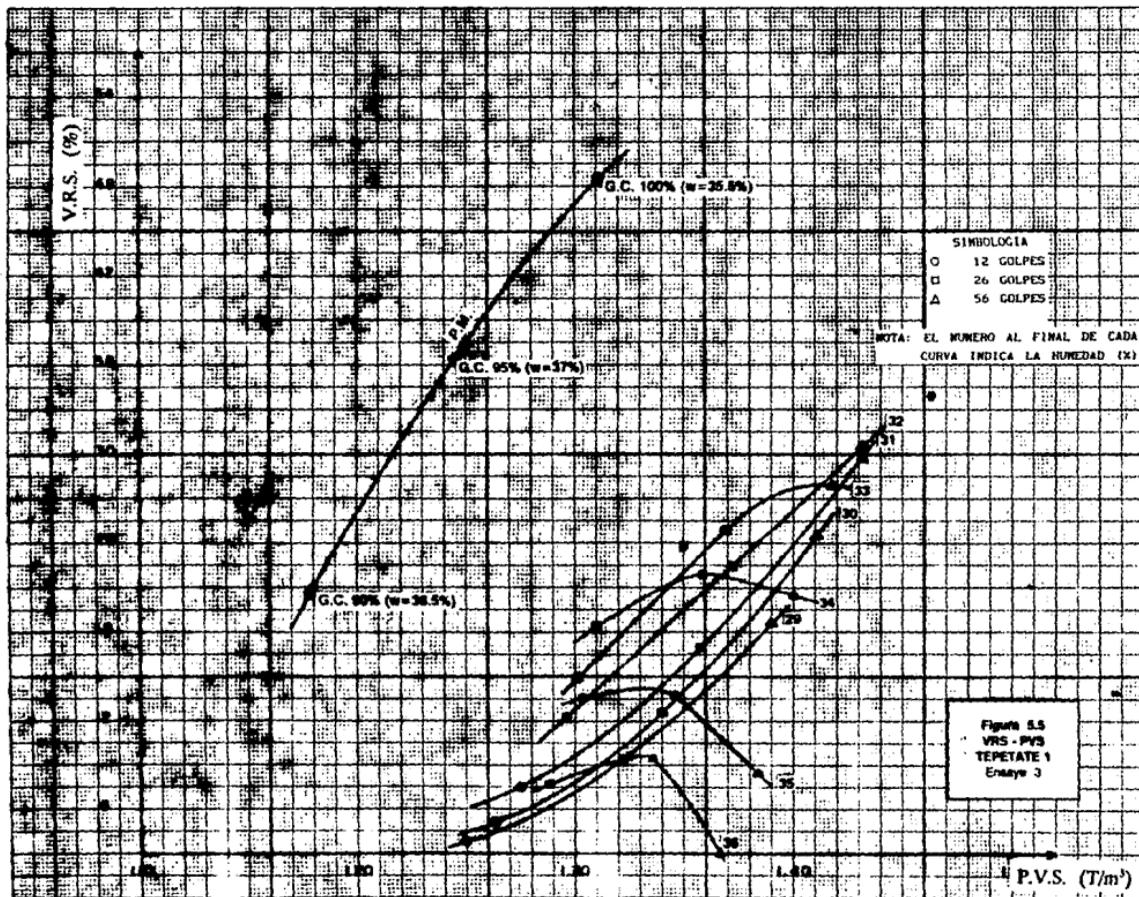
kg.
21.6
86.2
211.2
297.4
400.9
474.1
581.9



No. MOLDE
5

kg.
69.0
112.1
129.3
159.5
198.3
232.8
293.1

Figura 5.4.2



V.R.S. (%)

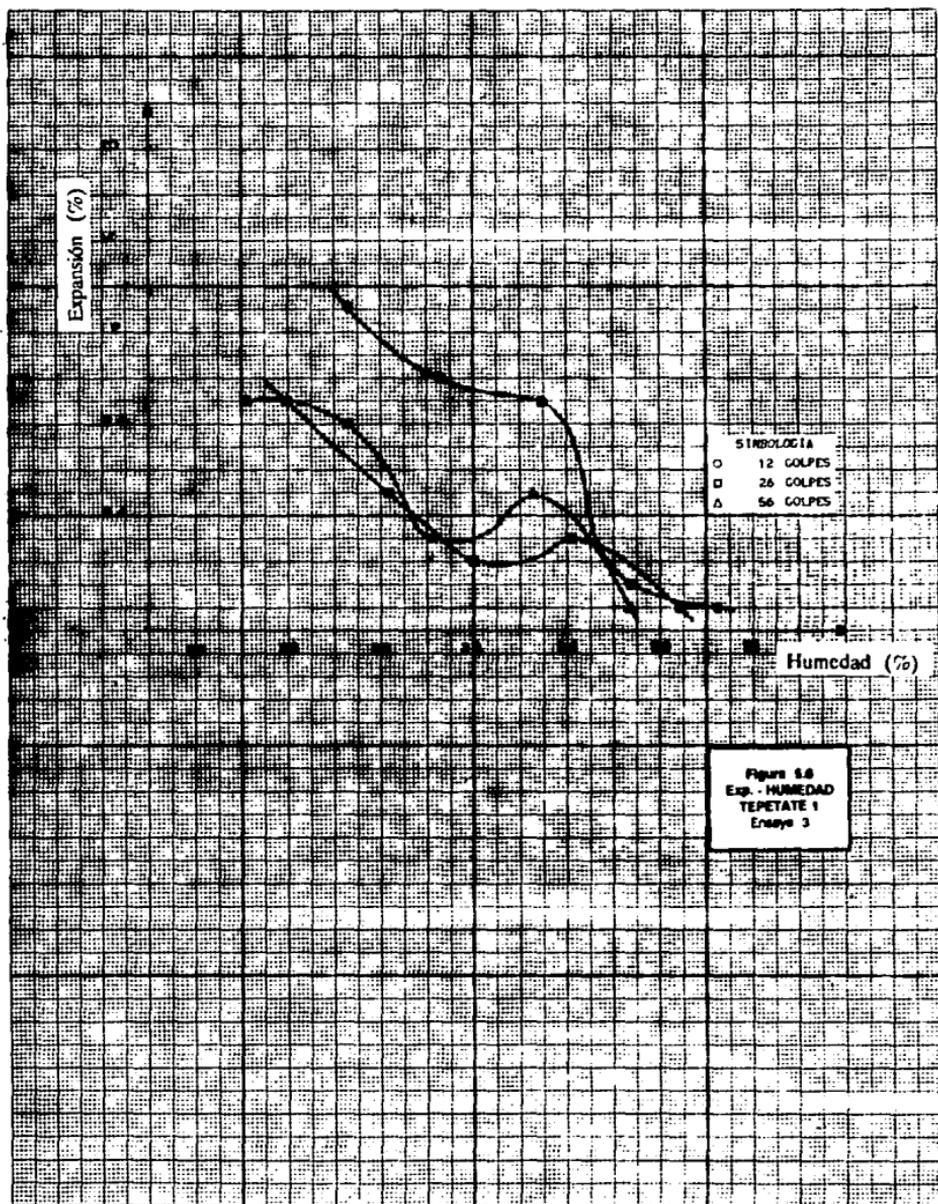
SIMBOLOGIA
 ○ 12 GOLPES
 □ 26 GOLPES
 △ 56 GOLPES

NOTA: EL NUMERO AL FINAL DE CADA CURVA INDICA LA HUEVEDAD (X)

G.C. 100% (w=35.6%)
 G.C. 95% (w=51%)
 G.C. 90% (w=38.5%)

Figura 5.5
 VRS - PVS
 TEPATE 1
 Ensayo 3

P.V.S. (T/m²)



SIMBOLOGIA
 ○ 12 GOLPES
 □ 26 GOLPES
 △ 56 GOLPES

Figura 5.8
 Exp. - HUMEDAD
 TEPETATE 1
 Ensayo 3

TABLAS DE RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS DEL MATERIAL

MATERIAL	TEPETATE (Ixtapaluca)		
	1	2	3
Ensaye Núm.	1	2	3
% pasa malla 3"	100.00	---	---
% pasa malla # 4	99.78	---	---
% pasa malla # 200	72.89	---	---
Límite Líquido (%)	56.35	56.50	57.00
Límite Plástico (%)	37.80	35.62	39.11
Índice Plástico (%)	18.56	20.88	17.89
Contracción Lineal (%)	13.81	13.53	13.26
Clasificación S.U.C.S.	OL	OL	OL
PVSM (T/m ³) (Proctor E.)	1.162	---	---
Humedad Óptima (%)	41.00	---	---

Cuadro 5.8

MATERIAL	TEPETATE (Inst. de Ingeniería)		
	1	2	3
Ensaye Núm.	1	2	3
% pasa malla 3"	100.00	---	---
% pasa malla # 4	99.45	---	---
% pasa malla # 200	64.99	---	---
Límite Líquido (%)	51.00	53.00	49.50
Límite Plástico (%)	31.58	26.16	31.19
Índice Plástico (%)	19.41	26.84	18.31
Contracción Lineal (%)	6.83	6.73	6.43
Clasificación S.U.C.S.	OL	OL	OL
PVSM (T/m ³) (Proctor E.)	1.310	---	---
Humedad Óptima (%)	35.50	---	---

Cuadro 5.9

TABLAS DE RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

MATERIAL	ARCILLA (Drenaje Profundo)		
	1	2	3
Ensaye Núm.	1	2	3
% pasa malla 3"	100.00	---	---
% pasa malla # 4	100.00	---	---
% pasa malla # 200	96.42	---	---
Límite Líquido (%)	55.50	54.60	55.20
Límite Plástico (%)	31.88	30.32	32.30
Índice Plástico (%)	23.62	24.28	22.90
Contracción Lineal (%)	8.45	8.55	8.41
Clasificación S.U.C.S.	CL	CL	CL
PVSM (T/m ³) (Proctor E.)	1.039	1.018	---
Humedad Óptima (%)	51.80	52.20	---

Cuadro 5.10

MATERIAL	GRAVA-ARENA (San Mateo Atenco)		
	1	2	3
Ensaye Núm.	1	2	3
% pasa malla 3"	100.00	---	---
% pasa malla # 4	48.65	---	---
% pasa malla # 200	2.27	---	---
Límite Líquido (%)	23.85	21.41	20.30
Límite Plástico (%)	INAP	INAP	INAP
Índice Plástico (%)	NP	NP	NP
Contracción Lineal (%)	---	---	---
Clasificación S.U.C.S.	GP-SW	GP-SW	GP-SW
PVSM (T/m ³) (Porter E.)	1.966	2.037	1.898
Humedad Óptima (%)	9.15	8.33	10.27

Cuadro 5.11

A continuación se presentan las gráficas de cada uno de los materiales en estudio, interpretando y comparando los resultados obtenidos, en el siguiente orden:

- 1.- TEPETATE 1 (Instituto de Ingeniería).
- 2.- TEPETATE 2 (Ixtapaluca).
- 3.- ARCILLA (Drenaje Profundo).
- 4.- GRAVA ARENA (San Mateo Atenco).

5.1. TEPETATE 1 (Instituto de Ingeniería).

5.1.1 Interpretación de Resultados.

De la prueba Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos observamos que en las curvas Valor Relativo de Soporte vs. Peso Volumétrico Seco (V.R.S. - P.V.S.) de la figura 5.5 (ensaye 3), el V.R.S. aumenta cuando crece el contenido de agua, manteniendo constante el P.V.S.; también crece el V.R.S. si el P.V.S. aumenta, teniendo un límite a partir del cual baja el V.R.S. cuando disminuye el P.V.S., esto se debe a que al efectuar la penetración a los especímenes saturados, la resistencia disminuye debido a la absorción y expansión que sufre el suelo por la influencia del agua.

Cuando se realizó la prueba de penetración a los especímenes compactados con 26 golpes, se aprecia en una parte de la curva V.R.S. - w (figura 5.4), presenta una mayor resistencia a la penetración comparados con los especímenes

elaborados con 12 y 56 golpes de energía de compactación, este comportamiento del suelo se refleja en las curvas con humedades de 34, 35 y 36 por ciento (figura 5.5), cuya característica es la concavidad hacia abajo.

El comportamiento del suelo se presenta en forma semejante en los ensayos uno (1) y dos (2) del antes mencionado, con la única diferencia que la resistencia a la penetración fue menor en algunos especímenes compactados con 26 golpes en el ensayo uno (1) figura 5.8, cuya característica de las curvas, para este tipo de comportamiento del suelo, es la concavidad hacia arriba, tal como se aprecian en la figura 5.9 para las humedades de 37 y 38 por ciento.

En lo que se refiere al parámetro de la expansión de los suelos, en los tres (3) ensayos que se presentan en las figuras 5.6, 5.13 y 5.14 de Expansión vs. Humedad, ambas en por ciento ($Exp - w$), se ilustra en términos generales, que a menor contenido de agua con que se compactaron los especímenes y a mayor energía de compactación, la expansión fue mayor, disminuyendo ésta, a medida que crecía la humedad de prueba.

Respecto a la prueba Porter Modificada (Padrón) se puede observar que si disminuimos el grado de compactación y aumentamos el contenido de agua en los suelos (segunda y tercera condición de la variante II, cuadro 3.1), los valores relativos de soporte decrecen (tal como se aprecian en las figuras 5.5, 5.9 y 5.12); ésto se debe a que al estar menos compactados respecto al peso volumétrico seco máximo y, con una humedad mayor que la óptima, la relación de vacíos en este caso es mayor, lo que implica en una menor resistencia a la penetración por parte del suelo, y en consecuencia un menor valor relativo de soporte en comparación con el mismo suelo pero con mayor porcentaje de compactación.

5.1.2 Comparación de resultados.

Al hacer la comparación de los resultados obtenidos de las figuras 5.5, 5.9 y 5.12, podemos observar que los valores relativos de soporte siempre son mayores, a iguales pesos volumétricos secos, del 95% al 100% de grado de compactación en la prueba Porter Modificada, que para los obtenidos en la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos; mientras que para el 90% de grado de compactación, los valores relativos de soporte aproximadamente son del mismo orden, pero para este caso, los pesos volumétricos secos son menores, que obtenidos mediante la prueba dinámica.

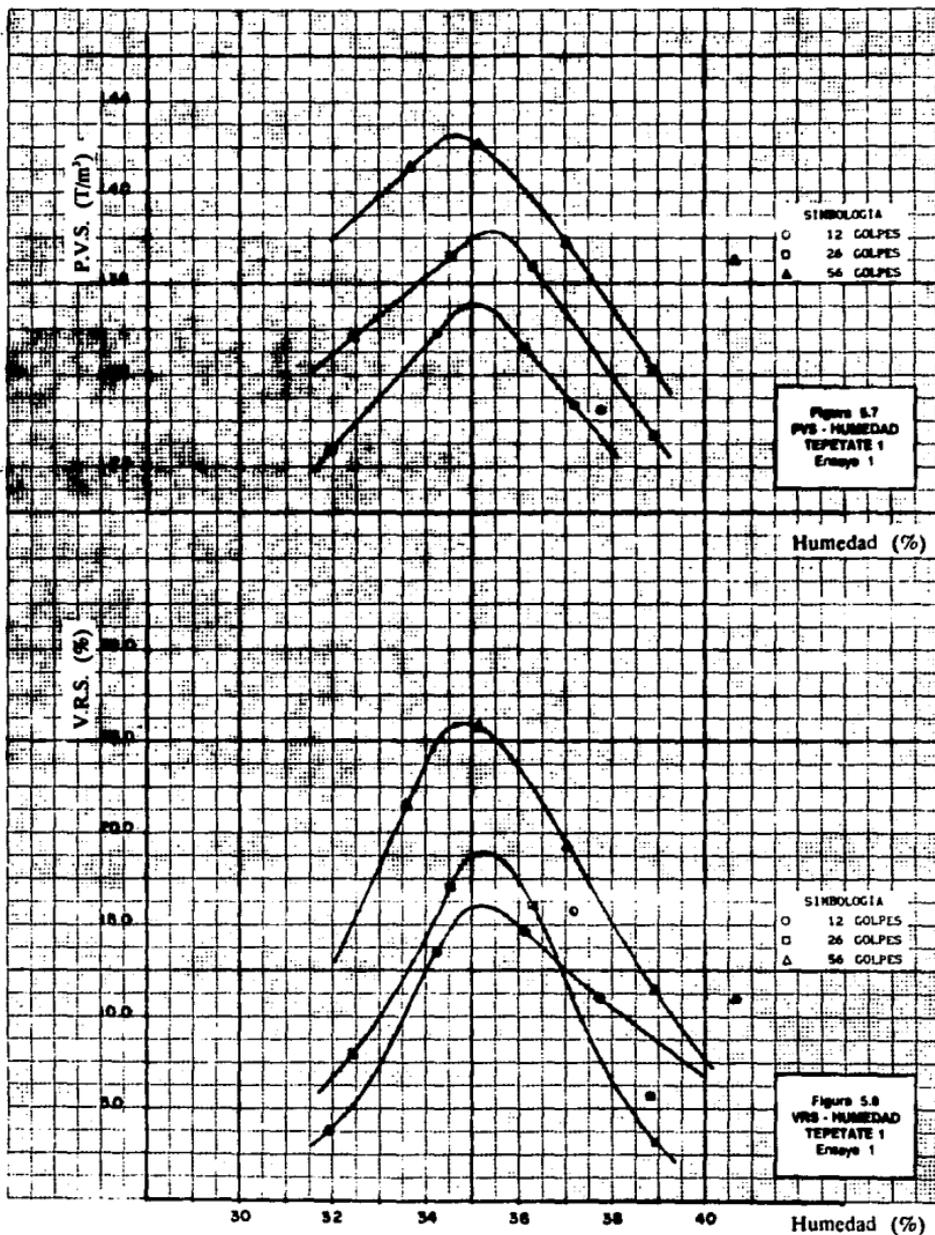
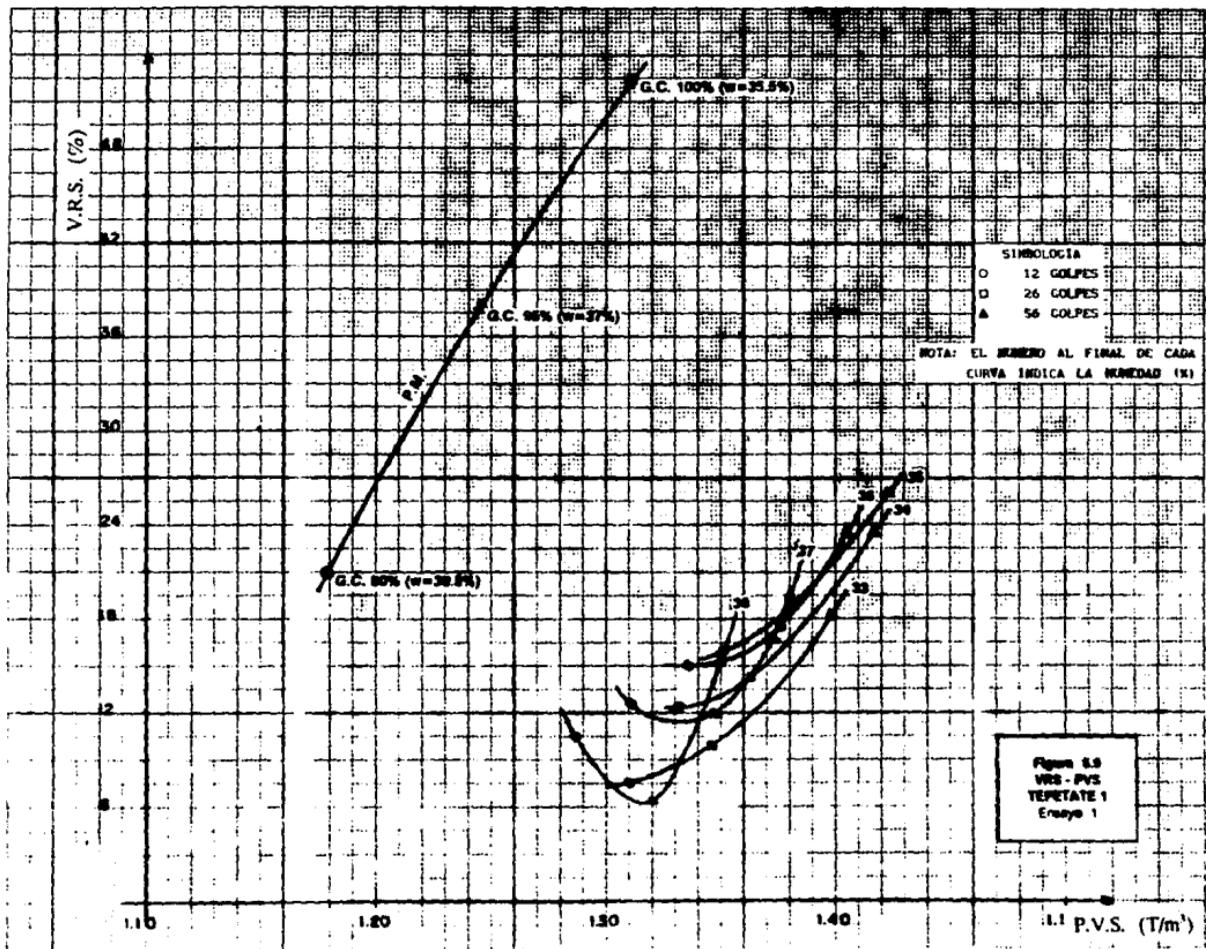
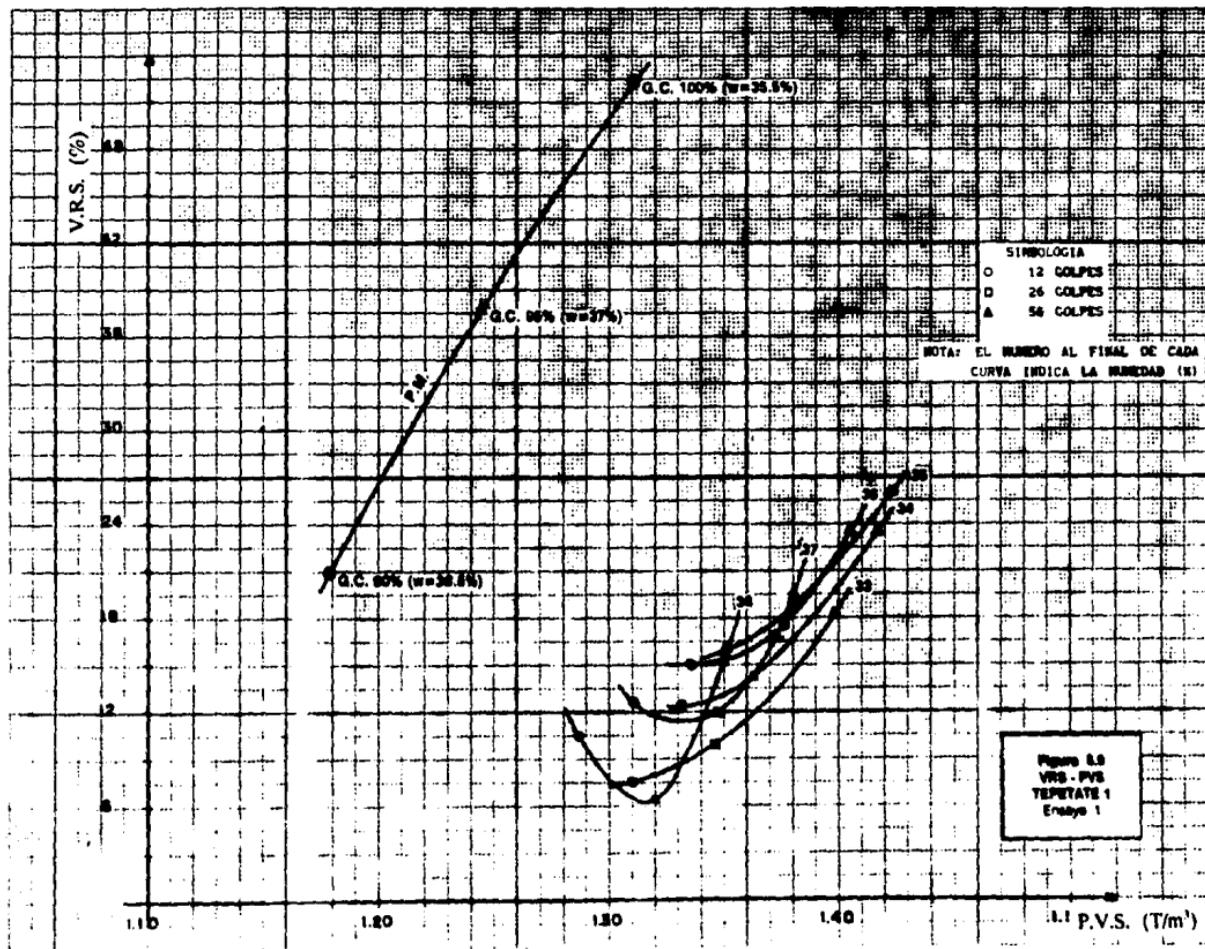
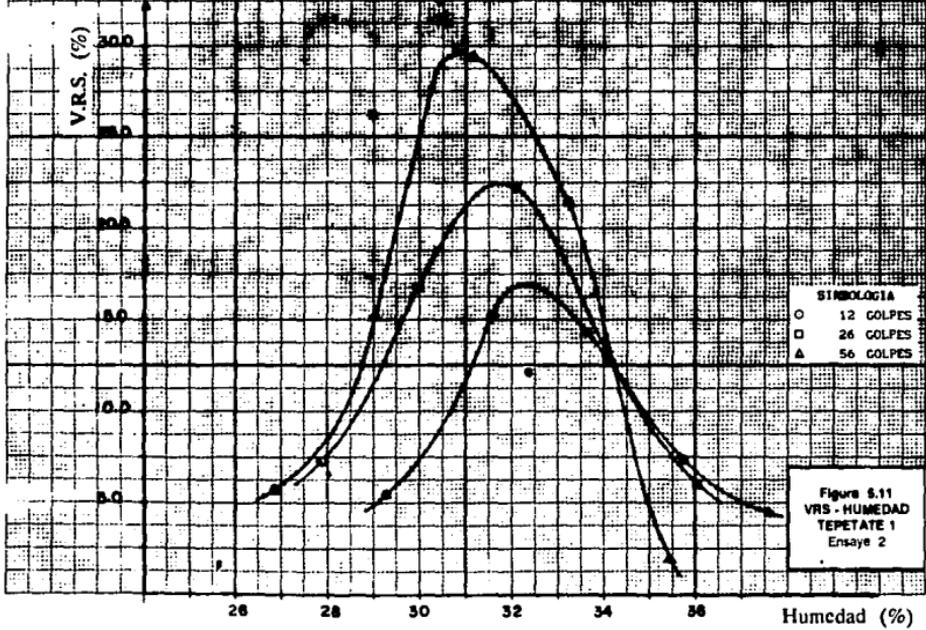
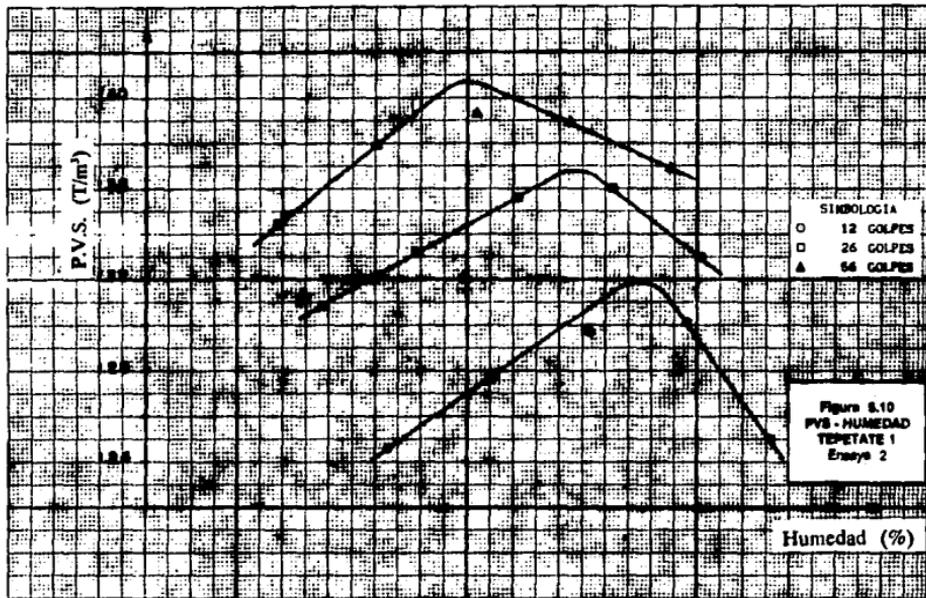


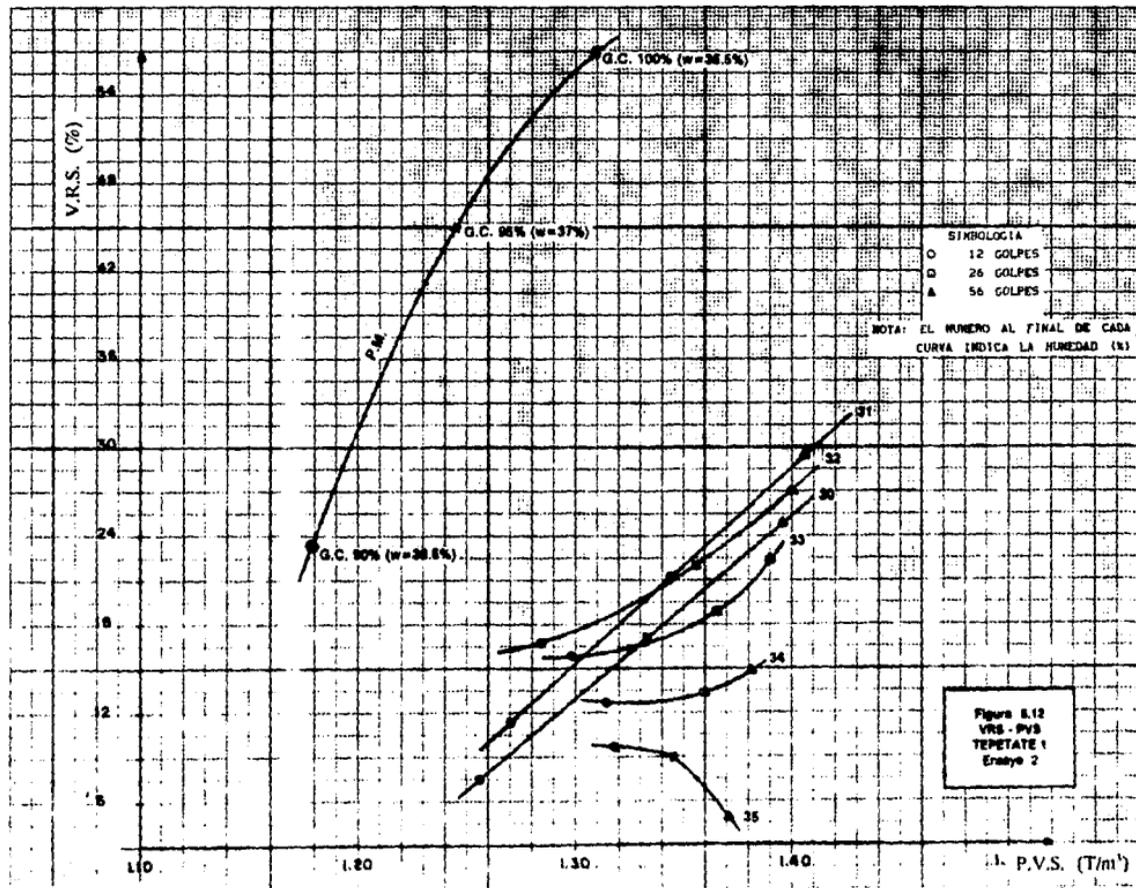
Figura 5.7
P.V.S. - HUMEDAD
TEPILATE 1
Ensayo 1

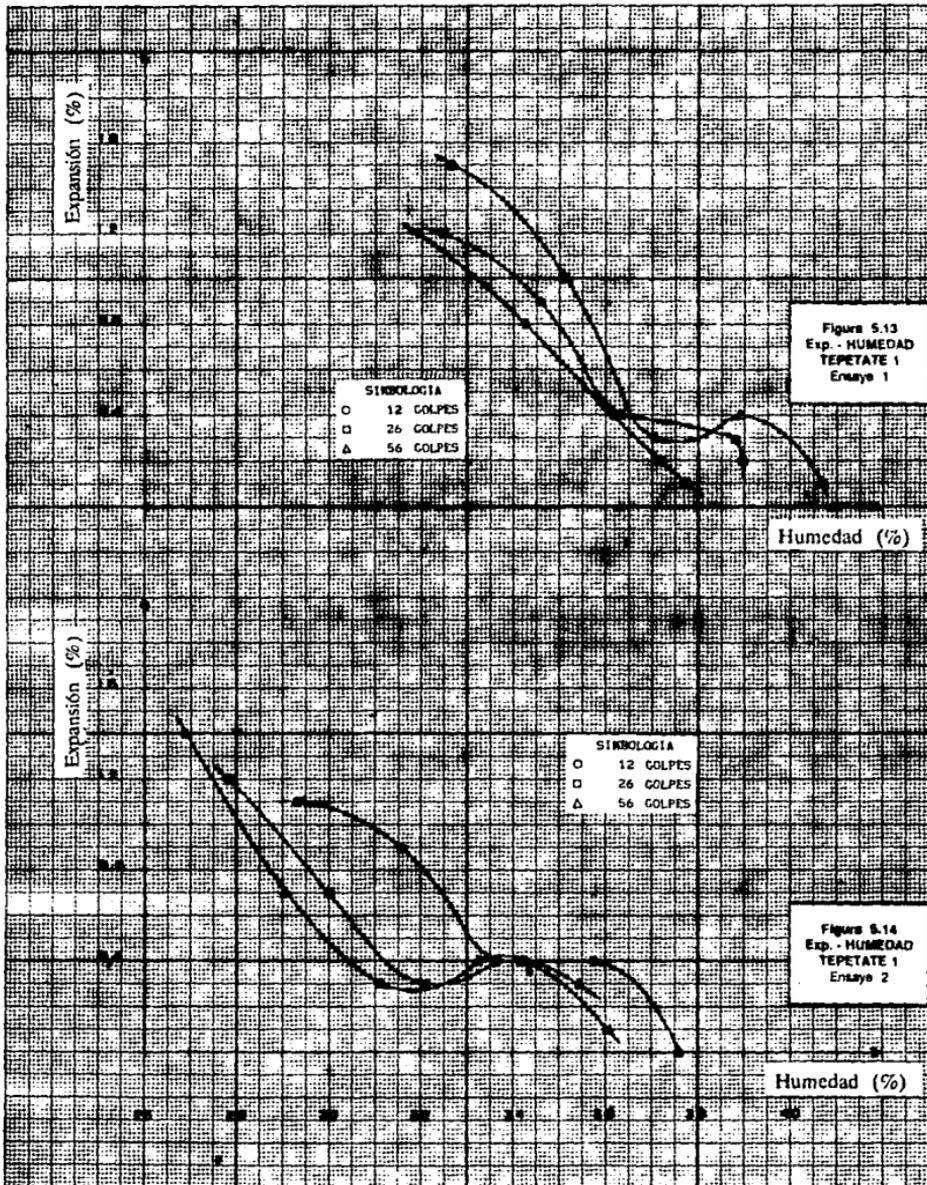
Figura 5.8
V.R.S. - HUMEDAD
TEPILATE 1
Ensayo 1











5.2 TEPETATE 2 (Ixtapaluca).

5.2.1 Interpretación de Resultados.

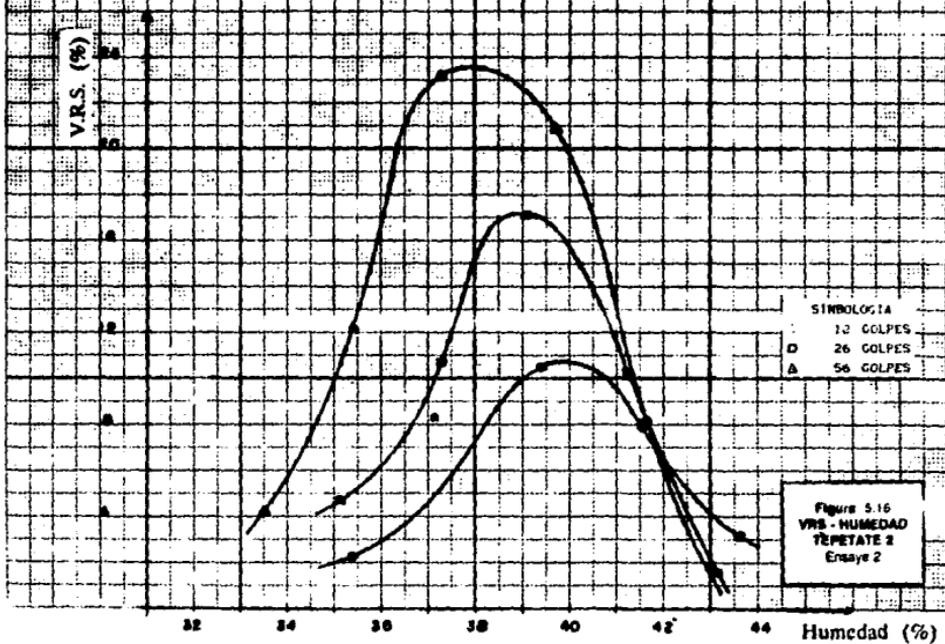
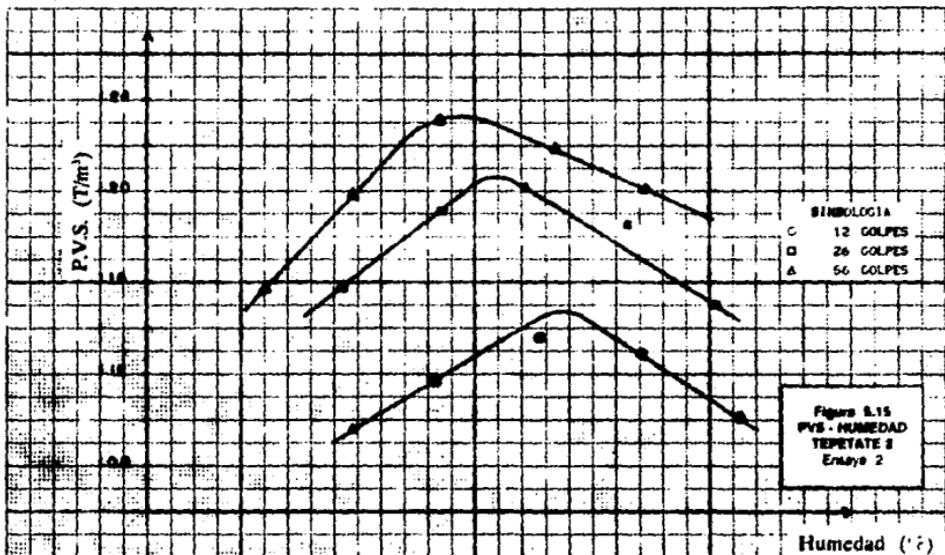
En las figuras 5.16 y 5.19 se aprecian que el comportamiento del suelo es similar al tepetate 1, con la diferencia que llegan a un límite, en donde los valores relativos de soporte bajan conforme se aumenta la humedad de prueba así como la energía de compactación.

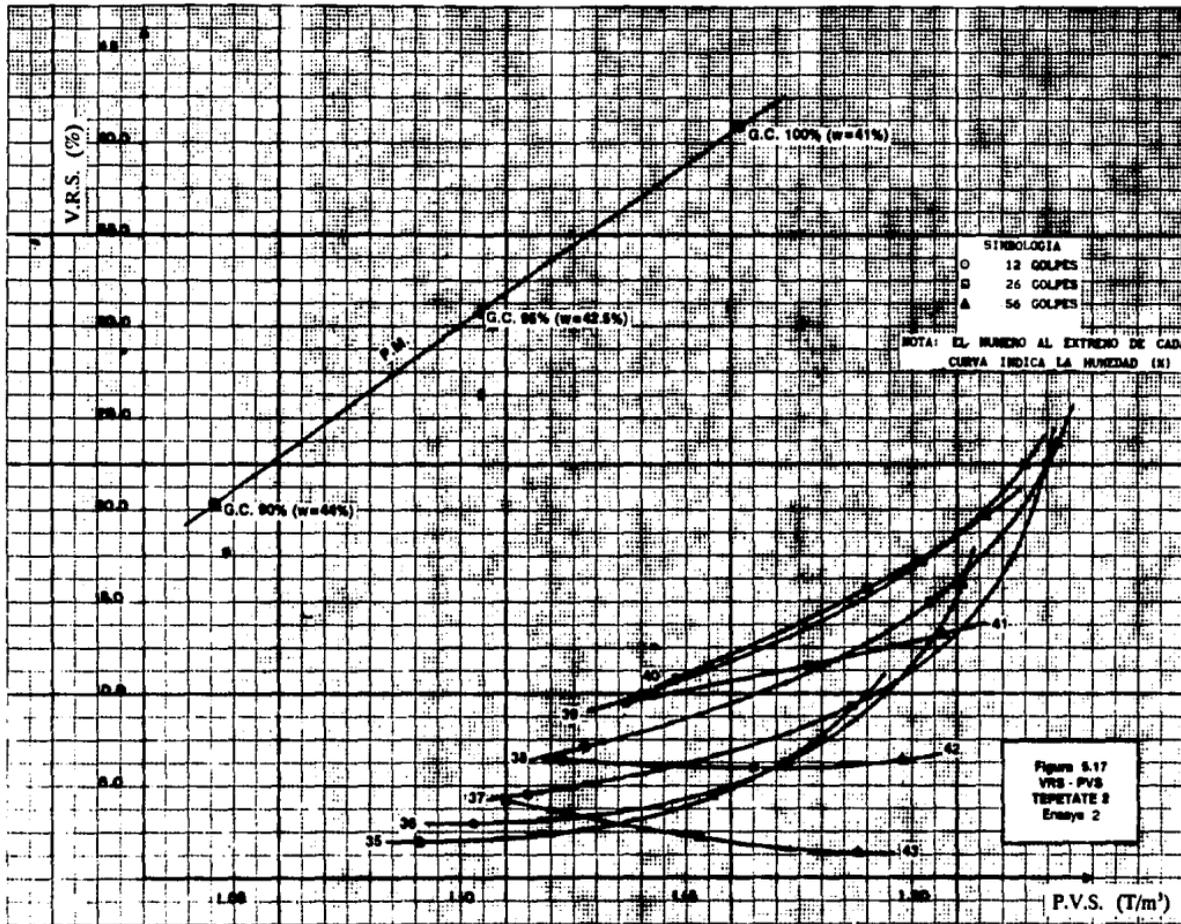
En la prueba Porter Modificada se tiene la misma tendencia que el tepetate 1, es decir, para la disminución del grado de compactación y aumento de la humedad de prueba respecto a la humedad óptima disminuye el V.R.S.; en donde observamos que la variación del valor relativo de soporte con respecto al peso volumétrico seco tienen un comportamiento lineal, tal como se aprecian en las figuras 5.16 y 5.19.

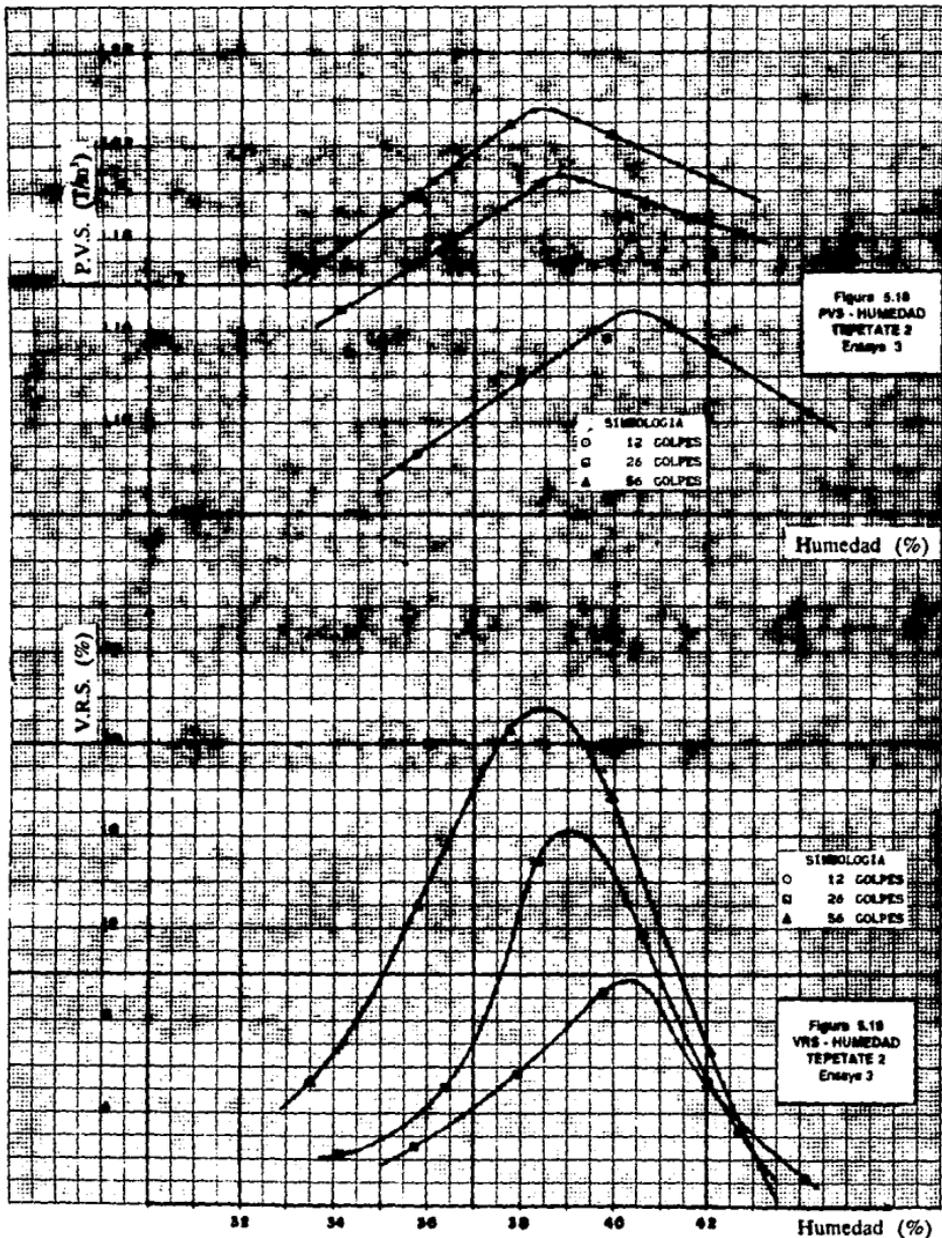
5.2.2 Comparación de Resultados.

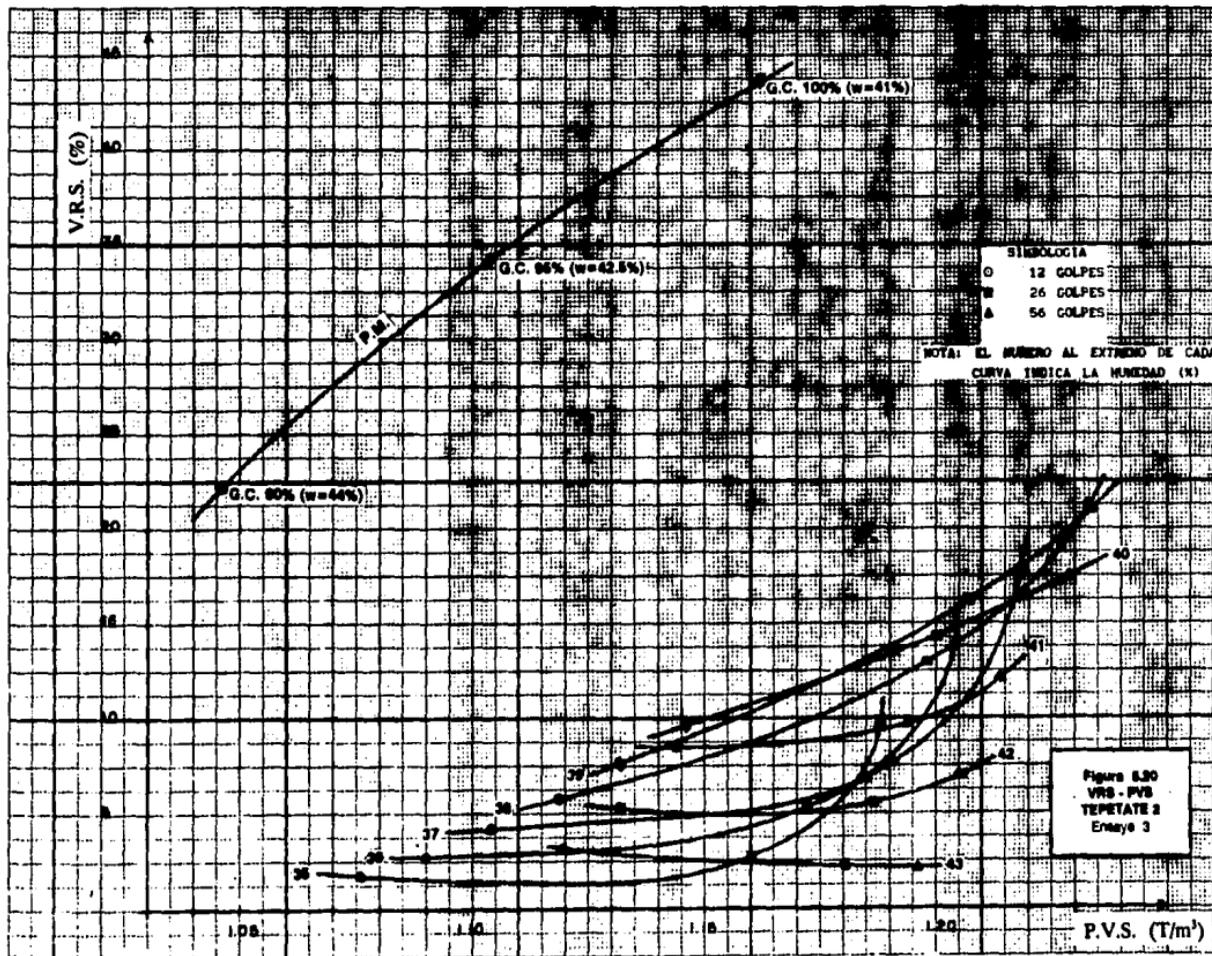
Respecto a este material, en el ensaye dos (2) tal como se ilustra en la figura 5.16, la comparación de los resultados nos llevan a las mismas conclusiones que el tepetate 1, con la diferencia que en el tepetate 2 para el 90% de grado de compactación, los valores relativos de soporte casi siempre son mayores, (sólo en algunos casos son del mismo orden) y de manera semejante los pesos volumétricos secos también son menores, que los obtenidos mediante la prueba de impactos.

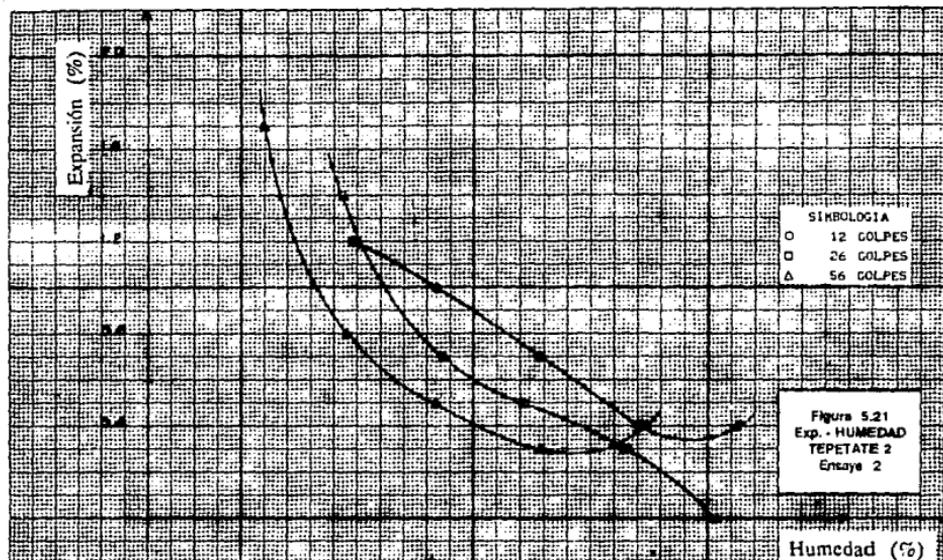
Referente los resultados que se presentan la figura 5.19 (ensaye 3), podemos observar la semejanza que hay con el comportamiento del material en el ensaye dos (2), con la diferencia que para estos ensayes los valores relativos de soporte siempre son mayores, a iguales pesos volumétricos secos, pero del 90% al 100% de grado de compactación en la prueba Porter Modificada, que los obtenidos mediante la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.



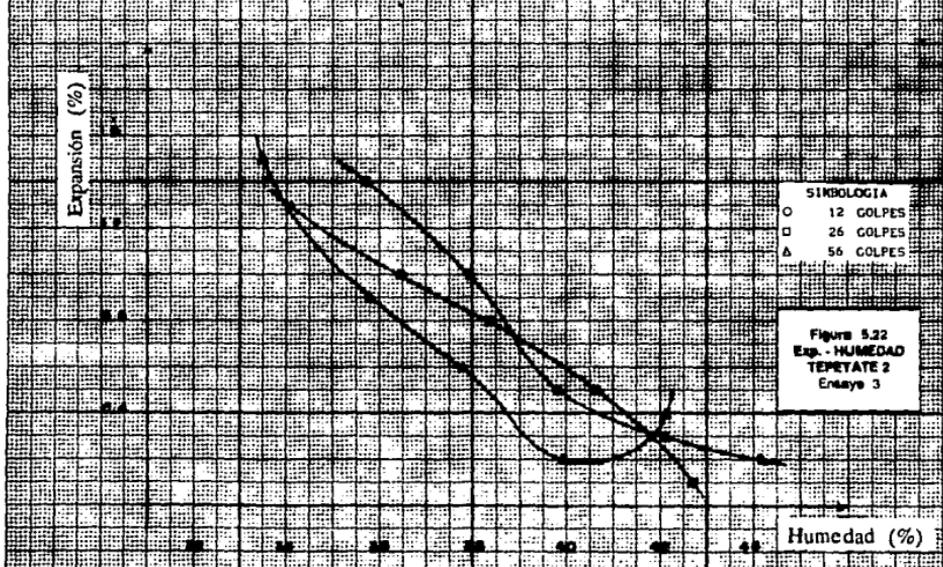








SIMBOLOGIA
 O 12 GOLPES
 □ 26 GOLPES
 Δ 56 GOLPES



SIMBOLOGIA
 O 12 GOLPES
 □ 26 GOLPES
 Δ 56 GOLPES

5.3 ARCILLA (Drenaje Profundo).

5.3.1 Interpretación de Resultados.

Como se observa en la figura 5.25 del ensaye uno (1), el comportamiento de este material se asemeja al tepetate 1 (ensaye 3) que se describió en el inciso 5.1.1.

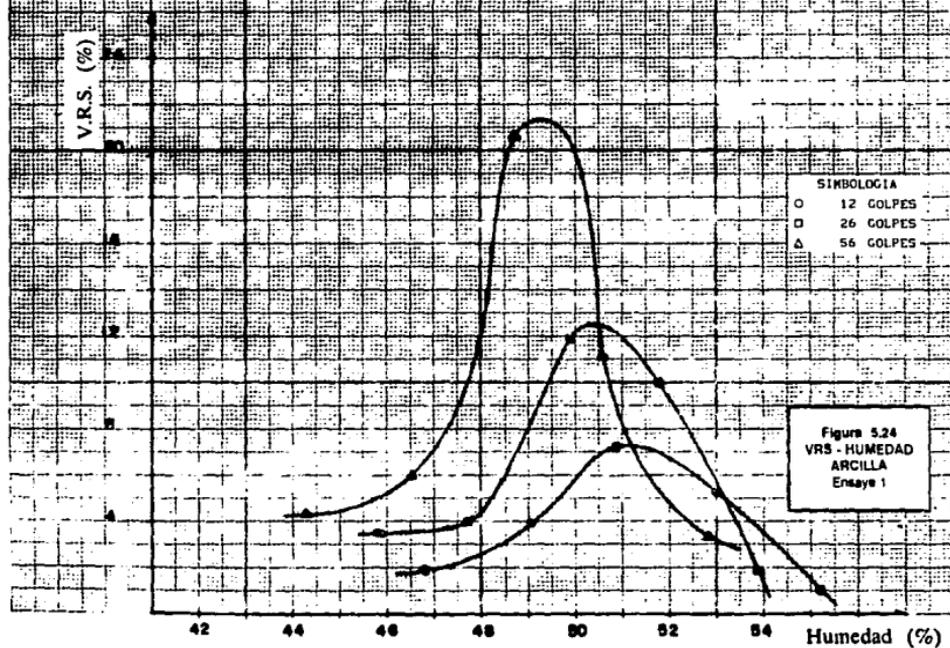
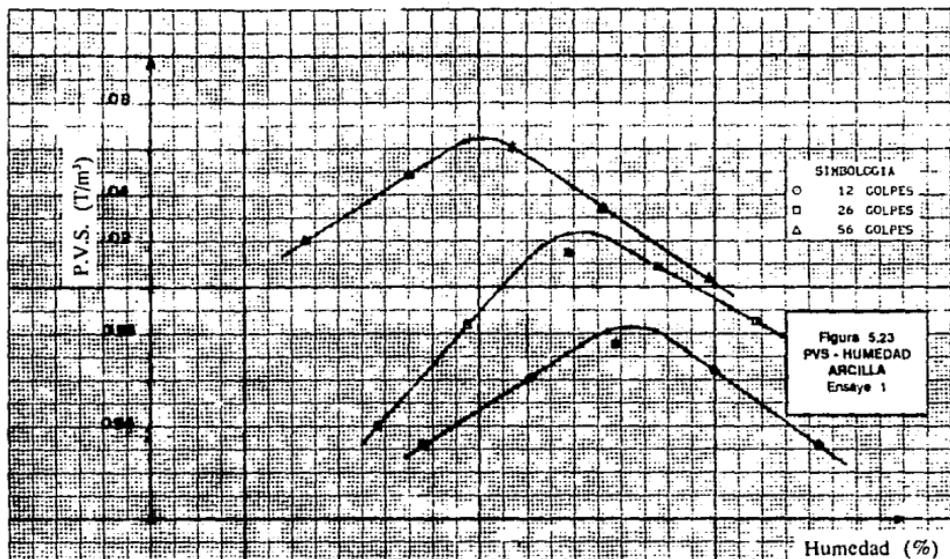
Respecto a los ensayos dos (2) y tres (3) que se aprecian en las figuras 5.28 y 5.31 respectivamente, que el comportamiento de la arcilla es similar a las de los materiales descritos anteriormente, en donde se observa la misma tendencia de las curvas, con la diferencia que a partir del 49% de humedad, el peso volumétrico seco y su respectivo valor relativo de soporte comienzan a disminuir conforme aumenta la humedad de prueba.

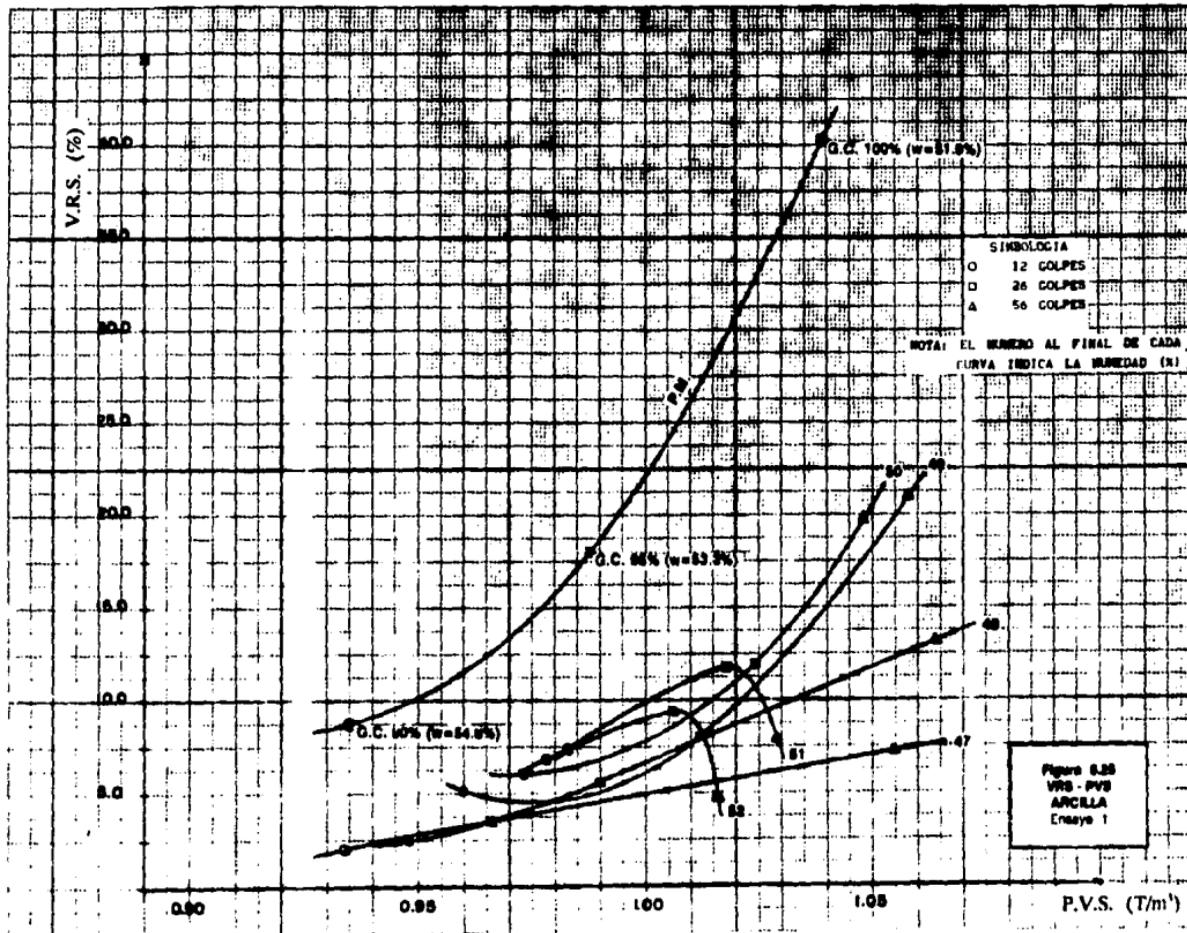
De la misma manera respecto a la prueba Porter Modificada (Padrón) observamos, para los tres (3) ensayos (figuras 5.25, 5.28 y 5.31), que existe una diferencia del 22.5% de los V.R.S. en promedio, entre el 100% y el 95% grados de compactación; mientras que entre el 95% y el 90% grados de compactación la diferencia es del orden del 10%, lo cual hace que la curva tenga una forma parabólica.

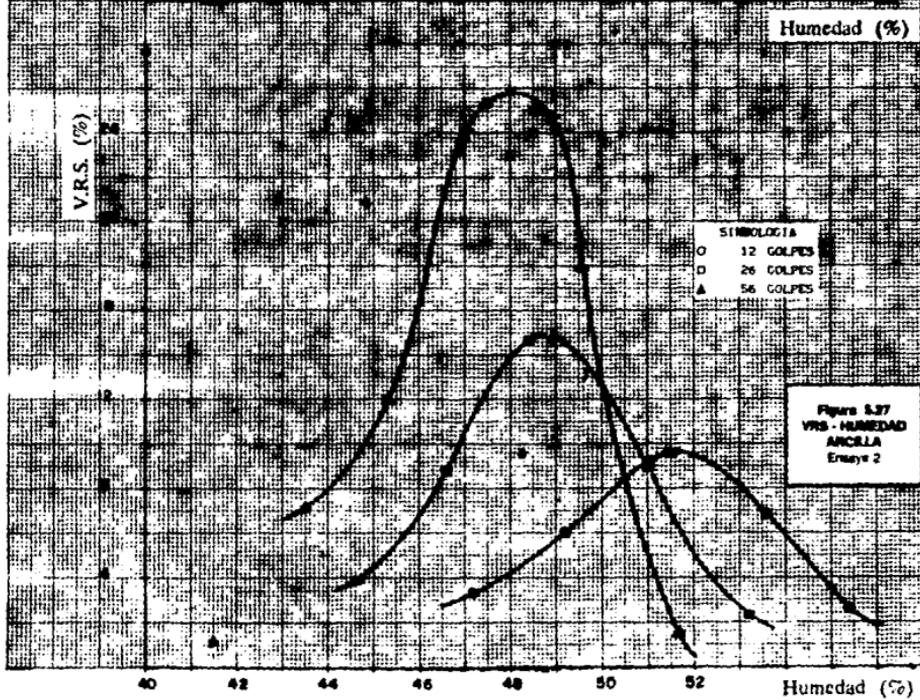
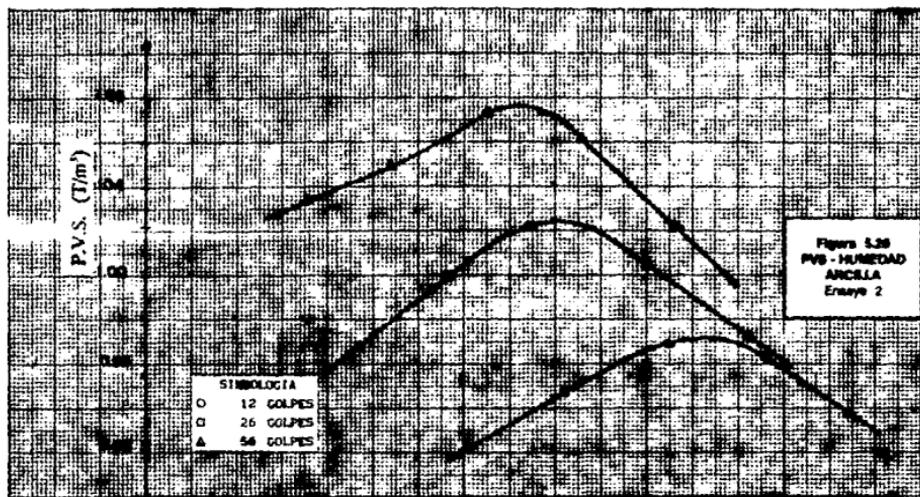
5.3.2 Comparación de Resultados.

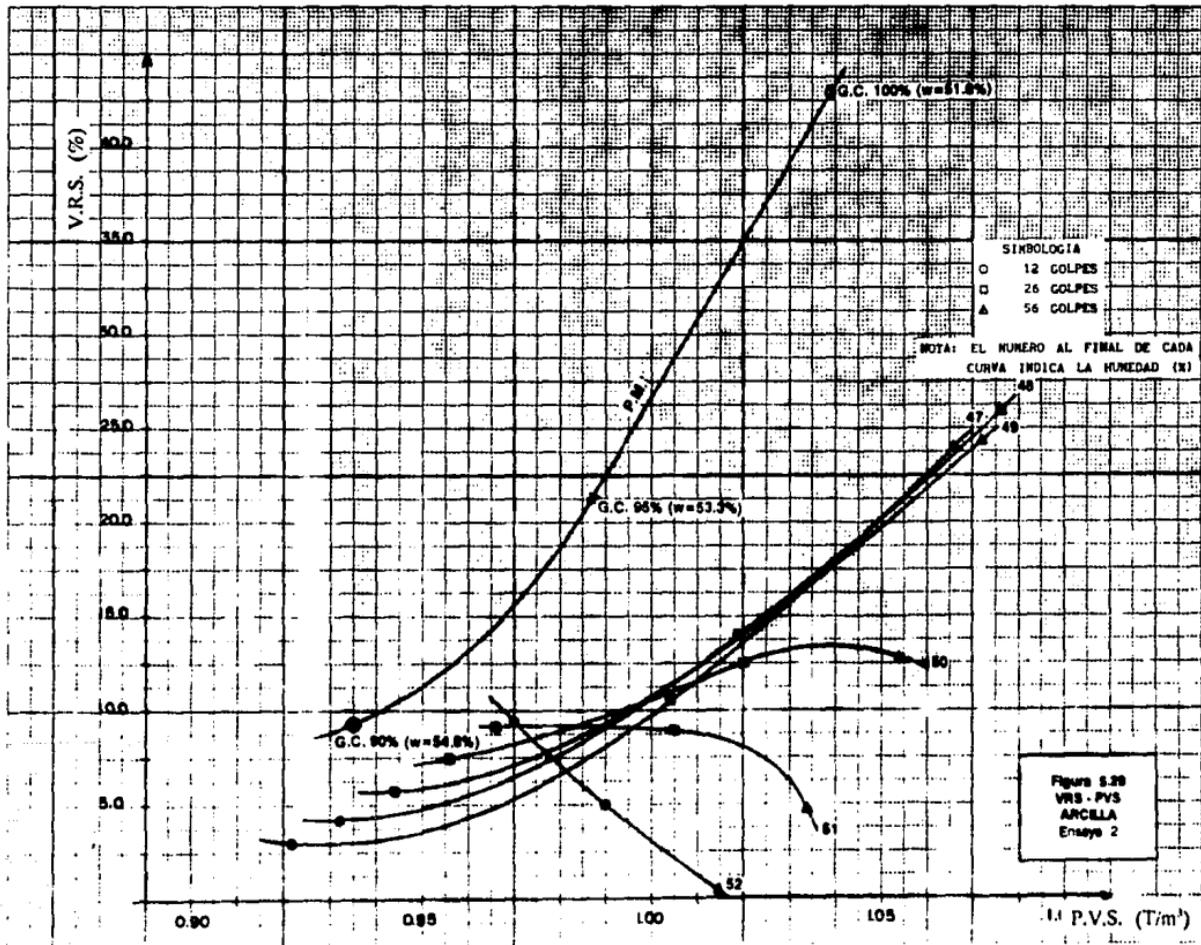
En las figuras de los tres (3) ensayos se aprecian que los valores relativos de soporte siempre son mayores en la

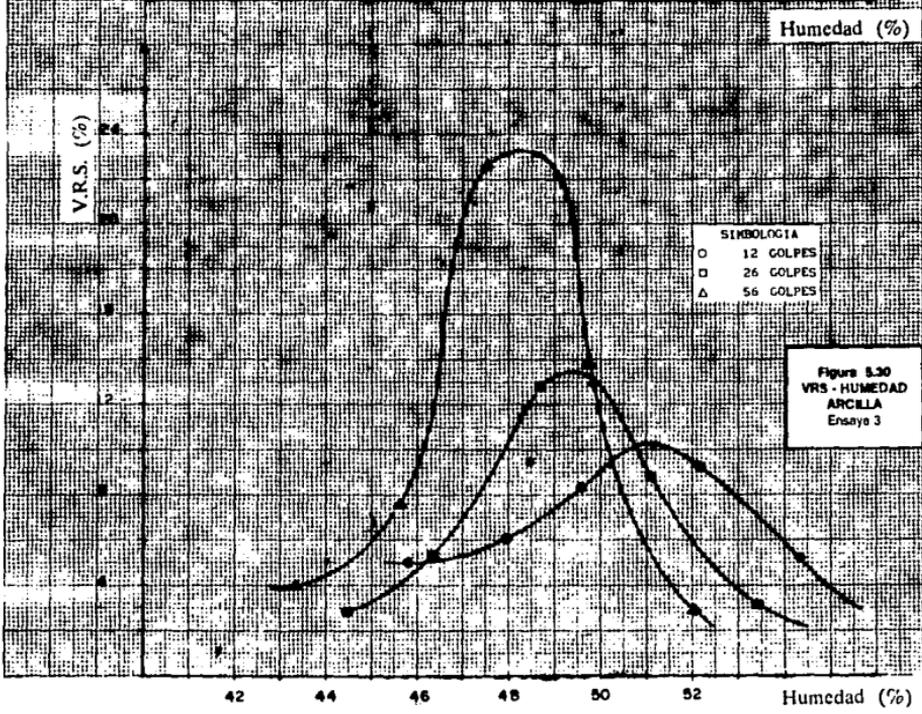
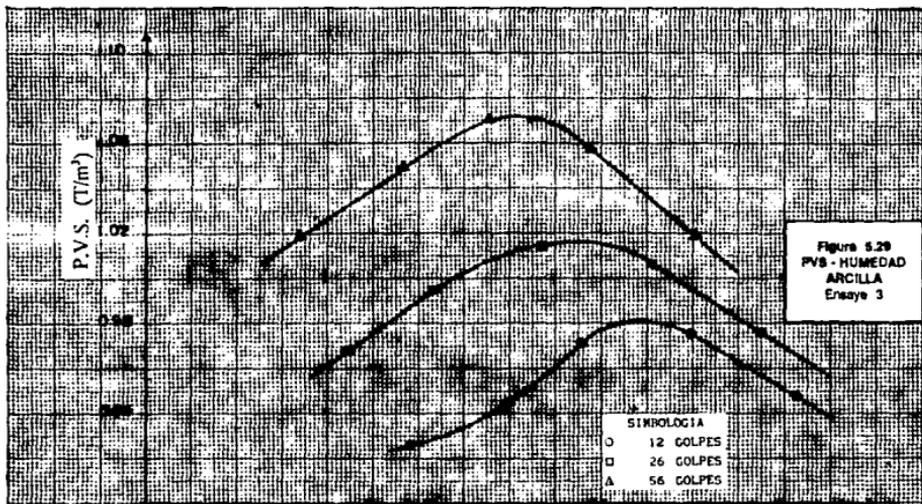
prueba Porter Modificada que en la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos y, esta diferencia entre ambos valores relativos de soporte aumenta, en la medida que crece el peso volumétrico seco.

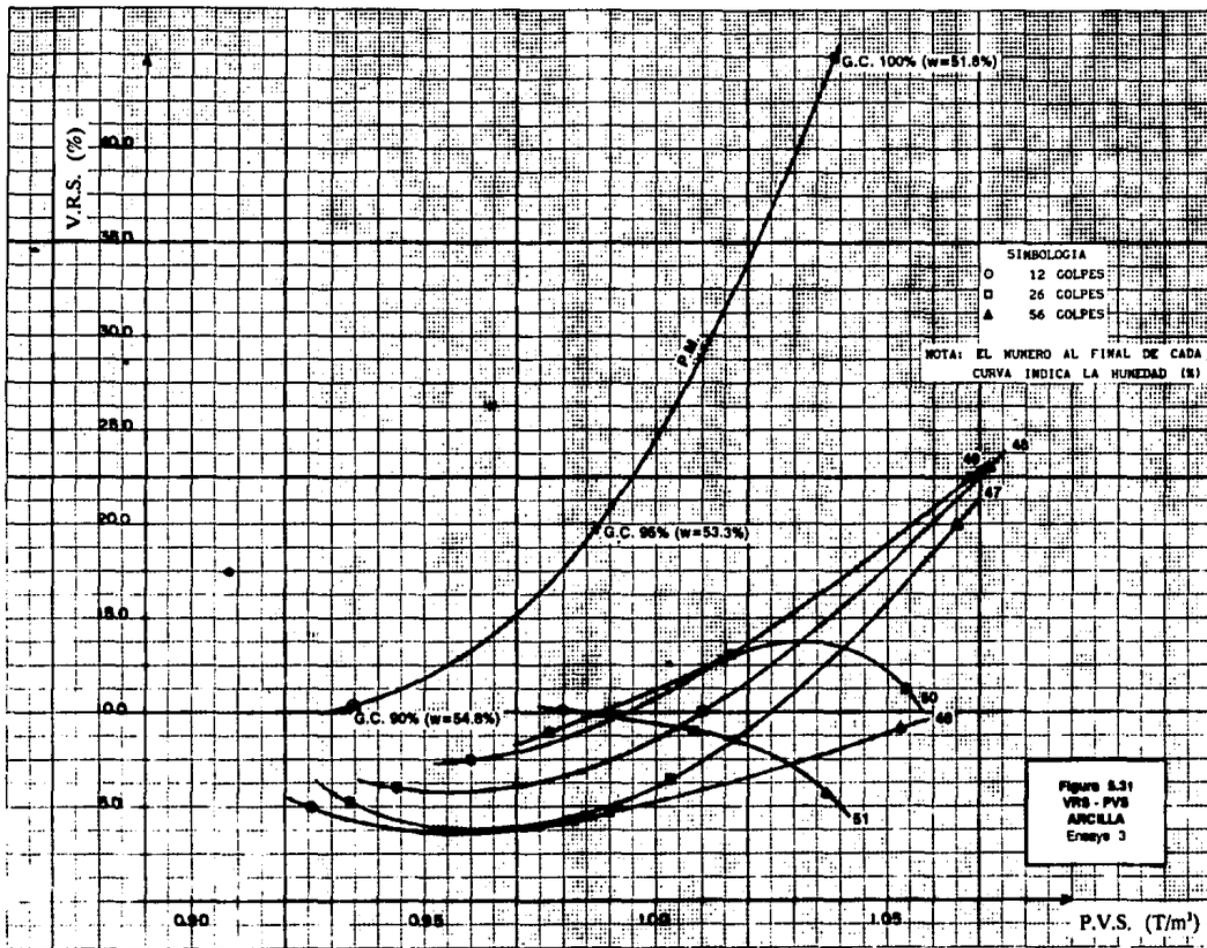


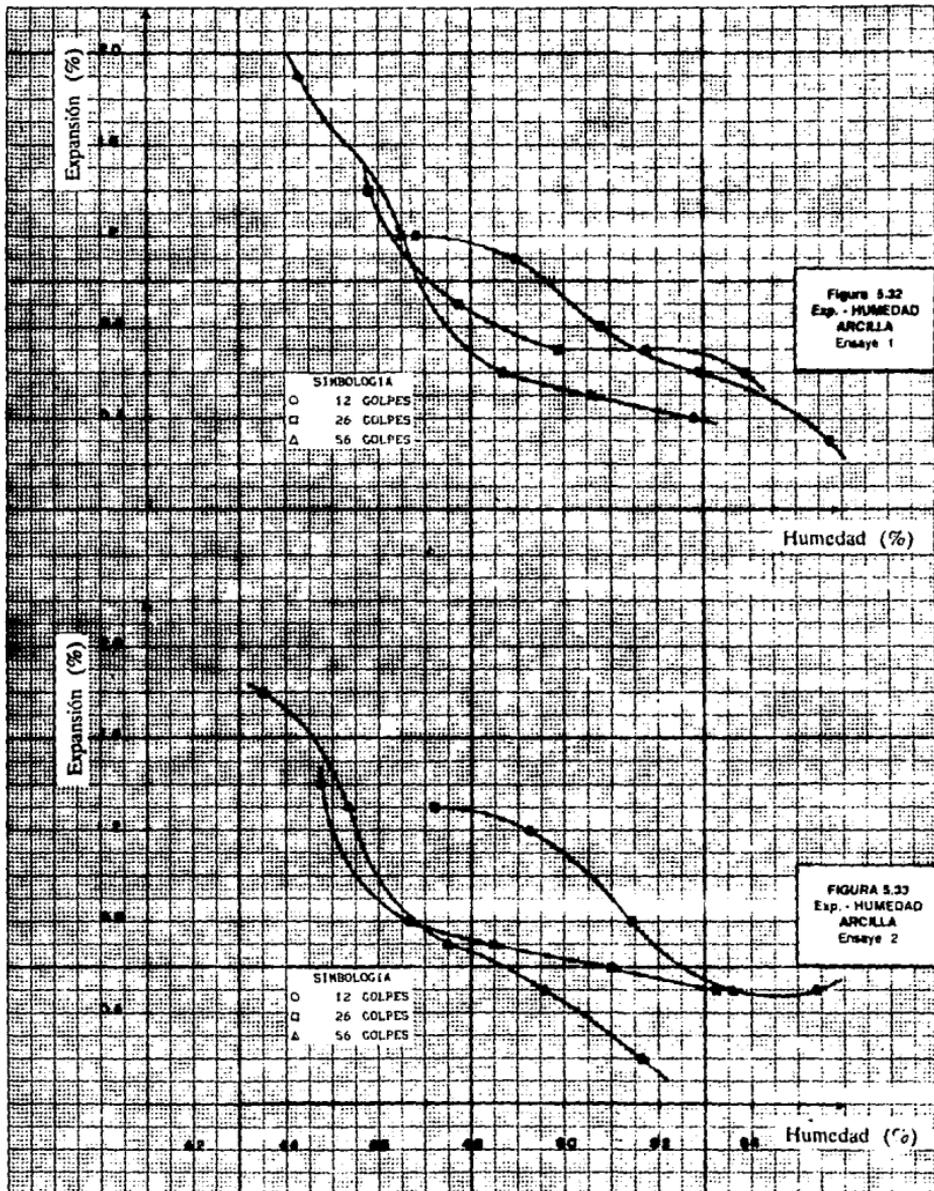


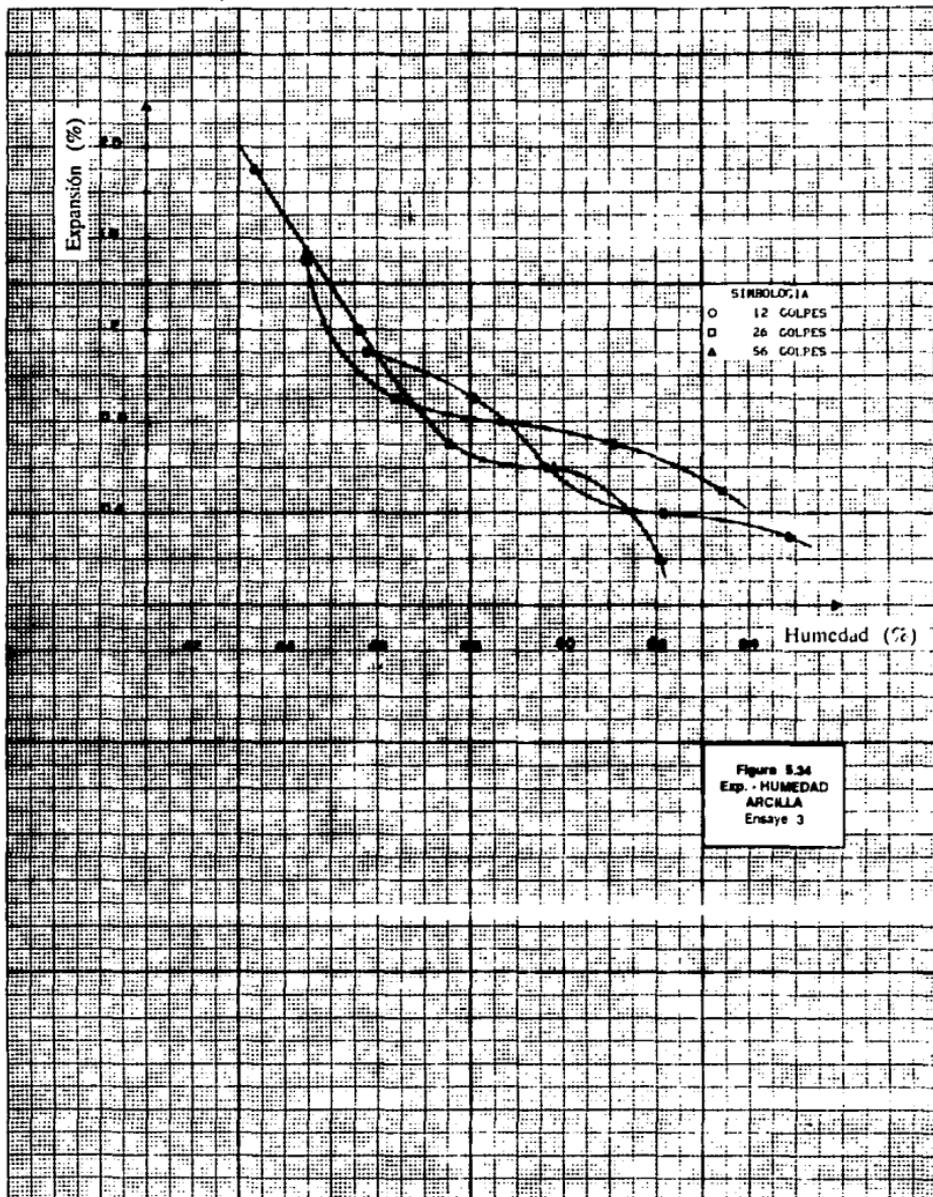












5.4 GRAVA ARENA (San Mateo Atenco).

5.4.1 Interpretación de Resultados.

Como se ha mencionado repetidamente, la dificultad de la ejecución de la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para los materiales inertes, trae como consecuencia la gran variabilidad de los resultados en los tres (3) ensayos.

Para el ensayo uno (1) (figura 5.37) se observa que conforme aumenta la humedad de prueba los valores relativos de soporte permanecen generalmente constantes y, los pesos volumétricos secos aumentan hasta un valor máximo, a partir del cual éstos disminuyen.

Por otro lado para humedades constantes, las diferencias son grandes entre los valores relativos de soporte de los especímenes compactados con 56 y 26 golpes, así como pequeñas son las diferencias entre sus respectivos pesos volumétricos, en comparación con las bajas diferencias que existen entre los valores relativos de soporte obtenidos mediante 26 y 12 golpes de energías de compactación.

Observando la figura 5.40 (ensayo 2), en las curvas para humedades del ocho y nueve por ciento (8% y 9%), los valores relativos de soporte crecen conforme aumentan el peso volumétrico seco. Por otro lado, en la curva para la humedad del diez por ciento (10%) se aprecia que se incrementa el valor relativo de soporte conforme crece el peso volumétrico seco, hasta un punto (26 golpes) en donde éste decrece aunque sigue aumentando el valor relativo de soporte; mientras para las

humedades del once y doce por ciento (11% y 12%) las curvas se comportan semejante a las descritas en el ensayo uno (1).

Respecto al ensayo tres (3) que se aprecia en la figura 5.43, las curvas para las humedades del siete y ocho por ciento (7% y 8%) tienen un comportamiento similar a las curvas del ocho y nueve por ciento (8% y 9%) del ensayo dos (2), así mismo el comportamiento de las curvas para el nueve y diez por ciento (9% y 10%) se comportan semejantes a la curva para la humedad del diez por ciento (10%) también del ensayo dos (2). Para las humedades del once y doce por ciento (11% y 12%) se observa que aumenta el valor relativo de soporte conforme disminuye el peso volumétrico seco hasta un punto (26 golpes) en donde éste crece aunque sigue aumentando el valor relativo de soporte, cuya característica es la concavidad hacia la derecha de la curva.

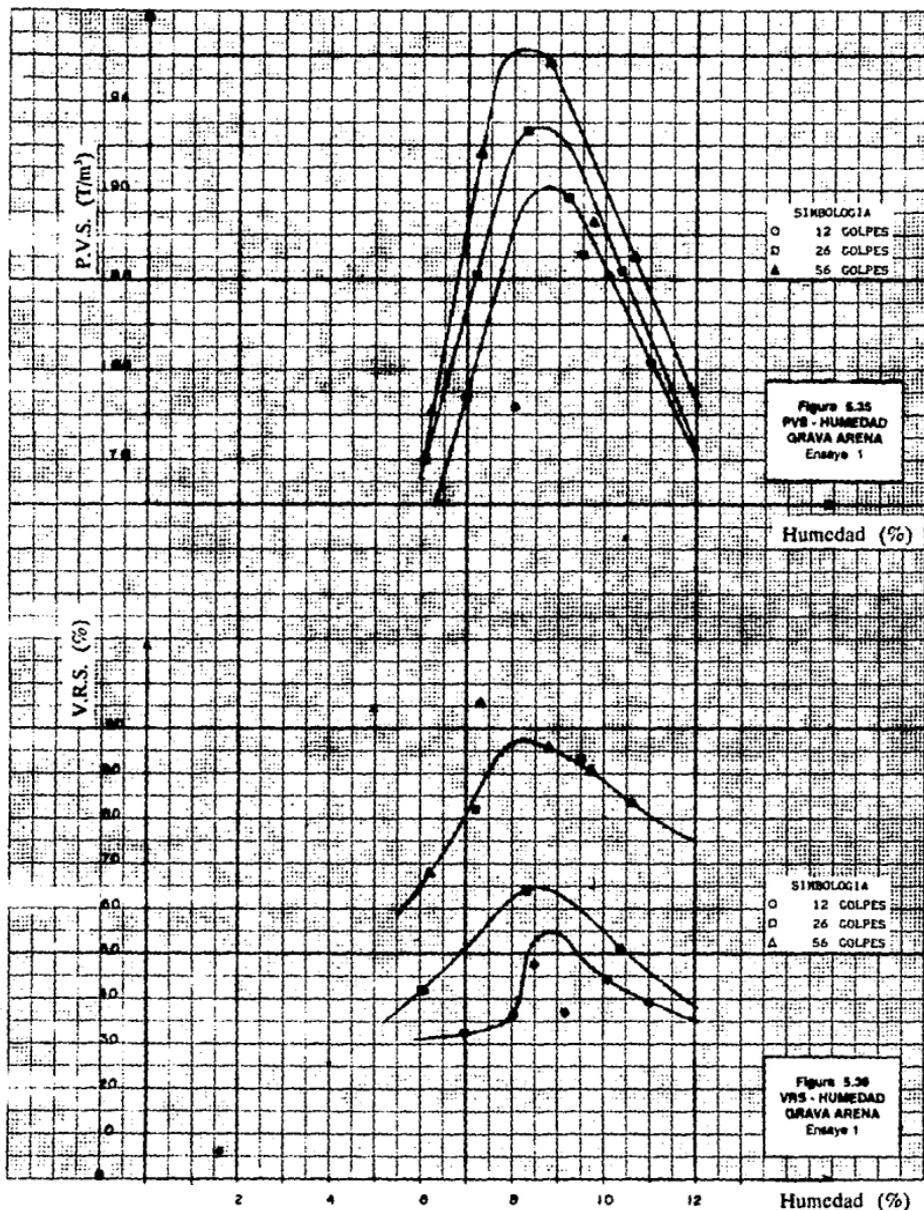
Para la prueba Porter Modificada, a diferencia de la prueba dinámica, su comportamiento es uniforme, es decir, que conforme se aumenta el grado de compactación, permaneciendo constante la humedad de prueba, los valores relativos de soporte también se incrementan.

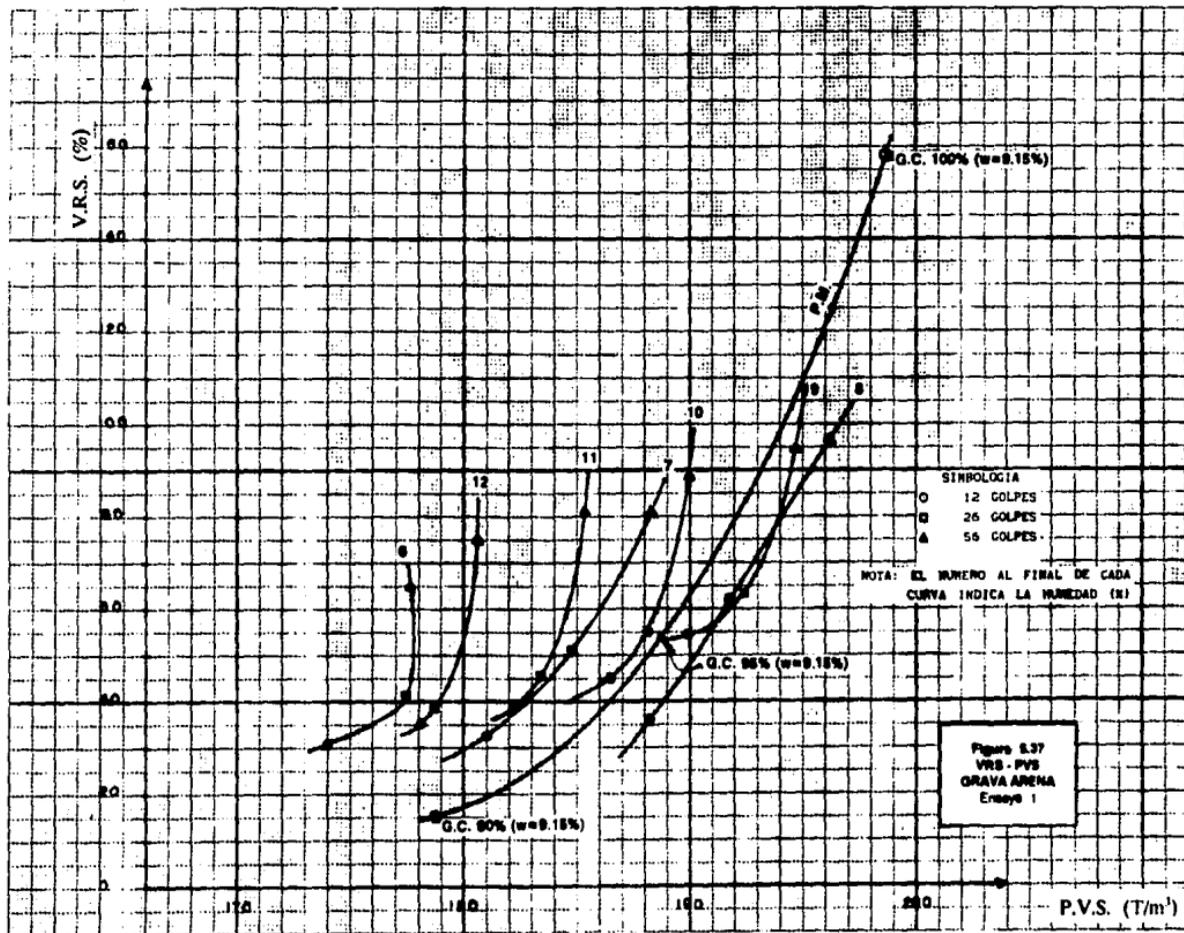
5.4.2 Comparación de Resultados.

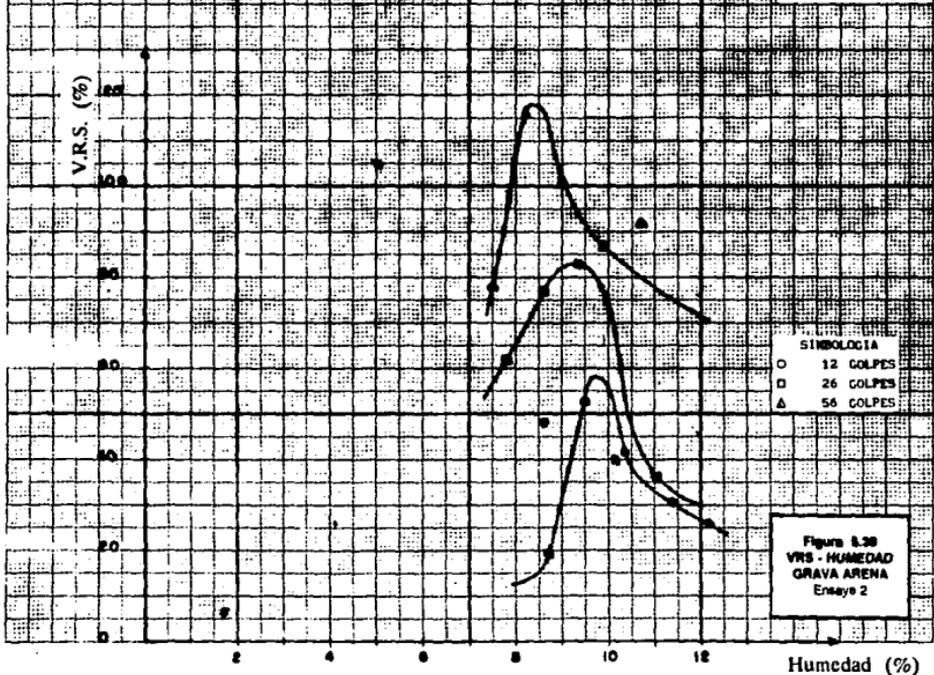
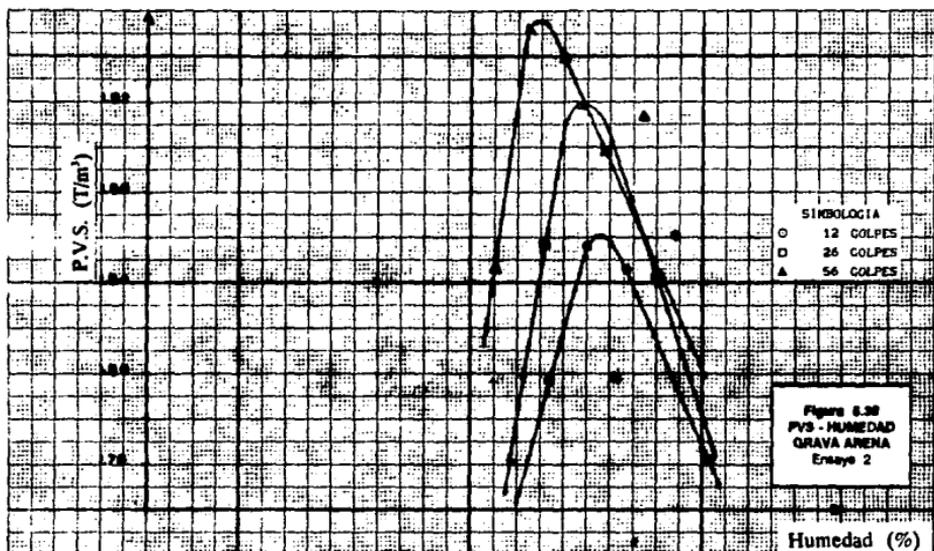
Para el 100% de grado de compactación de la prueba Porter Modificada los valores relativos de soporte y los pesos volumétricos secos son mayores que los que se obtienen mediante la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

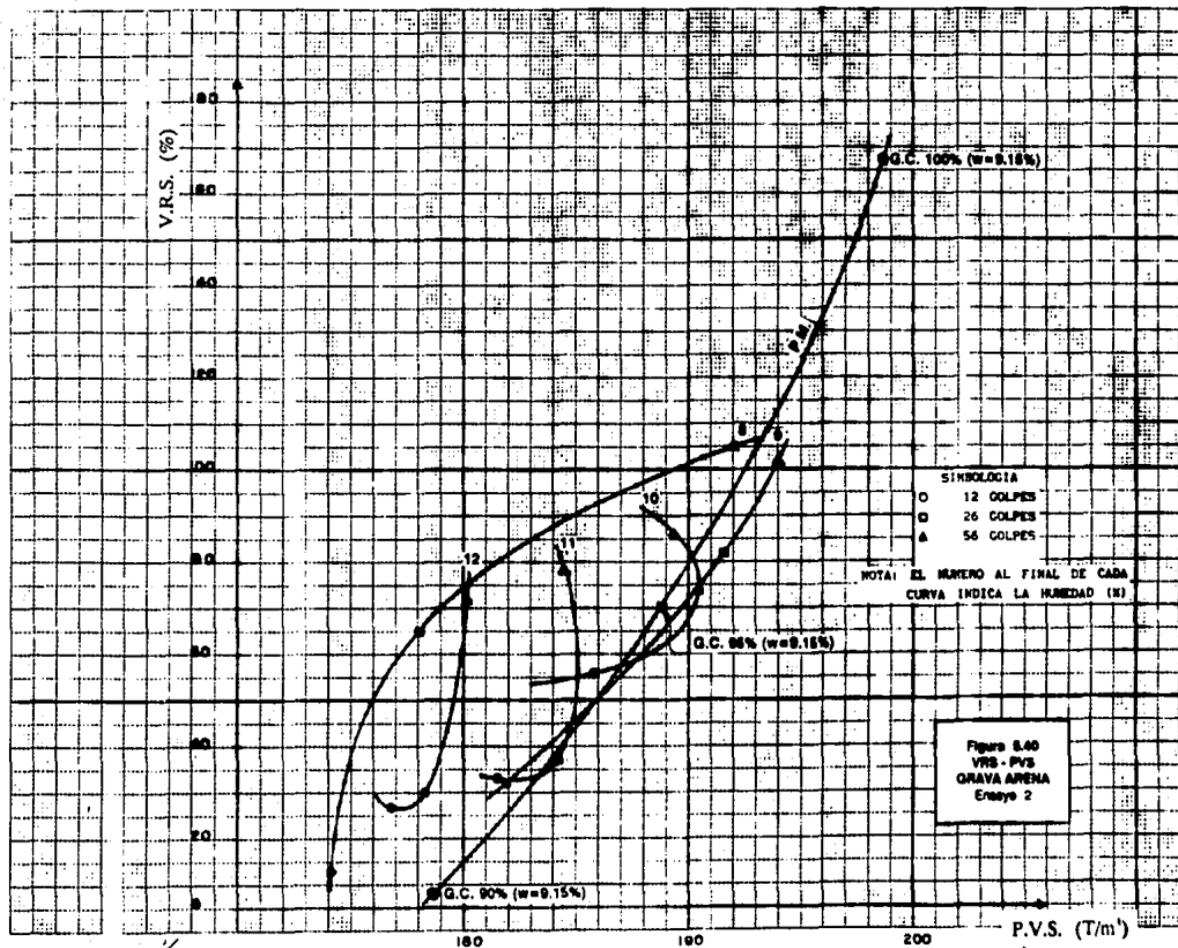
Para el 95% de grado de compactación y humedades cercanas a la humedad óptima en la prueba estática, el valor relativo de soporte es un poco menor que el obtenido de la prueba dinámica para 56 golpes y, del mismo orden aproximadamente que para 26 golpes de energía de compactación.

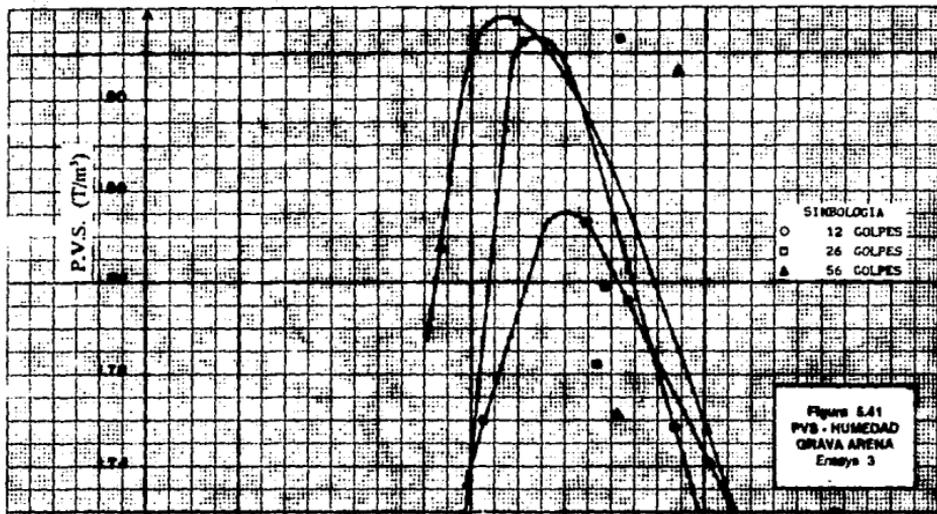
De la prueba dinámica, para 12 golpes de energía de compactación, en general se obtienen valores relativos de soporte bajos, pero mayores que los que se obtienen mediante la prueba Porter Modificada para el 90% de grado de compactación; mientras los pesos volumétricos son del mismo orden en ambas pruebas para humedades de compactación no cercanas a la humedad óptima.



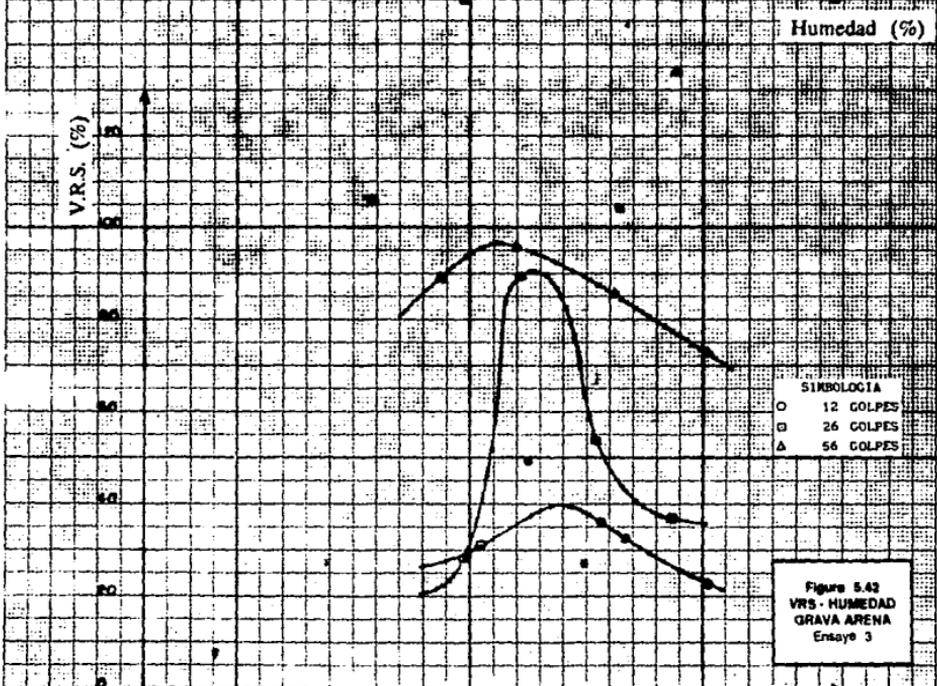






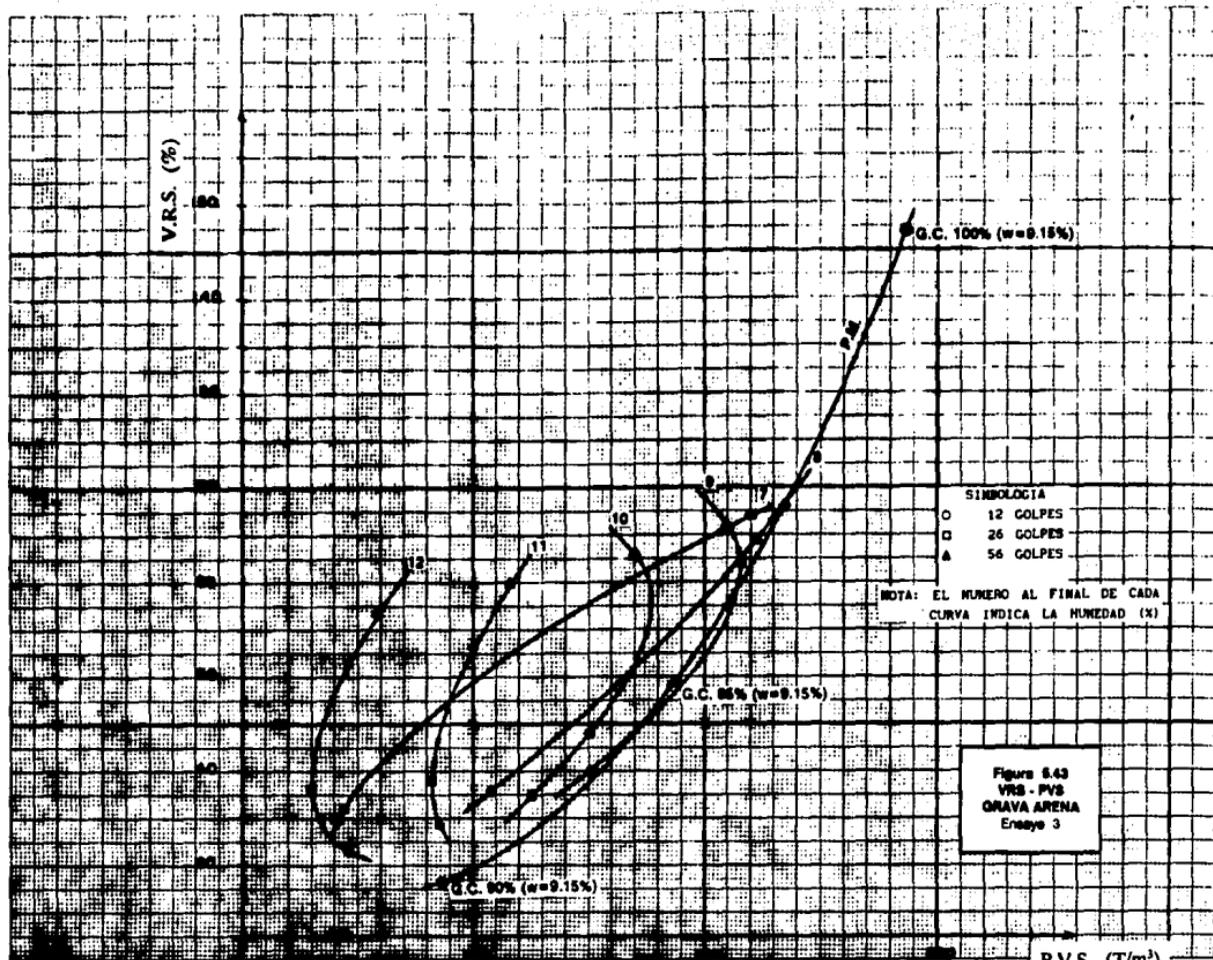


SIMBOLOGIA
 ○ 12 GOLPES
 □ 26 GOLPES
 ▲ 56 GOLPES



SIMBOLOGIA
 ○ 12 GOLPES
 □ 26 GOLPES
 ▲ 56 GOLPES

Humedad (%)



P.V.S. (T/m^2)

En todas las gráficas V.R.S. - P.V.S. de los diferentes materiales en estudio, al comparar los resultados se puede apreciar en forma general, que en la prueba Porter Modificada se obtienen mayores valores relativos de soporte (V.R.S.) que en la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, una de las razones se debe a que en este último método de compactación, para todos los casos se prueban especímenes sometidos a saturación previa en el laboratorio durante un mínimo de cuatro días, tras haber sido compactados con las humedades que se indican, colocando al suelo en condiciones muy extremas, que difícilmente se darán en la realidad; mientras que en la prueba Porter Modificada involucra el aspecto regional de una manera más eficiente, en las condiciones del grado de compactación y la humedad de prueba, tal como se resume en el cuadro 3.1 del capítulo 3, que por investigaciones hechas en la ENEP de Aragón por el ingeniero Fernando Olivera B., se obtienen resultados más cercanos a los reales, obtenidos en las pruebas de campo, del cual también se mencionan en las referencias 1 y 5.

Observamos también en estas figuras (V.R.S. - P.V.S.), que el valor relativo de soporte aumenta cuando crece el contenido de la humedad, manteniendo constante el valor del peso volumétrico seco. El valor relativo de soporte también crece si el peso volumétrico aumenta, esta tendencia tiene un límite, como se mencionó anteriormente, a partir del cual disminuye el valor relativo de soporte, aunque crezca el peso volumétrico seco, esto debido a la influencia de la humedad en los suelos con un contenido significativo de finos plásticos. Lo anterior a veces no llega a cumplirse en la grava arena (como es el caso del ensaye 1), ya que en la mayoría de los casos existe una incertidumbre al elaborar las gráficas P.V.S. - w y V.R.S. - w , de las cuales se deriva la curva en cuestión.

La principal aplicación de la figura (V.R.S. - P.V.S.) en el método dinámico, es la elección de aquellas zonas de la familia de curvas en que las características del V.R.S., P.V.S y humedad sean estables, es decir, los intervalos en que los valores relativos de soporte no sufran pérdidas notables cuando se aumenta el peso volumétrico y humedad, lo que nos conduce al V.R.S. de proyecto para las vías terrestres.

De las gráficas que obtuvimos se observan que para las características de los suelos gruesos se obtienen mayores resistencias para las diferentes condiciones de peso volumétrico y humedad de prueba; es decir, que tanto se analizan materiales con granulometría más gruesas y con menores contenidos de humedad, generalmente se obtienen resistencias más altas comparadas con las de los suelos finos, los cuales casi siempre poseen granulometrías muy pequeñas y contenidos altos de agua.

Por otro lado, al analizar por separado cada material llegamos a la misma conclusión: en general los valores relativos de soporte obtenidos mediante la prueba Porter Modificada (prueba estática) son mayores y, son aún más en la medida que el material es de mayor calidad, que a los obtenidos mediante la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (prueba dinámica). Lo anterior corrobora a los resultados de las investigaciones que se han realizado anteriormente por el Ing. Rodrigo Padrón Llaca en la extinta SAHOP, así como en el laboratorio de Suelos de la ENEP Aragón, por el Ing. Fernando Olivera B., y otros laboratorios de Estados Unidos, etc.; en donde, si se comparan los V.R.S. obtenidos por ambos métodos de compactación, a iguales pesos volumétricos y humedades se obtienen curvas semejantes a la figura 5.45, que se mencionan en las referencias 1 y 4.

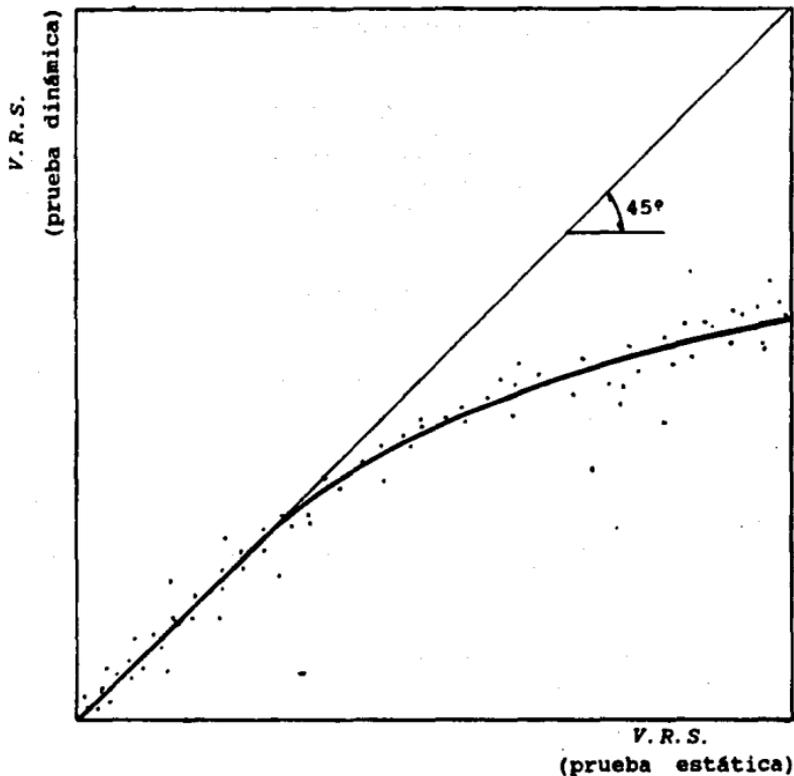


Figura 5.45

Sobre la expansión de los suelos, se presentan las gráficas Expansión vs. Humedad, ambas en porcentaje (*Exp. - v*), donde éstas nos dan una idea clara de la calidad del suelo, puesto que a mayor porcentaje de finos plásticos, mayor también será su expansión; lo cual por estudios experimentales

que se han realizado anteriormente, los suelos expansivos van asociados a bajos valores relativos de soporte, por lo tanto la utilización de éstos en porcentajes altos, son negativos para las capas subrasantes en la construcción de las terracerías de los caminos.

Cabe señalar que los resultados de la prueba Porter Modificada y Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos presentados anteriormente, estan sujetos a las limitaciones que en el capítulo 4 se mencionan. Por lo que únicamente estos resultados son válidos para esta investigación.

6.- CONCLUSIONES.

Del presente trabajo de investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones, considerando el grado de dificultad y la comparación cuantitativa de los dos métodos :

- 1.- La realización de la prueba Porter Modificada es de más fácil y de menor tiempo de ejecución, así como también es menor la necesidad del equipo, que la prueba del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (no es muy común la realización de esta prueba dinámica en México), por lo tanto son menos costosas.
- 2.- En los dos métodos de compactación, tanto para el control de calidad como para el proyecto, no consideran al tiempo como una variable importante, dentro de la estructura del suelo, por lo que los resultados obtenidos por los dos tipos de compactación deberán referirse a valores índices de laboratorio.
- 3.- Para iguales condiciones de los suelos en estudio (en cuanto al peso volumétrico y de humedad) la diferencia de los valores relativos de soporte (V.R.S.) obtenidos con ambos métodos de compactación, la Porter Modificada (prueba estática) y la del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de lo Estados Unidos (prueba dinámica) aumenta conforme aumenta la resistencia de los materiales, es decir, cuando se trata de suelos finos la diferencia que existe entre los V.R.S. son menores que cuando se comparan suelos del tipo granular, tal como se aprecia en la gráfica 5.45.

- 4.- De lo anterior, se deriva en forma clara que al utilizar la compactación dinámica es menos sensible a los cambios de calidad de los materiales, es decir, en términos generales, se obtienen valores relativos de soporte bajos cuando los materiales son de gran resistencia; en comparación con la compactación estática, que si varía las condiciones de granulometría o de plasticidad del material, varían también de manera significativa los resultados de valor relativo de soporte.
- 5.- Una de las causas más probables de la mayor diferencia que existe entre los valores relativos de soporte (V.R.S.) compactados por ambos métodos, es la dificultad que se presenta para compactar los suelos granulares en la prueba por impactos, provocando que las partículas se alisen, es decir, que pierdan fricción entre ellas, lo que conduce a que el suelo obtenga menor resistencia; además, de que la relación de vacíos es mayor en los suelos granulares con respecto a los suelos finos, lo que implica que la permeabilidad también es mayor que la del los suelos finos.
- 6.- Podemos asegurar por lo descrito en la conclusión Núm.5, que para los mismos V.R.S. (en promedio) en las pruebas estáticas la variabilidad de los resultados es menor que para las pruebas dinámicas.
- 7.- De acuerdo a las investigaciones realizadas por el Ing. Fernando Olivera B. (referencia 1), se comprueban que los valores relativos de soporte (V.R.S.) obtenidos en el campo son mayores a los que se obtienen en la prueba estática y, éstos son a su vez mayores a los obtenidos mediante la prueba dinámica.

- 8.- De ambos tipos de compactación estudiados se considera que la prueba Porter Modificada (Padrón), trata de reproducir de alguna manera la variable regional, como son la precipitación pluvial y la humedad, así como la calidad de los materiales (relativo a su expansión) la cual consiste en la elaboración de especímenes con los pesos volumétricos y humedades que requiera el proyectista, ajustados a las condiciones que prevalecerán en la región donde se construirá el camino; mientras que en el método dinámico es muy radical en cuanto a las condiciones climatológicas y de drenaje, puesto que al colocar el material compactado en el tanque de saturación, supone al suelo en condiciones críticas de saturación que en la práctica difícilmente se darán, siendo de esta manera más conservador.
- 9.- Por las diferencias que existen en los resultados de los dos métodos de compactación (V.R.S.), es imprescindible mencionar que para el diseño de una vía terrestre, es necesario utilizar nomogramas de proyecto haciendo referencia precisamente al tipo de prueba de compactación de laboratorio para el cual fue elaborado, pues estos valores cambian al variar su forma de obtención.
- 10.- Por lo expuesto anteriormente es conveniente, en la mayoría de los casos, emplear la compactación estática (para la obtención de los valores relativos de soporte, así como para la calificación de la calidad del material) teniendo como un apoyo de gran importancia la compactación dinámica. También es imprescindible mencionar que en este campo de la Mecánica de Suelos, todavía no conducen los resultados a los comportamientos reales de los suelos, por lo que falta aún una mayor investigación.

REFERENCIAS.

- 1.- Estructuración de Vías Terrestres.
Fernando Olivera Bustamante, 1986.
- 2.- Normas para Muestreo y Pruebas de Materiales, Equipos y Sistemas para Carreteras y Aeropistas.
Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1986.
- 3.- "Variación de la Resistencia de una Grava-Arena al variar el contenido de finos de diferente plasticidad"
Borja Gaspar, E.M. ENEP Aragón, UNAM, 1984.
- 4.- "Estudio de Pesos Volumétricos y Valores Relativos de Soporte obtenidos de especímenes elaborados estática y dinámicamente".
Interpretación de resultados de pruebas efectuadas en diferentes unidades de laboratorios.
Urquijo, I y Burgos, S. SAHOP, México, 1978.
- 5.- "Correlación entre Pruebas Estáticas y Dinámicas de Compactación de Suelos en el Laboratorio".
Aguirre Menchaca L. M. Tesis de Maestría, UNAM, 1964.
- 6.- Estudio de una Correlación entre Pruebas de Compactación Estáticas y Dinámicas.
J. Alberro, Junio 1966. SAHOP, México.
- 7.- "Influencia de Grumos y Granos Porosos en las Propiedades de los Suelos Cohesivos Compactados".
S. Loaiza. Feb. 1984. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 8.- "Compactación de Suelos en el Laboratorio y en la Construcción de Terraplenes".
A. Pérez Sanchez. Tesis 1967. UNAM, México.