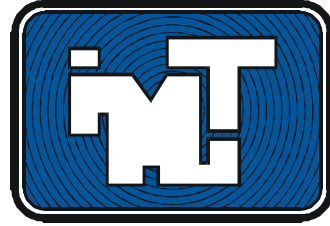


ISSN 0188-7114



CONSIDERACIONES SOBRE COMPACTACIÓN DE SUELOS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE

Alfonso Rico Rodríguez
Hermilo del Castillo Mejía

Documento Técnico No. 7
Sanfandila, Qro, 1992

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**CONSIDERACIONES SOBRE
COMPACTACIÓN DE SUELOS EN
OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE
TRANSPORTE**

Alfonso Rico Rodríguez
Hermilo del Castillo Mejía

**Documento Técnico No. 7
Sanfandila, Qro, 1992**

El presente trabajo ha sido realizado en el IMT por Alfonso Rico R., Coordinador Operativo, con la colaboración de Hermilo del Castillo M., Jefe de División del mismo Instituto.

CONTENIDO

INCISO

I. Definición.	1
II. Objetivos.	1
III. Comentario a los objetivos.	2
IV. El papel del peso volumétrico en la tecnología de la compactación.	3
V. Implicaciones de la utilización del peso volumétrico seco como característica índice de la- compactación de campo.	4
VI. Diferentes métodos para el mejoramiento del comportamiento de suelos en obras lineales en el campo.	8
VII. La compactación como técnica de trabajo de campo.	11
VIII. Factores que influyen en la compactación de los suelos.	16
La naturaleza del suelo.	16
La energía de compactación.	18
El contenido de agua con que se compacta el suelo.	20
IX. Algunas relaciones importantes entre los factores que influyen la compactación de los suelos.	26
X. Estructuración de los suelos compactados.	32
XI. Métodos de compactación en campo y laboratorio.	44
a- compactación por amasado.	49
b- Rodillos de presión.	55
Rodillos lisos.	55
Rodillos neumáticos.	56
c- Compactación por impactos.	60
d- Compactación por vibración.	63
XII. Ideas generales sobre el proceso de compactación de campo.	46

	V
XIII. Propiedades de los suelos compactados.	70
a- Arenas y suelos gruesos.	70
b- Suelos cohesivos.	72
1.- Efecto del contenido de agua.	72
2.- Efecto de la energía de compactación.	73
3.- Efecto de la fracción gruesa.	73
A -Permeabilidad.	74
B -Compresibilidad y expansión	75
C -Resistencia al esfuerzo cortante.	79
D -Tubificación.	96
E -Valor relativo del soporte.	97
F -Resumen de algunos factores de comportamiento de suelos finos - compactados.	99
 APENDICE A: Comportamiento mecánico de algunos suelos compactados por cuatro métodos incluyendo vibración (ref. 17).	 101
 APENDICE B : Efecto de la inclusión de materiales finos en el comportamiento mecánico de mate- riales triturados para base de pavimento.	 111

CONSIDERACIONES SOBRE COMPACTACION DE SUELOS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE.

I. Definición.

Para las finalidades de este trabajo la compactación es un proceso mecánico destinado a mejorar las características de comportamiento de los materiales térreos que constituyen la sección estructural de las carreteras, los ferrocarriles o las aeropistas.

II. objetivos.

Aunque en forma general quedaron señalados en el inciso anterior, es evidente que conviene detallar cuales son las características de comportamiento que pueden ser mejoradas al compactar un suelo. En el caso de las vías terrestres existen tres de ellas cuya mejoría se busca prácticamente en todos los casos. Son la deformabilidad, que implica la intención de disminuir la compresibilidad de los suelos e incrementar su estabilidad volumétrica, especialmente ante la absorción o pérdida de agua; la resistencia, especialmente al esfuerzo cortante, obviamente en el sentido de obtener los mayores valores posibles y unas adecuadas relaciones esfuerzo-deformación que garanticen un balance conveniente en el comportamiento.

Algunas otras características cuya mejoría se busca en ocasiones son la flexibilidad de la formación (es decir, la no susceptibilidad al agrietamiento) ; la permeabilidad (cuyo control es mucho más típico en la construcción de presas de tierra) , y el incremento de la resistencia de los suelos compactados a la erosión.

III. Comentario a los objetivos.

De la enumeración del inciso anterior se desprende que la compactación puede ser un proceso de objetivos múltiples; además, es evidente que esos objetivos pueden ser contradictorios entre si en muchos problemas concretos, en el sentido de que las acciones que se emprendan para cumplir uno pudieran perjudicar a algún otro. Por ejemplo, en términos generales puede ser cierto que una compactación muy intensa produce un material más resistente, pero seguramente muy susceptible al agrietamiento o poco estable al absorber agua.

Al considerar que los suelos compactados han de tener una vida larga, conservando básicamente sus características, se comprende que alguno de los objetivos anteriores podrá ser inclusive contradictorio consigo mismo. Por ejemplo, un suelo fino intensamente compactado podrá ser poco deformable, pero si absorbe agua, su deformabilidad puede hacerse extrema, de manera que el esfuerzo al compactarlo pueda resultar altamente contraproducente, dando lugar a un suelo aún más deformable que en su estado natural.

Cuando por compactar de más un suelo se le hacen adquirir características indeseables, se dice que el suelo ha sido sobrecompactado. El convertir a los suelos finos en altamente expansivos a costa del dinero y el esfuerzo que representa la compactación es uno de los pecados más frecuentes, pero no el único, de la sobrecompactación.

En suma debe concluirse que no existe una relación fija entre la compactación que se da a un suelo y los resultados obtenidos, mucho habrá de depender de las circunstancias futuras en que la obra se desenvuelva y la consideración que se haga de tales --circunstancias al planear el proceso de- compactación.

IV. El papel del peso volumétrico en la tecnología de la compactación.

El problema de la compactación de los suelos estuvo desde un principio ligado a la necesidad de controlar los trabajos de campo. En las vi as terrestres, estos trabajos suelen realizarse a contrato, por lo que la verificación de lo realizado está ligada a problemas de pago y otros de carácter legal. La verificación no sólo ha de referirse a que el contratista ejecute todas las operaciones que se le encomienden, sino también a que se alcancen en la obra los resultados técnicos exigidos por el proyecto.

Para medir la resistencia, la compresibilidad, la permeabilidad y todas las demás propiedades relevantes de los suelos se requieren pruebas especializadas, que necesitan laboratorios con un cierto nivel de equipamiento y tiempos de ejecución casi siempre demasiado largos para controlar un proceso de compactación que avance de manera normal. Por ejemplo, para controlar la compresibilidad de suelos finos podría pensarse en la utilización de pruebas cada una de las cuales exige varios días de trabajo; en otros casos, no existen pruebas estandarizadas y reconocidas, tal como podría suceder al desear controlar la resistencia a la erosión.

Esta situación, existente desde los primeros años de la década de los treinta, cuando volvieron a actualizarse las técnicas de la compactación en un sentido moderno, llevó a los pioneros de entonces (Proctor y otros, Ref, 1 y 2) a buscar alguna característica del suelo compactado que representara la compactación obtenida con suficiente confiabilidad para servir de base de pago y de elemento de control y que, a la vez, pudiera conocerse con gran prontitud. Partiendo de la idea intuitiva de que la compactación disminuye el volumen de los suelos tanto más

cuanto más se compacten juzgaron que el peso volumétrico era la característica buscada. Aquellos pioneros realizaban en laboratorio la compactación de diferentes muestras del suelo a utilizar, para elegir una que les parecía satisfactoria en cuanto a comportamiento esperado ya la que, naturalmente, correspondía un cierto peso volumétrico (pensaron en referirse al peso volumétrico seco, $\gamma_d = W_s / V_m$, pues esta cantidad sólo varía cuando varía el volumen de suelo). Juzgaron también ~-1e al pactar con el contratista el peso volumétrico al que había que llegar en la obra, bastaría medir en esta el peso volumétrico alcanzado(lo cual se logra con una prueba que requiere poco tiempo) para garantizar que se había obtenido en el campo el suelo seleccionado en los estudios de laboratorio y fundamento del proyecto.

La costumbre ha perpetuado el Uso del peso volumétrico seco como un cómodo indicador de ciertos aspectos, sobre todo de carácter legal y administrativo del trabajo del contratista.

V. Implicaciones de la utilización del peso volumétrico seco como característica índice de la compactación de campo.

La utilidad del peso volumétrico seco en lo referente a trabajos administrativos y de carácter legal no se discute, pero la utilización de tal índice de compactación tiene implicaciones técnicas que deben ser analizadas.

Si se acepta que en un estudio para proyecto se ha seleccionado un suelo compactado ya con los criterios actuales, de manera que se garanticen unas propiedades fundamentales adecuadas (presentadas como objetivos de la compactación) y se acepta también que ese suelo queda tipificado por su peso volumétrico seco, de manera que al llegar a ese valor del peso volumétrico en el campo se tiene

el suelo deseado, con las propiedades consideradas previamente, se está aceptando como válida la

Hipótesis: Los suelos compactados hasta el mismo peso volumétrico seco con diferentes métodos de compactación adquieren las mismas propiedades.

Es evidente y sobre ello se insistirá más adelante, que los procedimientos de compactación que se utilizan en el laboratorio y los que después se usan en el campo no son idénticos. También, como se irá mencionando en lo que sigue, actualmente se sabe que diferentes métodos de compactación por los que se lleve a muestras de un mismo suelo al mismo peso volumétrico seco producen suelos con diferentes propiedades mecánicas. También se verá subsecuentemente que estas diferencias son relativamente menos importantes en gravas, arenas y, en general, en suelos con partículas de forma equidimensional de estructura simple, que en suelos finos de carácter arcilloso, con partículas de forma laminar y estructuras elaboradas y basadas en nexos interparticulares de carácter electroquímico.

La técnica anterior de proyecto, basada en la elaboración y análisis de muy diversos especímenes, en la elección de alguno de ellos con propiedades satisfactorias y en la tipificación de ese suelo por su peso volumétrico seco, se realiza usualmente en la construcción de presas de tierra; allí, el peso volumétrico seco especificado para el campo es el previamente seleccionado en los estudios para proyecto y se utiliza como base de pago, pero se reconoce generalmente que al llegar a ese valor en la obra con un método de compactación distinto, probablemente cambian las propiedades fundamentales deseadas, razón por la cual es usual en la tecnología de presas llevar dos controles paralelos. Adicionalmente a la medida del peso volumétrico seco, realizada rutinariamente para controlar legal y

administrativamente al contratista, se lleva otro control con medición directa de las propiedades fundamentales, utilizando las pruebas de laboratorio disponibles, generalmente en laboratorios a pie de obra, independientemente de su duración en el tiempo. De esta manera se adquiere la posibilidad de ir realizando los ajustes necesarios en el proceso de compactación para que las propiedades obtenidas en obra vayan concordando con las consideradas en el proyecto.

Por su importancia intrínseca, la gran utilización que se hace de materiales procedentes de un número no exagerado de bancos y el monto de las inversiones involucradas, las construcciones de presas de tierra permiten sobradamente este proceder.

En el caso de la construcción de obras lineales tales como carreteras y ferrocarriles, la metodología de trabajo anterior sin duda se complica por la variabilidad de los bancos y los volúmenes no muy grandes de material que se utilizan de cada uno, las distancias cubiertas y otras situaciones de trabajo; también es justo considerar que una falla de carácter más o menos parcial en una obra de esta naturaleza no tiene la importancia que pudiera llegar a tener en una presa de tierra. Por estas razones, la rutina de construcción de carreteras en muchos lugares consiste más bien en ceñirse al uso de ciertos materiales sujetos a determinados tratamientos y todo ello dentro del marco de un conjunto de reglas que están destinadas a que los materiales, en calidad intrínseca y en características adquiridas por los tratamientos, lleguen a una condición que garantice un comportamiento razonablemente adecuado para lo que de ellos se espera en la operación de la estructura. Ese conjunto de reglas se llaman Especificaciones de Construcción y una de ellas se refiere a requerimientos de compactación, siempre referidos al peso volumétrico seco que debe ser obtenido en la obra (generalmente expresado a través del concepto grado

de compactación) .Así, es frecuente ver dentro de esas especificaciones que se diga, por ejemplo: "las subrasantes deberán compactarse hasta determinado grado de compactación", con base en una prueba estándar también especificada.

En rigor y si se considera sólo el requisito de compactación, lo anterior equivale a aceptar que cualquier suelo que se encuentre en la naturaleza, compactado hasta el límite especificado adquiere las mismas propiedades, vale decir aquellas que se considere debe cumplir una subrasante, por seguir con el ejemplo anterior. Es evidente que esta segunda hipótesis resulta de una generalidad inaceptable. La defensa del método está en la consideración de que el material no se sujeta a reglas únicamente en lo referente a compactación, sino en otros aspectos tales como plasticidad y granulometría principalmente.

Al considerar esta metodología de trabajo destaca la enorme y particular importancia que tienen en las obras lineales esas especificaciones de construcción, pues su aplicación suele dispensar la mayor parte de las veces de otros estudios y análisis.

No sobra decir que el criterio de los ingenieros proyectistas y de campo deberá ser capaz de distinguir aquellos casos en que la aplicación de unas especificaciones de construcción aún muy adecuadas, no baste para garantizar la calidad de la obra. También, en materia de obras relacionadas con el transporte, debe señalarse que la construcción de aeropistas parece propicia para la utilización de la metodología del trabajo utilizada en presas, sin mayores impedimentos de carácter práctico.

VI. Diferentes métodos para mejoramiento del comportamiento de suelos en obras lineales en el campo.

En rigor, la compactación es uno de los varios métodos de los que hoy se dispone para mejorar la condición de un suelo que haya de Usarse en una obra de construcción pesada; es, además, sin duda uno de los más eficientes y de aplicación más universal; pero no es el único en que pueda pensarse.

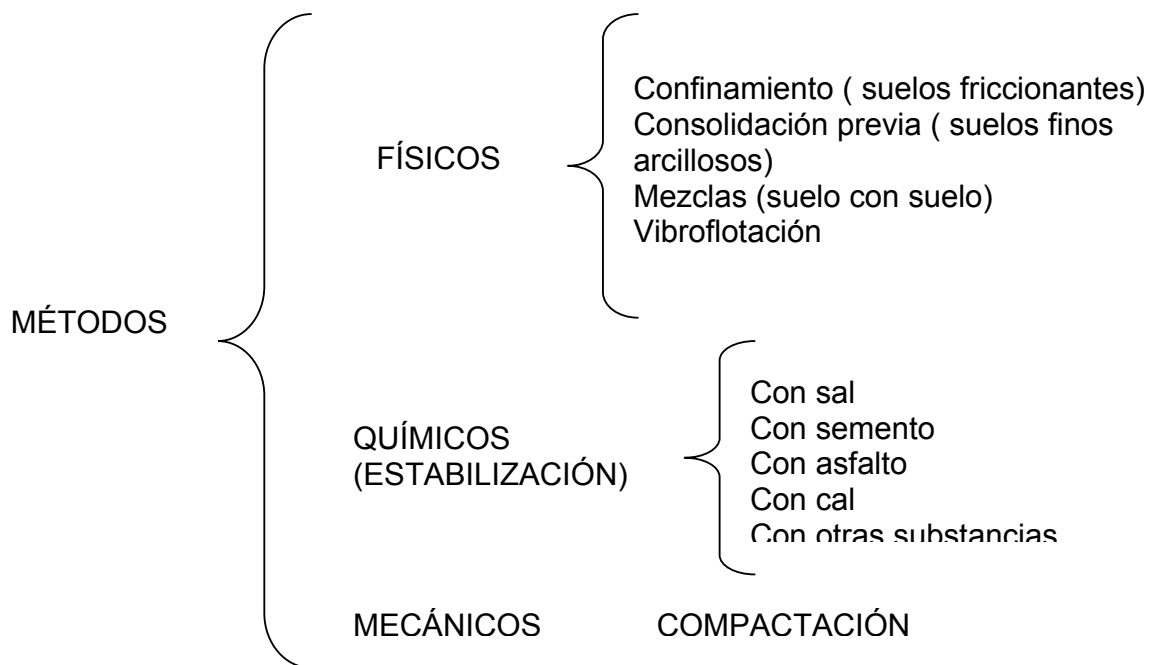
La Tabla I presenta un panorama más general sobre otras técnicas de utilización posible.

En el último renglón, de compactación por medios mecánicos, deben considerarse incluidas las técnicas de compactación a base de grandes impactos producidos por masas muy considerables dejadas caer desde alturas muy grandes, utilizadas con frecuencia para mejorar la condición de suelos naturales que servirán como terrenos de cimentación a diferentes obras de ingeniería; estas técnicas han sido poco utilizadas hasta hoy en obras lineales, pero, por supuesto, están disponibles cuando su uso sea conveniente.

La historia del desarrollo de la tecnología de compactación en muchos países merece un comentario especial. En un principio, situado aproximadamente hasta los últimos años de la década de los cuarentas en el caso específico de obras lineales, los ingenieros manifestaron una frecuente predisposición en contra de su utilización. La razón era la casi siempre invocada en contra de cualquier innovación tecnológica obediente a los incrementos del tránsito tanto en peso como en número, trátase de camiones, trenes o aviones comerciales. Se decía que la compactación vendría únicamente a incrementar los costos de construcción, sin ningún beneficio compensatorio; en el caso de las carreteras y más aún en el de los ferrocarriles, se invocaba que el propio

TABLA 1

MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS



tránsito de los equipos rodantes produciría el mismo efecto, con gasto nulo.

Puede verse hoy que las técnicas de compactación lograron ganar en un lapso relativamente breve la confianza de los ingenieros proyectistas y constructores de obras para el transporte, a un grado tal, que hoy su uso puede considerarse prácticamente universal en esos trabajos. De hecho, los criterios evolucionaron definitivamente en sentido opuesto al inicial y en la actualidad la idea es que la compactación es aceptada indiscriminadamente, considerándose que cuanto más se compacte los suelos, mejores resultados han de obtenerse. Este criterio indiscriminadamente aplicado puede conducir fácilmente a todos los riesgos de sobrecompactación de suelos finos con contenido arcilloso apreciable, muy especialmente si se tiene en cuenta que en México y en muchas otras partes, las especificaciones de construcción permiten la utilización de capas con índices de plasticidad excesivamente elevadas, sobre todo en terracerías y subrasantes y con contenidos de materiales finos demasiado altos en subbases y bases y que, adicionalmente, es muy frecuente también en muchas partes una utilización excesivamente restringida de técnicas de sub drenaje que pongan esos suelos peligrosos a cubierto de la acción perjudicial del agua; todo ello combinado con un tránsito q11e crece constantemente en número y peso vehicular.

Otro caso en que las ideas anteriores conducen a una sobrecompactación perjudicial se tiene cuando se utilizan materiales ligeros, tales como los tezontles, suelos pumíticos y otros materiales de origen volcánico, que deben su deseada ligereza a porosidad en sus partículas, la cual se destruye con un efecto de compactación excesiva; en tales casos, el tezontle, por ejemplo, puede pasar de pesos volumétricos de alrededor de 1 Ton / m³ a valores del orden del peso volumétrico del basalto es decir -de más del doble de

esa cantidad, perdiéndose evidentemente las características de ligereza que indujeron a su uso.

Los diferentes métodos de mejoramiento mencionados en la Tabla 1 deben ser objeto de consideración por parte de los proyectistas y constructores; en especial el de mezclas de suelos diversos puede ofrecer en las obras lineales excelentes oportunidades (Ref. 3).

VII. La compactación como técnica de trabajo de campo.

Es evidente que la compactación de suelos es ante todo y sobre todo una técnica de trabajo de campo y que si sus particularidades se estudian también en los laboratorios o son objeto de trabajos de investigación teórica, ello no puede tener otra finalidad que el apoyo de las propias obras en donde se aplique.

En principio, el proceso de compactación en el campo debe conducirse para responder a la pregunta fundamental de ¿que equipo habrá de emplearse y que operaciones habrán de realizarse para obtener en un suelo dado un cierto conjunto de propiedades mecánicas consonantes con las consideradas en el proyecto?

Sin embargo, en muchas ocasiones la pregunta anterior adquiere una modalidad diferente, dado que no es difícil que se presenten casos en que para realizar los trabajos de compactación se disponga de un cierto equipo y que resulte difícil o imposible en la práctica obtener algún otro que pudiera considerarse preferible para un caso dado. En esos casos la pregunta fundamental que se plantea al planear un tren de compactación sería ¿que resultados se pueden obtener con el equipo disponible y como manejar ese equipo y el proceso en general, a fin de obtener mejores resultados que sea posible? Obviamente en una situación como la que se

plantea el propio proyecto deberá de ser retroalimentado por información realista, para tomar en consideración los resultados a que pueda llegarse en el campo.

Como es sabido existen diversos modos de compactar materiales en el campo. Los utilizados al presente se suelen clasificar en las siguientes categorías:

-Por amasado

-Por presión

-Por impacto

-Por vibración

-Por métodos mixtos

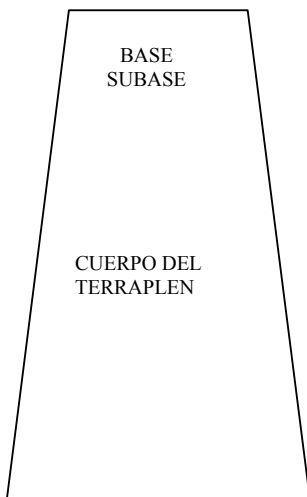
Dentro de las anteriores categorías caben todas las soluciones comerciales e industriales *que* hasta el momento se han desarrollado para resolver el problema.

Los tres primeros tipos de compactadores se presentan bajo la forma de rodillos que circulan sobre el terreno que se desea compactar. Los dos últimos en ocasiones aparecen también con técnicas de rolado; pero en otras desarrollan mecanismos diferentes.

Las Tablas II y III (Ref. 4) presentan algunas indicaciones en relación a la elección de equipos de compactación en los diferentes casos de la práctica. Se trata, naturalmente, de Indicaciones de carácter general, que no pueden excusar la consideración de las características especiales de cada obra en el diseño del proceso de compactación que a ella corresponda, para llegar a los resultados mejores que sea posible.

TABLA II

UNA INDICACIÓN SOBRE ELECCIÓN DE EQUIPOS DE COMPACTACIÓN



SÍMBOLO SUCS	MATERIAL	TRAMPER AUTOPROPULSADO		TRAMPER REMOLCADO		PATA DE CABRA AUTOPROPULSADO		PATA DE CABRA REMOLCADO		LISO VIBRATORIO PEQUEÑO		LISO VIBRATORIO PESADO		PATA DE CABRA VIBRATORIO, PEQUEÑO		PATA DE CABRA VIBRATORIO, PESADO		NEUMÁTICO LIGARO		NEUMÁTICO PESADO	
	GRANULAR LIMPIO									1	1							3			2
	GRANULAR CON POCOS FINOS	1	1							1	1	2	2								2
	ROCA	2	2								1			2							
GW,GP,S W	ARENA, GRAVA									1	1	2	2								2
SP	ARENA UNIFORMA									1	1	2	2								3
SM, GM	ARENAS O GRAVAS LIMOSAS	1	1	4	4					3	3	2	2								2
ML, MH	LIMOS	1	1	2	2									3	3						2
GC, SC	ARENAS O GRAVAS ARCILLOSAS	1	1	2	2									3	3						2
CH, CL	ARCILLAS	1	1	2	2													3			3

TABLA III

CARACTERÍSTICAS DE UTILIZACIÓN DE LOS SUELOS, AGRUPADOS SEGÚN SUCS.

Símbolo	Características De compactabilidad	Peso vo Lumetrico seco máx. típico (proctor estandar ton/m3.	Compresi-Bilidad y Expansión	Permeabi-Dad y características de drenaje	Características como material de terraplén	Características como subrasante	Características como base	Características como Pavimento provisional	
								C/revestimient o ligero	C/tratamiento asfáltico
GW	Buenas. Rodillos lisos vibratorios. Rodillo neumático. Respuesta perceptible al bandeo con tractor.	1.9 a 2.1	Práctica-Mente nula	Permeable Muy buenas	Muy estable	Excelente	Muy buena	Regular a mala	Excelente
GP	Buenas. Rodillos lisos vibratorios. Rodillo neumático perceptible al bandeo con tractor	1.8 a 2.0	Práctica-Mente nula	Permeable Muy buenas	Estable	Buena a excelente	Regular	Pobre	Regular
GM	Buenas. Rodillos neumáticos o pata de cabra ligeros	1.9 a 2.2	Ligera	Semipermeable Drenaje pobre	Estable	Buena a excelente	Regular a mala	Pobre	Regular a pobre
GC	Buenas o regulares rodillos neumáticos o pata de cabra	1.8 a 2.1	Ligera	Impermeable Mal drenaje	Estable	Buena	Regular a buena	Excelente	Excelente
SW	Buenas rodillos neumáticos o vibratorios	1.7 a 2.0	Práctica-Mente nula	Permeable Buen drenaje	Muy estable	Buena	Regular a mala	Regular a mala	Buena
SP	Buenas rodillos neumáticos o vibratorios	1.6 a 1.9	Práctica-Mente nula	Impermeable buen drenaje	Razonablemente Estable en estado compacto	Regular a buena	Mala	Mala	Regular a mala
SM	Buenas rodillos neumáticos o pata de cabra	1.7 a 2.0	Ligera	Impermeable Mal drenaje	Razonablemente En estado compacto	Regular a buena	Mala	Mala	Regular a mala
SC	Buenas o regulares rodillos neumáticos o pata de cabra	1.6 a 2.0	Ligera a media	Impermeable Mal drenaje	Razonablemente estable	Regular a buena	Regular a mala	Excelente	Excelente

TABLA III (Continuación)

Símbolo	Características De compactabilidad	Peso vo Lumetrico seco máx. típico (proctor estandar ton/m3.	Compresi-Bilidad y Expansión	Permeabili-Dad y características de drenaje	Características como material de terraplén	Características como subrasante	Características como base	Características como Pavimento provisional	
								C/revestimient o ligero	C/tratamiento asfáltico
ML	Buenas a malas. Rodillos neumáticos o pata de cabra	1.5 a 1.9	Ligera a media	impermeable mal drenaje	Mala estabilidad Si no esta muy compacto	Regular a mala	No debe usarse	Mala	Mala
CL	Regulares a buenas. Rodillos pata de cabra o neumáticos	1.5 a 1.9	Media	impermeable no drena	Buena	Regular a mala	No debe usarse	Mala	Mala
OL	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra o neumáticos	1.3 a 1.6	Media a alta	impermeable mal drenaje	Inestable debe Evitarse su uso	Mala	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse
MH	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra o neumáticos	1.1 a 1.6	Alta	Impermeable Mal drenaje	Inestable debe de Evitarse su uso	Mala	No debe usarse	Muy mala	Muy mala
CH	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra	1.3 a 1.7	Muy alta	impermeable no drena	Regular Vigílese la expansión	Mala o muy mala	No debe usarse	Muy mala	No debe usarse
OH	Regulares a malas. Rodillos pata de cabra	1.0 a 1.6	Alta	Impermeable No drena	Inestable Debe evitarse Su uso	Muy mala	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse
Pt	No debe usarse		Mal alta	Regular o mal drenaje	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse	No debe usarse

La ulterior discusión de las características importantes de los procesos de compactación en el campo requieren algunas consideraciones conceptuales previas, que se hacen a continuación.

VIII. Factores que influyen en la compactación de los suelos.

La compactación depende de una serie de características y condicionantes propias del método de compactación que se utilice, de las condiciones en que se ponga el suelo antes de compactarlo y otras que se mencionan en este inciso. En rigor esas características siguen siendo válidas para los procesos de compactación en el laboratorio.

-La naturaleza del suelo es obviamente altamente influyente en el proceso. En este caso, al igual que en toda la tecnología de materiales térreos, prevalece la esencial diferencia entre los suelos de estructura simple y forma equidimensional, comunmente denominados en los libros gravas, arenas y limos no plásticos y los suelos de formas generalmente laminares y cuya estructuración obedece a efectos electroquímicos, llamados usualmente limos plásticos o arcillas.

Todo proceso de compactación implica una doble acción sobre la estructura de los suelos. En primer lugar será preciso romper y modificar la estructura original que el suelo tenía en el lugar de donde fue recogido; en segundo lugar, habrá que actuar sobre él, modificando la disposición o acomodo de sus grumos o partículas, para hacer que el conjunto adopte una nueva estructura, más densa. Es dudoso pensar que los efectos de compactación alcancen en suelos finos a disgregar los grumos en sus partículas individuales y es posible que

sea más conveniente hablar de estructura de grumos, antes que de estructura de partículas.

En el caso de los suelos arenosos, tal como se denominará en este trabajo en lo sucesivo a los del primer grupo arriba mencionado, la actuación sobre una estructura simple original (análoga a la de un montón de canicas o a la de un común montón de grava) no puede producir más que otra estructura simple, más densa. Como se sabe esta estructura es básicamente estable ante la absorción o pérdida de agua, presenta la compresibilidad típica de estos suelos (debida a simple acomodo por pequeños colapsos ya ruptura de partículas o flujo plástico del material, en casos extremos de altos niveles de esfuerzo) y presenta una resistencia fundamentalmente dependiente de la compacidad alcanzada (aunque, como se sabe, es también influenciada en forma apreciable por la angulosidad de los granos) , la que para todos los efectos prácticos se mantiene en tanto no se modifique esa compacidad. De esta manera la compactación creciente de estos suelos suele conducir a formaciones cada vez menos compresibles y más resistentes; el carácter disgregado de la estructura no hace a estos suelos proclives al agrietamiento. si fuera posible en temas de compactación hacer una afirmación de carácter tan general, casi podría decirse que en estos suelos cuanto mayor sea la compactación se obtienen mejores comportamientos. Pero aún en ellos se encuentran inmediatamente acotaciones a tanta generalidad; una, podría ser la ya mencionada sobrecompactación de materiales ligeros, que los transforma en pesados si se rompen las partículas; otra, aunque menos frecuente podría ocurrir al emplear presiones tan altas que se llegara a producir flujo plástico en las aristas de los granos o ruptura de partículas "duras" y podría haber otros casos.

En los suelos arcillosos, la ruptura de las estructuras iniciales, generalmente muy complicadas especialmente si el banco de suelo original contiene suelos transportados, seguida del posterior reacondicionamiento que da la compactación para lograr una estructura nueva más densa, produce de nuevo estructuras muy elaboradas, compresibles, tanto más inestables al absorber agua cuanto más densificadas y más rígidas a compactación creciente; la resistencia de estos suelos tiende a aumentar con la compactación (si bien esta no es regla sin importantes excepciones), pero esa resistencia podrá perderse en gran medida si el suelo, a expensas del potencial de succión adquirido al ser compactado, toma agua y se expande.

En este tipo de suelos actúan con toda su fuerza las ideas expresadas más atrás, de las contradicciones entre los diferentes objetivos de la compactación.

La energía de compactación es otra de las variables del proceso que ejercen una gran influencia sobre el mismo; sin embargo, no es fácil en general, conocer el valor exacto que se está empleando en un momento dado; por el contrario, es fácil tanto en el campo como en el laboratorio, modificarla de modo graduable, dados los procedimientos actualmente en uso en ambas técnicas.

La energía puede cuantificarse en términos absolutos, aunque en forma aproximada por razones prácticas, en 108 procesos de compactación en el laboratorio que impliquen el uso de pruebas de impactos causados por la caída de un pisón. La fórmula que proporciona el valor de la energía específica en ese caso es:

$$E_e = \frac{N n W h}{V} \quad \left(\frac{\text{Kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3} \right) \quad (1)$$

Donde:

E_e , es la energía específica, medida en unidades apropiadas en relación con una unidad de volumen del terreno al que se está entregando esa energía.

N , es el número de golpes del pisón compactador que se dá a cada una de las capas en que se acomoda al suelo en el molde de compactación que se utiliza en el laboratorio.

n , es el número de capas que se dispone para llenar el molde.

W , es el peso del pisón compactador.

h , es la altura de caída del pisón al aplicar los impactos al suelo.

V , es el volumen total del suelo compactado, generalmente igual al del molde empleado para compactar.

La justificación de la fórmula (1) se considera evidente.

Con los procedimientos usuales de rolado en el campo, la energía no puede cuantificarse, pero si modificarse, modificando el peso y/o la presión de los equipos, el número de sus pasadas y el espesor de la capa que se compacta, fundamentalmente. En el caso de utilizar métodos vibratorios, también se puede influir sobre la energía entregada, según se comentará más adelante.

Cuando en el campo un equipo de compactación aplica energías de compactación que se consideren bajas, pueden implementarse algunas acciones para modificar esta situación; entre ellas están el recurrir a sobrepesos adicionales para aumentar el peso total del equipo; el aumentar la presión de inflado en

caso del uso de rodillos de llantas; el reducir el espesor de la capa suelta por compactar; el aumentar el número de pasadas; el modificar el contenido de agua del suelo por compactar (casi siempre para aumentarlo) o el hacer modificaciones en la velocidad de arrastre de los equipos o en frecuencias, amplitudes u otros factores, en caso de usar vibración.

Es claro que cada uno de estos cambios puede tener implicaciones indeseables, por lo que no es aplicable realizarlos sin un balance general del problema. Algunas de las implicaciones más frecuentes se comentarán en lo que sigue.

-El contenido de agua con que se compacta el suelo tiene una influencia determinante, tanto en los procesos de compactación de campo como en el laboratorio. Esta influencia fué ya reconocida por Proctor, Porter y otros pioneros (Refs. 1 y 2) quienes la establecieron en los términos prácticamente actuales, midiendo la compactación por el peso volumétrico seco alcanzado en cada caso. La Fig. 1 muestra la bien conocida relación que se establece entre el peso volumétrico seco del suelo compactado y el contenido de agua del mismo, cuando se emplea una cierta energía de compactación.

La curva de compactación presenta formas relativamente similares para los diversos modos de compactar. Existen diversas explicaciones de dicha forma, de diferentes grados e complejidad. Una, es la que sigue:

Cuando el contenido de agua es muy bajo, este elemento se encuentra en el suelo en forma capilar, produciendo impresiones interparticulares tanto más fuertes cuanto -más finos sean los suelos, lo que conduce a grumos muy difícilmente desintegrables o a dificultad de reacomodar.

partículas individuales; como consecuencia la compactación se dificulta y se alcanzan pesos volumétricos relativamente bajos. Estos efectos capilares se van disipando si la misma energía de compactación se da a suelos con contenidos de agua crecientes, lo que permite alcanzar pesos volumétricos cada vez mayores. Empero, si el contenido de agua alcanza valores que produzcan cantidades de agua libre que empiecen a ocupar en forma substancial los vacíos del suelo, la compactación comenzará a dificultarse, pues el agua no puede desplazarse instantáneamente dentro del suelo y por ello comenzará a absorber parte de la energía aplicada, devolviéndola, a expensas de su elasticidad en forma de simple rebote; este efecto será tanto más notable a medida que el contenido de agua crece.

La Fig. 1 explica la adopción de los familiares conceptos de peso volumétrico seco máximo alcanzado por el proceso y la humedad óptima, que produce dicho máximo. Los conceptos involucrados en la exposición anterior pueden consultarse para mejor comprensión en la Ref.5.

La primera parte de la explicación anterior fué ya sugerida por Proctor (Refs. 1 y 2), pero este autor atribuyó la disminución del peso volumétrico alcanzado en la rama húmeda a humedades crecientes, a un efecto de lubricación entre los cristales que constituyen las partículas de los suelos, una idea actualmente abandonada al haberse demostrado sobradamente que el agua funciona como antilubricante entre dichos cristales.

En un reciente trabajo realizado para el Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Manuel J. Merlidoza (Ref. 6) se proporcionan y analizan otras explicaciones más recientes de la forma peculiar de las curvas de compactación.

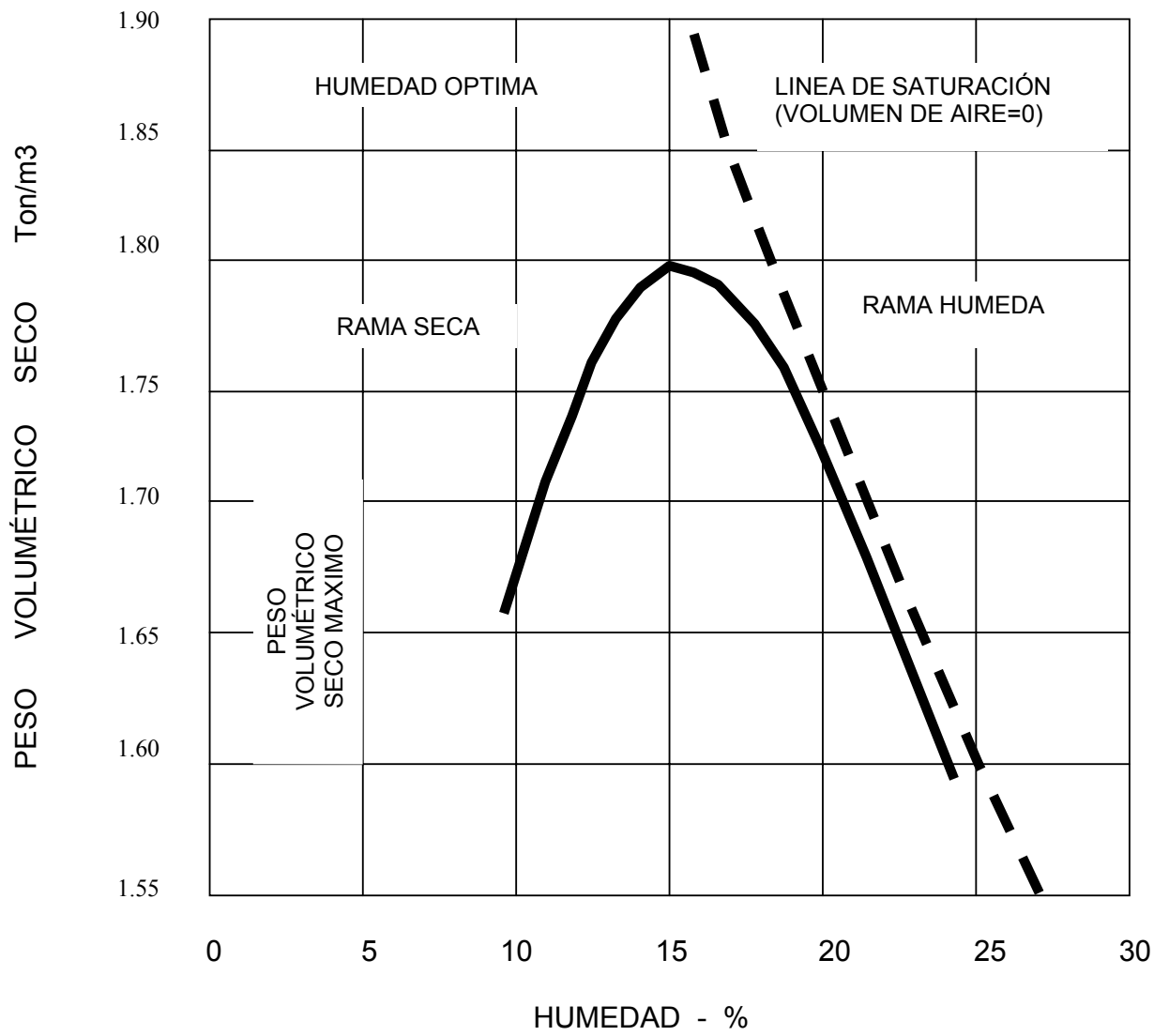


Figura 1. Curva de compactación típica

La discusión anterior aclara el hecho práctico bien conocido desde siempre, según el cual el suelo compactado en el campo y en el laboratorio debe tener un contenido de agua por abajo del correspondiente a la saturación, pues en esta condición los suelos son prácticamente imposibles de compactar y, de hecho, los suelos finos se transforman en lodos. A despecho de lo anterior, debe señalarse que se han logrado compactaciones adecuadas en suelos prácticamente saturados y aún con muy altos contenidos de arcilla, cuando se utilizan los procedimientos ya mencionados de compactación dinámica con grandes pesos cayendo desde alturas considerables.

La forma y su disposición en relación a las escalas horizontal y vertical de la curva de compactación mostrada en la Fig. 1 varía no sólo para cada tipo de suelo, sino también con el método de compactación empleado y con la energía con que se utilice dicho método. De esta manera, los conceptos de humedad óptima y del peso volumétrico seco máximo a ella asociado no son constantes del suelo, sino valores circunstanciales que cambian según el proceder del ingeniero. Lo anterior implica una consideración fundamental, que es que la humedad óptima con la que se alcance un determinado peso volumétrico deseado en una investigación de laboratorio conducida para realizar el proyecto de alguna obra, no va a ser la misma cuando en el campo se compacte el suelo para alcanzar el peso volumétrico señalado por el propio proyecto y contratado con una empresa constructora, debido a que entre el laboratorio y el campo cambia siempre el método de compactación. Esta fundamental diferencia obliga a que en todo proceso de campo se haga una consideración especial respecto al contenido de agua con que deba compactarse el suelo. De hecho, debe aceptarse como una realidad insoslayable que no basta tipificar un proceso de campo por el peso volumétrico que deba alcanzarse, sino que es necesario establecer también el contenido de agua con que el

proceso haya de realizarse. El no hacerlo así, como es desdichada y frecuente costumbre conduce a muchos problemas de campo, en los que es frecuente tratar de llegar a un peso volumétrico señalado por el proyecto con un contenido de agua que no es apropiado con la energía que se esté empleando; estas situaciones conducen a enojosas y estériles discusiones entre la parte contratante y el contratista, a muchas pérdidas de tiempo y de dinero ya que en aras del cumplimiento de programas se acepten compactaciones inadecuadas o a que se obligue a reposición de obra a contratistas que hayan afrontado el proyecto y traten de llevarlo a la obra con buena fé.

La Fig. 2 ilustra gráficamente las afirmaciones contenidas en estos últimos párrafos. El mismo suelo se ha compactado en el campo con seis, doce y veinticuatro pasadas de un mismo rodillo pata de cabra (curvas A, B, C) y en el laboratorio con tres pruebas dinámicas (de impactos) de diferentes energías (1, 2 y 3) .Salta a la vista los muy diferentes valores que para ese mismo suelo se obtienen al variar métodos y/o energías.

Al hablar del contenido de agua que debe usarse en la compactación de campo destacan dos puntos importantes; el primero, ya mencionado, es que el valor óptimo o más conveniente para hacer lo más eficiente posible la energía empleada, no tiene por que coincidir con ningún valor óptimo medido en el laboratorio; adicionalmente, en segundo lugar, al seleccionar el contenido de humedad óptimo en el campo debe tenerse en cuenta que es muy diferente frecuentemente aumentar un contenido de agua natural, añadiendo agua al suelo extraído de un banco, que reducirlo, oreando a ese material; la diferencia estriba en la influencia que en cada caso particular el clima tenga en lo referente al régimen- de lluvias. Bajo un régimen lluvioso, secar un material puede ser imposible y en una zona desértica, impregnar un material

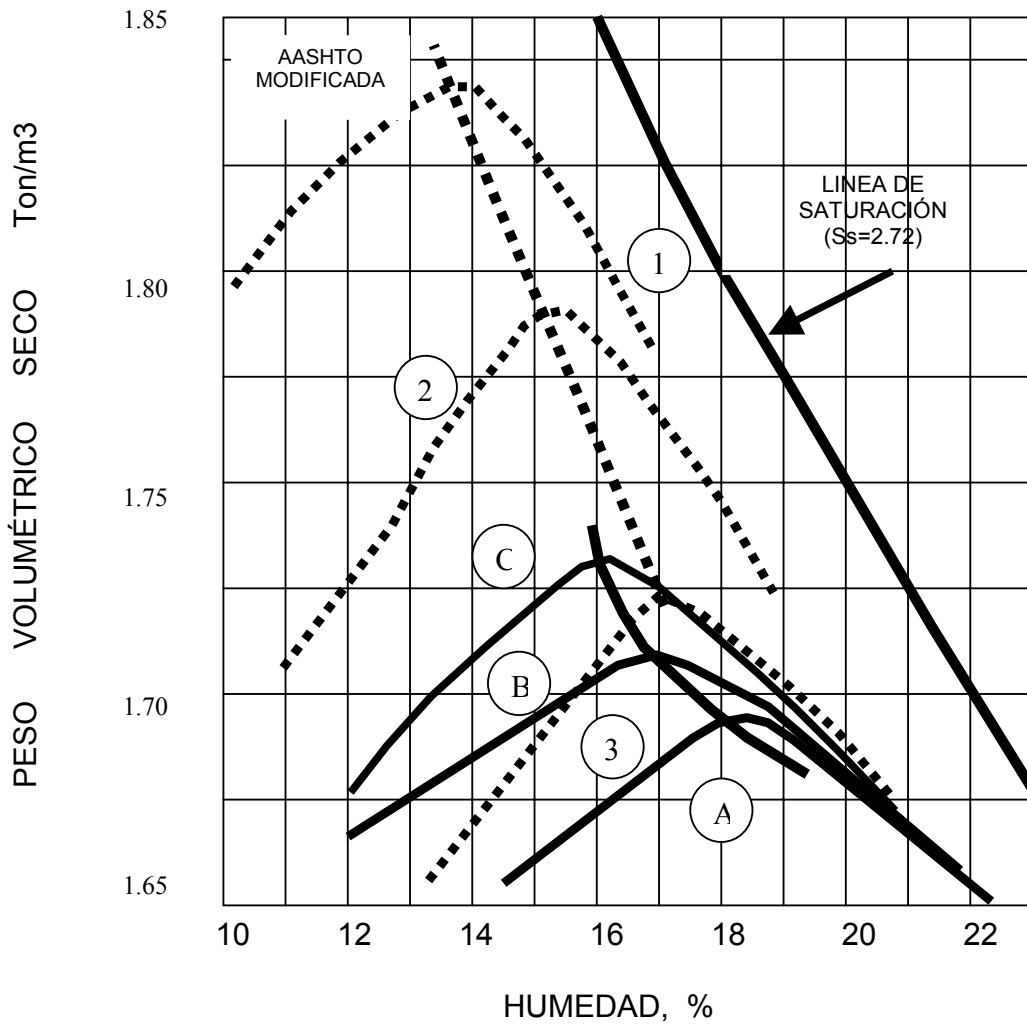


Figura 2. Comparación entre los resultados de un proceso de compactación de campo con rodillo " pata de cabra " y pruebas dinámicas.

con agua adicional puede ser muy costoso por razón de acarreos de agua.

No es fácil en obras lineales llegar a los contenidos de agua óptimos de campo por simple observación o experiencia; lo más recomendable es iniciar el tren de compactación con atenta observación experimental y constantes mediciones del peso volumétrico alcanzado, hasta llegar a un contenido de agua que proporcione el peso volumétrico seco contratado, con una utilización razonable del equipo disponible y con un espesor de capa y número de pasadas también adecuados. Relaciones posteriormente analizadas entre las variables que afectan el proceso de compactación orientarán estas tareas, abriendo la posibilidad de sacar los mejores resultados posibles de las condiciones reales de un proceso, cuyo equipo a emplear muchas veces está condicionado por la disponibilidad que en la obra tenga el contratista.

Existen otros factores que influyen en la compactación de los suelos si bien su efecto práctico es menos importante. En la Ref. 4 se mencionan algunos.

IX. Algunas relaciones importantes entre los factores que influyen la compactación de los suelos.

Entre los factores analizados en el inciso VIII existen algunas relaciones de carácter general que conviene destacar desde este momento; otras de carácter más circunstancial se desprenderán de la lectura de otras partes de este escrito.

El comportamiento mecánico de los suelos arcillosos compactados, se dice en la Ref. 6, está condicionado por tres variables principales; estas son el peso volumétrico seco, (más a tono con lo acostumbrado en la Mecánica de Suelos se representarla mejor por la relación de vacíos del suelo); el grado de saturación y la estructura del suelo compactado.

Estas variables juegan su papel dentro de los diferentes métodos de compactación y de alguna manera condicionan las propiedades mecánicas de los suelos compactados en lo referente a resistencia, compresibilidad y comportamiento esfuerzo deformación, por mencionar las propiedades de mayor interés en obras lineales. Según podrá discutirse más adelante las relaciones entre esos factores y las importantes propiedades mencionadas, distan con frecuencia de ser rígidamente fijas.

-La Fig. 3 se refiere a una relación de gran generalidad en los procesos de compactación tanto en el campo como en el laboratorio entre la energía de compactación, el peso volumétrico seco alcanzado y el contenido de agua dado al suelo para alcanzarlo, manteniendo fijo el método de compactación.

Puede verse que para un mismo método de compactación y, obviamente un mismo suelo, a mayor energía de compactación empleada corresponden humedades óptimas menores y pesos volumétricos secos mayores. Este resultado consistente reviste gran importancia práctica en la solución de muchos problemas de campo. Por ejemplo, puede llegarse en el campo a pesos volumétricos iguales, con equipos cada vez más ligeros aumentando el contenido de agua de compactación. Otro caso particular de interés podría tenerse en regiones en que escasée el agua que haya de incorporarse al suelo, teniendo entonces en cuenta que el equipo disponible, trabajando con contenidos de agua substancialmente abajo del óptimo puede alcanzar (siempre dentro de ciertos límites) un peso volumétrico previamente pactado, sin más que hacer crecer la energía de compactación, por ejemplo, lastrándolo, aumentando el número de pasadas o disminuyendo el espesor suelto -de la capa compactada. Podrían plantearse otros ejemplos, pues es indudable que el juego de energía de compactación y contenido de agua se presta para ello.

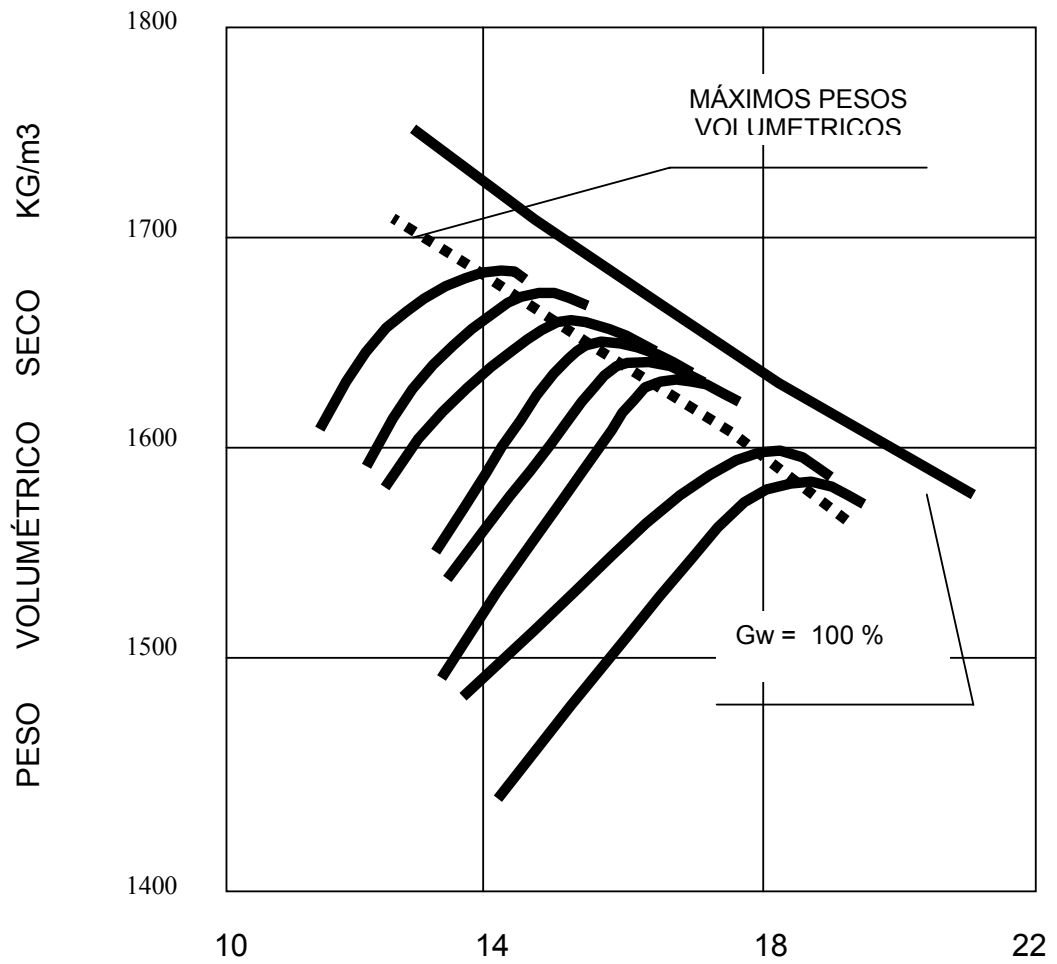


Figura 3. Diagrama cualitativo de γ_d vs. W para diversas energías de compactación

La Fig. 4 muestra otra relación consistente entre la energía de compactación entregada al suelo durante el proceso y el peso volumétrico obtenido, obviamente para un mismo método de compactación y compactando a los suelos en las mismas condiciones de contenido de agua y demás. En el caso particular de la figura se ve que en los 4 suelos señalados se manifiesta la tendencia general de que el aumento de la energía es muy eficiente en un principio, después lo es menos y, a partir de un cierto límite propio de cada caso, pierde con rapidez eficiencia y, finalmente, aumentos posteriores son irrelevantes.

Las dos relaciones anteriores pueden combinarse en la solución de muchos problemas prácticos de innumerables maneras. Un ejemplo de ello puede obtenerse en el análisis de la Fig. 5, en ella se presentan resultados de un suelo compactado con rodillo neumático y con tres contenidos de agua diferentes, empleando en combinación con cada uno de ellos tres diferentes niveles de energía.

Imagínese que se ha contratado un peso volumétrico seco de 1,760 Kg/m³. si se compacta al suelo con 13 % de contenido de agua se requerirían 16 pasadas de un rodillo cuya presión de inflado fuera 9 Kg/cm². si se usara un equipo cuya presión de inflado pudiera ser de 10 Kg/cm² bastarían 8 pasadas para lograr el peso volumétrico deseado y equipos sucesivamente más pesados podrían aún reducir el número de pasadas, con el correspondiente juego económico entre el equipo empleado y la reducción del número de veces que hubiera de circular, dentro del cual entra el aspecto importante de la disponibilidad de equipos.

Considérese que el mismo problema trata de resolverse con el contenido de agua de 16% tal como se ve en el segundo cuadro de la Fig. 5, ahora el peso volumétrico--seco-de 1,760 Kg/m³

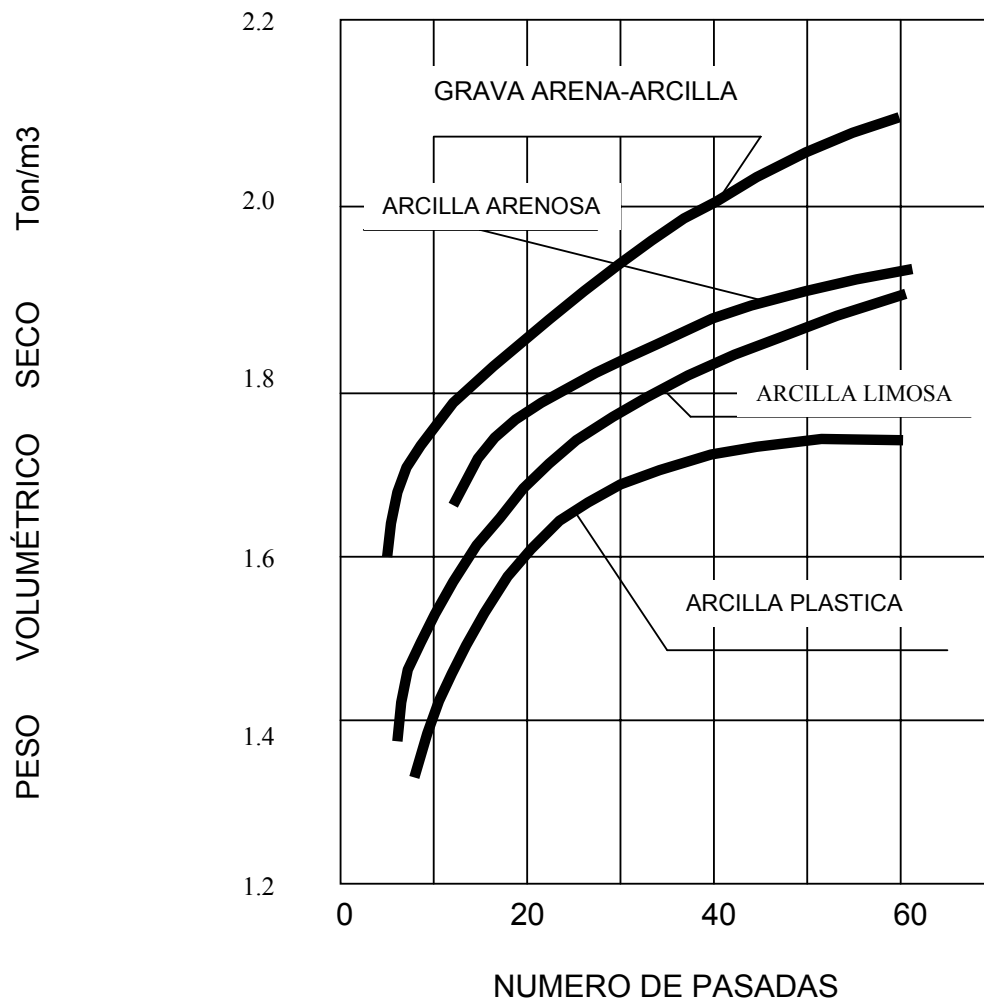


Figura 4. Compactación con rodillo pata de cabra. Efecto del número de pasadas en el grado de compactación de diversos suelos.

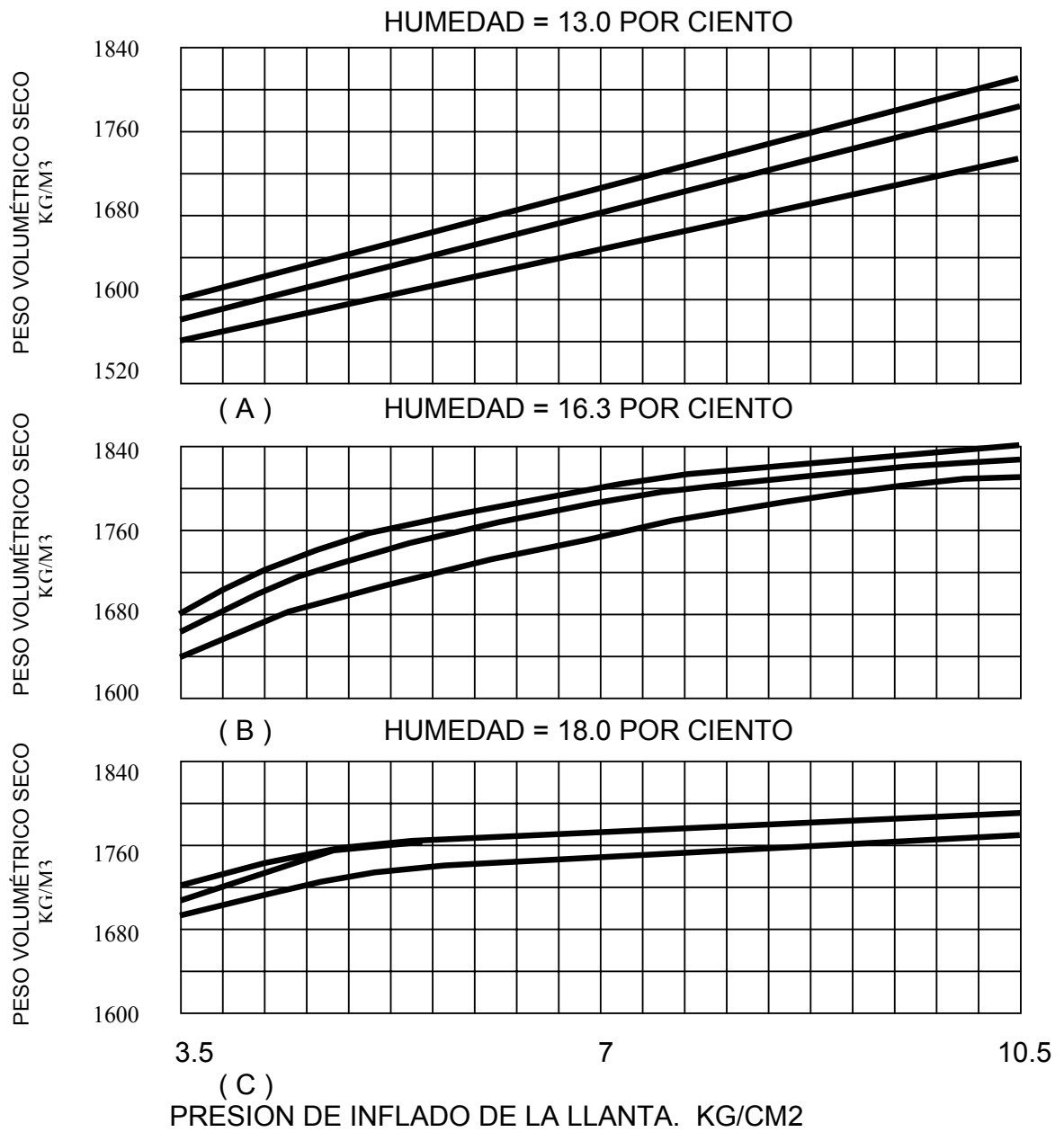


Figura 5. Efecto de la presión de inflado. Del número de pasadas y de la humedad de compactación.

se obtiene con 16 pasadas de un equipo que dé presión de inflado de 5.5 Kg/cm². El mismo resultado lo obtendrían 8 pasadas de un equipo cuya presión de inflado estuviera en el orden de 6 Kg/cm², pero un equipo cuya presión de inflado fuera de 7.5 Kg/cm² requeriría sólo 4 pasadas para llegar a los deseados 1,760 Kg/m³.

Finalmente, si el suelo se compacta con 18 % de contenido de agua el mismo peso volumétrico seco puede obtenerse 8 pasadas de un rodillo cuya presión de inflado sea del orden de 5 Kg/cm² o 4 pasadas de un equipo que comunique una presión de 6 Kg/cm².

De todo lo anterior destaca con gran valor práctico el hecho de la gran influencia del contenido de agua de compactación; de la gran sensibilidad del proceso a la presión de compactación empleada, de manera que cambios aparentemente pequeños en ella conducen a diferencias muy importantes en el número de pasadas requerido y, finalmente, el hecho de que a partir de un cierto nivel de la energía empleada, aumentos en la presión de inflado o en el número de pasadas son ya muy poco eficientes o irrelevantes.

Otra conclusión importante es que determinados pesos volumétricos, combinados con determinados contenidos de agua pueden no ser alcanzados por ningún equipo de determinadas características por más pasadas que con él pretendan darse.

X. Estructuración de los suelos compactados.

Como se señaló en el inciso IX, la estructuración *que* adoptan los suelos al ser compactados es una de las condicionantes básicas de su comportamiento posterior, de acuerdo con las ideas actualmente prevalecientes.

De nuevo el problema adquiere características totalmente diferentes en el caso de suelos arenosos de estructuración simple o en el caso de suelos arcillosos de estructuras complicadas; como ya se señaló, en el primer caso, se tiene un comportamiento gravitacional en el que las propiedades de conjunto dependen fundamentalmente de la intensidad de presiones que se ejercen en los contactos entre grano y grano, del número de esos contactos (compacidad) y de la trabazón mecánica que se ejerza entre ellos (diferencia entre partículas de aristas agudas y redondeadas).

En el caso de los suelos arcillosos el arreglo y disposición de los grumos formados por muchas partículas individuales y el de las partículas individuales entre si ocurre, como ya se dijo, por efecto de fuerzas electroquímicas; ellas definen tanto la geometría y el arreglo relativo como el tipo e intensidad de las fuerzas interactuantes. Por razón de esta superior complicación y menor familiaridad, resulta necesario comentar en cierta medida algunas de las ideas que hoy se tienen en torno a la estructuración de los suelos arcillosos. Ante todo ha de decirse, que estas formas de estructuración resultan tan complejas que no ha sido posible obtener un esquema simple ya la vez suficientemente general que sirva como una base cuantitativa de trabajo. Mucho de lo que ahora se discute proviene de las Refs. 6 y 4, en las que, a su vez, podrá encontrarse una bibliografía más amplia, útil para profundizar en el tema.

Las ideas actuales sobre microestructura tienen un enfoque eminentemente cualitativo, con resultados que para el ingeniero civil que opera los procesos en el campo tienen una utilidad principalmente circunscrita a proporcionar una cierta lógica de apoyo para el entendimiento de una serie de conocimientos experimentales, provenientes tanto del campo como del laboratorio.

En la actualidad se considera que las partículas individuales de los suelos arcillosos se agrupan en unas primeras unidades denominadas paquetes (Ref, 6) , de nivel submicroscópico, que, a su vez, se integran en flóculos o agregados, perceptibles por un buen microscopio óptico y que forman grumos visibles a simple vista. Se piensa hoy que para efectos prácticos la estructura de los suelos finos compactados está determinada por la asociación de paquetes en flóculos y de éstos en grumos.

Se reconoce que la estructura de los suelos compactados depende en primer lugar de factores intrínsecos, tales como la mineralogía, forma y tamaño de las partículas (en más de un sentido dependientes de la anterior) y la composición química del agua contenida en los poros del suelo; estos factores definen en gran parte la magnitud de las fuerzas electro-químicas entre los cristales vecinos. Adicionalmente existen obviamente factores externos, de los que el método de compactación y la energía en él empleada son con mucho los más significativos; de hecho, está sobradamente demostrado que métodos de compactación diferentes producen distintas estructuras.

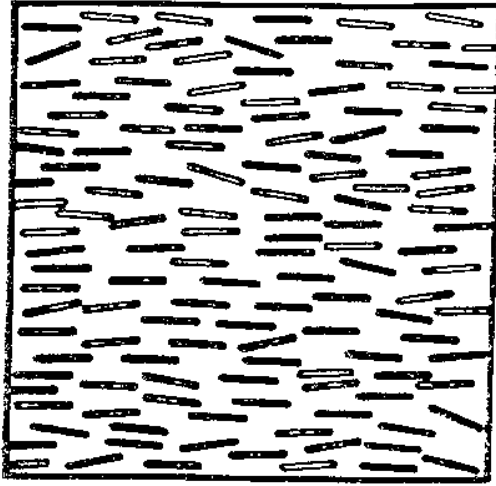
La naturaleza de las fuerzas eléctricas que interaccionan entre cristales de arcilla no está tampoco completamente dilucidada en la actualidad, pero una imagen que ha resultado útil para visualizar las cosas considera que esos elementos se comportan como si tuviesen una carga eléctrica negativa capaz de atraer una atmósfera de iones positivos dentro del agua vecina. A ese efecto se suma una interacción de partícula a partícula, que incluye una atracción electro- magnética (fuerzas de 'van Der Waals) y una repulsión entre las capas de carga positiva de agua que rodean a cada partícula. Cuanto mayor sea el predominio de.- Jas fuerzas de repulsión sobre las de atracción, se tenderá a estructuras

con mayor grado de orientación, en las que los elementos cristalinos tienden a colocarse paralelamente.

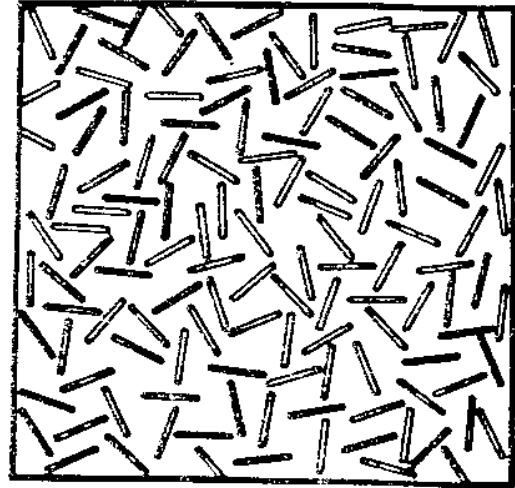
La Fig. 6 muestra los arreglos extremos que hoy se piensa pueden adoptar los suelos finos compactados. En un caso los sólidos muestran una disposición regular y paralela, con un alto grado de orientación, que da su nombre a estas estructuras (orientadas) ; en el segundo caso la disposición es mucho más irregular, prevaleciendo puntos de concentración de atracción entre los elementos cristalinos (estructuras floculadas).

La intuición y, como se mencionará, la evidencia experimental disponible inducen a pensar que las estructuras altamente orientadas conducen a materiales más compresibles y menos resistentes.

El contenido de agua con que se compacta el suelo tiene una influencia importante en la estructura adquirida. contenidos de agua bajos limitan el desarrollo de las capas de agua adheridas a los cristales y propician altas concentraciones de iones, con la que se producen a la vez repulsiones pequeñas entre las partículas (por sus cargas negativas altamente neutralizadas) y desarrollo de grandes esfuerzos efectivos por capilaridad. Todo ello conduce a estructuras con fuertes nexos entre cristales y bajo grado de orientación entre los elementos estructurales. Al aumentar los contenidos de agua, disminuyen las concentraciones de iones positivos en torno al cristal y, correspondientemente, aumentan las fuerzas de repulsión entre ellos a la vez que disminuyen los esfuerzos capilares y, por ende, los esfuerzos efectivos actuantes por este concepto; las estructuras van teniendo así a mayor grado de orientación, que será predominante para contenidos de agua elevados.



a)



b)

Figura 6. Estructuras extremas de un suelo arcilloso: a) alto grado de orientación de partículas: b) bajo grado de orientación de partículas.

Otro efecto que juega un papel en las relaciones entre los elementos sólidos que rigen la estructuración, es el desarrollo de presiones osmóticas que tienden a crecer en las zonas de mayor concentración de iones positivos entre cristales; ello hace pensar que en los arreglos de las estructuras floculadas, la disposición angulada de los elementos propicia una mayor presión de repulsión en la parte cerrada del ángulo que en la abierta; este efecto se ha invocado para explicar un hecho que parece establecido, en el sentido de que las estructuras floculadas tienden a evolucionar hacia estadios de mayor orientación, con el paso de largos períodos de tiempo.

La energía que se aplica al suelo durante el proceso de compactación tiende a reducir su volumen y/a deformarlo angularmente, lo que contribuye a una orientación adicional.

La Fig. 7 (Ref. 4) muestra los resultados de una importante investigación donde se analizó el efecto del método de compactación en la estructura adquirida por los suelos en el laboratorio, comparando resultados obtenidos para un suelo dado con el uso de compactación estática, dinámica y por amasado.

Los resultados obtenidos parecen indicar que la compactación estática da lugar a estructuras altamente floculadas para cualquier contenido de agua dentro de la curva de compactación; en la compactación por amasado se obtienen estructuras floculadas con muy bajos contenidos de agua (zona inicial de la rama seca), pero contenidos adicionales de agua hacen que muy rápidamente la estructura evolucione hacia altas formas de orientación, de manera que en las zonas que corresponden a los contenidos de agua de uso práctico puede considerarse que prevalecen estructuras francamente orientadas. La compactación dinámica muestra una tendencia similar a la del amasado, pero requiriendo contenidos de agua

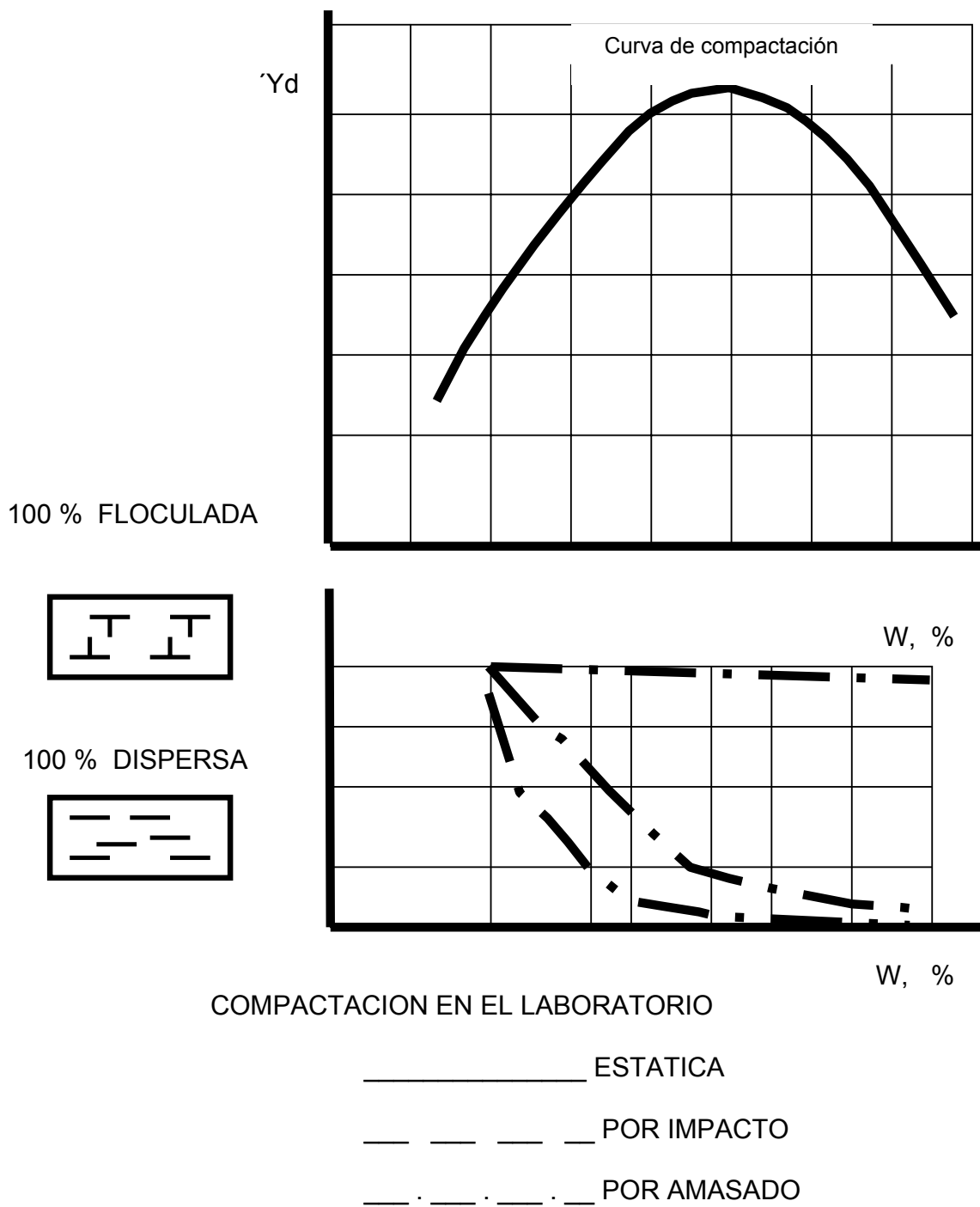


Figura 7 Influencia del tipo de compactación en la estructura adquirida por el suelo compactado.

sustancialmente mayores para llegar a desarrollos completos de estructuras orientadas; de todas maneras, para los contenidos de agua que pudieran corresponder a procesos de compactación prácticos, puede considerarse que con la compactación por impactos prevalecen formas de estructuración con franca tendencia a la orientación.

Investigaciones como la arriba reseñada proporcionan una base lógica al pensamiento de gran validez práctica de que los diferentes métodos de compactación deben conducir a suelos de propiedades diferentes; es muy familiar para cualquier ingeniero la idea de que los mismos elementos materiales, dispuestos y estructurados de diferentes formas, alcanzan resistencias, deformabilidades y, en general, todo tipo de propiedades distintas.

Como ya se insinuó en párrafos precedentes, la investigación moderna realizada en México (Re. 6) y en otros lugares hace ver que los elementos, que para los efectos de la compactación a nivel fenomenológico (nivel ingenieril) interesan, están dados no por la disposición de partículas individuales sino por la de los grumos. Los resultados que a continuación se presentan en forma muy resumida se refieren a distintos trabajos realizados por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Ref. 6) .En este escrito se analiza únicamente la diferencia de comportamiento para un suelo fino específico (con 98 % de partículas menores que la malla 200 y clasificación MH).

En la Fig. 8 se muestra la granulometría de ese suelo, denominando granulometría de partículas a la obtenida con hidrómetro y uso de defloculante y granulomería de grumos a la que se obtuvo con el material con el contenido de agua natural, mecánicamente disgregado hasta que su totalidad pasase la malla No. 4.

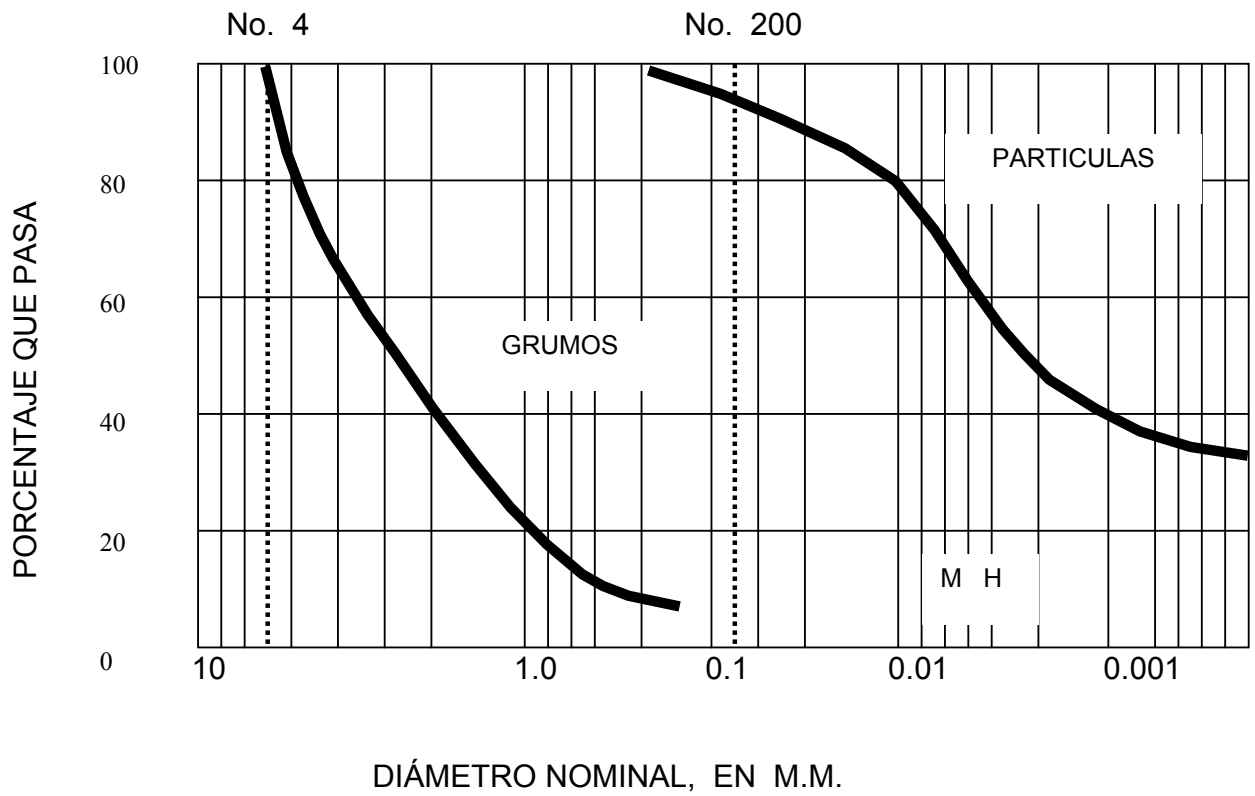


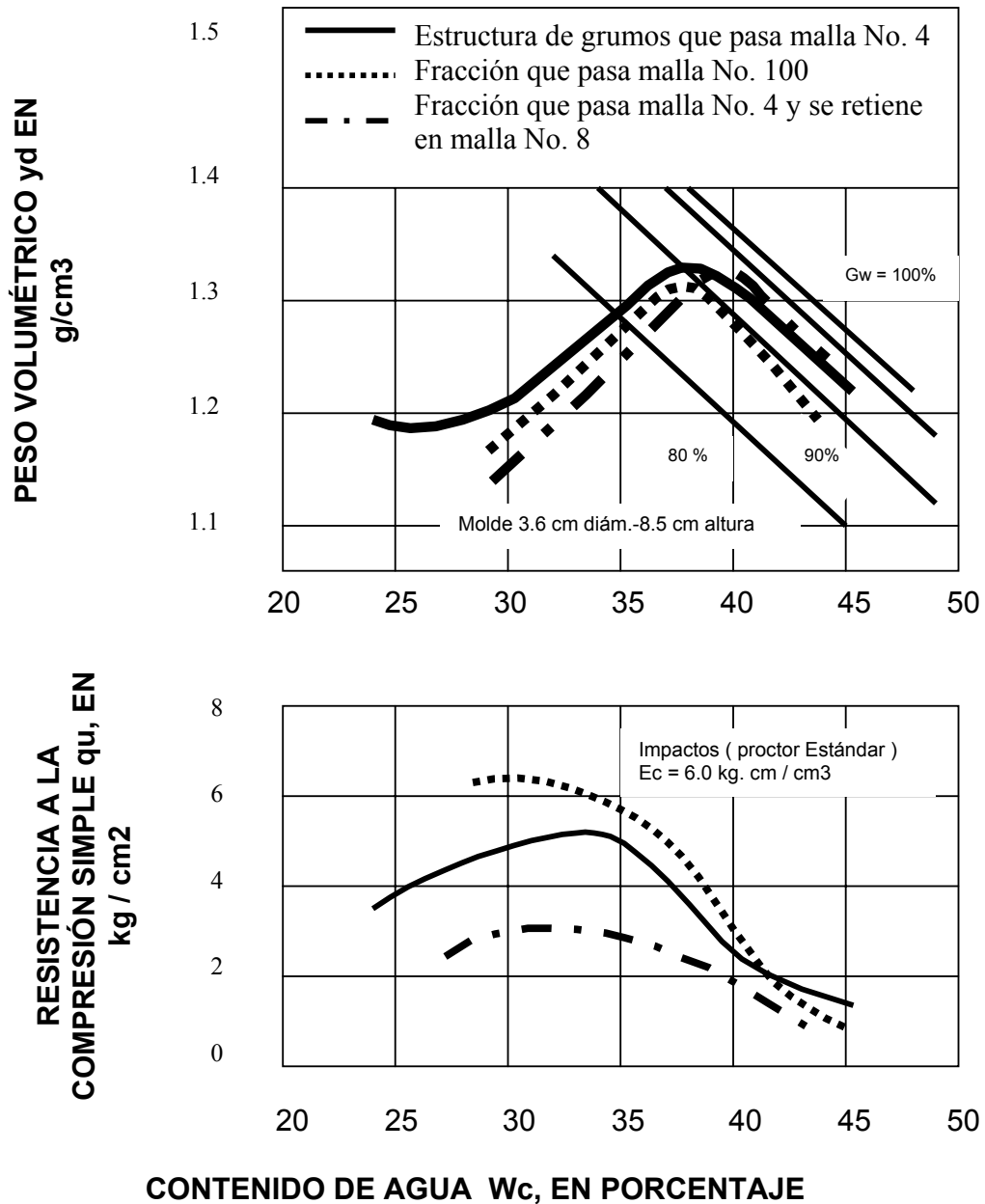
Figura 8 Granulometrías de partículas y grumos de un suelo MH.

De la granulometría integral del suelo se formaron tres fracciones como se muestra en las Figs. 9 y 10. La Fig. 9 describe resultados obtenidos en el laboratorio compactando las tres fracciones por el método de impactos (Proctor estándar) .La Fig. 10 proporciona los mismos resultados, pero utilizando un compactador por amasado.

En los dos casos se presentan las curvas de compactación obtenidas para las distintas fracciones y se ilustran las diferencias obtenidas con las mismas energías de compactación y mismos contenidos de agua, en las resistencias a la compresión simple. Con ello se espera hacer ver las diferencias en propiedades que se obtienen en los suelos finos con distintas agrupaciones de partículas y también mostrar como los distintos métodos de compactación ejercen una influencia importante; todo ello independientemente de lo que sobre el tema haya de insistirse en páginas subsecuentes.

Nótese que las agrupaciones de grumos más gruesos tienden a mostrar las menores resistencias, acusándose diferencias muy significativas. En el caso de las agrupaciones de grumos mayores, es de esperar que la energía aplicada en la rama seca se gaste en gran parte en romper esa estructura inicial de grumos, disgregándolos, pero aparentemente sin lograr acomodarlos mejor, por lo que en las curvas de compactación se obtienen pesos volumétricos menores. En la rama húmeda se logran seguramente distribuciones más uniformes de agua en los grumos y por ende menores fuerzas capilares, a lo que puede atribuirse que las resistencias de los diferentes arreglos tiendan a ser más semejantes.

Las tendencias observadas en la compactación por impactos se repiten en la compactación por amasado, si bien este método de compactación produce resistencias a la compresión simple notablemente menores; al parecer el amasado es más eficiente para destruir grumos, de manera que las estructuras de los



Compactación por impactos con energía estándar.

Figura 9. Efecto de la granulometría de grumos sobre la densificación y la resistencia a la compresión simple. Suelo MH.

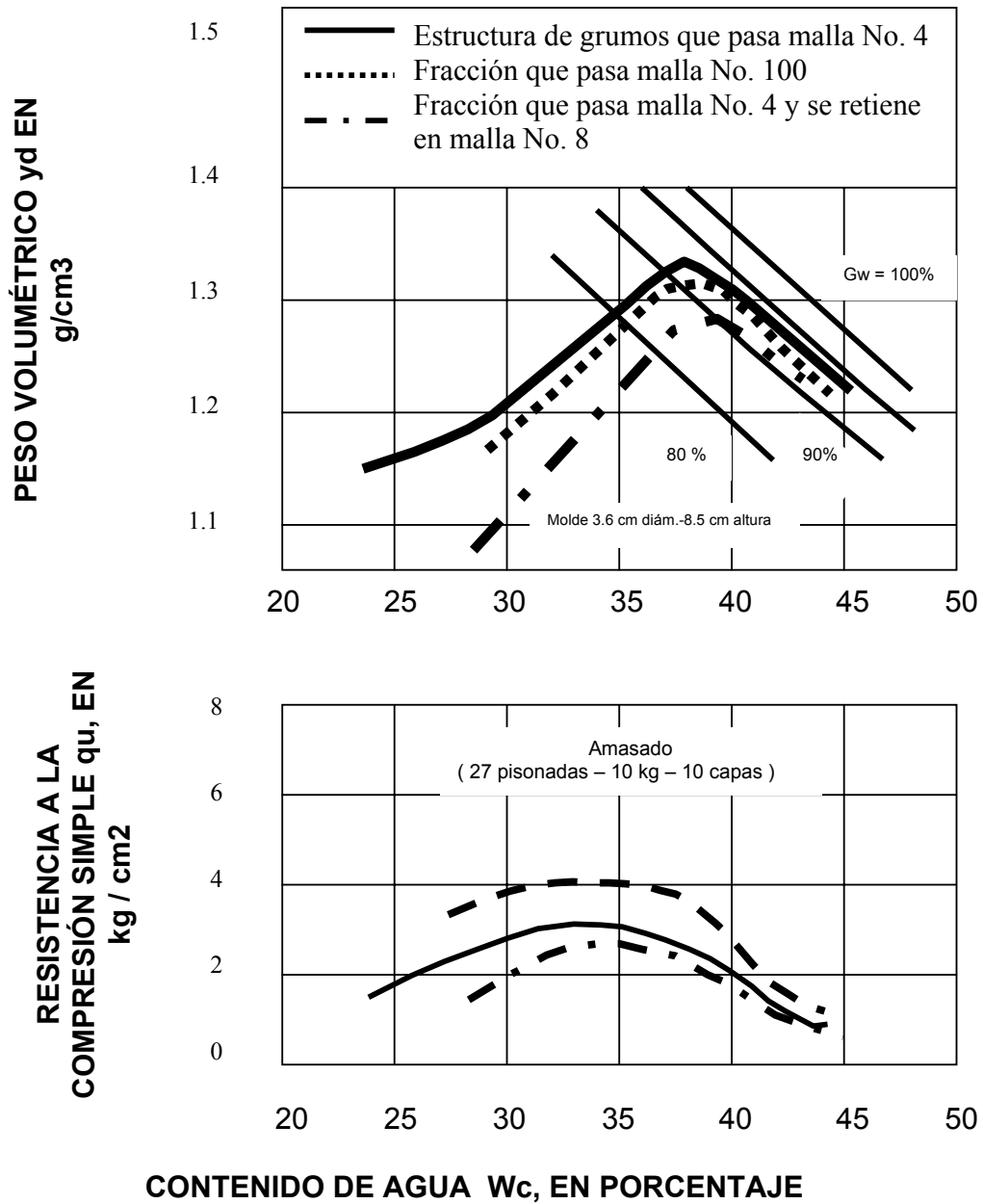


Figura No. 10 Efectos de la granulometría de grumos sobre la densificación y la resistencia a la compresión simple. Suelo MH.

tres arreglos resultan más parecidos, especialmente en la rama húmeda.

Los resultados anteriores apoyan un criterio, sobre el que habrá ocasión de insistir, que resalta el importante papel de la microestructura de los arreglos de partículas en el comportamiento mecánico y lo importante que es también en investigaciones de laboratorio, de donde se deduzcan recomendaciones para la compactación de campo o para proyecto de obras, lograr una duplicación razonable de las condiciones que puedan llegar a obtenerse en obra.

XI. Métodos de compactación en campo y laboratorio.

En el inciso VII de este trabajo se enlistaron ya los diferentes métodos que pueden aplicarse en el campo para compactar suelos. En este inciso se harán algunas consideraciones adicionales sobre esos métodos.

La falta de una teoría general que modele la compactación de suelos hace indispensable el uso continuo de técnicas de laboratorio que permitan manejar suelos compactados, midiendo sus propiedades para fines de proyecto o que sirvan de referencia para problemas de control de calidad o de base de pago. Como ya se dijo, desde un principio se plantea la necesidad de obtener congruencia entre los resultados obtenidos con esas pruebas de laboratorio y los que finalmente puedan obtenerse en la obra; hasta este momento se han presentado elementos suficientes para pensar que las propiedades adquiridas por los suelos compactados cambian con el método de compactación y con otras características, por lo que la búsqueda de esa congruencia resulta fundamental.

Por razones comprensibles, las técnicas utilizadas en el laboratorio para compactar suelos tratan de reproducir, en lo posible, los efectos de los compactadores de campo, pero

algunas diferencias entre lo que puede lograrse en el laboratorio y lo que la industria ha ido logrando para el campo son importantes y hasta el momento representan causas de diferencias con las que ha de convivirse.

La facilidad de manipulación y estandarización ha hecho que las primeras pruebas que se desarrollaron en el laboratorio fueran de tipo estático (ejerciendo presión con algún dispositivo sobre el suelo, colocado por capas dentro de un molde metálico, cilíndrico) o de tipo dinámico (en el que la compactación se logra con golpes de un pisón estándar dejado caer desde una altura fija sobre el suelo, también colocado en capas en un cilindro similar de dimensiones especificadas y llevando cuenta del número de golpes correspondiente a cada capa) .La Ref. 4 es una de tantas en las que puede consultarse el detalle de estas pruebas.

Cuando con posterioridad se descubrió la peculiar manera en que ciertos rodillos (pata de cabra) comunicaban su energía en el campo, se produjo el desarrollo de pruebas de laboratorio con técnicas de amasado, en las que trata de reproducirse, inclusive en forma directamente descriptiva la acción de tales rodillos. Finalmente, la gran popularidad adquirida por el uso de la vibración en técnicas de campo, indujo al desarrollo de pruebas de laboratorio con vibración, si bien estas últimas no han sido objeto de una estandarización tan rígida y universalmente aceptada como las anteriores.

De esta manera, podría decirse que los métodos de compactación de laboratorio comprenden las cuatro modalidades siguientes:

-Por impactos

-Por amasado

-Por presión estática

-Por vibración

La información contenida en torno a la Fig. 7 proporciona una relación entre algunas modalidades de compactación de laboratorio y la estructura adquirida por el suelo compactado, que deberá tenerse muy presente en todas las consideraciones que se incluyen en el presente inciso.

XII Ideas generales sobre el proceso de compactación de campo

Mucho de lo que se menciona en este apartado se debe a la Ref. 7.

El resultado inmediato de la compactación es un aumento en la cantidad de sólidos por unidad de volumen, que es lo que modifica el peso volumétrico seco. Este efecto también trae un aumento en el número de contactos entre los arreglos de partículas, así como un aumento en los esfuerzos efectivos entre ellos; estos factores son los que pueden propiciar una mejoría en las propiedades mecánicas. El número de contactos se relaciona fácilmente con el módulo de deformación, lo que permite entender que la deformabilidad disminuye con tal número. La resistencia tiende, en principio, a aumentar cuando aumenta el número de contactos entre los sólidos, porque al ser requerido el suelo por esfuerzos cortantes se producen aplastamientos en los puntos en que ocurren tales contactos, lo que a su vez propicia un aumento de los mismos contactos y un mayor encaje en las microasperezas entre los sólidos. En rigor la tendencia al aumento de resistencia de un suelo compactado es un fenómeno relativamente similar al crecimiento que experimenta la resistencia de un suelo sobreconsolidado. El aumento de la presión normal efectiva

actuante en los contactos, si propicia por si mismo un incremento en la resistencia al corte.

Los efectos anteriores, especialmente el efecto sobre la resistencia, pueden lograrse más fácilmente siguiendo dos estilos diferentes de compactación. En el primero se trata de comunicar la máxima cantidad de energía que no llegue a producir la fluencia del material, la cual causaría únicamente disipación de dicha energía sin aprovecharla en el acomodo estructural. Por este sistema debe procurarse que una carga que no llegue a la fluencia del material actúe en la mayor superficie posible, aprovechando el comportamiento friccionante del suelo. Este es el tipo de acción que ejerce en compactador neumático de llantas. El otro modo de propiciar una compactación eficiente es, hasta cierto punto, contrario. Ahora se trata de producir los mayores esfuerzos de cizallamiento en toda la masa de la capa por compactar, concentrando grandes presiones en ciertos puntos. Este sistema es el que produce el rodillo pata de cabra, que concentra gran energía en áreas pequeñas y penetra en el interior de la capa de suelo. Este sistema tiene el inconveniente de causar una fluencia efectiva y perder, por lo tanto, toda la energía que en ello se emplee, pero esta fluencia puede no ser de todo inútil, pues tiende a producir un amasado que se traduce en un aumento de homogeneidad del suelo compactado. Los efectos anteriores son particularmente útiles en suelos que formen terrones, que han de ser desmenuzados para lograr la densificación final. Este proceso suele requerir proporcionar agua al suelo o secarlo, como sucede en general en todo proceso de compactación; al añadir agua los terrones quedan secos internamente, con una superficie excesivamente húmeda; si se orea el conjunto, por el contrario, los terrones quedan húmedos, con una costra dura y reseca. En cualquiera de los dos casos se requiere una alta energía, que también se favorece la concentración de presión que se produce en las pequeñas áreas

de contacto de los rodillos pata de cabra (efecto de amasado).

Los rodillos de llantas también tienden a producir un efecto similar. En este caso cuando una rueda pesada se acerca a un cierto punto, se produce fluencia del terreno bajo ella, a la vez que se forma una onda hacia adelante que ha de superar la rueda en movimiento. Tras la rueda que avanza se produce una onda también, por efecto de rebote, de menor consideración puesto que tras la rueda el suelo va quedando más compacto. El proceso de aflojamiento y posterior densificación de la onda delantera, con aplicación de intensos esfuerzos cortantes bajo la rueda a un suelo inmediatamente antes aflojado, produce en los suelos finos un efecto que es el que se considera similar al amasado de un rodillo pata de cabra.

si se tiene en cuenta que el suelo que se compacta no está saturado, se comprende que la compresión que genera cualquier tipo de rodillo tiende hacia alguna clase de expansión después de que el rodillo pasó, lo que puede conducir a presiones en el agua del suelo muy importantes, que serán de tensión en caso de que la tendencia a la expansión se mantenga o que podrán ser de compresión si se ha logrado una muy importante rigidización del conjunto con el proceso de densificación ocurrido bajo el propio rodillo; obviamente en estos balances finales influye que se esté compactando en el lado seco ó en el lado húmedo de la curva de compactación; influye también la estructura, que determina en gran parte la marcha de los efectos capilares. Actualmente se cree que en los procesos de compactación de campo son más frecuentes las presiones de poro remanentes que las tensiones en el agua capilar, especialmente en compactaciones con contenidos de agua en el lado húmedo.

Las ideas inmediatamente anteriores no están desprovistas de interés práctico, puesto que los suelos compactados intensamente del lado seco, en los que el agua remanente queda a tensión, a veces importante, tenderán a ser potencialmente colapsables (Ref. 8) y guardarán potenciales de expansión por absorción posterior de agua.

a -Compactación por amasado

En la nomenclatura usual, la compactación por amasado se identifica en el campo con la acción del rodillo pata de cabra, si bien, como ya se dijo, actualmente se considera que los rodillos neumáticos ejercen un efecto de cizallamiento masivo entre las aglomeraciones de partículas que produce lo que podría considerarse un efecto similar. En el laboratorio existen actualmente pruebas que reproducen los mismos efectos, según fué ya comentado.

En esta sección se hará hincapié en la información que se refiere a compactación con rodillos pata de cabra y de una manera un tanto convencional los rodillos neumáticos se mencionarán preferentemente bajo la clasificación de rodillos de presión.

Los rodillos pata de cabra compactan concentrando grandes presiones en las áreas de apoyo relativamente pequeñas de sus vástagos; éstos penetran profundamente en la capa suelta tendida, especialmente en las primeras pasadas y esta penetración va siendo menor a medida que se densifica la capa. De esta manera el rodillo pata de cabra va compactando a la capa tendida de abajo hacia arriba, característica única en los rodillos de compactación, que frecuentemente se ha citado como la característica distintiva del procedimiento de amasado dentro de los trabajos de campo; en otras páginas de este escrito-se ha proporcionado información que hace ver que

esta característica quizá tiene más de circunstancial que de fundamental en el efecto de estos rodillos.

Dentro de la relativamente escasa información confiable que se tiene sobre detalles de la tecnología de compactación en el campo, se comentarán algunos aspectos que probablemente son generalmente válidos para los rodillos pata de cabra. Téngase en cuenta que, a falta de una teoría general, la fuente de información disponible es el experimento, difícil y costoso de manejar dentro de los trabajos de campo y, por lo tanto, mucho más Popular en el ámbito del laboratorio, con las correspondientes limitantes de correlación.

Se ha 'especulado sobre la influencia de la forma de la punta de los vástagos y todo parece indicar (Ref. 4) que las formas más cercanas a la paralelepípedica son más eficientes, llevando la densificación a profundidades mayores y propiciando el uso de capas de mayor espesor. También alguna investigación realizada indica que a misma presión aplicada en la superficie inferior del vástago, las áreas mayores son más eficientes para compactación en profundidad, lo que resulta acorde Con el conocimiento general; vástagos de sección cuadrada son más eficientes que los de sección redonda. Obviamente el mantener la misma presión sobre vástagos de mayor sección recta exige rodillos más pesados, aunque permita mayores espesores de capa, de manera que en este aspecto se presenta, como es usual en la compactación, un problema de balance.

La densificación de la capa bajo los vástagos puede llegar, de continuar el trabajo más allá de lo prudente, a que el vástago pase casi sin penetrar en el terreno, con ineficiencia general del proceso. Se considera que el vástago debe penetrar no menos de la cuarta o quinta parte de su longitud para poder considerar que todavía ejerce un efecto notable.

La Tabla IV (Ref. 4) presenta un resumen procedente de distintas fuentes en relación con el efecto de la presión de contacto bajo los vástagos en los grados de compactación obtenidos para varios suelos, considerando también variaciones en el área de contacto de los vástagos y en el número de pasadas.

Es notable el hecho de que en muchos casos incrementos muy importantes en la presión de contacto tienen un efecto no significativo en la densificación lograda. Todo parece indicar que se trata de proporcionar una presión que sea suficiente para lograr un intenso cizallamiento entre los grumos del suelo, rompiendo su disposición original y propiciando un nuevo acomodo, de manera que presiones superiores a un cierto umbral que logre los efectos señalados no producen beneficios subsecuentes. De hacer caso a la información contenida en la Tabla IV ese umbral mínimo se establecería alrededor de los 8 Kg/cm², por lo menos dentro de las características actuales de los rodillos proporcionados por la industria. Debe tenerse en cuenta que si el peso volumétrico seco obtenido no aumenta indiscriminadamente con la presión de contacto, si crece con ella el contenido de agua que debe proporcionarse al suelo para obtener ese máximo.

En la Fig. 11 se ilustra la forma en que el esfuerzo de compactación producido por los rodillos pata de cabra afecta al suelo a distintas profundidades medidas a partir de la superficie de la capa; la gráfica corresponde a un rodillo pata de cabra con vástago del tipo tronco-cónico con un área de contacto por vástago de 32.2 cm² y una presión de contacto equivalente a 7.4 Kg/cm² con el tambor del rodillo vacío y 14.1 Kg/cm² con el tambor lastrado. -Con el tambor en estas condiciones se efectuaron pruebas con suelos limo-arenosos y areno-limosos, que acusaron 52 % y 40 % en peso,

TABLA IV

Rodillos pata de cabra. Efecto de la presión de contacto en el peso volumétrico seco máximo.

Tipo de suelo	presión de Contacto Kg/cm2	Area de contacto cm2	No. de pasadas	Grado de compactación Obtenido, respecto a la Prueba proctor estándar
Arena arcillosa	17.5	43.75	9	99
	31.5	43.75	9	99
Arcilla limosa I	17.5	43.75	8	102
	35.0	43.75	8	101
	52.5	43.75	8	101
Arcilla poco Plástica	8.7	87.5	12	101
	26.2	87.5	12	101
Arcilla plástica	8.0	75.25	64	108
	17.5	31.5	64	108
Arcilla limosa II	8.0	75.25	64	112
	17.5	31.5	64	111
Arcilla arenosa	8.0	75.25	64	104
	17.5	31.5	64	101
Mezclas de grava Arena y arcilla	8.0	75.25	64	100
	17.5	31.5	64	99

En todos los casos el espesor de la capa compactada fue de 15 cm aproximadamente.

respectivamente, de tamaños que pasan por la malla No.200; con el tambor vacío sólo se efectuaron pruebas con un suelo limo-arenoso. El porcentaje de compactación se refiere al peso volumétrico seco máximo obtenido con el método Proctor modificado.

Al examinar las curvas de la Fig. 11 puede observarse que en estos suelos (predominantemente arenosos) el porcentaje de compactación decrece poco hasta una profundidad de más o menos 25 cm, cuando se compacta con el rodillo lastrado (presión de contacto 14.1 Kg/cm²); en cambio, con el rodillo vacío (presión de contacto 7.4 Kg/cm²) se observa una marcada disminución del peso volumétrico seco aproximadamente abajo de los 10 cm de profundidad.

Se considera en la actualidad que los rodillos pata de cabra rinden su mejor utilidad al compactar suelos finos o con porcentajes elevados de ellos. Las razones para esto han quedado mencionadas. Se considera también que la fuerte distorsión con la que resulta finalmente la parte superior de una capa compactada favorece la liga con la capa suelta que sobre ella se deposite, de manera que se atribuye al rodillo pata de cabra virtudes especiales en lo referente a obtener conjuntos muy homogéneos con excelente liga entre capas.

El rendimiento de los rodillos pata de cabra en el campo se ve influido por el manejo que se da a los equipos; por ejemplo, si los vástagos penetran en los mismos agujeros en pasadas sucesivas, el rendimiento obviamente se reduce y para evitar este efecto conviene que el operador haga ligeros cambios laterales en el recorrido del equipo. También se ha visto que el rendimiento de los rodillos de esta clase aumenta con la velocidad, tanto más cuanto menor sea el número de pasadas que se está empleando.

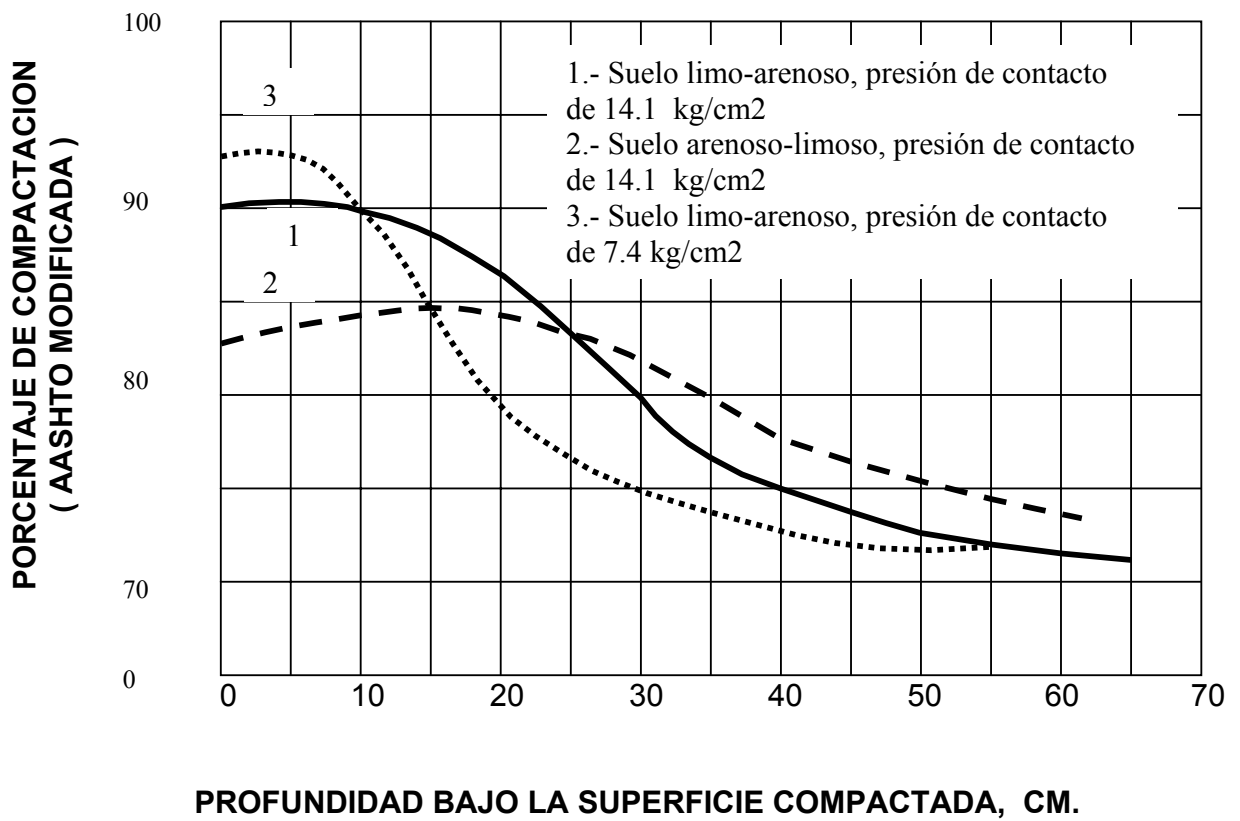


Figura 11 . Efecto de la compactación con rodillo “ pata de cabra” en relación con la profundidad dentro de la capa compactada.

Los rodillos de rejillas, que se han venido popularizando en materiales terrosos que requieren disgregación, tienen a fin de cuentas efectos similares a los rodillos pata de cabra y desde el punto de vista de este trabajo pueden considerarse como tales. Lo mismo puede decirse de los rodillos segmentados.

En épocas relativamente más recientes, se han utilizado rodillos pata de cabra en combinación con efectos de vibración, proporcionados al propio rodillo, dotándolo de los sistemas apropiados; de esta manera puede incrementarse la concentración de presiones sobre áreas pequeñas, según se comprenderá al tratar de la vibración en párrafos subsecuentes. La Ref. 9 contiene información práctica relativa a el comportamiento de los rodillos mencionados en este párrafo y de otros que se tratan en párrafos siguientes, que seguramente resultará de, utilidad para los ingenieros que realicen trabajos específicos de campo.

b - Rodillos de presión

Rodillos lisos

Como todos los demás rodillos ofrecidos por la industria pueden aparecer en modalidades arrastradas o autopropulsadas. Estos rodillos fueron considerados en algún momento como útiles para la compactación de suelos friccionantes; sin embargo, esta idea fué perdiendo partidarios con el paso de los años. De hecho, la superficie metálica de estos rodillos presenta una rigidez que, sobre todo después de las primeras pasadas produce un área de contacto muy pequeña con la capa de suelo que se está compactando; es sabido, que el efecto de la presión aplicada a la capa se disipa muy rápidamente con la profundidad cuando el área de contacto con la que se aplica la presión es poco considerable, de manera que o se emplean capas muy poco espesas, lo que es antieconómico o se

obtienen compactaciones muy poco homogéneas a lo largo del espesor de la capa, con valores muy bajos en la parte inferior. En un cierto momento, se pensó evitar esta dificultad incrementando substancialmente la presión aplicada en la superficie de la capa, pero en tal caso la lisura del metal que forma el rodillo hace que esa parte superior quede tan densificada que resulta sumamente cerrada y bruñida, lo cual perjudica la unión de esa capa con la suprayacente, produciendo una estructura discontinua que no se considera deseable.

Al enfrentarse a estos hechos, los ingenieros de campo pensaron en la utilización de los rodillos metálicos lisos como terminadores de la parte superior de todo el terraplén o de, por ejemplo, carpetas asfálticas recién tendidas. Así se utilizan todavía en trabajos de compactación ligeros. En la actualidad otros sistemas de compactación, como por ejemplo los rodillos neumáticos con aditamento vibratorio, se han considerado preferibles también para esos trabajos de acabado.

No obstante todo lo anterior los rodillos lisos han vuelto al panorama de los trabajos de campo, pero provistos de sistemas de vibración, especialmente para la compactación de arenas y gravas; este hecho podrá ser comprendido en párrafos subsecuentes de este trabajo.

Aún en estas condiciones, los rodillos lisos no se consideran apropiados para compactar materiales arcillosos, invocando las desfavorables características mencionadas inmediatamente arriba.

Rodillos neumáticos

El campo de acción de los rodillos neumáticos en los trabajos de campo se ha extendido en forma continua con el paso del tiempo, al grado de que en la actualidad se les considera apropiados para la compactación de prácticamente todos los tipos de suelos, incluyendo grandes enrocamientos en los que se han obtenido resultados muy satisfactorios con equipos muy pesados. La llanta flexible llena de aire proporciona áreas de transmisión de presión suficientemente grandes como para que el efecto de densificación, ya discutida en un párrafo anterior, se transmita a profundidades suficientemente grandes como para poder utilizar espesores de capa económicos, sin detrimento de la homogeneidad de los resultados logrados.

Estos rodillos aplican a la superficie de la capa prácticamente la misma presión desde la primera pasada; esa presión es prácticamente igual a la de inflado de la llanta, si se descuentan pequeños efectos de rigidez de la llanta misma. La superficie de contacto de la llanta con el suelo es función del peso del rodillo y de la presión de inflado, lo que lleva a la necesidad de usar equipos muy pesados cuando se deseen aplicar presiones muy grandes en áreas importantes.

La práctica ha indicado como muy conveniente que las llantas delanteras y traseras del equipo se superpongan ligeramente; es usual buscar una disposición que deje dos tercios de la huella libres entre las superposiciones.

El acabado superficial de las capas compactadas con rodillos neumáticos suele presentar una rugosidad suficiente para garantizar una buena liga entre las capas tendidas sucesivamente.

Obviamente, el efecto de la presión de inflado y el aumento a la carga por rueda tienden siempre a producir en todos los

tipos de suelo un crecimiento en el peso volumétrico seco máximo obtenido, pero no es recomendable el aumento de la presión de inflado sin aumentar proporcionalmente la carga por rueda, pues ello produciría una disminución del área de contacto cuyos malos efectos han quedado discutidos. Obviamente, como ya quedó dicho más atrás, cualquiera de estos aumentos en la energía de compactación se traduce en una disminución de la humedad óptima del proceso.

La Fig. 12 proporciona datos relacionados con la eficiencia de la compactación de rodillos neumáticos a lo largo del espesor de la capa tendida.

Se presentan datos correspondientes a capas de 15, 30 y 60 cm de espesor y se ven los pesos volumétricos secos que se obtuvieron con tres contenidos de agua. En este caso se utilizó un rodillo neumático pesado y se compactó un suelo arcilloso homogéneo. La lección que se desprende de la información incluye la idea de que un constructor que se comprometa a un cierto peso volumétrico mínimo en todo el espesor de la capa, tenderá a utilizar equipos que proporcionen pesos volumétricos mayores que el pactado, en las capas superiores. También pueden obtenerse ideas sobre la influencia del espesor de la capa de compactación en la selección del equipo, en su eficiencia y en el costo de la operación. Se observa que la elección del espesor de capa no es arbitrario, sino que resulta íntimamente ligada al equipo disponible, a la humedad de compactación y a otros factores ya analizados. Para un equilibrio eficaz de todos estos factores suele requerirse del uso de terraplenes de prueba que ponderen los valores empleados. Huelga decir que, en principio, llegar a 'valores de compactación mayores que el pactado, supuestamente indicado por un proyecto bien realizado, siempre será antieconómico e incluirá el riesgo de sobrecompactación, con posibilidad de dar al suelo- potencial de expansión.

PROFUNDIDAD BAJO EL NIVEL EN QUE SE APLICA EL RODILLO, cm

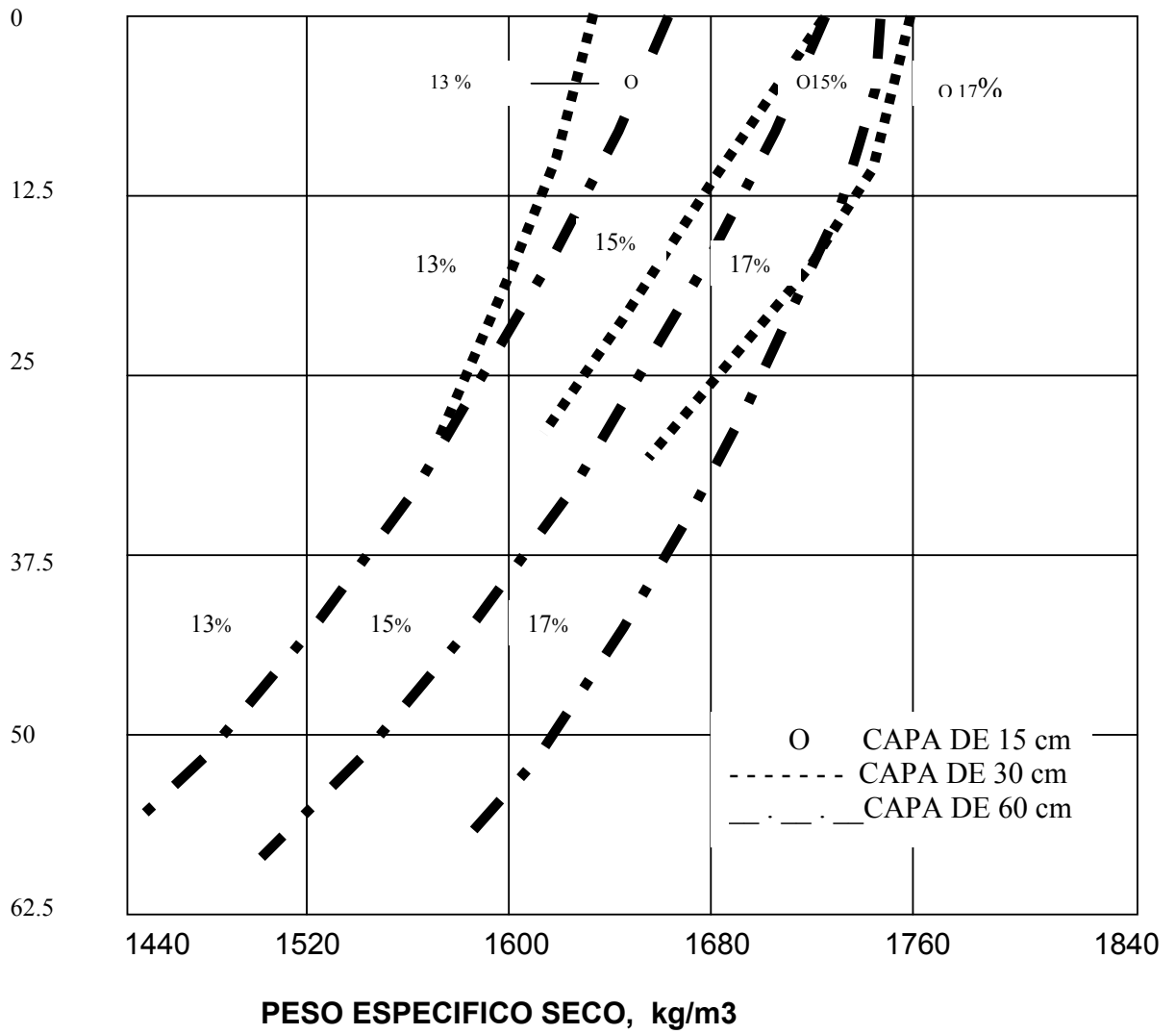


Figura 12. Influencia del espesor de la capa y el contenido de agua en la compactación. Rodillos neumáticos.

La Fig. 13 proporciona información complementaria sobre la homogeneidad lograda por los rodillos neumáticos en diferentes tipos de suelos.

La Tabla V proporciona una muy interesante comparación entre resultados obtenidos con rodillo pata de cabra y con rodillo neumático, para los espesores de capa que se señalan, en la que se observan las homogeneidades obtenidas por ambos equipos en la investigación específica de que se trata. Se observa en este caso una ventaja a favor de los rodillos neumáticos, así como la influencia de la presión de inflado de las llantas.

Finalmente, puede mencionarse que la práctica actual recomienda el uso de los rodillos neumáticos en suelos constituidos por guijarros grandes o con altos porcentajes de ellos, en los que las llantas permiten una distribución de la presión más uniforme, en tanto que los vástagos de un rodillo pata de cabra podrían puentearse sobre los guijarros, dejando prácticamente sin tratamiento el suelo intermedio.

c -Compactación por impactos

En el campo, los compactadores por impactos van desde diferentes tipos de pisones (algunos manuales y otros con dispositivo que proporciona automáticamente el rebote) , hasta rodillos tipo Tamper, semejantes en ciertos aspectos a los pata de cabra, pero que reciben su acción de impacto a base de velocidades de operación mucho mayores.

Los pisones tienen una amplia utilización para la compactación de zonas en que un rodillo convencional no cabe o que están en la inmediata vecindad de cualquier cosa que pueda perjudicarse por el golpe de un equipo normal.

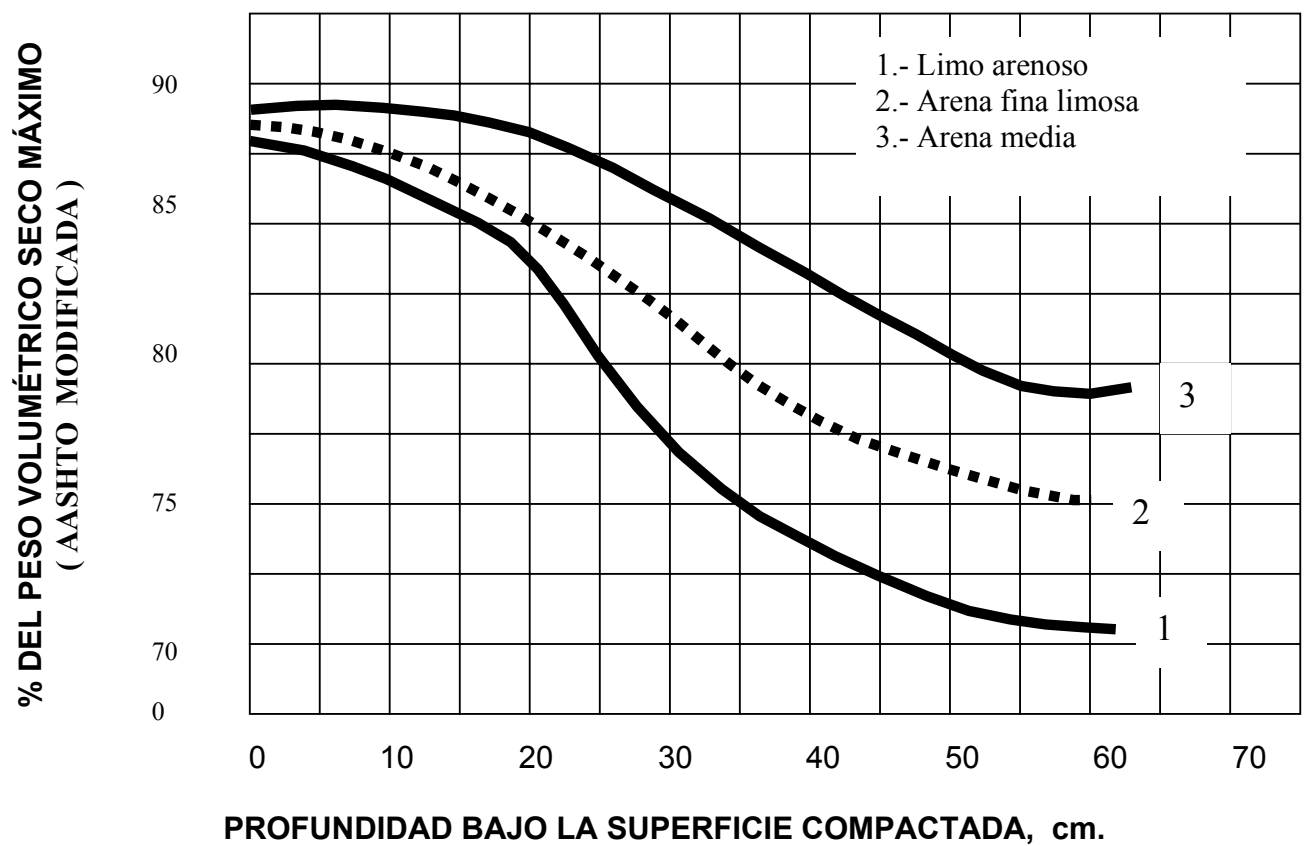


Figura 13. Influencia de un rodillo neumático a lo largo de la profundidad de la capa compactada.

TABLA V

VARIACIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO SECO CON LA PROFUNDIDAD EN UNA CAPA COMPACTADA

I. Rodillo Pata de Cabra

Espesor de la capa compactada: 15 cm

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Relación entre el peso volumétrico seco medio en el tercio inferior y el peso volumétrico seco medio en el resto de la capa.</i>	
	<i>Pata tipo troncocónica de 1.75 cm de longitud</i>	<i>Pata tipo paralelepípedica de 19.5 cm de longitud</i>
Arcilla plástica	0.88	0.88
Arcilla limosa	0.82	0.88
Arcilla arenosa	0.80	0.90
Mezcla de grava, Arena y arcilla	1.00	0.86

II. Rodillo Neumático

Espesor de la capa compactada: 30 cm

<i>Tipo de Suelo</i>	<i>Relación entre el peso volumétrico seco medio en el tercio inferior y el peso volumétrico seco medio en el resto de la capa.</i>			
	<i>10300 kg por rueda 9.9 kg/cm²</i>	<i>10300 kg por rueda 6.35 kg/cm²</i>	<i>5150 kg por rueda 9.9 kg/cm²</i>	<i>5150 kg por rueda 6.35 kg/cm²</i>
Arcilla plástica	0.93	0.93	0.88	0.88
Arcilla arenosa	0.95	0.94	0.90	0.89
Mezcla de arcilla, Grava y arena	0.95	0.95	0.95	0.96

Los rodillos Tamper operan a velocidades superiores a los 20 Km/hora; su efecto no ha sido suficientemente analizado hasta la fecha, pero parece que sus mejores resultados se logran en suelos finos con abundante contenido de grava y guijarros o en suelos finos residuales, que contengan fragmentos de roca parcialmente intemperizada.

d- Compactación por vibración

La compactación por vibración más usual incorpora a equipos de compactación convencionales dicho efecto, empleando mecanismos de masas desbalanceadas o de tipo pulsativo que proporcionan el efecto vibratorio al compactador propiamente dicho. Un equipo apropiado debe aplicar presiones suficientemente considerables, lo que se logra aprovechando el peso muerto del equipo más la fuerza dinámica proporcionada por el vibrador; esas fuerzas deben actuar con la amplitud suficiente y dando, a través de la frecuencia empleada, tiempo para el movimiento de los granos o grumos del suelo (Ref. 9) .La mayor parte de los equipos vibratorios producen fuerzas verticales.

Los rodillos de cualquiera de los tipos ya descritos al recibir aditamentos vibratorios han mostrado utilidad especial en todos los tipos de suelos, desde enrocamientos y formaciones de fragmentos hasta arcillas. Otra forma de compactación vibratoria frecuente en los trabajos prácticos, es el compactador de plataforma o placa, que va desde equipos manuales operados por un trabajador hasta plataformas más pesadas remolcadas por tractores (Ref. 4).

Se han atribuido al efecto vibratorio cuatro acciones de naturaleza diferente (Ref. 7), a saber:

-Incremento de la presión por el componente vibrátil.

-La vibración que sufren las partículas.

-Efectos de impacto.

-Acciones repetitivas.

Se reconoce que estos cuatro efectos quedan influidos en los dispositivos prácticos por seis factores principales:

-La frecuencia, que es el número de revoluciones por minuto del oscilador.

-La amplitud, medida por una distancia vertical en casi todos los equipos comerciales.

-El empuje dinámico que se genera en cada impulso del oscilador.

-La carga muerta, representada por el peso del equipo compactación, sin considerar el oscilador propiamente dicho.

-La forma y el tamaño del área de contacto del equipo con el suelo.

-La estabilidad misma del compactador.

Obviamente a los factores anteriores hay que sumarles las características del suelo por compactar y algunos conceptos que influyen en la misma, producidos por el ingeniero, de los cuales el contenido de agua se reconoce como muy importante. Puesto que la vibración implica una mayor entrega de energía y frecuentemente una mayor eficiencia de la misma, es natural esperar que los contenidos de agua óptimos del proceso sean menores en un equipo provisto de aditamento

vibratorio que lo que serían para ese mismo equipo sin vibraciones.

De todas las formas de compactación, la vibración es la que más aspectos por dilucidar presenta al ingeniero de campo. Por ejemplo, el incremento de las presiones debido al componente vibratorio parece tener una influencia menor que la que en un principio se había considerado. La vibración impartida a las partículas parece de mayor significación, puesto que produce aceleraciones muy diversas a ellas y, como consecuencia, hace aparecer fuerzas relativas que contribuyen a la reestructuración de los conjuntos inestables; sin embargo, no ha sido posible cuantificar este efecto y menos aún analizarlo teóricamente.

La acción de impacto del vibrador tiene una consecuencia clara cuando se traduce en "saltos" del equipo; según las características del suelo y la frecuencia propia del equipo, la frecuencia de este tipo de impactos no es la misma que la que corresponde al vibrador; de hecho suele estar comprendida entre un tercio y la mitad de este valor, pues el "salto" ocurre con un valor intermedio entre la frecuencia del vibrador y la natural del suelo.

En suelos francamente granulares este efecto de impacto del equipo en conjunto tiene una gran importancia práctica, por reducir por instantes la fricción interna entre los granos y aplicar presiones considerables inmediatamente después de ese momento, con la resistencia al esfuerzo cortante entre dichos granos disminuída, en tanto que la presión estática del equipo sin vibración tendría que vencer, para lograr acomodo de granos, la resistencia desarrollada bajo la presión del equipo en todo su valor.

En suelos cohesivos, los impactos del equipo también han demostrado su eficacia. De cualquier manera se ha visto que el efecto permite en estos suelos utilizar capas de mayor espesor durante el proceso, reduciendo costos. Hay que decir, sin embargo, que a mayor presencia de suelos finos puede suceder que en las capas de espesor considerable que suelen utilizarse en la vibración, por ejemplo superpuesta a equipos pata de cabra, se obtengan pesos volumétricos relativamente más bajos que lo deseable, valores que sólo pueden incrementarse si se logra aumentar significativamente la magnitud de los "saltos" , lo que exige que el suelo esté ya muy rigidizado, que sólo podría lograrse o con muchas pasadas o con capas más delgadas. La consecuencia práctica de estas reflexiones es la recomendación de utilizar capas más delgadas inmediatamente debajo de los pavimentos e ir aumentando el espesor en zonas más profundas del terraplén, donde puedan aceptarse pesos volumétricos algo menores.

Los efectos repetitivos del rodillo vibratorio pueden entenderse si se considera que al aplicar ciclos sucesivos de carga al suelo se obtienen áreas de histéresis cada vez menores, indicando un comportamiento no elástico del material y una transformación de su estructura hacia la densificación.

La velocidad de viaje del rodillo es influyente en el efecto de la vibración. La frecuencia del vibrador dividida entre dicha velocidad es una medida tosca del número de ciclos de carga que se imparten al suelo y por ende influye notoriamente en su densificación para un equipo dado. Obviamente el efecto de cada ciclo se ve incrementado cuanto mayor sea la amplitud del vibrador. Efectos de esta naturaleza explican el hecho observado en el campo, según el cual los rodillos vibratorios son los únicos equipos de compactación que logran mejores resultados cuanto menor sea su velocidad de desplazamiento. sin embargo, la práctica también indica que esas velocidades no debe ser excesivamente

bajas, pues en tal caso se disminuye el efecto de impacto por efecto de "salto", ya mencionado.

Cuando se compactan suelos gruesos con vibración se produce un cambio en la orientación de las partículas en el momento en que tienden a separarse y una fuga de las partículas más finas a los huecos entre las más grandes, que contribuye a la densificación. Se ha llegado (Ref. 10) a apreciaciones cuantitativas de la reducción de la fricción intergranular que la vibración consigue en suelos gruesos; esta ha llegado a ser de 15 veces en arenas y 40 en gravas. También se han cuantificado los esfuerzos de cohesión aparente que hay que vencer en las arenas para modificar su estructura original, que oscilan entre 0.5 y 1 Kg/cm² (estos esfuerzos pueden ser de 4 a 7 veces mayores en arcillas) .Las fuerzas de cohesión aparente por capilaridad dejan de ser significativas cuando crece el tamaño de las partículas (gravas y fragmentos) , pero aún en éstas el contenido de agua es relevante, pues la investigación realizada en México (Refs. 11 y 12) ha demostrado que es una práctica recomendable humedecer el material al colocarlo, con vista a reducir la compresibilidad posterior de un pedraplén. La práctica del humedecimiento parece inducir que los procesos de deformación ocurran durante la compactación, en ventaja de lo que pueda suceder durante la vida posterior de la estructura. Las razones de este aumento inmediato de la deformabilidad con el humedecimiento no están bien dilucidadas, pero se han relacionado con cierto reblandecimiento en las aristas y picos entre los fragmentos de roca que toleran menos, cuando están humedecidos, las concentraciones de esfuerzo que entre ellos se producen, cuando las grandes presiones que frecuentemente se inducen en las partes bajas de los pedraplenes, se transmiten a través del relativamente bajo número de puntos de contacto entre los fragmentos que los constituyen .El papel del- agua que se proporcione al pedraplén es más claro a medida que disminuye el tamaño de

los fragmentos; ya en arenas gruesas, el agua añadida contribuye a disipar las tensiones capilares que pudieran existir entre los granos.

La Fig. 14 proporciona un ejemplo real de la influencia de la frecuencia de vibración en la compactación de suelos gruesos, utilizando un espesor de capa de 60 cm.

El número de pasadas suele aumentar el efecto de densificación causado por los rodillos vibratorios bastante más allá de lo que lo haría el mismo equipo sin vibración; también permite aumentar los espesores de las capas compactadas.

Las altas frecuencias han mostrado ser particularmente útiles para compactar arenas con rodillos vibratorios ligeros en capas delgadas; cuando se utilizan equipos pesados, obviamente en capas de mayor espesor, las frecuencias más bajas han demostrado ser preferibles. En cualquier caso, la frecuencia del vibrador no debe ser menor que la de resonancia tomando en cuenta la frecuencia natural del suelo.

Existe una marcada diferencia entre los logros que la compactación vibratoria proporciona en depósitos naturales de suelo granular y los suelos de la misma naturaleza que se compactan por capas. Los rodillos relativamente ligeros, que se usan normalmente, no producen efectos de importancia abajo de un metro en el interior del depósito natural. El aumento del número de pasadas por arriba de S, se hace también poco eficiente.

Los efectos de la vibración en las arcillas son menos entendidos que en las arenas. La vibración parece ejercer cambios -favorables en la viscosidad de las sustancias coloidales en general, conocimiento que podría ser aplicable

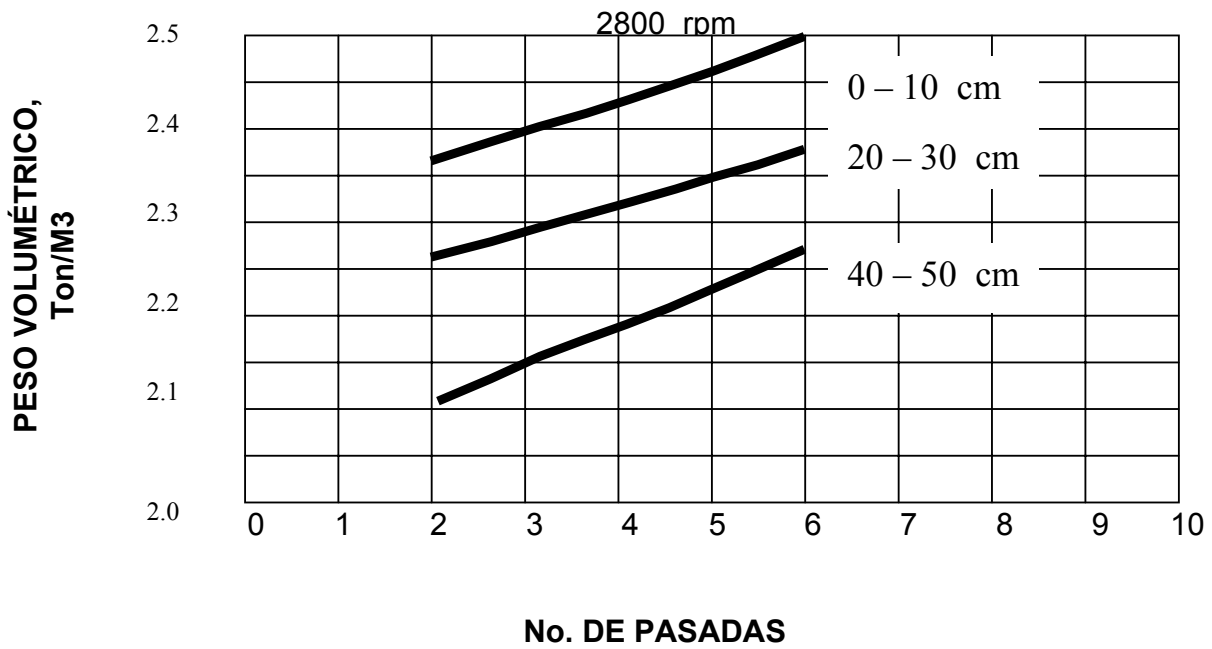
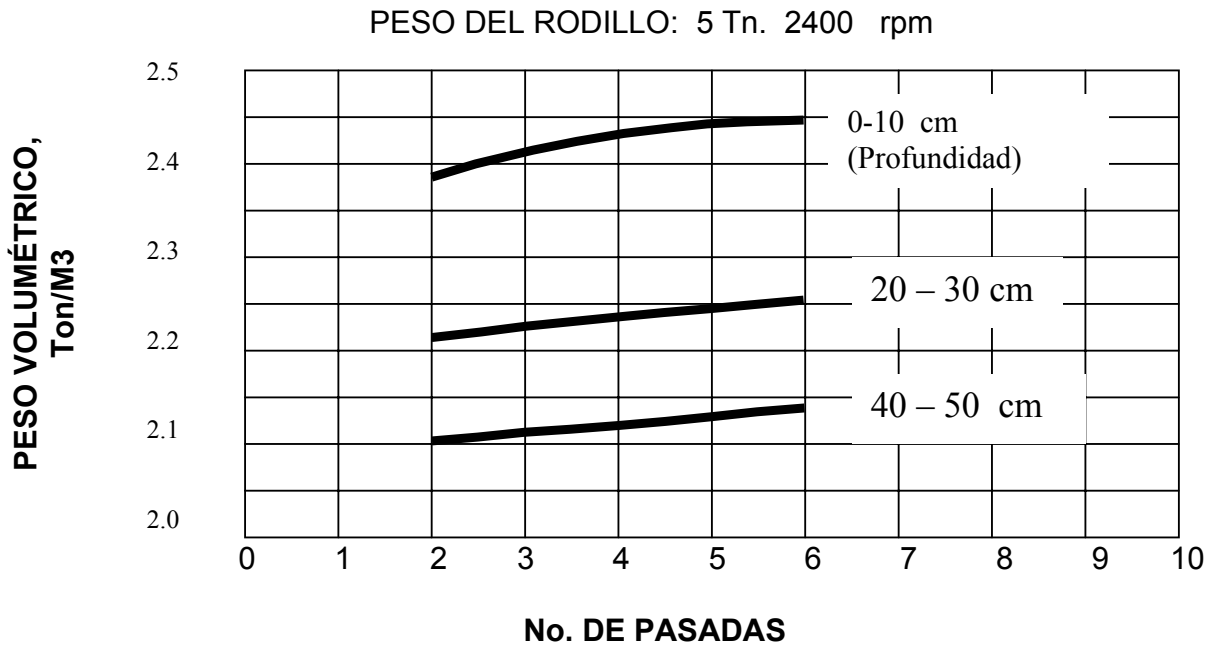


Figura 14. Influencia de la frecuencia del vibrador en en proceso de compactación.

al caso de compactación de arcillas húmedas; de hecho, estas últimas pueden compactarse con energías mucho menores que las más secadas y con equipos mucho más ligeros. También se ha visto que en las arcillas blandas y húmedas es relativamente fácil alcanzar con el equipo un cierto grado de compactación, pero que resulta drásticamente más difícil elevar el nivel del proceso, incrementando el número de pasadas.

Ya se discutió la influencia que la vibración puede tener para reducir la resistencia al corte de las arcillas y los mecanismos que produce en ellas de degradación estructural. Estas ideas ya expuestas se ven corroboradas por el hecho observado en el campo de que las arcillas más sensibles son las que mejor se compactan por vibración.

XIII. Propiedades de los suelos compactados

a. Arenas y suelos gruesos

Como suele suceder en muchos ámbitos de la Mecánica de Suelos aplicada, los resultados de aplicar compactación a suelos gruesos (cuyo análisis en este trabajo es, como ya se expresó, marginal) son mucho más claros y consistentes que los que se tienen con materiales finos. Algunas precisiones de interés se hacen en lo que sigue y otras, también de valor práctico, podrán verse en los Apéndices.

El comportamiento esfuerzo-deformación de una arena suelta y una arena compacta difieren radical, pero gradualmente, según es conocimiento general (Ref. 4) .Las arenas fuertemente compactadas muestran comportamientos netamente frágiles, en tanto que el mismo material suelto ostenta comportamientos claramente plásticos. Esta diferencia en comportamiento puede explicarse en términos de estructuración, pues en las arenas compactas cualquier esfuerzo tangencial aplicado ha de vencer no sólo a la resistencia friccionante entre los

granos, sino obligarlos a girar y moverse, rodando unos sobre otros. Al vencer los dos efectos combinados se tiene resistencia máxima, pero una vez vencido el segundo efecto se facilita mucho el movimiento relativo y la resistencia disminuye mucho con rapidez; en la arena muy suelta, la estructuración inicial es inestable y es fácil comenzar el movimiento relativo a bajo esfuerzo cortante aplicado, pero los movimientos inducidos van densificando el conjunto, produciendo estructuras más cerradas y, correspondientemente, mayores resistencias, que se mantienen prácticamente uniformes a deformaciones crecientes, por lo que la resistencia ya no varía. La resistencia final, obtenida tras deformaciones muy grandes, es la misma en arenas sueltas y compactas, pues aunque por etapas diferentes, la arena llega a la misma estructura. Todo lo anterior lleva al hecho práctico de que la resistencia máxima de una arena muy compacta es mucho más grande que la que llega a tener una arena suelta, pero también es menos confiable, pues si la arena se obliga a deformaciones subsecuentes mayores que la que corresponde a esa resistencia máxima, la resistencia del conjunto disminuye cuanto más compacta haya estado la arena.

La compresibilidad de las arenas compactadas también es substancial y gradualmente menor que la de la misma arena en estado suelto.

Un proceso al que se ha dedicado poca atención en el pasado, pero que tiende a interesar cada día más a los proyectistas es la degradación estructural que sufre un suelo grueso por el proceso de compactación, que se traduce en cambios importantes en su granulometría, principalmente por ruptura de partículas o pulverización de aristas. Este efecto puede ser importante con el tiempo en bases de pavimentos flexibles en lo referente a resistencia y compresibilidad (son de mucho mayor importancia relativa en el caso de enrocamientos formados por fragmentos de roca, especialmente de tamaños

uniformes, tales como los que se presentan en pedraplenes altos en carreteras o en respaldos de presas de tierra}. También estos cambios pueden tener efectos substanciales en los contenidos óptimos de asfalto en bases tratadas y en carpetas. El efecto es obviamente más notorio cuanto más deleznable sean las partículas o los fragmentos de que se trate. En la Ref. 13 se presentan medidas de la degradación estructural de materiales gruesos compactados en el laboratorio con diferentes procedimientos y se reportan diferencias en el material menor que la malla 200 que van de 9% en condición original a la % después de la compactación.

b. Suelos cohesivos.

Son muchos los conceptos por los que el proceso de compactación influye en las propiedades finales de los suelos finos compactados. En lo que sigue, tratará de puntualizarse lo esencial del conocimiento hoy disponible de valor práctico inmediato.

1- Efecto del contenido de agua.

El efecto del contenido de agua en el peso volumétrico seco alcanzado ha quedado debidamente establecido en el apartado VIII de este trabajo, al analizar la curva clásica de compactación. Ese contenido de agua tiene también un efecto obvio en el grado de saturación alcanzado por el suelo. Para cualquier par de valores y_d y W , el grado de saturación puede calcularse con la expresión:

$$G_w = W Y_d S_s / S_s Y_w - Y_d \quad (2)$$

Donde S_s es el peso específico relativo de los sólidos del suelo y Y_w es el peso volumétrico del agua. La expresión

(2) permite dibujar en el diagrama de compactación (Fig. 1) la curva correspondiente a cualquier grado de saturación.

El grado de saturación disminuye rápidamente para contenidos de agua decrecientes abajo del óptimo, pero se mantiene mucho más uniforme para contenidos de agua arriba de dicho límite.

El contenido de agua de compactación influye también, como ha quedado señalado en varios lugares de este trabajo, en la estructura de grumos y partículas que el suelo compactado adopte.

2- Efecto de la energía de compactación.

Este efecto ha quedado también suficientemente discutido en el apartado IX.

Puesto que durante el proceso de compactación el contenido de agua del suelo permanece constante, cualquier aumento en la energía de compactación que influya en la densificación, acarreará un aumento en el grado de saturación del suelo.

El efecto de la energía de compactación en la estructura es una tendencia a aumentar el grado de orientación de los constituyentes de la misma, en forma creciente con el contenido de agua; en suelos compactados del lado húmedo este efecto será particularmente notable.

3- Efecto de la fracción gruesa.

El peso volumétrico obtenido con la compactación aumenta con el porcentaje de partículas gruesas del suelo hasta un cierto límite, arriba del cual disminuye; el peso volumétrico seco aumenta más cuando la granulometría de los gruesos es más variada. Por ello es objetable el procedimiento de compactación de laboratorio, a veces usual, en el cual la

fracción retenida en una malla (frecuentemente la de 3/4") se substituye por el mismo peso de material entre dicha malla y la número 4; esta práctica puede provocar desviaciones significativas respecto a los resultados de campo.

A continuación se pasa una breve revista a las propiedades mecánicas é ingenieriles adquiridas por los suelos compactados.

A- Permeabilidad

Esta es una característica que no suele ser de importancia fundamental para el ingeniero constructor de v las terrestres, por lo que los comentarios que a continuación se harán se refieren primordialmente a conceptos de carácter básico. En las referencias 4, 6 y 14 podrá encontrarse información adicional.

En la permeabilidad de un suelo compactado influye, en primer lugar, la naturaleza de sus componentes minerales y los tamaños de sus poros. Como caracter1sticas circunstanciales influyen, la relación de vacíos, la estructuración del suelo y el grado de saturación.

El coeficiente de permeabilidad tiende a disminuir con el grado de saturación del suelo, si se conserva constante el volumen total de este; en otras palabras, si el volumen del suelo compactado no cambia, a mayor contenido de agua se tiene menor permeabilidad.

La estructuración es el factor que más afecta a la permeabilidad de los suelos compactados. Cuanto mayor sea la distorsión durante la compactación, mayor llega a ser el grado de Orientación de los arreglos de partículas ya este tipo de estructuración corresponden las permeabilidades menores. o rodillos pata de cabra o rodillos neumáticos

anchos y no muy pesados, empleados con altos contenidos de agua deben considerarse equipos ideales para lograr suelos compactados de baja permeabilidad. Si esos mismos equipos fueran muy pesados (alta energía), para operar eficiente y económicamente tendrían que hacerlo con suelos con contenidos de agua más bajos, con lo que la permeabilidad ya tendería a crecer. Por lo demás y sin tomar en cuenta esa condición económica, es claro que la mayor energía por sí sola produce estructuras más cerradas y tiende a disminuir la permeabilidad.

Como se ve, existe una contradicción en cuanto al uso de la energía de compactación. Altas energías conducen a estructuras muy cerradas y por ello poco permeables, pero el efecto revierte fácilmente pues en operación eficiente y económica de los equipos de campo, esas altas energías exigen contenidos de agua más bajos y esto último tiende a producir permeabilidades más altas.

Para una misma energía de compactación, se obtienen mayores permeabilidades compactando en la rama seca que haciéndolo en la húmeda, lo cual se desprende de lo anteriormente dicho.

Las mayores permeabilidades que se obtienen al compactar del lado seco determinan en los suelos finos sujetos a consolidación posterior, una mayor rapidez en el proceso, en relación a la compactación de los suelos en el lado húmedo.

B -Compresibilidad y expansión.

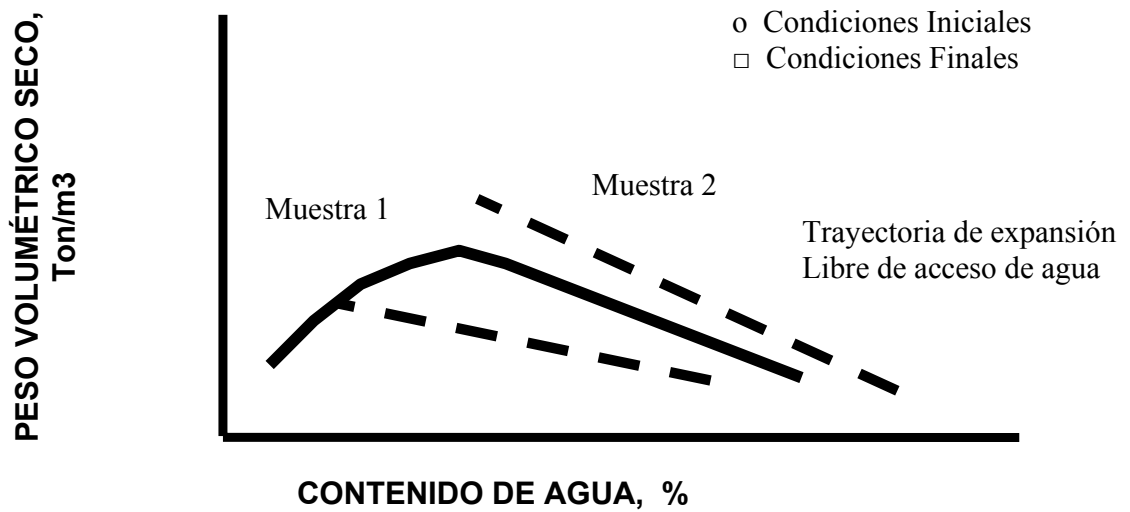
Los cambios de volumen en un suelo arcilloso tienen a nivel estructural dos componentes. En primer lugar, la deformación produce variaciones en las distancias entre grumos y partículas, a grado de orientación constante y, en segundo lugar, dicha deformabilidad produce reducciones en las distancias medias entre los componentes sólidos, sin que

cambie su distancia mínima, si se logra durante la compactación un aumento en el grado de orientación. Esta segunda componente, que ocurre cuando el suelo se comprime, es irreversible, por lo que actualmente se acepta que cualquier expansión que posteriormente pueda sufrir el suelo compactado, se debe muy principalmente a la primera componente señalada.

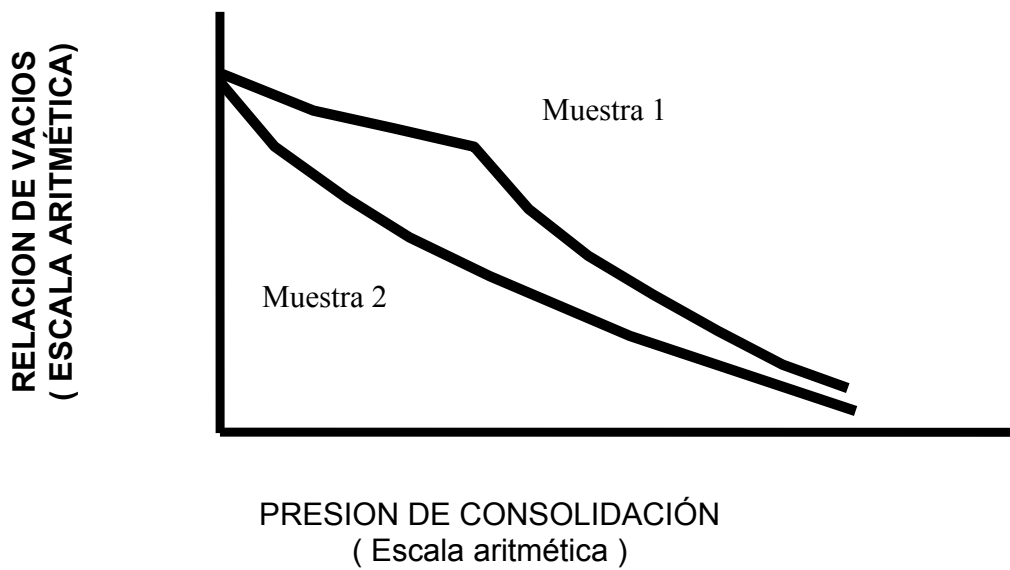
La Fig. 15 ilustra el comportamiento de dos muestras de un suelo fino compactado con los mismos métodos y energías y al mismo peso volumétrico seco, pero empleando en un caso una humedad en el lado seco y, en el otro, una humedad correspondiente al lado húmedo de la curva de compactación.

Puede verse que la muestra compactada del lado seco adquiere un potencial de expansión muy importante al absorber agua, que en el caso de la figura se manifiesta tanto por el agua absorbida en expansión libre, como por la disminución de peso volumétrico, relacionada con el aumento de volumen que tiene lugar. Por el contrario la muestra compactada del lado húmedo exhibe un potencial de expansión mucho menor y una estabilidad volumétrica posterior mucho mayor.

La parte b de la figura presenta curvas de compresibilidad típicas en ambas muestras. La correspondiente a la muestra 2 tiene la forma típica, pero la muestra, 1 presenta una curva de compresibilidad que se diría compuesta por dos curvas convencionales. En suelos compactados por amasado se ha observado que la presión de consolidación que corresponde a la transición entre las dos curvas es ligeramente menor que el esfuerzo de compactación (Ref. 4) .Al parecer el aumento del coeficiente de compresibilidad que corresponde a la iniciación de la zona de pendiente más abrupta, se debe al predominio de la disminución de las distancias mínimas entre los sólidos, a l crecer la energía de compactación y e 1 grado de compactación obtenido.



a) Condiciones de compactación y trayectorias de expansión libre



b) Curvas relación de vacíos- presión.

Figura 15. Compresibilidad y expansividad de un suelo arcilloso compactado a una misma relación de vacíos con contenidos de agua a ambos lados del óptimo.

Bajo presiones pequeñas el coeficiente de compresibilidad del suelo compactado del lado seco es menor que el del suelo compactado del lado húmedo, pero esta situación se invierte a presiones grandes, debido a que en este último caso ocurren cambios importantes en el grado de orientación de las partículas, que crece en forma de pequeños colapsos. Bajo presiones muy grandes, las dos muestras llegan a una estructura similar, lo que se manifiesta en una misma relación de vacíos.

La mayor expansividad de los suelos compactados en la rama seca al absorber agua, se atribuye a que en este caso se tienen distancias mucho menores entre los arreglos de sus partículas, con lo que sus fuerzas de repulsión crecen mucho cuando aumenta el contenido de agua por absorción. La expansividad de los suelos finos compactados crece mucho con la energía de compactación.

No es fácil generalizar si el comportamiento de un suelo compactado en la rama seca es mejor o peor que el del mismo compactado en la rama húmeda. Ello depende de las características que se desee que el suelo adquiera. El suelo compactado del lado seco será menos compresible al final de la compactación y más expansivo si llega a absorber agua; obviamente, será también más rígido. Al compactar el suelo en la rama húmeda se obtendrá un material más compresible, menos expansivo y menos susceptible al agrietamiento.

Una vez compactado un suelo en un terraplén, se inicia en él una serie de cambios en el estado de esfuerzos, en su volumen, en contenidos de agua y condiciones de saturación y otros, cuya reproducción en el laboratorio ha resultado hasta la fecha prácticamente imposible. Las circunstancias que más influyen en esos cambios son el peso del suelo suprayacente y los cambios en el contenido de agua por consolidación o

expansión. El potencial de expansión, muy relacionado con el grado de orientación de la estructura resultante, depende por ello mucho del método de compactación (Fig. 7).

La Fig. 16 puede considerarse como representativa, cualitativamente hablando de la expansividad y compresibilidad de los suelos finos, según sean compactados del lado húmedo o seco y con diferentes métodos de compactación.

La compresibilidad de los suelos compactados, para presiones mayores que la "preconsolidación" causada por la compactación, es tanto mayor cuanto más alto sea el contenido de agua de compactación (Ref. 6) .si el suelo se llega a saturar, la compresibilidad es prácticamente independiente del contenido de agua de compactación (Ref. 6).

Finalmente, se considera de interés la información, cualitativamente general, que se presenta en la Fig. 17 para un caso particular y que relaciona la presión de compactación con el potencial de expansión en los suelos finos. En el caso particular de que se trata, una arcilla fue compactada por métodos estáticos.

C -Resistencia al esfuerzo cortante.

Desde un punto de vista que contemple las acciones externas y el arreglo estructural, la resistencia al esfuerzo cortante de las arcillas depende del esfuerzo normal efectivo aplicado y de las mínimas distancias entre las partículas y/o sus arreglos solidarios. La distancia mínima depende de la relación de vacíos y de la orientación, en tanto que el esfuerzo efectivo correspondiente a una determinada condición de los esfuerzos exteriores depende de la presión en el agua, que, a su vez, es función de la relación de vacíos, del grado

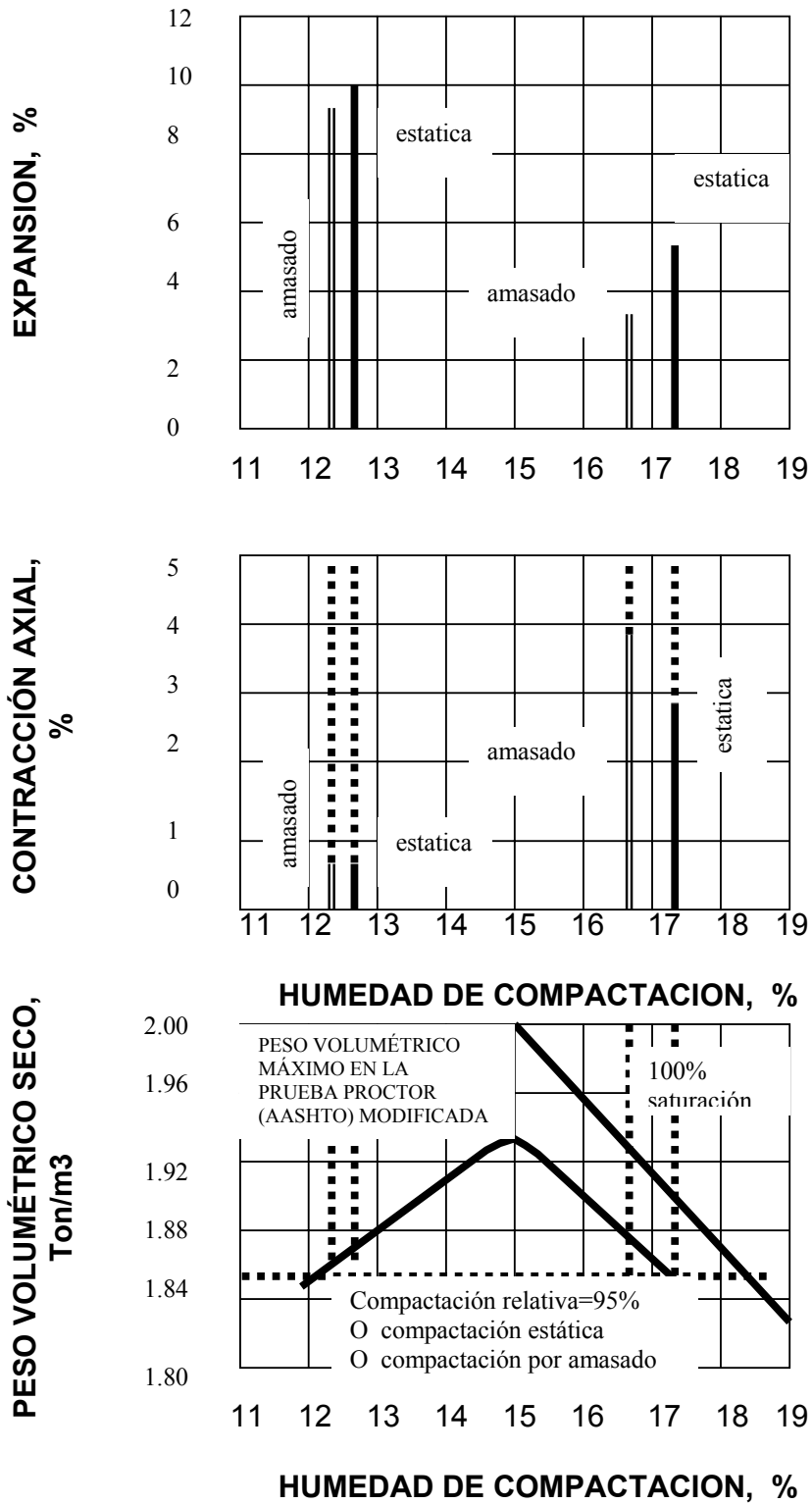


Figura 16. Expansión y contracción de una arcilla arenosa compactada estáticamente y por amasado.

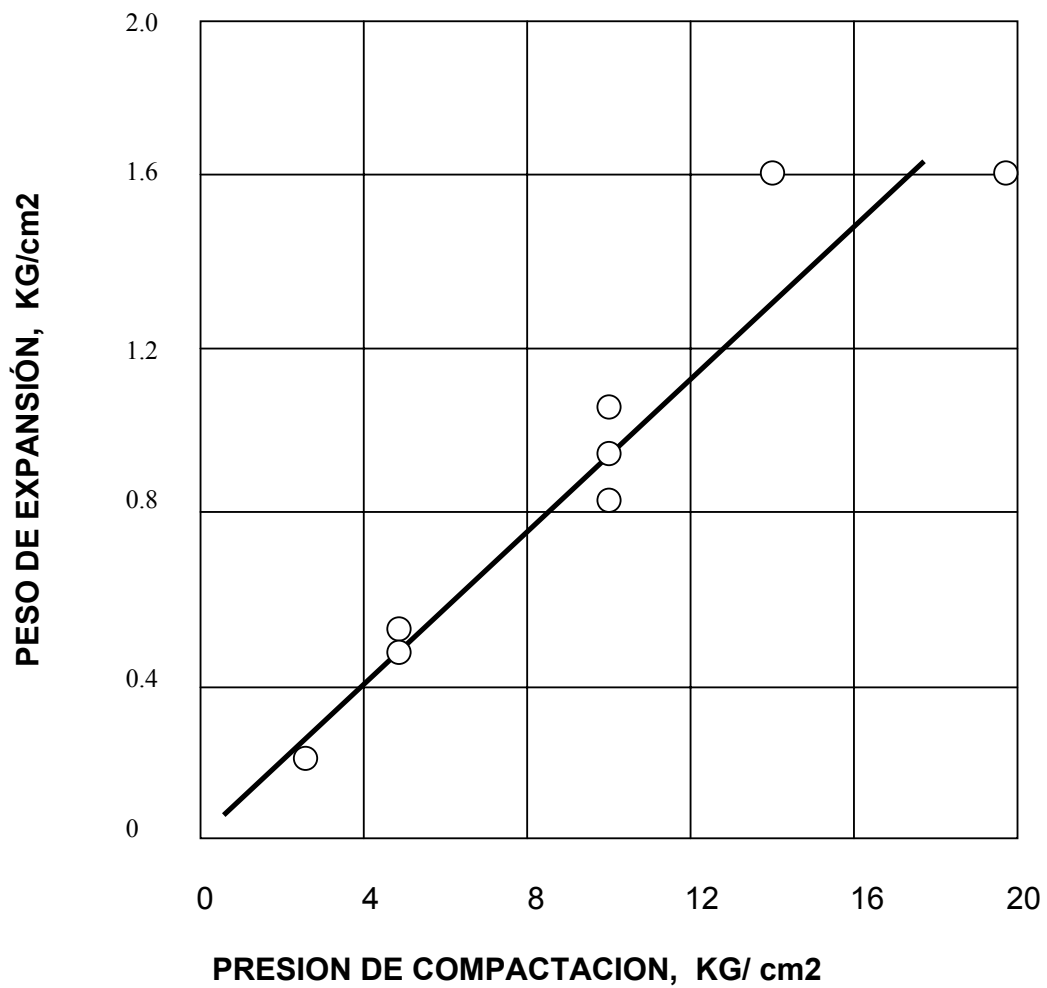


Figura 17. Relación entre la presión estática de compactación y la presión de expansión en una arcilla.

de saturación y, otra vez, de la estructuración adquirida por el suelo.

En consecuencia relación de vacíos, grado de saturación y estructura adquirida gobiernan tanto la resistencia como las características esfuerzo-deformación de las arcillas compactadas.

Si en los suelos finos compactados se desarrollan presiones neutrales negativas después de la compactación, estas estarán relacionadas con el grado de saturación (serán mayores cuanto menor sea éste) y con la energía de compactación empleada, de manera que si se desarrollan presiones de polo negativas, serán mayores cuanto mayor haya sido la energía de compactación.

En problemas relativos al comportamiento de terraplenes de suelos finos compactados en vias terrestres (carreteras, ferrocarriles, aeropistas, bordos de protección y otras estructuras similares) es muy frecuente que se presenten siquiera en forma aproximada las condiciones denominadas de resistencia crítica inicial. En ellas la resistencia adquirida por el terraplén recién compactado no es muy diferente a lo largo de la vida de la estructura; pues los cambios que más frecuentemente se presentan son de dos clases que, de algún modo, tienden a compensarse. Por un lado, tenderá a producirse una cierta consolidación de los suelos finos bajo el peso del material sobreyacente y este efecto producirá un determinado incremento en la resistencia al corte; por otro lado; el contenido de agua de un terraplén recién colocado tiende a crecer algo en los primeros tiempos de la vida de la estructura, hasta alcanzar la denominada humedad de equilibrio, la cual parece ser bastante más uniforme con el tiempo de lo que en alguna época pensó y ello aún considerando variaciones estacionales de clima tan acusadas como pueden darse en muchas regiones de México. El

contenido de agua de los suelos finos recién compactados tiende a crecer por dos efectos; en primer lugar, por ascensión capilar, a partir de un terreno de cimentación que usualmente presenta potencial capilar suficiente y, en segundo lugar, porque la colocación del propio terraplén protege de la evaporación a todo terreno subyacente, sea natural o del propio terraplén. Esta humedad de equilibrio, superior en general a la de compactación, tiende a producir cierta disminución neta en la resistencia al corte de los materiales constituyentes del terraplén. En muchas mediciones de campo realizadas en México o reportadas en la literatura puede verse que el aumento de la resistencia por consolidación propia y la disminución de la misma por el incremento en el contenido de agua en el interior de la estructura hacen que la resistencia que finalmente se alcanza no sea muy diferente de la que correspondía al terraplén recién colocado; las mediciones de campo han hecho ver también que esa condición finalmente alcanzada tiende a mantenerse con el tiempo y con las variaciones estacionales. Lo anterior es cierto en los terraplenes de altura usual en este tipo de obras; en terraplenes muy altos, el efecto de consolidación puede predominar y en terraplenes muy bajos puede hacerse más notorio el efecto de cambios estacionales en el contenido de agua interno.

Así, el pensar que la resistencia al corte inicial que posee el suelo fino que constituye el terraplén es la que gobierna su comportamiento futuro, en la gran mayoría de los casos es una hipótesis de trabajo aceptable, por lo cual debe concluirse que la resistencia no drenada gobierna el comportamiento de los terraplenes típicos en las obras lineales. Esta resistencia es la que en laboratorio se obtiene usualmente con pruebas de compresión no confinada o con pruebas triaxiales sin consolidación y sin drenaje (rápidas) .Sobre este tipo de resistencia se harán en lo que sigue algunos comentarios.

La Ref. 6 incluye la información aquí presentada en la Fig. 18, en la que para un caso particular se relaciona la resistencia a la compresión simple del suelo con el grado de saturación y con el peso volumétrico adquirido, todo ello para diferentes energías de compactación, siempre proporcionada por impactos.

Los suelos cohesivos compactados exhiben resistencias no drenadas mayores (y deformabilidades menores) en la rama seca que en la húmeda y ello es válido para todos los métodos de compactación; idéntica tendencia se observa en el Valor Relativo de Soporte (VRS) (Ref. 6) .

En general la resistencia no drenada aumenta también con la energía de compactación (e igualmente disminuye la deformabilidad) , también para cualquier suelo fino y para cualquier método de compactación; sin embargo, en la Ref. 6 se señala que altas energías de compactación empleadas en el lado húmedo, pueden llegar a producir tan fuerte remoldeo que cause una disminución de la resistencia no drenada y un aumento en la deformabilidad.

Las Figs. 19 y 20 indican el comportamiento típico de los suelos arcillosos compactados en prueba triaxial sin consolidación y sin drenaje (rápida) .En todos los casos los suelos fueron probados con el grado de saturación con el que resultaron después de ser compactados. Todas las muestras fueron probadas en cámara triaxial, con una presión confinante de 4 Kg/cm² en el caso de la Fig. 19 y de 1 Kg/cm² en el caso de la Fig. 20. Al final se unieron los puntos de igual resistencia no drenada, hasta obtener las líneas llenas de las figuras.

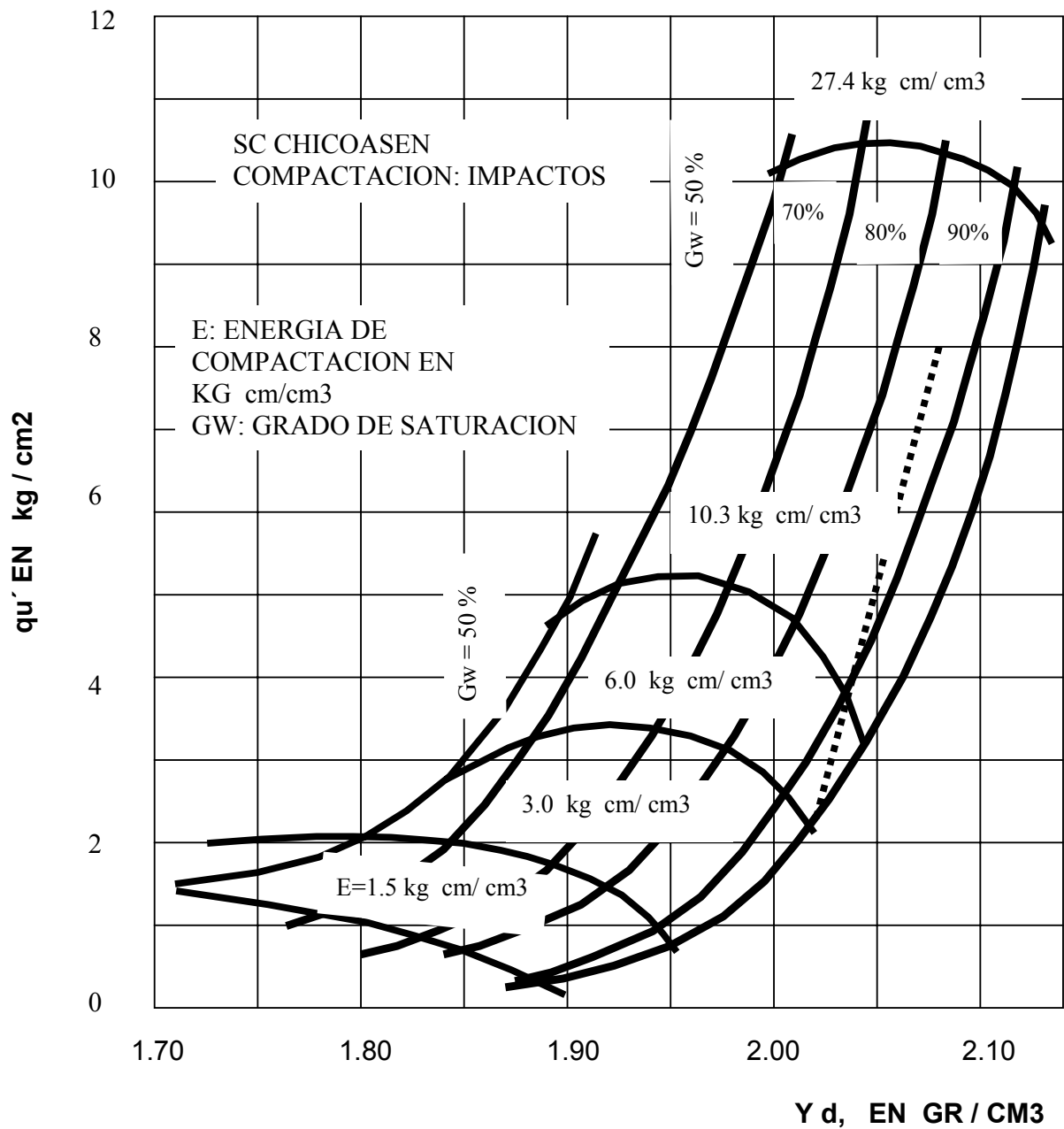


Figura 18. resistencia no confinada en función de γd para valores diferentes de G_w .

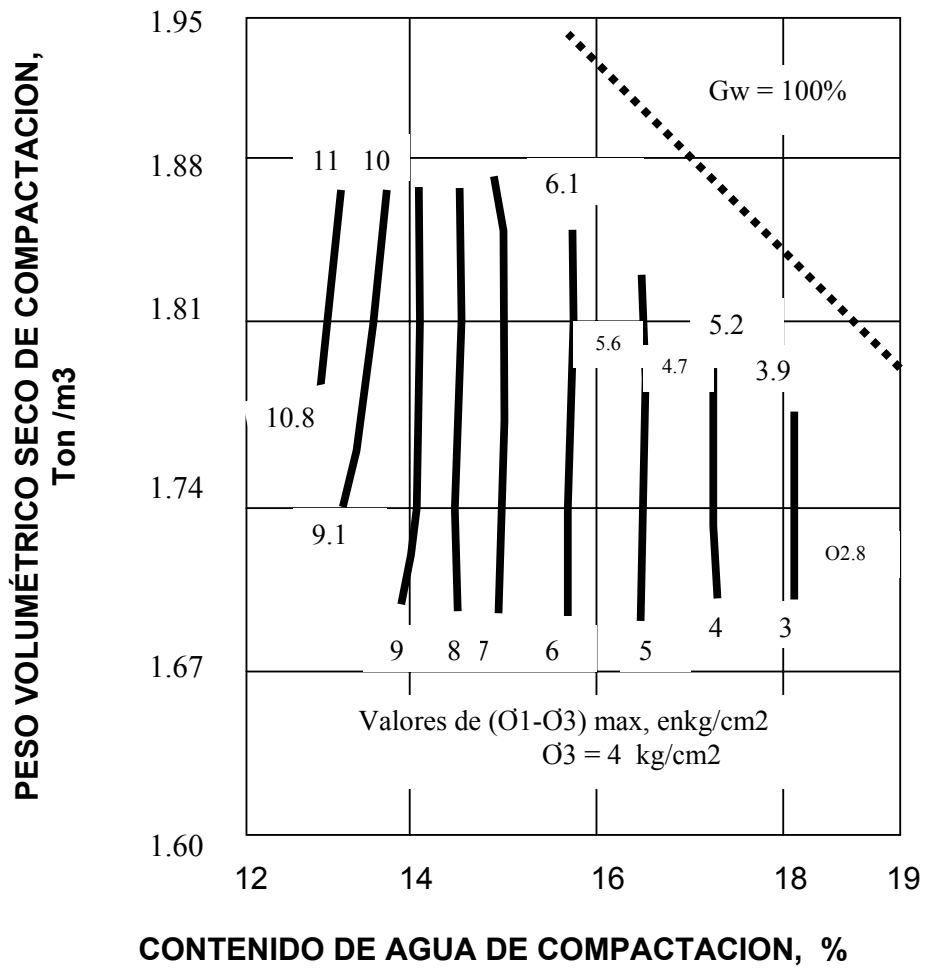


Figura 19. Líneas de igual resistencia a la compresión en prueba rápida, sin saturación previa y con presión confiante de 4 kg/cm^2 .

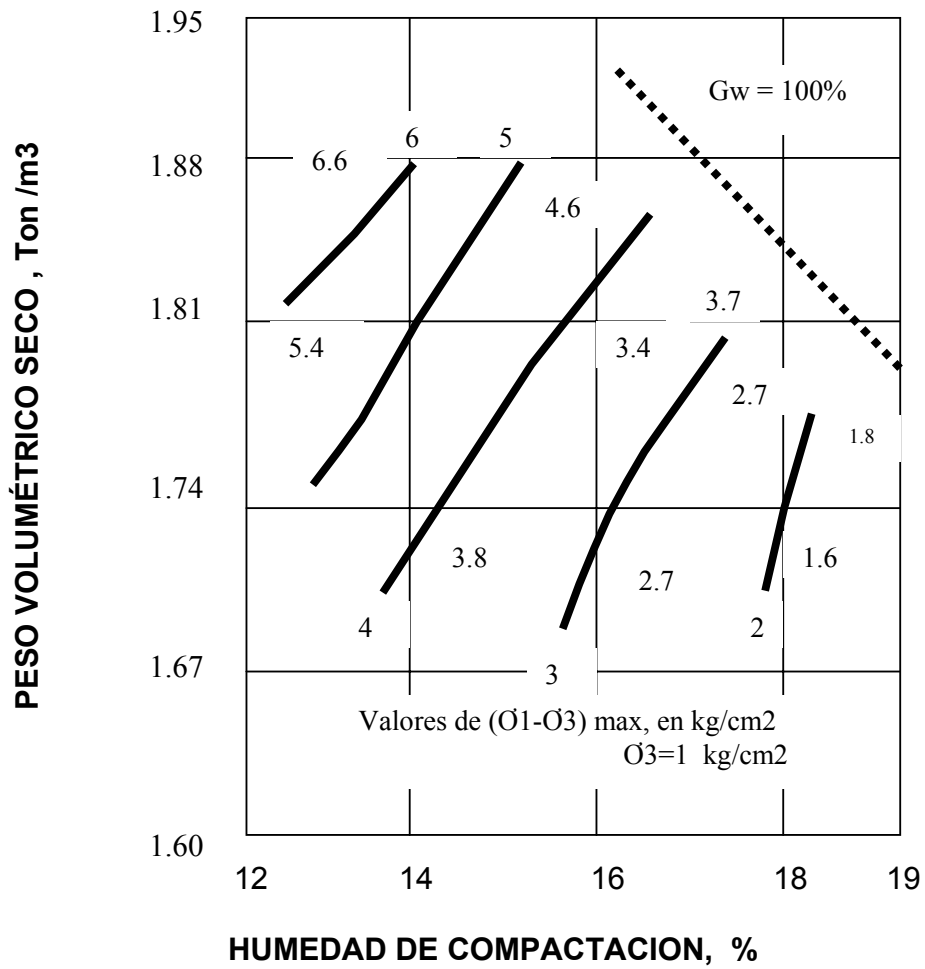


Figura 20. Líneas de igual resistencia a la compresión en prueba rápida, sin saturación previa y con presión confinante de 1 kg/cm^2 .

En el caso de la presión confinante igual a 4 Kg/cm², seguramente este valor fué suficiente para disolver el aire que quedó dentro de la muestra después de la compactación; la resistencia decrece de manera apreciable cuando aumenta el contenido de agua, pero resulta ser prácticamente independiente, para un contenido de agua dado, del peso volumétrico alcanzado; la razón de ello es que al disolverse todo el aire dentro de la muestra, prácticamente en todas ellas se llega a la misma condición interna tras aplicar la presión de la cámara, por lo que todas las muestras estaban en condiciones similares al aplicar el esfuerzo desviador. En casos reales como éste no se obtendrá ningún beneficio en resistencia por aumentar el peso volumétrico, o sea por hacer crecer la energía de compactación. Casos como este ilustran el criterio de que el aumento del peso volumétrico no necesariamente conlleva a aumentos de resistencia.

Bajo presión confinante de 1 Kg/cm² en la primera etapa de la prueba triaxial, no se alcanzó a disolver todo el aire dentro de la muestra y ahora la resistencia varia no sólo con la humedad de compactación, sino también con el peso volumétrico obtenido. El conjunto de las figuras anteriores hace ver que la relación entre resistencia y peso volumétrico alcanzado es más compleja de lo que en ocasiones se piensa. Se observa que hay casos en que la resistencia alcanzada por el suelo es prácticamente independiente del peso volumétrico obtenido (altas presiones de confinamiento) y que aún en los casos en que los pesos volumétricos a que se llegue si hagan crecer la resistencia, el efecto no es posiblemente tan drástico como para aumentar ciegamente los costos de compactación que el proceso implicaría; aún para presiones de confinamiento relativamente bajas el efecto del peso volumétrico en la resistencia es tanto menor cuanto mayor sea la humedad de compactación.

El grado de saturación influye en forma importante en la resistencia triaxial no drenada, por lo que la resistencia de un suelo dado dependerá en la vida de la obra de que el grado de saturación adquirido en la compactación se conserve o varíe. En el primer caso la resistencia depende mucho de la presión de confinamiento del suelo, pues la compresibilidad de los volúmenes de vacíos hace que varíe la oquedad. si el grado de saturación crece lo suficiente después de colocado el suelo, se llega al caso en que el comportamiento del suelo es prácticamente independiente de la presión de confinamiento. sin embargo, ya se dijo que los contenidos de agua dentro de los terraplenes normales son poco variables.

En el laboratorio (Ref. 4) si se prueban muestras en las que se produzca saturación previa del suelo compactado a volumen constante, se obtienen resistencias no drenadas que dependen muy claramente del peso volumétrico alcanzado y que naturalmente son relativamente independientes de la humedad de compactación originalmente empleada (este parámetro se modificó al permitir la saturación a volumen constante y todas las muestras llegaron a una condición similar después de ese proceso) .Esta dependencia de la resistencia con el peso volumétrico seco es tanto más cierta cuanto mayor sea la deformación unitaria para la cual se mida la resistencia.

si se define como resistencia un esfuerzo que produzca deformaciones unitarias relativamente pequeñas, tales resistencias son mayores cuanto menor sea el contenido de agua de compactación; ello se debe a que si el contenido de agua crece, aumenta el grado de orientación de las partículas y la presión neutral inducida por el esfuerzo desviador, efectos ambos que hacen bajar la resistencia del suelo. Si, por el contrario, la resistencia se define como el esfuerzo que produce al suelo, durante una prueba de laboratorio, deformaciones unitarias muy grandes, estas grandes deformaciones dan lugar a estructuras prácticamente idénticas

en todas las muestras que tengan la misma relación de vacíos, por lo que la resistencia es similar en todos los especímenes e independiente de la humedad de compactación.

La Fig. 21 ilustra las afirmaciones anteriores. Muestra el tipo de curvas esfuerzo-deformación que pueden obtenerse con especímenes de igual relación de vacíos, pero compactados uno del lado seco y el otro del húmedo en la curva de compactación.

Se aprecia la mayor rigidez de las estructuras menos orientadas y como las resistencias tienden a igualarse en las deformaciones grandes, cuando llega a ser similar el grado de orientación en ambos especímenes.

Todo lo anterior hace ver el importante efecto que en la resistencia no drenada tiene la estructuración adquirida por el suelo durante la compactación. Por lo tanto, hace ver la gran influencia del método de compactación en la resistencia adquirida por el suelo, pues, como se señaló repetidamente en este trabajo, los diferentes métodos de compactación conducen a estructuraciones diferentes de las partículas o aglomeraciones de partículas de los suelos compactados, que de hecho oscilan entre alto grado de orientación y alto grado de dispersión. La Fig. 22 (Ref. 15) corrobora este importante efecto para muestras llevadas al laboratorio hasta el mismo peso volumétrico seco, con el mismo contenido de agua, utilizando diferentes métodos de compactación.

En el caso de la figura la resistencia fué definida como un esfuerzo relacionado con valores de deformación unitaria comparativamente pequeños (5%) y altos (20 %) .Aparece una comparación de los efectos de la compactación estática y por amasado de tres suelos diferentes y se compara la resistencia relativa obtenida por ambos métodos para diferentes contenidos de agua. Para deformaciones unitarias bajas

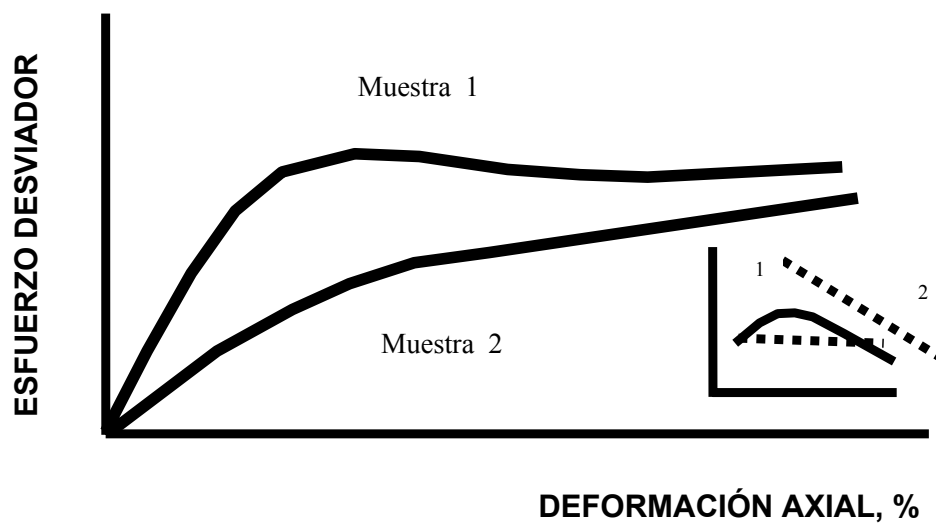


Figura 21. Relaciones esfuerzo – deformación en prueba rápida (con saturación previa a volumen constante) de muestras compactadas a mismo peso volumétrico con diferente contenido de agua.

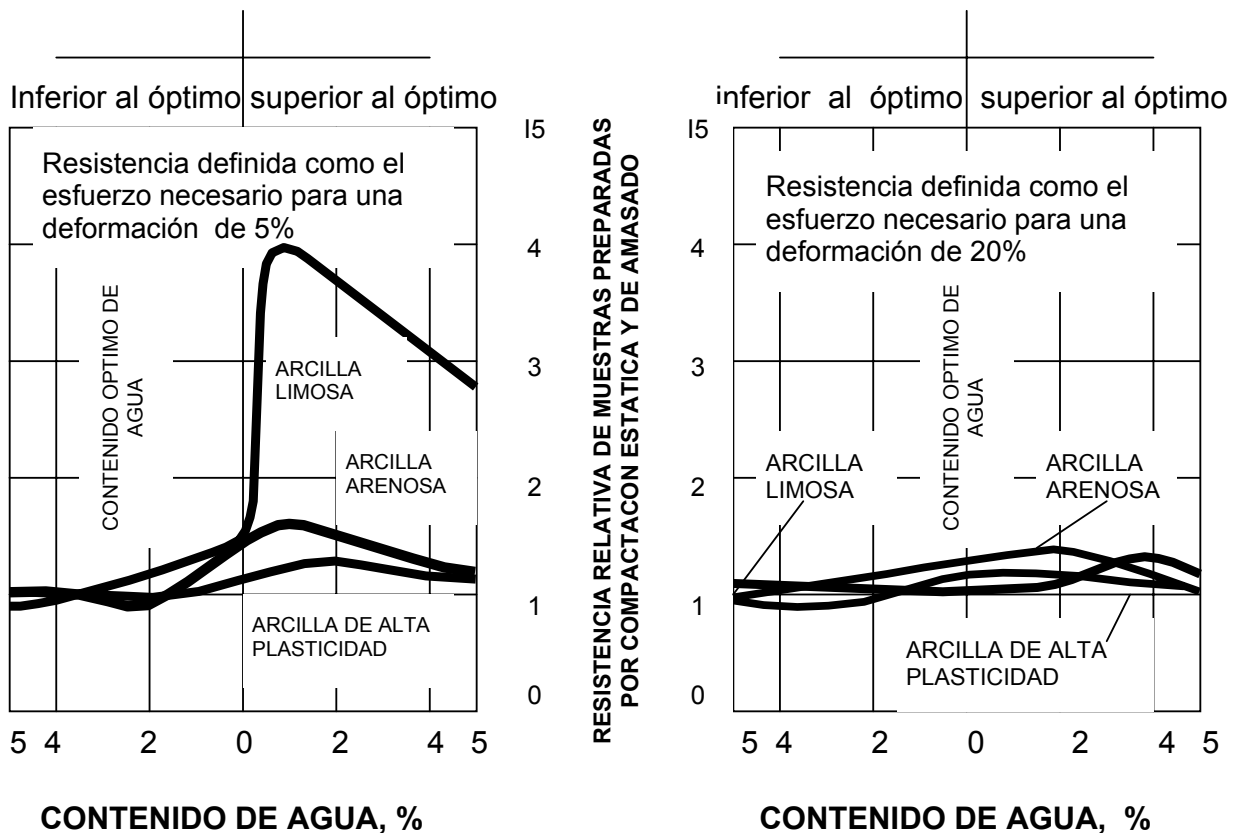


Figura 22. Efectos de procedimientos de compactación en la resistencia en prueba rápida (saturación previa de muestras compactadas a mismos γ_d y w) con compactación estática y de amasado.

(seguramente prevalecientes en los terraplenes normales de las vias terrestres), la compactación estática conduce a resistencias que pueden ser varias veces mayores que las que se obtienen por amasado, si bien este efecto se manifiesta con contenidos de agua superiores al óptimo del proceso de compactación (rama húmeda) y se observa que, como atrás quedó explicado, las resistencias tienden a ser muy uniformes para deformaciones unitarias muy altas. Los resultados mostrados deben conducir a una fuerte reserva por parte de los proyectistas a la utilización de la prueba estática de compactación como prueba para proyecto de estructuras térreas, dado que los actuales métodos de compactación usados en el campo se alinean definitivamente en el lado de los métodos de amasado. De no tomar en cuenta estos hechos podrían asignarse a las estructuras térreas resistencias del lado de la inseguridad, generando una incongruencia entre proyecto y resultados de campo.

Toda la discusión realizada en este apartado debe conducir al criterio de que la resistencia no drenada de un suelo fino no siempre está ligada al peso volumétrico de la manera en que frecuentemente suele pensarse, juzgando que a mayor peso volumétrico se obtiene invariablemente una mayor resistencia y una "mejor" compactación. Puede verse como la resistencia puede ser prácticamente independiente del peso volumétrico alcanzado y, en esos casos, la lucha por mejorar este último concepto resultará un dispendio inútil (independientemente de que al hacer aumentar dicho peso volumétrico puedan perjudicarse muchas otras características del suelo, tales como su estabilidad ante el agrietamiento o su futura expansividad ante la absorción de agua). Otros casos podrá haber en que el aumento del peso volumétrico se refleje poco en el aumento de resistencia y aún en los casos atrás detallados en que la resistencia no drenada crece claramente con el peso volumétrico obtenido, debe observarse que este efecto se produce cada vez en menor escala según el grado de

saturación se vaya acercando al 100 % y que esa resistencia puede también disminuir en esos casos, con aumentos del grado de saturación a valores claramente cercanos al 100 %. Finalmente, si los aumentos de resistencia se logran en el laboratorio con compactación estática muy enérgica, esos altos pesos volumétricos pudieran tener poca significación en el campo.

No dejan de presentarse en problemas conectados con la construcción de terraplenes para obras de transporte casos en los que la resistencia crítica del suelo sea la final, en decir, la que el suelo alcance cuando hayan ocurrido en él los cambios en volumen, contenido de agua y condiciones de saturación que puedan considerarse más desfavorables dentro de su vida útil. Es sabido que esta resistencia es la que en el laboratorio se hace corresponder a la obtenida en una prueba con consolidación y con drenaje (lenta).

Para fines prácticos, también en estos problemas conviene considerar como un límite de comportamiento, la resistencia en condiciones de saturación, aún cuando deba reconocerse que esta condición no es un evento frecuente en los terraplenes de las vias terrestres. La relativamente poca experiencia de que se dispone indica que para presiones de consolidación superiores a 1 Kg/cm² la resistencia drenada es similar con y sin saturación previa.

La Fig. 23 (Refs. 14 y 16) muestra los efectos de las condiciones de compactación y de la presión confinante en la resistencia drenada de los suelos arcillosos compactados; las pruebas específicas que se muestran se realizaron sin saturación previa y aparecen resultados con presiones de consolidación de 4 y 8 Kg/cm².

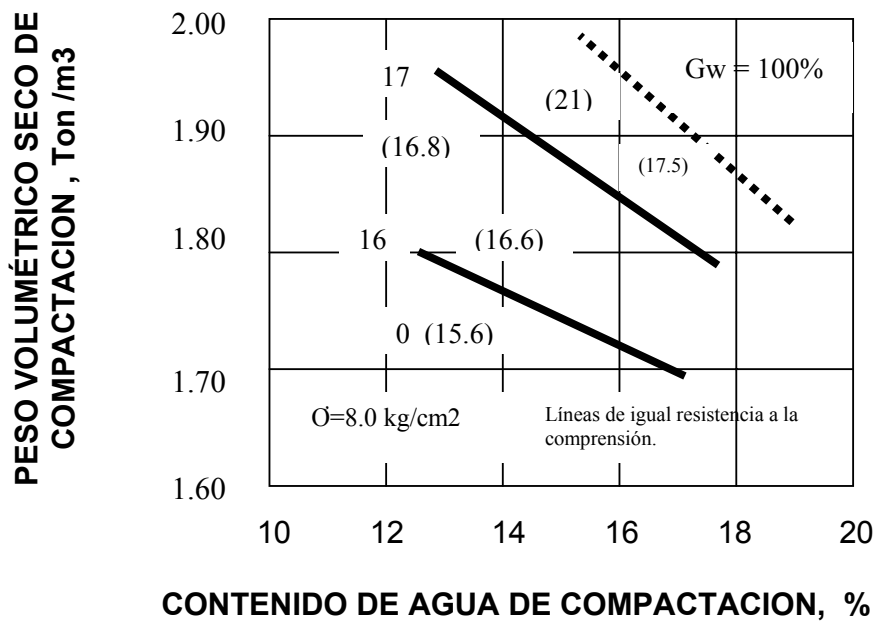
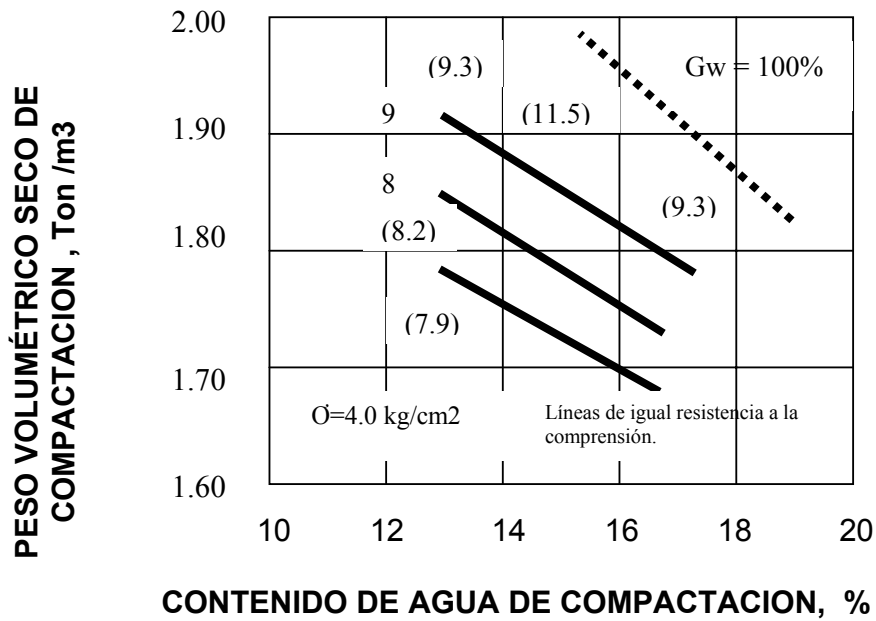


Figura 23. Efectos de las condiciones de compactación y de la presión efectiva en la resistencia drenada, sin saturación previa.

A contenido de agua de compactación constante, la resistencia a largo plazo crece con el peso volumétrico seco, debido al menor espaciamiento que van logrando las partículas o sus arreglos cuando aumenta esta última magnitud. A peso volumétrico seco constante, la compresibilidad crece con el contenido de agua de compactación y, por esa razón, disminuye el espaciamiento infraestructural en el instante de la falla, de manera que, en definitiva, la resistencia en prueba lenta aumenta al crecer el contenido de agua de compactación (siempre considerando el mismo peso volumétrico seco).

D-Tubificación.

La tubificación no es un evento frecuente en obras viales para el transporte, pero tampoco es una situación imposible de encontrar (terraplenes cruzando vasos de presas ó esteros ó situaciones equivalentes) .La resistencia a este efecto, tan importante en presas de tierra y bordos de protección depende de la trabazón interna estructural, determinada por la geometría de la estructura y por la magnitud de las fuerzas electromagnéticas entre los componentes estructurales. En las arcillas suele haber partículas libres tan pequeñas como para emigrar a través de los poros, si están en suspensión; así, para una misma permeabilidad, un suelo arcilloso será tanto más susceptible a la tubificación, cuanto mayores sean las fuerzas de repulsión entre sus unidades sólidas.

La compactación del lado seco produce, como se dijo, bajo grado de orientación estructural y alta permeabilidad; si en tal caso ocurre flujo de agua a través de la masa de suelo y éste se lava con agua con baja concentración de sales, aumentarán las fuerzas de repulsión de las partículas y, por ende, la susceptibilidad al fenómeno. Si la compactación se hace del lado húmedo, efectos contrarios producen menor susceptibilidad a la tubificación.

E -Valor relativo de soporte.

La prueba de valor relativo de soporte es ampliamente usada todavía en la tecnología mundial de pavimentos como prueba de diseño y para fijar normas de calidad en los materiales. A reserva de que sobre este tema se hacen comentarios adicionales en alguno de los apéndices de este trabajo, se incluye alguna información en los párrafos siguientes sobre la relación de este valor con el proceso de compactación.

Desde luego parece posible afirmar como preámbulo general que el VRS, dadas sus condiciones de prueba y su representatividad intrínseca, no debe ser considerado como un índice confiable del comportamiento mecánico de un suelo; expresa, cuando más, un conjunto de características circunstanciales.

La Fig. 24 (Ref. 4) muestra la variación del valor relativo de soporte de una arcilla limosa en las condiciones de compactación, probando al material con el contenido de agua con el que se compactó y con el correspondiente a la absorción de agua que tuvo lugar tras 4 días de exposición a un proceso de saturación por absorción libre.

Se observa la fuerte dependencia del VRS con el contenido de agua y con el peso volumétrico alcanzado y la reducción drástica del índice cuando se permiten aumentos posteriores al contenido de agua del suelo. Resalta la conveniencia de compactar con humedades no inferiores a la óptima en aquellos casos en que la expansión posterior del suelo constituya una característica de preocupar.

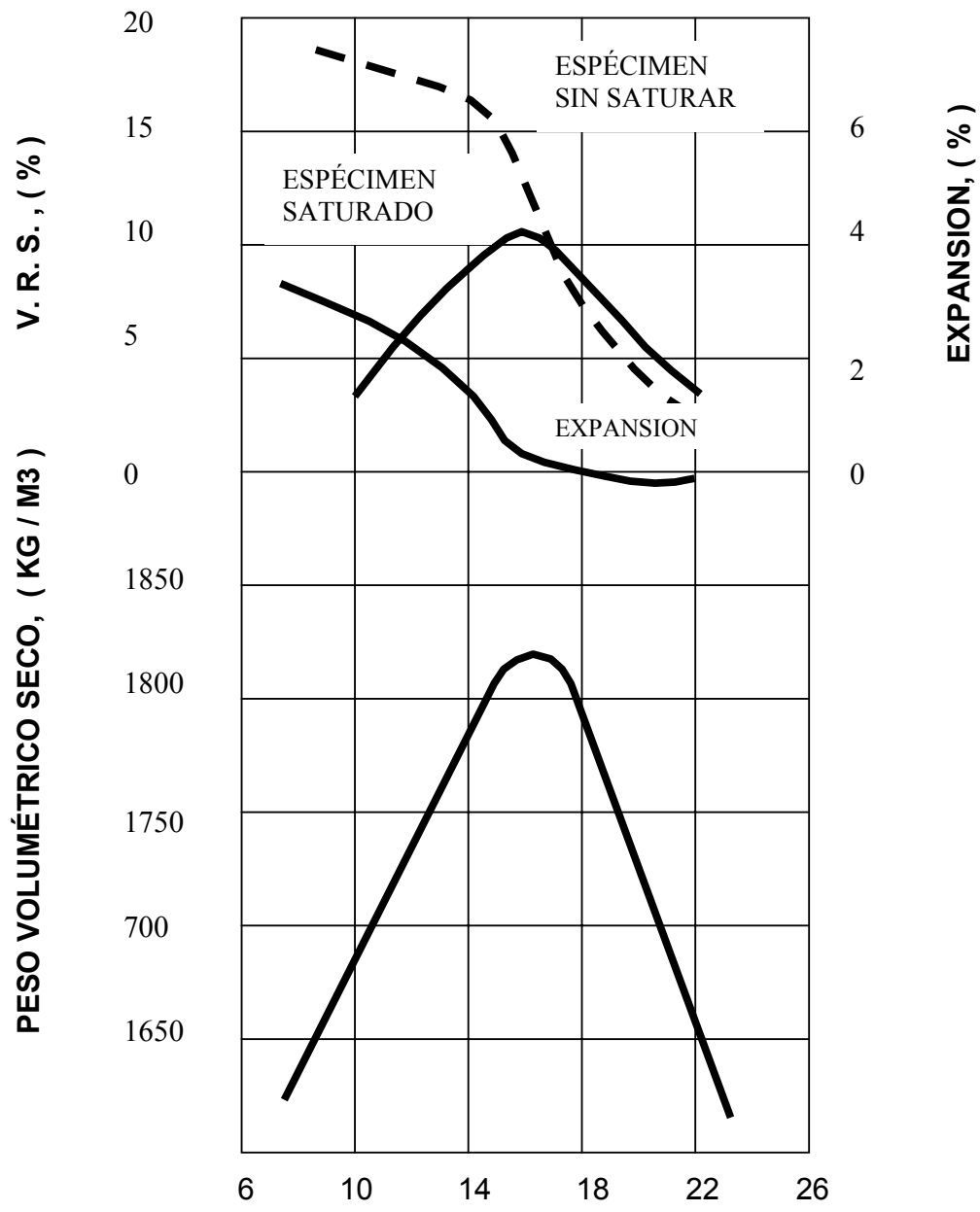


Figura 24. Variación del V. R. S. De una arcilla limosa con la compactación.

En muchas arcillas activas, el VRS aumenta cuando crece el contenido de agua pero se mantiene constante el peso volumétrico seco; también en es-tos suelos el VRS tiende a aumentar al crecer dicho peso volumétrico seco, pero esa tendencia tiene un límite a partir del cual crecimientos posteriores del peso volumétrico seco producen disminución del VRS, para cualquier contenido de agua práctico. Estos hechos deben invitar, una vez más, a reflexionar sobre el criterio de que una más intensa compactación se refleja siempre en un mejoramiento de propiedades mecánicas o circunstanciales que un ingeniero pueda desear obtener.

La disminución del VRS con el aumento del peso volumétrico seco más allá de un cierto límite es el resultado del aumento de presiones neutrales en el agua contenida en el suelo al extremar el proceso de compactación.

F -Resumen de algunos patrones de comportamiento de suelos finos compactados.

En la excelente Ref. 6, también publicada por el Instituto Mexicano del Transporte, se presenta una tabla que resume algunos patrones de comportamiento de especímenes de suelos finos compactados en la rama seca o en la rama húmeda. Dicha Tabla No.6 se incluye en este trabajo, afrontando el riesgo de la repetición por su alto valor didáctico.

TABLA VI

Patrones de comportamiento de especímenes compactados en las ramas seca y húmeda (semejante ϵ_d y diferencias sustanciales en el G_w y la microestructura).

PARÁMETRO O PROPIEDAD	RAMA SECA	RAMA HUMEDA
Contracción por secado	Baja	Alta
Expansión por aumento de contenido	Alta	Baja
Presión de expansión	Alta	Baja
Microestructura	Partículas agrupadas en forma desordenada	Partículas agrupadas y con marcada orientación
Bajo esfuerzo cortante Como se les compacta: Comportamiento Esfuerzo – deformación	Rígido – plástico o francamente frágil	Plástico
Resistencia máxima	Mayor	Menor
Deformación a la falla	Menos de 2 %	Más de 5 %
Presión de poro durante la construcción	Baja	Alta
Después de saturados a mismo peso vol. Seco:		
Resistencia máxima	Menor que en rama húmeda	Mayor que en rama seca
Comportamiento	Rígido – plástico	Plástico
Esfuerzo-deformación		
Deformación a la falla	Menos de 5 %	Más de 10 %

APENDICE A

COMPORTAMIENTO MECANICO DE ALGUNOS SUELOS COMPACTADOS POR CUATRO METODOS INCLUYENDO VIBRACION. (Ref. 17)

1. Introducción.

En este Apéndice se estudian las propiedades adquiridas por tres suelos finos, cuyas plasticidades cubren un amplio espectro, cuando se compactan en el laboratorio por los métodos estático, dinámico, de amasado y de vibración, siempre hasta el mismo peso volumétrico seco. El efecto del tiempo se estudia repitiendo los ensayos con especímenes almacenados tres meses en cuarto húmedo.

2. Suelos utilizados:

Suelo (CH) $w_L = 79 \%$; $W_p = 26 \%$; 90 % menor que la malla No.200

Suelo (CL) $w_L = 36 \%$; $W_p = 22 \%$; 70% pasa malla No.200

Suelo (S~1) $w_L = 20 \%$; W_p inapreciable; 100 % pasa malla No.4 y 40% pasa malla No.200.

3. Ensayes efectuados.

Cada uno de los tres suelos se compactó hasta dos pesos volumétricos y con dos contenidos de agua para cada peso, obteniéndose por los cuatro métodos de compactación 48 especímenes diferentes. A partir de éstos se labraron probetas de 3.5 cm de diámetro que se ensayaron en cámara triaxial y probetas que se ensayaron en consolidómetro convencional. Los valores de V.R.S. se obtuvieron al penetrar los especímenes en los propios moldes de compactación. Todos los especímenes se fabricaron por

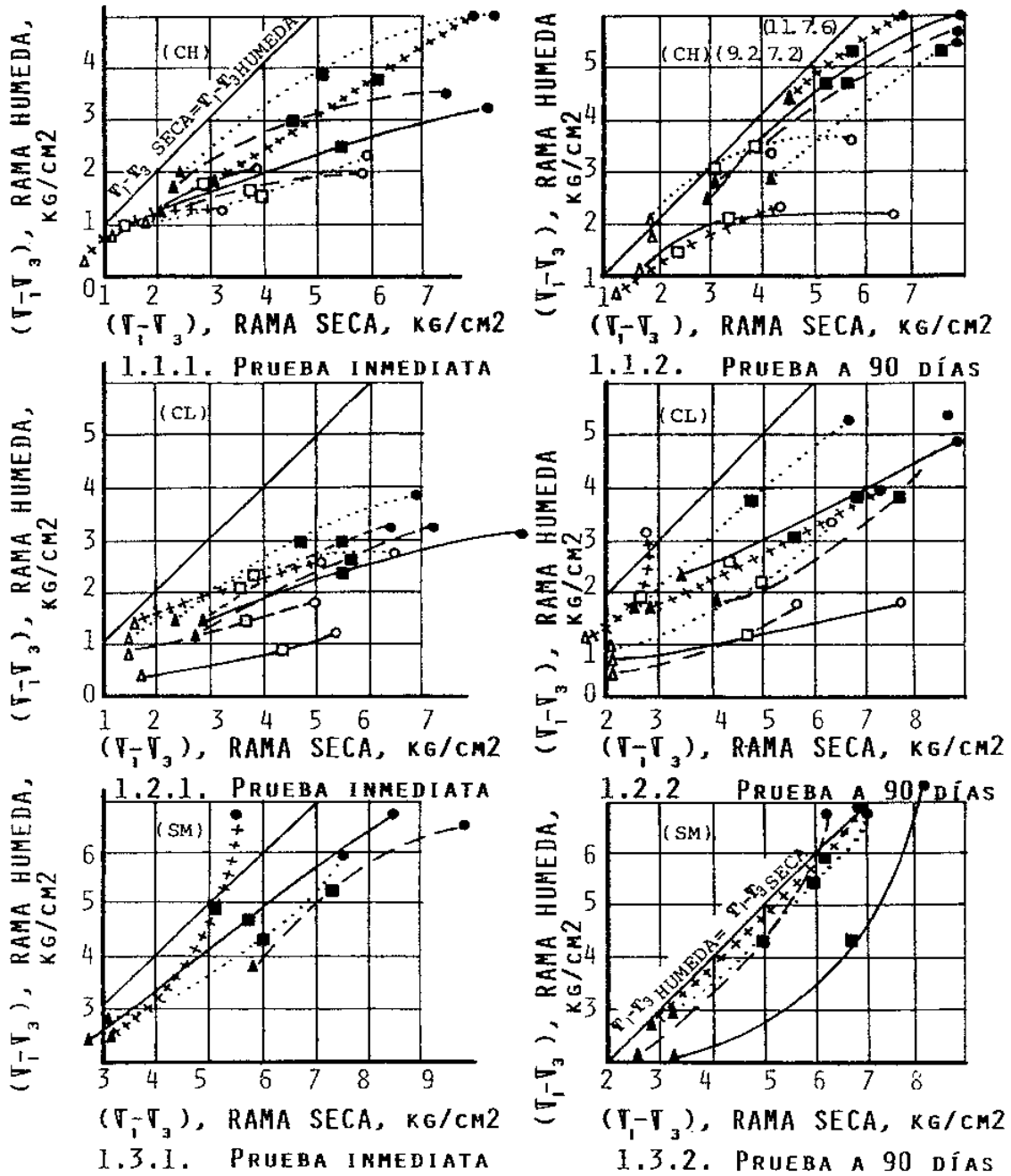
duplicado, para ensayar la primera serie de inmediato y la segunda tras 90 días de reposo en cuarto húmedo, o 72 Hs de inmersión para los ensayos de V.R.S. Se ensayaron así 96 especímenes diferentes en tres tipos de pruebas, o sea un total de 288 ensayos.

Dos de los contenidos de agua de compactación, son los correspondientes al 95 % del peso volumétrico seco máximo, uno en la rama seca y otro en la rama húmeda, de la curva de compactación AASHTO estándar. Los otros dos contenidos de agua corresponden a la prueba ASSHTO modificada. Los pesos volumétricos corresponden al 95 % de los propios ensayos ASSHTO estándar (energía específica de 6.05 Kg cm/cm³) y modificado (energía específica 16.38 Kg cm/cm³).

La compactación estática se efectuó en molde de 15 cm (6") , varillando el material por capas y aplicándole al espécimen la carga necesaria para alcanzar el peso volumétrico preestablecido. La compactación dinámica también se efectuó en molde de 15 cm (6") .Para la compactación por amasado se utilizó el compactador Hveem variando la presión máxima y el número de aplicaciones a modo de alcanzar los pesos volumétricos deseados. La compactación por vibración se efectuó combinando una mesa vibratoria tipo ASTM, con la carga estática necesaria para alcanzar el peso volumétrico preestablecido.

4. Resultados obtenidos.

La Fig. A-I resume las resistencias y, hasta cierto punto, el comportamiento esfuerzo deformación, al comparar el esfuerzo desviador resistido por los especímenes compactados del lado seco con el correspondiente a los especímenes compactados del lado húmedo. Las comparaciones se hacen a niveles de deformación de 1.25, 2.5 y 5 %, bajo presión



CLAVE

ENERGIA		METODO	
EST.	MODIF.	DINAMICO	
△ δ = 1.25 %	▲	—	ESTATICO
□ = 2.50 %	■	- - -	AMASADO
○ = 5.00 %	●	+++	VIBRACION

Figura A-1 Efecto del método, energía y contenido de agua de compactación en la resistencia inmediata y a 90 días.

confinante de 2 Kg/cm². La información presentada merece los siguientes comentarios:

a. La resistencia en la rama seca es mayor que en la húmeda para prácticamente todos los casos. La tendencia es más clara en los suelos más plásticos.

b. A mayores pesos volumétricos las diferencias en la estructura adquirida del lado seco y del lado húmedo son mayores. Dichas diferencias son más notorias a mayores niveles de deformación. En la arcilla CH la resistencia crece con el peso volumétrico para cualquiera de los tres niveles de deformación; este aumento es mayor en el lado seco que en el húmedo, lo que implica que las diferencias en estructura son mayores a mayores energías de compactación; este efecto disminuye con la plasticidad.

c. Los métodos de compactación producen diferencias en la resistencia que son más acusadas en los suelos más plásticos compactados con mayor energía del lado húmedo y en los suelos menos plásticos compactados con mayor energía del lado húmedo y en los suelos menos plásticos, compactados del lado seco.

d. Almacenar a los suelos en cuarto húmedo no produjo cambios significativos en los no plásticos, aunque se observa la tendencia a parecerse más las resistencias del lado seco y del húmedo. En el CH produjo incrementos en la resistencia y una menor diferencia entre la resistencia del lado seco y del húmedo, lo que equivale a menores diferencias en estructura.

En el CL se observó la misma tendencia, acercándose las curvas a la línea a 45° pero la influencia del método de compactación parece ser ahora más importante.

e. Información adicional sobre matices en las diferencias puede ser obtenida de las gráficas; por ejemplo, en los suelos CH la permanencia de las resistencias obtenidas con

métodos estáticos del lado seco parece ser muy problemática a partir de las condiciones iniciales, efecto que se diluye hacia los suelos menos plásticos.

La Fig. A-2 compara la compresibilidad (medida por la variación de la relación de vacíos para incrementos de presión fijos) que los suelos mostraron en la rama húmeda con la de la rama seca, para los cuatro métodos de compactación. De esta Figura pueden hacerse los siguientes comentarios:

a. Resultan notoriamente menos compresibles los suelos compactados con mayor energía.

b. El suelo CH probado de inmediato mostró mayor compresibilidad en el lado seco bajo presiones de importancia. Cuando éstas son pequeñas, la compresibilidad en el lado húmedo es mayor o tiende a ser similar en ambas ramas. Parece obvio que para presiones suficientemente altas ambas compresibilidades deben igualarse. Lo anterior es especialmente cierto para la vibración y el amasado; para el método dinámico, la tendencia se invierte y para los suelos compactados estáticamente ambas compresibilidades tienden a ser siempre muy parecidas, si bien para presiones medias es mayor en la rama seca y para presiones grandes en la húmeda.

c. En los suelos CH probados tras 90 días se mantienen las tendencias anteriores, pero se observen cambios significativos, especialmente en el amasado, donde los suelos compactados con mayor energía se acercaron al comportamiento de los compactados con menor energía, pero probados de inmediato. La vibración y energía alta derivó hacia mayor compresibilidad en la rama seca para altas presiones. El tiempo de reposo también produjo modificaciones en los especímenes compactados estática y dinámicamente.

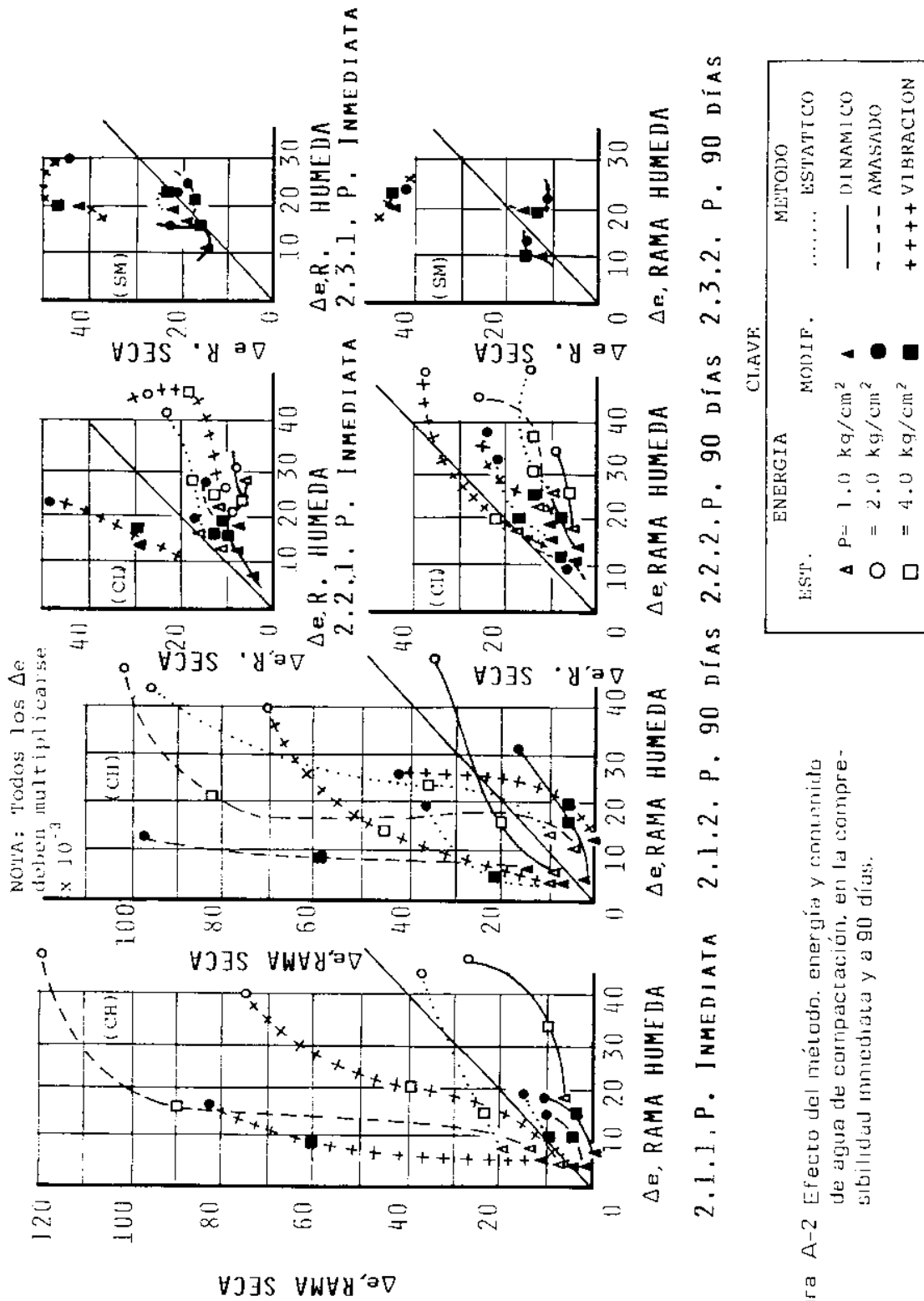


Figura A-2 Efecto del método, energía y contenido de agua de compactación, en la compresibilidad inmediata y a 90 días.

d. Los suelos CL probados de inmediato mostraron mayor compresibilidad en la rama húmeda en todos los casos, excepto para la vibración con alta energía. Una vez más se observa que la vibración produce los suelos más compresibles en términos absolutos. Trás el periodo de reposo, los suelos compactados por vibración muestran cambios estructurales que acercan las compresibilidades de la rama seca y de la húmeda; cuando se emplea energía alta, la compresibilidad en la rama húmeda aumenta, en tanto que para bajas energías, durante el período de reposo aumenta la compresibilidad en la rama seca.

e. En los suelos SM probados de inmediato el contenido de agua de compactación y el período de reposo no afectan la compresibilidad, aunque la vibración se aparta de esta tendencia, pues la resistencia en la rama seca aumenta notablemente mientras que en la húmeda se conserva. En este caso, los suelos compactados por vibración en la rama seca alcanzaron pesos volumétricos 3 % menores, diferencia que no se considera significativa.

La Fig. A-3 muestra los valores de V.R.S. obtenidos. De ellos se hacen los siguientes comentarios:

a. El V.R.S. aumenta con la energía de compactación.

b. Los V.R.S. en la rama seca son mayores que los de la rama húmeda.

c. Tras el período de inmersión, los VRS del suelo CH son prácticamente iguales para cualquiera de las dos energías, confirmando la reconocida tendencia de esta prueba de perder toda capacidad de matizar a los suelos finos cuando se les sumerge después de compactados.

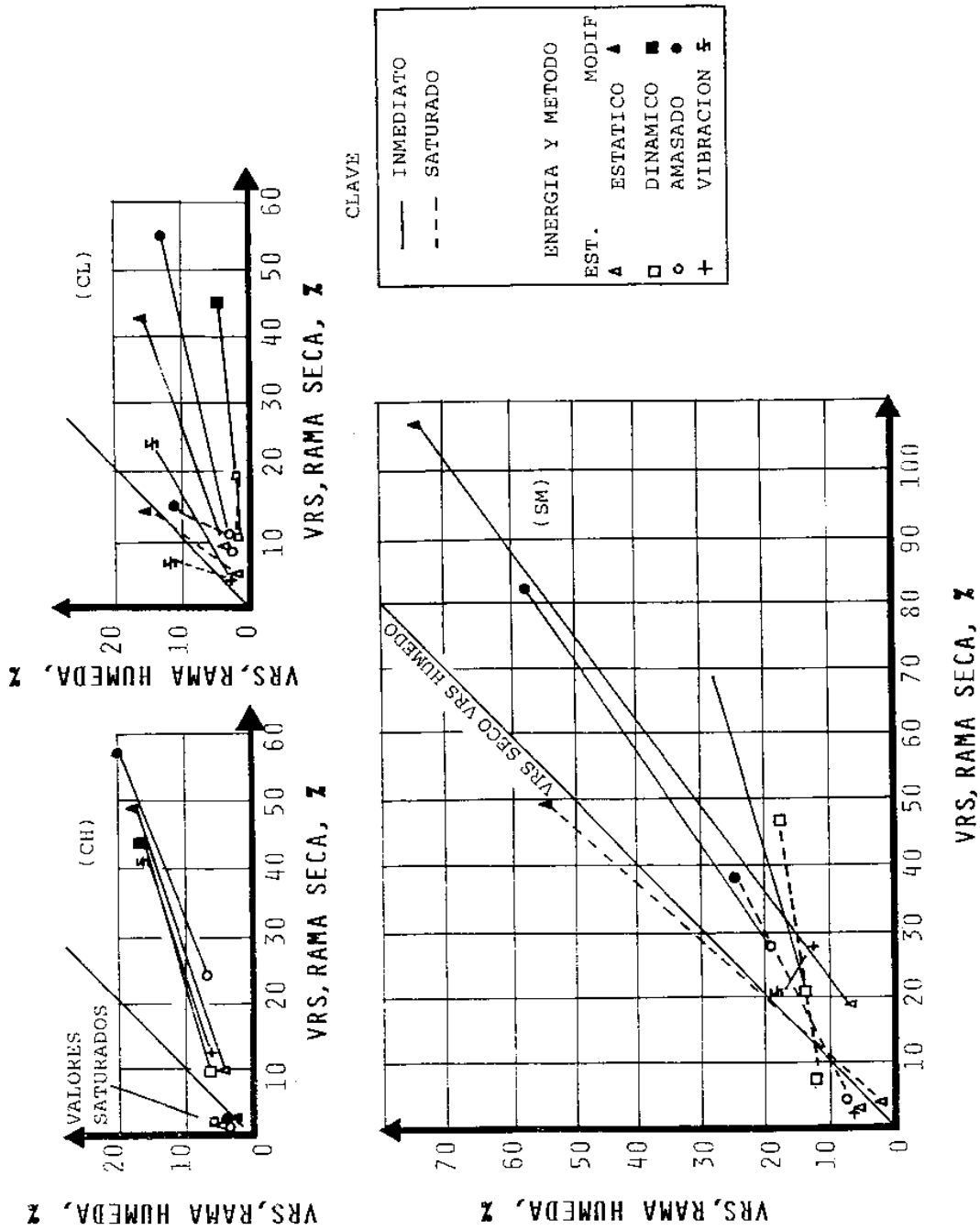


Figura A-8 Resultados de las pruebas de VRS.

d. Para los suelos más plásticos, la inmersión disminuye enormemente el V.R.S. de la rama seca, mientras que el de la rama húmeda disminuye comparativamente menos. Al disminuir la plasticidad esta tendencia es menor y se invierte para los suelos no plásticos.

e. Los V.R.S. obtenidos por los diversos métodos de compactación son muy diferentes para la arcilla CL y tienden a ser similares para los otros suelos. Los métodos estáticos y dinámicos tienden a producir los mayores V.R.S. en todos los casos.

5. Conclusiones

a. Las diferencias de comportamiento entre los especímenes del mismo suelo, compactados por diferentes métodos hasta el mismo peso volumétrico, son tan significativas que debe considerarse peligroso calificar a los suelos sólo por el peso volumétrico alcanzado, dejando al constructor la elección del equipo y contenido de agua de compactación. Estas diferencias pueden ser hasta de tres veces en resistencia, cinco veces en compresibilidad y dos veces en V.R.S.

b. En general, la vibración y el amasado producen los suelos más compresibles; los métodos estático y dinámico producen las mayores resistencias. Lo anterior es tanto más cierto cuanto más plástico sea el suelo. La influencia del período de reposo es mayor en los suelos más plásticos.

TABLA VI

Patrones de comportamiento de especímenes compactados en las ramas seca y húmeda (semejante ϵ_d y diferencias sustanciales en el Gw y la microestructura).

PARÁMETRO O PROPIEDAD	RAMA SECA	RAMA HUMEDA
Contracción por secado	Baja	Alta
Expansión por aumento de contenido de agua	Alta	Baja
Presión de expansión	Alta	Baja
Microestructura	Partículas agrupadas en forma desordenada	Partículas agrupadas y con marcada orientación
Bajo esfuerzo cortante Como se les compacta: Comportamiento Esfuerzo - deformación	Rígido – plástico o francamente frágil	Plástico
Resistencia máxima	Mayor	Menor
Deformación a la falla	Menos de 2 %	Más de 5 %
Presión de poro durante la construcción	Baja	Alta
Después de saturados a mismo peso vol. Seco:		
Resistencia máxima	Menor que en rama húmeda	Mayor que en rama seca
Comportamiento Esfuerzo – deformación	Rígido – Plástico	Plástico
Deformación a la falla	Menos de 5 %	Más de 10 %

APENDICE B

EFFECTO DE LA INCLUSION DE MATERIALES FINOS EN EL COMPORTAMIENTO MECANICO DE MATERIALES TRITURADOS PARA BASE DE PAVIMENTO.

I. Planteamiento del estudio.

En la práctica de las vías terrestres existe desde antiguo una disyuntiva en relación a la incorporación de materiales menores que la malla 200 a las bases trituradas. Para justificarla se aduce un mejoramiento en la trabajabilidad del material y en la permanencia de las características de compactación logradas. Muchas especificaciones aceptan contenidos entre 5 y 20 % de finos no plásticos, incluyendo algún mecanismo de control de dicha plasticidad. Por otra parte el uso de finos es atacado por quienes desean un comportamiento puramente friccionante en las bases y un bajo nivel de deformabilidad y por quienes consideran que:

1. No es fácil defender la importación de volúmenes pequeños de un material fino y gastar dinero en manipularlo y mezclarlo con un triturado obtenido a alto costo, para llegar como producto final, a una mezcla de características aleatoriamente inferiores; aleatoriamente, porque los métodos de control de rutina difícilmente pueden detectar oportunamente cambios desfavorables en la calidad del material que se mezcla.

2. El material importado, usualmente menor que la malla No. 4, contiene una fracción gruesa que también suele disminuir la calidad del conjunto.

3. Sobre todo en caminos modestos, es frecuente que las bases se coloquen sobre capas mucho más finas, que las

contaminan con el tiempo, elevándose el contenido de finos por arriba de los valores originalmente considerados convenientes. El mismo efecto tendrá la ruptura de granos, que ha de ser importante en bases.

Desde luego, el problema de la incorporación de finos ha de ser estudiado diferenciando los caminos de alto tránsito de los de bajo. En los primeros, las carpetas de gran espesor darán suficiente confinamiento a bases puramente granulares en los segundos, carpetas muy delgadas darán confinamientos menores. No cabe duda de que en este segundo caso, un cierto contenido de finos decididamente no plásticos podrá contribuir a una estabilización mecánica que podrá ser conveniente.

El objeto de este trabajo es cuantificar los riesgos del empleo de finos en bases, pues se ha visto que, a despecho de lo extendido de la polémica en torno a este tema, falta mucha información cuantitativa para respaldar una u otra actitud.

II. Descripción del estudio. A. Preparación de Mezclas.

Se prepararon con base en una misma matriz, que es un basalto triturado en laboratorio a tamaño máximo de 3/4". Se elaboraron mezclas de este material con tres tipos de finos, uno de ellos natural y poco plástico (CL-ML), otro una caolinita comercial y el último una bentonita comercial. Las tres mezclas se usaran con variantes de 5, 10, 15 y 20 % de material fino incorporado a la matriz. La Tabla B 1 muestra algunas propiedades índice de los diferentes materiales empleados.

TABLA B - I
PROPIEDADES INDICE

MATERIAL	L. L.	L.P.	I.P.	EQUIVALENTE DE ARENA
-----	%	%	%	%
Matriz (Triturado)	24	--	--	60
CL-ML	49	28	21	--
Caolín	94	29	65	--
Bentonita	135	37	98	--

La Fig. B-1 muestra las propiedades índice de todas las mezclas preparadas.

8. Pruebas Realizadas.

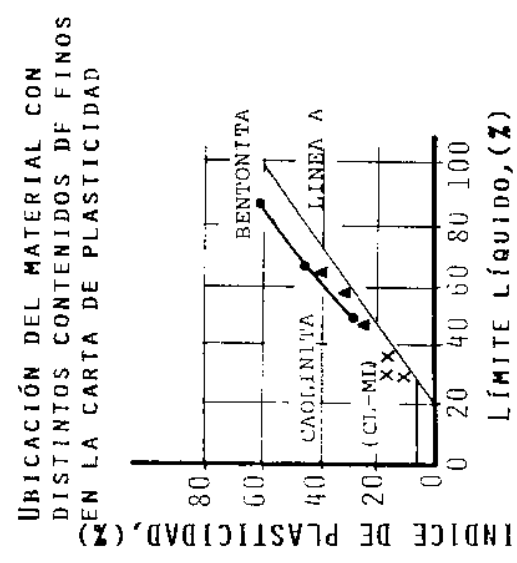
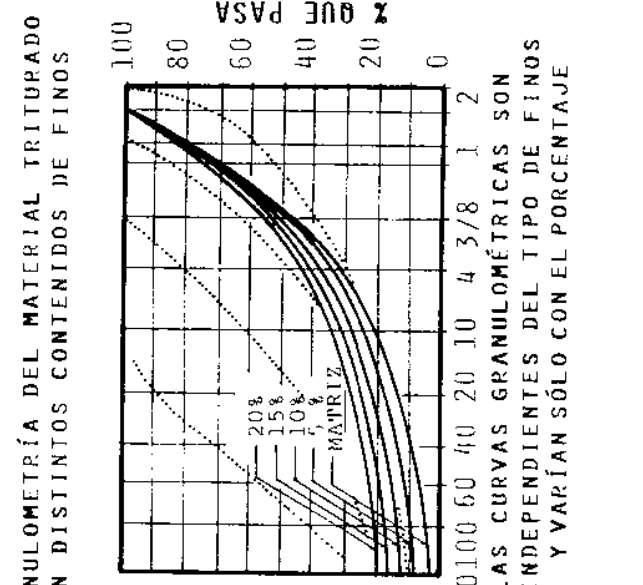
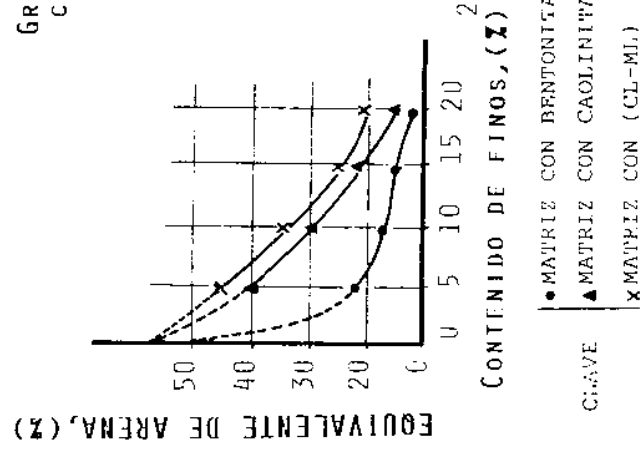
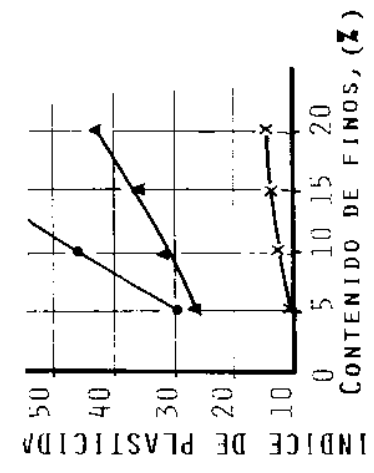
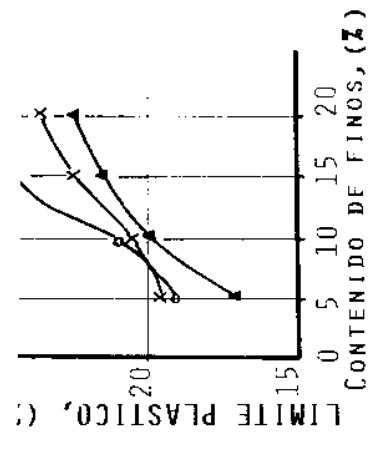
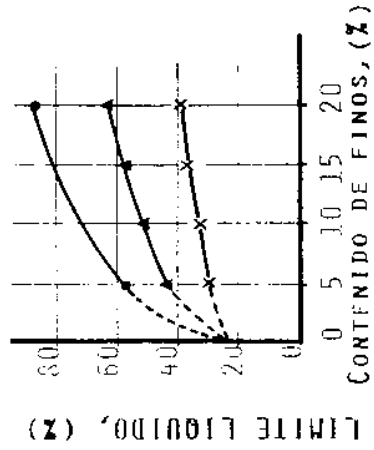
En el laboratorio se realizaron pruebas triaxiales en dos modalidades:

B-I. Se compactaron las mezclas dinámicas con el equipo y el método de Texas (Ref.18) .Lo que se tomó como humedad de fabricación fue un valor arbitrario, algo mayor que el óptimo de la prueba, con vista a acercarse a la humedad de equilibrio en el campo. Las humedades de compactación se muestran en la Tabla 8-II.

8-2. En la segunda modalidad de prueba, los especímenes se fabricaron igual que en la primera, pero después se colocaron, aún en la cámara triaxial bajo presión lateral de 0.07 Kg/cm² 1 psi) y vertical de 0.45 Kg/cm², con las que se trató de reproducir el confinamiento de campo, en un ambiente húmedo, de manera que pudieran modificar su humedad, sin estar sumergidos. El contenido de agua al que se llegó es el que se llama de saturación en la Tabla B-II.

De cada una de las mezclas se fabricaron cuatro especímenes que se probaron a las presiones de confinamiento, en Kg/cm², de: 0.351 (5 psi) , 0.703, (10 psi) , 1.055 (15 psi) , 1.406 (20 psi) , obteniéndose para cada prueba la curva esfuerzo-deformación y las envolventes de falla correspondientes a niveles de deformación de 1.25 %, 2.5% y 5 %.

Como las humedades de fabricación y saturación resultaron similares, también lo fueron los resultados obtenidos en ambos casos, por lo que en lo que sigue se reportan sin diferenciarlos.



GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL TRITURADO CON DISTINTOS CONTENIDOS DE FINOS

UBICACIÓN DEL MATERIAL CON DISTINTOS CONTENIDOS DE FINOS EN LA CARTA DE PLÁSTICIDAD

● MATRIZ CON BENTONITA
▲ MATRIZ CON CAOLINITA
x MATRIZ CON (CL-MI)

Figura B-1 Propiedades indicativas de la plasticidad y granulometrías de las mezclas.

TABLA B - II

HUMEDADES DE PRUEBA EN LAS DOS MODALIDADES

MEZCLA	HUMEDAD DE FABRICACIÓN (Considerada de equilibrio). La modalidad de prueba.	HUMEDAD DE SATURACION
-----	%	%
MATRIZ	7.0	-----
Matriz + 5% CL - ML	6.5	8.0
+ 10% CL - ML	7.5	8.5
+ 15% CL - ML	9.5	9.5
+ 20% CL - ML	10.0	10.5
Matriz + 5% Caolinita	8.0	8.5
+ 10% Caolinita	10.5	11.0
+ 15% Caolinita	12.0	12.0
+ 20% Caolinita	12.5	13.0
Matriz + 5% Bentonita	9.0	9.0
+ 10% Bentonita	10.5	10.5
+ 15% Bentonita	14.0	14.4
+ 20% Bentonita	15.5	16.0

8-3. Se realizó también un estudio de la variación del V.R.S., en especímenes saturados por inmersión y sin saturar, compactados con la energía AASHTO estándar en todos los casos.

III. Tipificación de resultados

A. Esfuerzo -Deformación

A. despecho de haberse obtenido la información triaxial correspondiente a todas las pruebas mencionadas, se presenta en este Apéndice sólo la relativa a presiones de confinamiento de 0.703 Kg/cm² (10 psi) ya niveles de deformación unitaria de 2.5 %, que se cree pudieran aproximarse al rango de trabajo de las mezclas en los) pavimentos reales.

La Fig. 8-2 muestra las relaciones esfuerzo-deformación obtenidas para las diferentes mezclas, preparadas en distintas proporciones.

La influencia de los finos es notable para todos los casos,)ero los porcentajes que deben resultar claramente dañinos, ;í son variables. En el caso de los finos menos plásticos, porcentajes hasta del orden del 15 % parecen no tener una influencia muy notable; en cambio en el caso de la caolinita, todo lo que pase del 10 % puede afectar mucho y en la bentonita, cantidades mayores del 5% abaten drásticamente el esfuerzo resistente desarrollado, incrementan la deformabilidad por arriba de todo límite y hacen cambiar radicalmente el comportamiento esfuerzo-deformación del material.

La Fig. B-3 es otro arreglo de la misma información, que habla por sí solo.

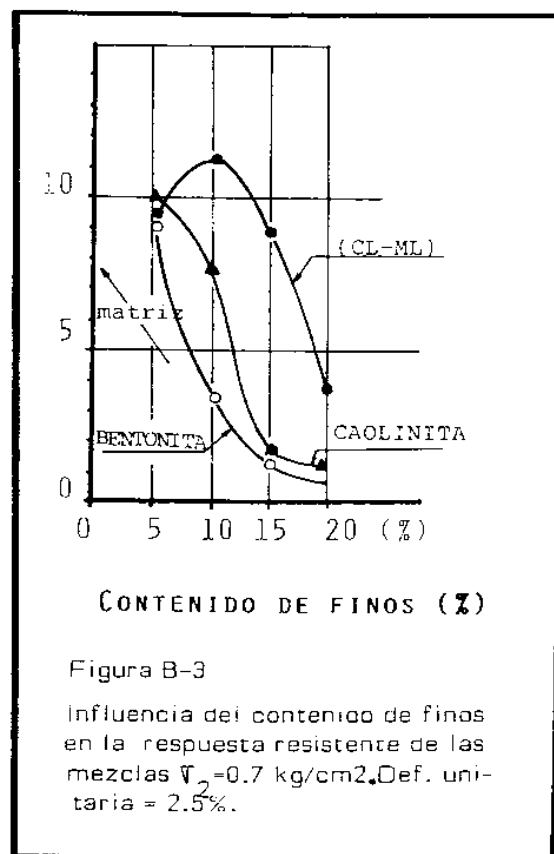
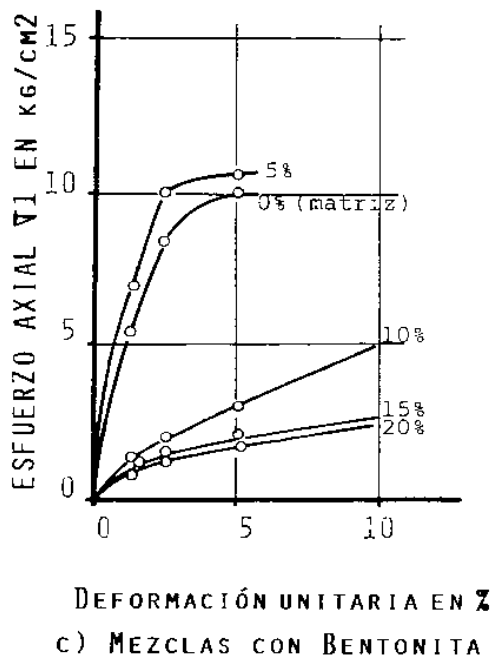
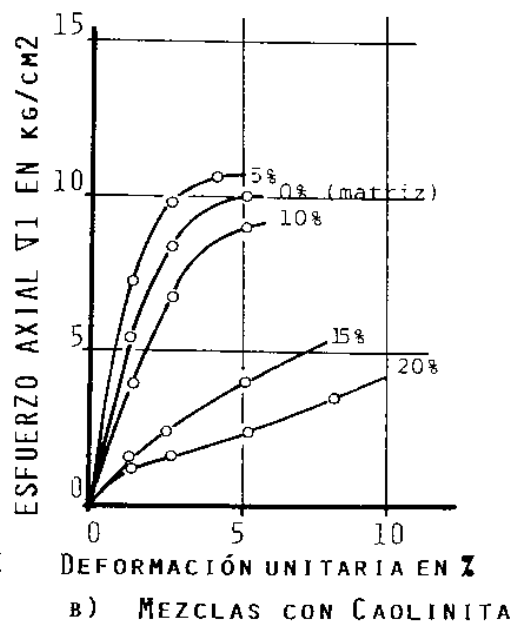
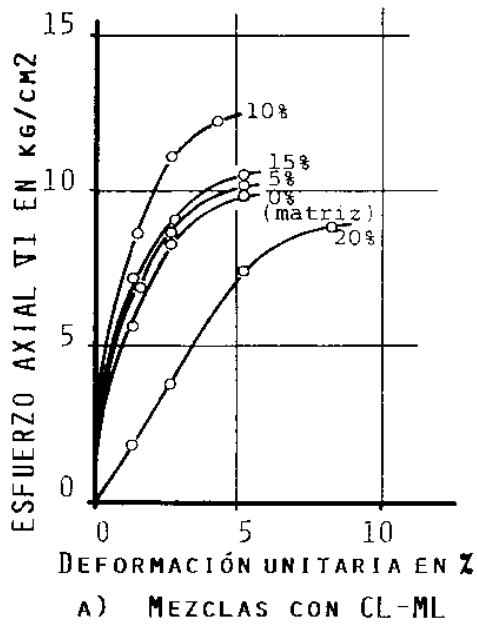


Figura B-2 Curvas esfuerzo deformación de las tres mezclas usadas $\sigma_3 = 0.7 \text{ kg/cm}^2$

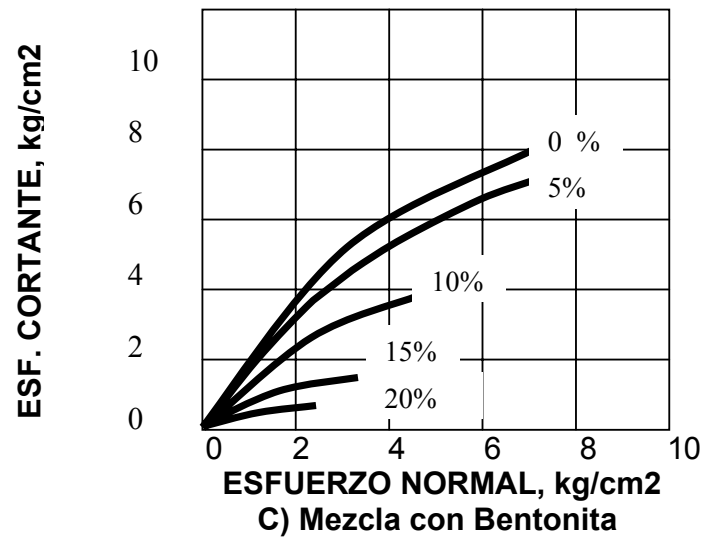
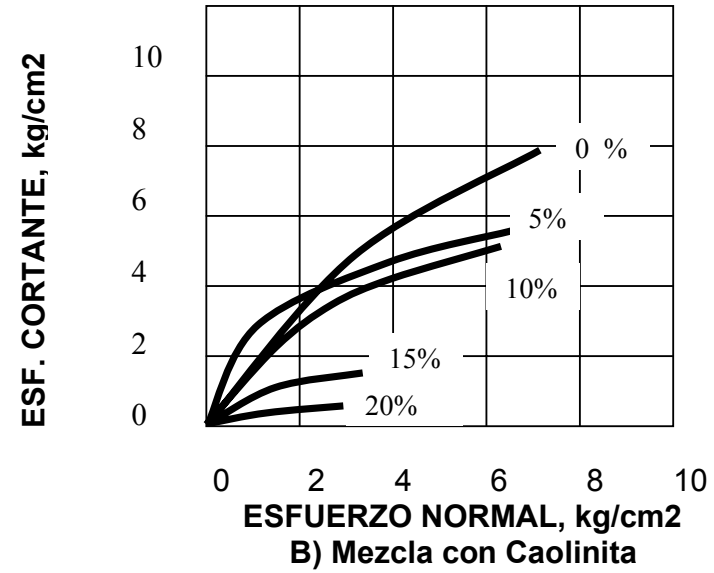
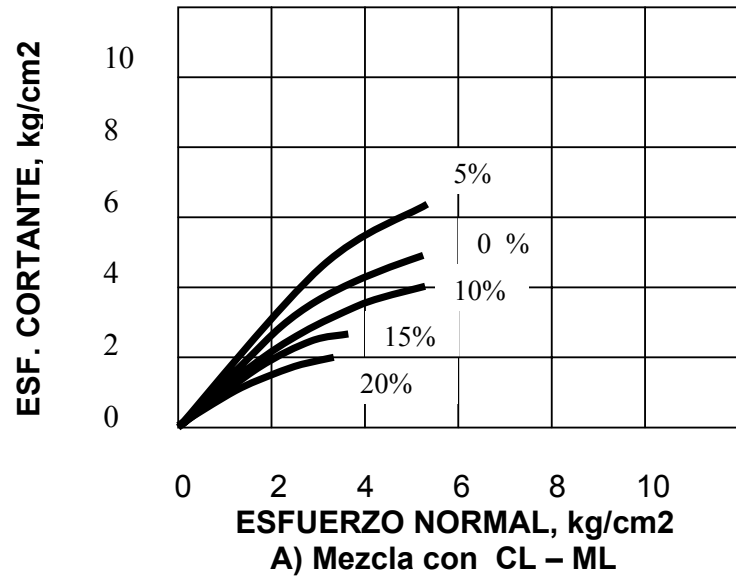
8. Resistencia Triaxial.

Esencialmente la prueba triaxial de Texas equivale a una triaxial rápida (sin consolidación y sin drenaje) realizada sobre especímenes grandes (15 cm de diámetro), muy representativos de los materiales que se utilizan en la tecnología de carreteras. El tamaño máximo de las partículas en la muestra es de 2 cm. En la Fig. 8-4 se presentan las envolventes de resistencia obtenidas para el nivel de deformación de 2.5 %. El efecto de la incorporación de finos es evidente, naturalmente más acentuado cuanto más plásticos son. De nuevo parece que en finos inertes puede llegarse sin mayor peligro a contenidos en el orden de 15 %, pero con finos de tipo caolinítico o desde luego bentonítico, porcentajes arriba del 5% resultan ya muy perjudiciales.

C. Variación del V.R.S. y otras propiedades de interés.

A las mezclas con diferentes contenidos de finos se les realizaron pruebas de V.R.S., habiendo formado los especímenes con compactación dinámica tipo AASHTO estándar, de la forma que aún es usual en la práctica mexicana. Se realizaron pruebas sobre especímenes con la humedad óptima AASHTO estándar y también con otros análogos, previamente saturados tras un período de inmersión de 72 hs. Una vez más, los contenidos de agua a que se llegó no fueron muy diferentes, de manera que la información de ambos grupos de pruebas no muestra diferencias de concepto. En este trabajo se reportan para este caso 105 resultados obtenidos sobre los especímenes saturados.

La Fig. 8-5 resume la información obtenida. En la parte a) se muestran los diferentes pesos volumétricos secos máximos a que se llegó con los diferentes contenidos de finos. Puede verse como el máximo peso volumétrico ocurre con el contenido de finos comprendido entre 0 % y 5 %, dependiendo de la



naturaleza de los finos. Esto explica la preferencia que muchos ingenieros tienen por añadir finos a los materiales de bases, pues así se alcanza un peso volumétrico más alto, lo que frecuentemente se considera la medida de una mejor compactación. Se desprende, sin embargo, de los resultados de este trabajo, que tal aumento de peso volumétrico se logra perjudicando muy seriamente en muchos casos propiedades fundamentales de comportamiento de los materiales.

La parte b) de la Fig. 8-5 muestra la evolución del V.R.S. estándar con el contenido de finos en las mezclas estudiadas. La información es autoexplicativa y muy importante, dado que el V.R.S. es aún el módulo de diseño más frecuente en pavimentos en casi todas partes. La similitud de los resultados obtenidos con el caolín y la bentonita sugiere que el efecto de los finos en el V.R.S. es un tanto independiente de su actividad; así, los estudios con el V.R.S resultan insensibles a la plasticidad y actividad de los finos empleados, lo que no sucede en los estudios con cámara triaxial.

El aumento del V.R.S. con pequeñas cantidades de finos poco plásticos hace ver la influencia de la granulometría en este concepto y sugiere la conveniencia de lograr materiales triturados muy bien graduados, que exhiban un alto V.R.S. sin necesidad de añadirles finos posteriormente.

En la parte c) de la misma Fig- 8-5 se muestra la variación de los pesos volumétricos máximos con el contenido de los distintos finos, obtenidos en prueba estática Porter. Puede notarse en este caso como los mayores pesos volumétricos se obtienen con contenidos de finos entre 10 % y 15 %. Puesto que esta es la prueba usual para materiales granulares, los resultados obtenidos en ella refuerzan la tendencia a añadir finos, comentada más arriba.

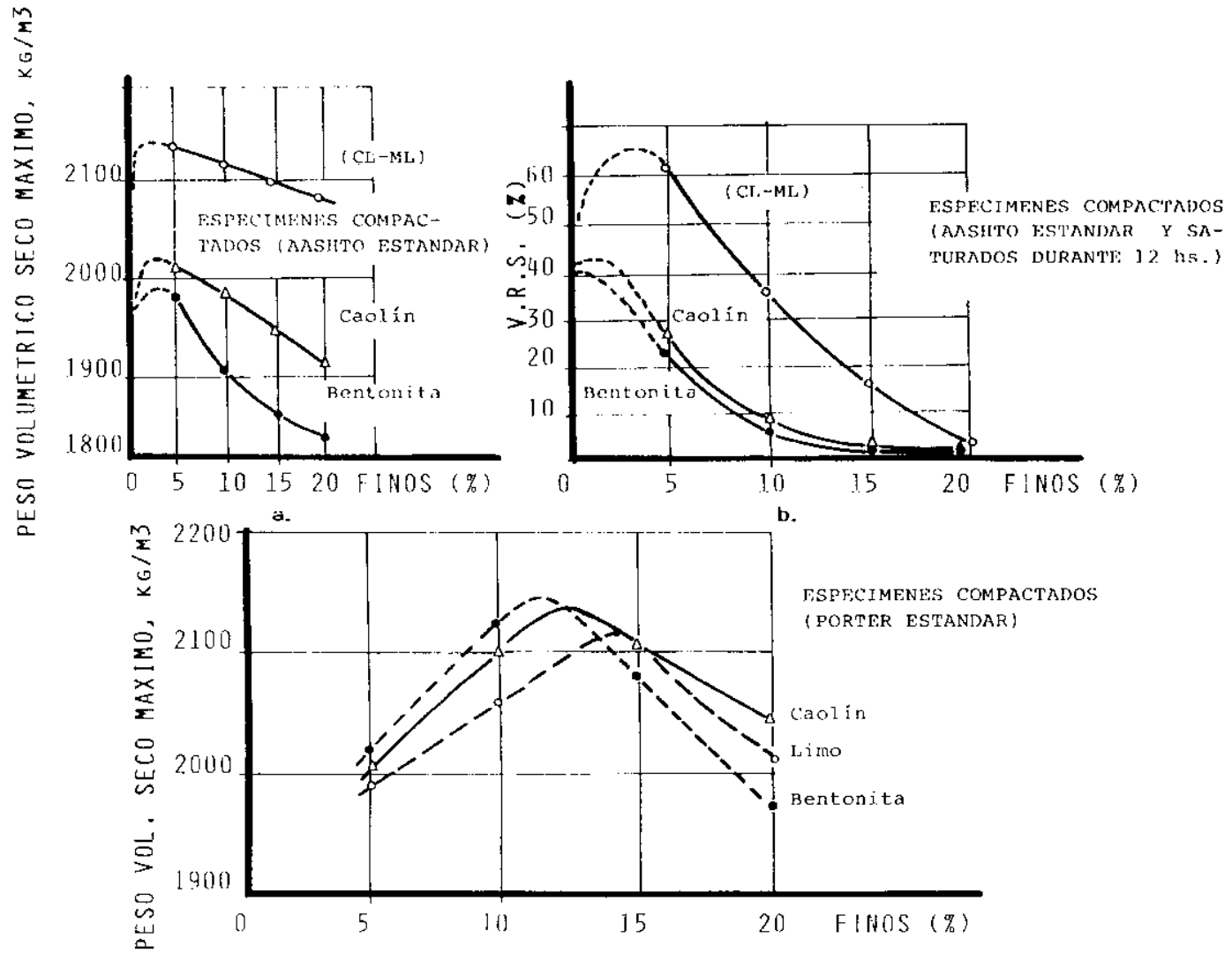


Figura B - 5 Variación del VRS y otras propiedades de interés.

Finalmente la Fig. B-6 es una comparación de esfuerzo desviador, correspondiente a una deformación de 2.5% con el equivalente de arena de las mezclas. En el caso de la bentonita, la prueba E.A. es ya poco sensible a despecho del derrumbe de resistencia que se tiene cuando aumenta sus porcentajes. Otra conclusión de interés es que el límite E.A.=50 % para bases, muy común en muchas normas, podría bajarse a 40% sin mayor riesgo.

IV. Conclusiones

De los resultados presentados parecen desprenderse las siguientes conclusiones:

1. La incorporación de finos a los materiales triturados para base disminuye la resistencia y aumenta la deformabilidad de estas capas, en las que ambos requisitos son esenciales.
2. El deterioro de las propiedades de los materiales triturados crece muy rápidamente con la plasticidad de los finos incorporados y con su cantidad. Tal parece que los finos arcillosos deben ser radicalmente excluidos y que, porcentajes superiores a 8-10% de cualquier clase de finos, son nocivos.
3. El efecto de los finos parece ser particularmente dañino en la capacidad de generación de resistencia de las mezclas, dentro de niveles de deformación tolerables. Independientemente de que la evolución de las envolventes de falla hace ver que la resistencia al corte se abate drásticamente cuando crece la proporción de finos, los que probablemente generan las situaciones más peligrosas son aquellos casos en que la mezcla aún es capaz de dar la respuesta resistente que se le demanda, pero ello se logra a niveles de deformación fuera de toda prudencia.

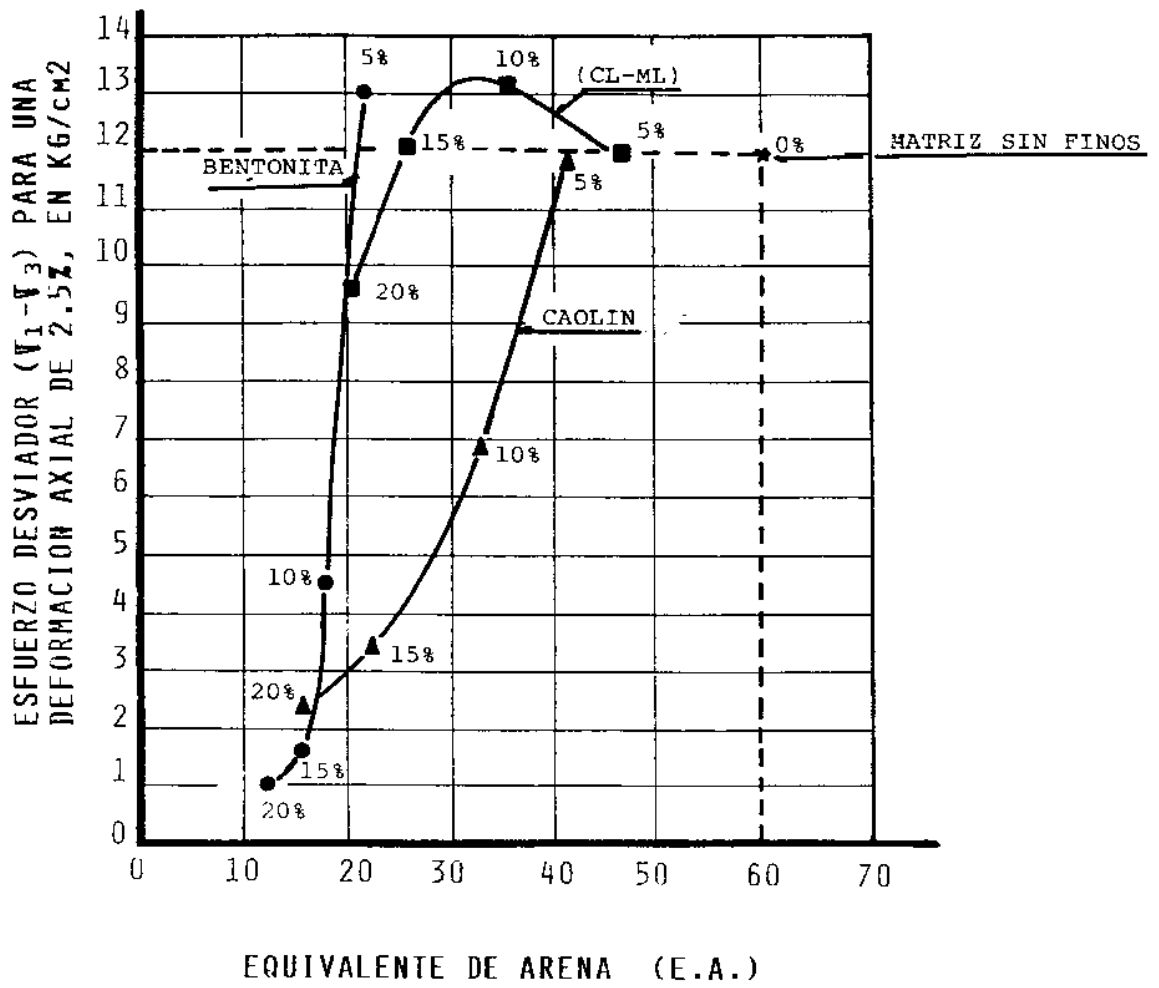


Figura B-6 Variación del esfuerzo desviador, con $\delta = 2.5\%$, con el equivalente de arena de las mezclas.

4. La prueba de V.R.S. resulta poco sensible para detectar el daño que causa la incorporación a los materiales triturados de finos plásticos en pequeña cantidad y no distingue sobre la actividad de dichos finos. Con base en ella, finos de muy diferente actividad e influencia parecen producir efectos análogos, de tal manera que un ingeniero que proyecta y controla un pavimento sólo con base en V.R.S., como es usual, no dispone de un mecanismo para distinguir un fino activo de otro más inactivo cuyos efectos a largo plazo serán, por otra parte, muy diferentes.

V. Comentario final

Como comentario final, parece conveniente insistir en que cualquier límite que arbitrariamente se fije para el contenido de finos aceptable o para la plasticidad de éstos, difícilmente podrá aspirar a mantenerse sin fluctuaciones importantes en una construcción normal. Los mecanismos de ruptura de partículas, a los que las bases han de ser particularmente susceptibles, de incrustación o de contaminación por arrastre en agua, harán que, en muchos casos, los límites inicialmente fijados se alteren, siempre para crecer. Este es un hecho que, a juicio de los autores de este trabajo nunca será suficientemente tomado en cuenta.

EPILOGO

El problema de la compactación de suelos es de fundamental importancia en toda construcción pesada y no sólo por el costo involucrado. En la mayor parte de los países esto equivale a decir en las obras hidráulicas (cuyo paradigma es la presa de tierra) y en las obras lineales (carreteras y ferrocarriles) .sin embargo, la problemática toma modalidades diferentes en ambos casos.

En la gran presa de tierra, es tolerable un doble control durante la construcción. Un control de laboratorio, basado en simples medidas de un peso volumétrico pactado en contrato con el constructor y que se realiza en laboratorios sencillos y con una rapidez que es compatible con un tren de construcción industrial y que permite un pago correcto y oportuno, y un segundo control, fundamentado en la investigación de las propiedades que obtenga el material compactado en la obra (resistencia, deformabilidad, flexibilidad y permeabilidad, fundamentalmente) ; la velocidad de este segundo control, que requiere laboratorios elaborados y mayores tiempos, va siempre desfasada respecto a la construcción, pero resulta permisible efectuar el control por la utilización de pocos bancos de materiales, de los que se utilizan volúmenes muy grandes. Así, en la práctica, la debida concordancia entre proyecto y resultado en obra puede obtenerse directamente con base en el análisis de las propiedad deseables de los suelos, con las que se elaboró el proyecto.

En las obras lineales, la abundancia de los bancos y los volúmenes mucho menores de suelos procedentes de cada uno hacen imposible su estudio minucioso y, durante la construcción, la verificación puntual de las propiedades obtenidas en los terraplenes. Así, la verificación de la calidad obtenida en esos terraplenes ha de hacerse con base en propiedades índice de verificación sencilla y fácil, señaladas por una normativa, establecida fundamentalmente por experiencia. Estas propiedades son del tipo de plasticidad, tamaño de partículas, grados de compactación y otros. Así, en las obras lineales las normas para materiales a utilizar resultan ser el control de calidad final. Desde luego subsisten a estas obras la verificación rápida del peso volumétrico para fines de pago a un contratista.

En estas obras, la compactación está sujeta a una cierta norma dentro de todo un conjunto y, por ende, no puede variarse en forma aislada sin riesgo de desbalancear el conjunto. En muchos países existe la idea de que cuanto más se compacte un suelo para una carretera o para un ferrocarril se obtendrán mejores resultados y se pide que se haga más y más exigente la norma de compactación, alcanzando cada vez mayores pesos volumétricos. Si este criterio se impone sin una atención correspondiente a las normas de plasticidad o sin una mucho mayor protección de los terraplenes contra el agua, por ejemplo utilizando con mayor profusión las técnicas del subdrenaje, se corre el peligro de tener terraplenes de suelo fino, intensamente compactados y expuestos a la acción del agua; es decir, obras con gran inestabilidad volumétrica, cuya resistencia disminuirá y cuyo mal comportamiento podrá garantizarse.

Quizá la reflexión más útil que pueda hacerse en materia de compactación de obras pesadas es que su normativa no puede cambiarse sin un cambio armonioso de las especificaciones generales.

REFERENCIAS

1. Proctor R.R.- Fundamental Principles of Soil Compaction.- Engineering News Record. 111.- Agosto y Septiembre 1933.
2. Proctor, R.R.- Design and Construction of Rolled Earth Dams.- Engineering News Record, 1933.
3. Rico, A. y del castillo, H.- La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres.- Tomo 11.- Capítulo 16.- Editorial Limusa, México, D.F. 1986.
4. Rico, A. y del castillo, H.- La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres.- Tomo 1.- Capítulo 4.- Editorial Limusa México, D.F. 1986.
- 5.- Juárez Badillo, E. y Rico A.- Mecánica de Suelos, Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos.- Capitulo V111.- Editorial Limusa. México, D.F. 1986.
6. Mendoza, Manuel J.- Enfoques recientes en la compactación de suelos.- México, D.F., 1991.
7. Jiménez Salas, José A.- Conceptos básicos de la compactación.- Comunicación personal.- 1980.
8. Rico, A. y del castillo, H.- La Ingeniería de Suelos en las vías Terrestres.- Tomo 11.- capítulo 15.- Editorial Limusa.- México, D.F., 1986.
9. Hilf, Jack w.- Compacted fill.- contenido en el libro Foundation Engineering Handbook, editado por Hans F. winterkorn y Hsai-Yang Fang.- Van Nostrand Reinhold Co.- 1975.

10. Llamazares Gómez, O.- Compactación por vibración.- Capítulo III de la publicación Compactación de Terrenos, Terraplenes y Pedraplenes.- Editores Técnicos Asociados, S.A.- Barcelona, 1970.
11. Marsal, R.J.- Resistencia y compresibilidad en enrocamientos y gravas.- Publicación del Instituto de Ingeniería de la UNAM para la Secretaría de Obras Públicas.- México, 1971.
12. Marsal, R.J., Moreno, E., Núñez, A., Cuellar R. y Moreno R.- Investigación sobre el comportamiento de los suelos granulares y muestras de enrocamiento.- Publicación de la Comisión Federal de Electricidad.- México, 1965.
13. Aguirre M. , L.M.- Correlación entre pruebas estáticas y dinámicas de compactación de suelos en el laboratorio.- Tesis para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería (Mecánica de Suelos) .-UNAM.- México, 1964.
14. Marsal, R.J. y Reséndiz, D.- Presas de Tierra y Enrocamiento.- Capítulo 9.- Propiedades de los suelos finos compactados, (por Daniel Reséndiz) Editorial Limusa.- México, D.F., 1975. También citada en la referencia 4.
15. Seed, H.B., Mitchell, J.K. y Chan, C.K.- The Strength of Compacted Cohesive Soils.- Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils.- ASCE.- Universidad de Colorado, E.E.U.U., 1960.- También citada en la referencia 4.
16. Casagrande, A. y Hirschfeld, R.C.- Investigation of Stress- Deformation and Strength Characteristics of Compacted Clays.- 2~ parte.- Harvard Soil Mechanics Series no. 65.- Harvard, Mass., 1962. También citada en la referencia 4.

17. Rico, A. y Orozco, J.M.- Comportamiento mecánico de algunos suelos compactados por cuatro métodos, incluyendo vibración.- VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de cimentaciones.- Volumen 11.- Lima, Perú, 1979.

18. Texas Highway Department.- Materials and Test Division.- Method Tex-114-E (April, 1970) .-Austin, Tex., 1970.

19. Rico, A. y Orozco, J.M.- Efecto de la incorporación de finos en el comportamiento de materiales para base.- V Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de cimentaciones.- Buenos Aires, 1975.



CIUDAD DE MEXICO

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>

publicaciones@imt.mx