

CAPITULO I

PERFIL DE LA INVESTIGACION

1.1 Introducción.-

El propósito de este trabajo es analizar experimentalmente una metodología alternativa para el proceso de compactación de suelos en laboratorio. Tradicionalmente se ha utilizado el método conocido como “Compactación Proctor T-99”, aunque siempre se ha reconocido que no representa fielmente las condiciones en que se produce la compactación en el campo.

Cuando se usan rodillos pata de cabra o neumáticos, la carga se pone directamente en contacto con el suelo prácticamente sin impacto la rotación del rodillo neumático produce una acción de amasado, a medida que el rodillo se adapta a la superficie del suelo. Tomando en cuenta esta consideración aparecieron métodos de laboratorio que fuesen capaces de reproducir mejor las condiciones del terreno siendo el equipo de laboratorio de **Harvard Miniatura** el cual actúa mediante amasado a diferencia del ensayo de “Compactación Proctor T-99” que produce la compactación por medio de impacto.

Debido a que el uso de este aparato es ventajoso en suelos que no contengan gruesos ya que el tiempo y el trabajo necesario para obtener una curva de compactación son muy inferiores al ensayo de Proctor T-99 y nos entrega resultados muy satisfactorios.

Dado que en Bolivia no se conocen ensayos alternativos, El propósito es analizar experimentalmente la metodología alternativa para el proceso de compactación de suelos en laboratorio.

Se realizó un estudio investigativo de tipo experimental, para lo cual se muestras de suelos y una recopilación de tipo teórico de la compactación de Proctor T-99, que generarán resultados propios realizando pruebas de laboratorio que determinan las características de compactación del suelo mediante el ensayo de compactación

Proctor T-99 y las características alcanzadas del suelo mediante el ensayo Harvard Miniatura.

Se comparan ambos resultados obtenidos para poder determinar una ecuación que nos permita determinar la densidad máxima seca, humedad óptima de la compactación Proctor T-99 a partir de la densidad máxima seca, humedad óptima obtenida mediante la compactación del Harvard Miniatura

1.2 Antecedentes.-

En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso.

La aplicación de energía a un espécimen de suelo, con el fin de incrementar su densidad o peso seco unitario y reducir el volumen de vacíos, es lo que se conoce como compactación del suelo. La compactación del suelo aporta a este las siguientes ventajas

- Aumenta la resistencia al corte y así mismo mejora la capacidad de soporte de vías y subestructuras.
- Reduce o previene la compresibilidad y los asentamientos.
- Reduce el volumen de vacíos
- Permite reducir y controlar los potenciales de expansión, contracción y expansión por congelamiento

Para conocer el porcentaje de compactación del suelo en campo es necesario que previamente se haya determinado la densidad seca máxima de éste, por medio de la ejecución de un ensayo o prueba de laboratorio en el que se mantenga una energía constante. Estos ensayos permiten obtener una relación entre el peso seco unitario y

el contenido de humedad además conduce a establecer el contenido de humedad con el que se debe compactar el suelo para que se logre alcanzar el peso unitario seco máximo.

1.3 Justificación.-

La realización del estudio de la correlación de Ensayos de Compactación para suelos cohesivos, es de mucha importancia en su aplicación debido a los siguientes factores:

La necesidad de poder contar con otros tipos de ensayo que presenten resultados confiables cuando se cuenta con poca cantidad de tiempo y muestra para realizar el ensayo de compactación T-99

Al aplicar este tipo de ensayo se podrá también tener una mejor representación del proceso de compactación por amasado realizado en campo por la maquinaria y así poder obtener resultados más reales en menor tiempo

Establecer que el ensayo de Proctor T-99 no es el único ensayo confiable al momento de realizar la compactación el laboratorio buscar nuevas formas para la compactación más eficaz de suelos en laboratorio en menor tiempo, de tal manera poder determinar la densidad máxima seca y el porcentaje de humedad optima en menor tiempo

Aportar a la sociedad y una forma de poder obtener los resultados de densidad máxima y humedad optima de compactación del Proctor T-99 mediante el ensayo de compactación Harvard Miniatura y así reduciendo el tiempo y el material necesario para realizar los ensayos de laboratorio

Aportar la investigación, en lo que se refiere a la existencia de estas nuevas e innovadores ensayos de laboratorio que se van desarrollando en el mundo y hoy en día no se encuentran normalizadas en nuestro medio, desarrollando un modelo de aplicación que podría ser de buen uso en un futuro cercano.

Se realizaran los ensayos en suelos finos el ensayo del Harvard Miniatura recomienda y establece que este ensayo es eficaz en suelos que pasen la malla del Tamiz N°4 es decir que no tenga Presencia de material granular el ensayo

1.4 Situación problemática.-

En Tarija, las zonas bajas en sus primeros estratos se tienen arcillas orgánicas e inorgánicas que al realizar proyectos a veces es necesario compactar este tipo de suelo y al no ser realizada correctamente es la causante de la aparición de grietas en estructuras apoyadas en este tipo de suelos es bastante.

Las construcciones más afectadas o más propensas a sufrir daños por la presencia de suelos mal compactados son las casas, muros, aceras, edificios de poca altura, carreteras, pistas de aterrizaje, etc. en los que por a las presiones transmitidas al terreno, se produce la aparición de fisuras, las mismas pueden incrementar su magnitud de difícil y costosa reparación, e incluso puede provocar el colapso completo de la estructura ocasionando inseguridades a los usuarios, por esta razón es muy importante minimizar estos efectos a través del estudio de alternativas de ensayos de laboratorio que representen mejor los procesos de compactación realizados en campo.

Para lo cual es necesario obtener la densidad máxima y humedad óptima en laboratorio en un tiempo reducido en algunos casos no se cuenta con la cantidad necesaria de muestra del lugar debido a diferentes motivos por lo cual al no haber suficiente muestra de material se produce la mala obtención de resultados al usar la misma muestra compactada para obtener la curva de compactación.

En estos casos es necesario contar con un ensayo que requiera menor cantidad de material y para obtener la curva de compactación por lo cual se pudo observar que el equipo de Harvard miniatura es un ensayo eficaz en el proceso de obtención de estos resultados

1.4.1 El problema.-

¿Establecer un procedimiento adecuado para el ensayo de compactación Harvard Miniatura para poder aplicarlo en laboratorio que permitan correlacionarlo con el ensayo Proctor T-99 ?

1.5 Objetivos.-

1.5.1 Objetivo general.-

- Determinar la correlación de los ensayos de compactación Harvard Miniatura con el ensayo de Proctor T-99 en suelos cohesivos para lograr obtener los parámetros de compactación en menor tiempo obteniendo resultados aptos para ser aplicados en trabajo de laboratorio.

1.5.2 Objetivos específicos.-

- Describir un procedimiento eficiente para el proceso de compactación Harvard Miniatura.
- Analizar la utilidad que proporciona la compactación mediante el equipo de Harvard Miniatura.
- Definir una ecuación que permita determinar la densidad máxima seca, humedad óptima de la compactación Proctor T-99 a partir de la densidad máxima seca, humedad óptima obtenida mediante la compactación del Harvard Miniatura
- Establecer las principales características del equipo de Harvard Miniatura y su Funcionamiento
- Analizar los posibles errores cometidos en el procedimiento de compactación Harvard Miniatura que puedan ser relevantes al obtener los resultados de la densidad máxima seca y humedad óptima

- Definir las principales ventajas y desventajas del ensayo de compactación de suelos finos mediante el Harvard Miniatura
- Al final de este estudio, se plantea establecer Conclusiones y recomendaciones.

1.6 Hipótesis.-

Los resultados obtenidos a través del ensayo Harvard miniatura podrá correlacionarse con los resultados del ensayo de compactación proctor T-99 y entonces poder determinar el tipo de ecuación que tenga mejor correlación para ambos ensayos, por lo cual la metodología asumida para el procedimiento del ensayo Harvard será válida.

1.7 Alcance.-

El trabajo estará enmarcado dentro del siguiente alcance y limitaciones:

- Los ensayos concernientes a la clasificación de suelo será los establecidos por la AASTHO como ser límites de Attemberg, granulometría, etc.
- La investigación abordará el diseño mediante ensayos de laboratorio, tanto de la compactación de Proctor T-99 como el ensayo miniatura de Harvard ambos para suelos finos el procedimiento de los ensayos estarán basados en las normas INV-142 para el procedimiento de compactación T-99 y el procedimiento establecido en el libro ingeniería de suelo vol. 1 para el ensayos de compactación miniatura de Harvard
- Los Suelos a emplear en la elaboración de la compactación será suelos finos según la clasificación de suelos de la AASHTO en la cual nos basaremos en la

contemplación de 4 tipos de Suelos a partir del suelo A-4, A-5, A-6, A-7. En lo que concierne a la información técnica que se requiera de éste, como resultados de ensayos para su clasificación, etc.; estos serán realizados en el laboratorio de suelos de la UAJMS.

- La granulometría a utilizar en el diseño que comprende éste trabajo de investigación; se basará en el tamaño máximo nominal del agregado de más empleo en nuestra área: N°4 ”, tamaño admisible para el ensayo de compactación Harvard Miniatura
- En el procedimiento de laboratorio se realizaran la compactación para cada suelo en cada tipo de ensayo tanto como para el ensayo de proctor T-99 y Harvard Miniatura para poder obtener una mayor cantidad de puntos que nos permitan establecer un correlación más eficaz entre ambos ensayos
- El estudio propone realizar la compactación haciendo variar el contenido de humedad para la obtención de la curva de compactación en suelos finos en ambos ensayos se utilizaran los mismos porcentajes de humedad, y energía de compactación
- Se determinara la probabilidad mediante el método estadístico que consistirá en la realización como mínimo de 30 pruebas que nos determine datos reales para saber porcentaje de vacíos de filtros cuando estos están diseñados con material fino

1.8 Diseño metodológico.-

1.8.1 Unidad de Estudio (Ensayos de Compactación).-

La unidad a estudiarse son los procesos de determinación de la densidad máxima seca, humedad óptima y energía de compactación en laboratorio en suelos cohesivos que tienen como finalidad incrementar las características de resistencia de los suelos, aumentando así su capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellas.

Se estudiarán distintos procesos de compactación en laboratorio como ser el método por amasado y el método por impacto ya que estos ambos tienen distinta metodología para el proceso de los mismos.

1.9 Población (Suelos para la utilización de Compactación en laboratorio).-

Los suelos finos se extraerán el material que tenga las características específicas que requiere la investigación a realizarse, como por ejemplo que el tamaño máximo no exceda los 2 milímetros, por lo cual será necesario que los suelos presenten un límite líquido e índice de plasticidad elevados

1.10 Muestra (Suelos finos de distinta clasificación).-

La muestra comprenderá en la utilización de distintos tipos de suelos finos a distintos grados de humedad para la compactación manteniendo una energía de compactación constante mediante el método de compactación para suelos cohesivos.

Los suelos empleados para el análisis de la correlación dependerán del tamaño de las partículas y sus propiedades físicas. Se realizó el ensayo de compactación variando la humedad del suelo para posteriormente proceder a encontrar los distintos valores de densidad máxima seca y humedad óptima.

CAPITULO II

COMPACTACION DE SUELOS

Se denomina compactación de suelos al proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia compresibilidad y esfuerzo deformación de los mismos por lo general el proceso implica un reducción más o menos rápida de los vacíos, como consecuencia de la cual en el suelo acurren cambios de volumen de importancia fundamentalmente ligados a pérdida de volumen ligados a pérdidas de volumen de aire, pues por lo común no se expulsa agua de los huecos durante el proceso de compactación. No todo el aire sale del suelo, por lo que la condición de un suelo compactado es la de un suelo parcialmente saturado.

El objetivo principal de la compactación es de obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda la vida útil de la obra. Las propiedades requeridas puedan variar de caso a caso, pero la resistencia, la compresibilidad y una adecuada relación esfuerzo deformación figuran entre aquellas cuyo mejoramiento se busca siempre; es menos frecuente, aunque a veces no menos importante, que también se compacte para obtener unas características idóneas de permeabilidad y flexibilidad finalmente, suele favorecerse mucho la permanencia de la estructura terrea ante la acción de los agentes erosivos como consecuencia de un proceso de compactación.

De la simple enumeración de los objetivos de la compactación destaca un hecho importante, que debe hacer prever al ingeniero muchas de las dificultades y complejidades que después efectivamente encontrara en estas técnicas. En primer lugar, la compactación resulta ser un proceso de objetivos múltiples y ello proporciona la complicación, pero, en segundo lugar, evidente que muchos de esos objetivos serán contradictorios en muchos problemas concretos, en el sentido de que las acciones que se emprendan para cumplir con uno pudieron perjudicar a algún otro.

Por ejemplo en términos generales ser cierto con frecuencia que una compactación intensa produce material muy resistente, pero sin duda muy susceptible al agrietamiento; en este aspecto el número de ejemplos contrastantes que pudieran ocurrirse es prácticamente ilimitado. Estas posibles contradicciones se complican y amplían aún más si se toma en cuenta que los suelos compactados ha de tener una vida dilatada y que es compromiso obvio que ser conserven sus propiedades en toda su vida; bajo la acción del agua de las cargas soportadas, etc. En estas perspectivas circunstanciales y temporal pueden multiplicarse mucho los ejemplos de contradicciones entre los objetivos del proceso; la alta resistencia, obtenida con compactación muy enérgica, de que antes se habló, puede entrar en contradicción consigo misma, pues un suelo muy compactado podrá en general absorber mucha agua si se da las condiciones propicias y al hacerlo su resistencia podrá descender drásticamente, en tanto que ese mismo suelo inicialmente compactado en forma menos enérgica, con menor resistencia inicial podrá resultar mucho más estable ante el agua, manteniendo en el tiempo una resistencia inicialmente menor que la del otro, pero probablemente suficiente.

Desde un principio el problema de la compactación de suelos resulta ligado al de control de calidad de los trabajos de campo; en efecto, después de realizar un proceso de compactación siempre es necesaria verificar si con el lograron los fines propuestos. Como quiera que las vías terrestres suelen construirse a contrato por parte de empresas especializadas, la verificación antes citada resulta ligada a problemas de pago, legales, etc. Esta multiplicidad de los problemas de compactación de suelos, que tantas veces lo hace trascender de la esfera meramente técnica, se requiere un tiempo de ejecución demasiado largo para controlar un proceso de compactación que avance de manera normal. Por otra parte ciertas experiencias, realizadas en los primeros años de la aplicación de las técnicas modernas de compactación, indicaron que existe una correlación que en aquella época se juzgó muy confiable (pero a la cual posteriormente se encontraron algunas desviaciones significativas) entre las propiedades fundamentales arriba enumeradas y el peso volumétrico seco a que llega el material compactado de manera que pueda decirse que a mayor peso volumétrico

seco se alcanza una situación más favorable en el suelo compactado. Debido a que la prueba de peso volumétrico es fácil y sencilla de realizar se hizo costumbre controlar la compactación determinando el peso volumétrico seco de los materiales compactados.

Como posterioridad a estas épocas, ha sido explosivo el desarrollo de equipos de compactación y se han investigado bastante las propiedades de los suelos compactados y las técnicas de campo y de laboratorio; de todo ello habrá un breve testimonio en páginas subsecuentes de este capítulo.

En rigor, la compactación es uno de los varios medios de que hoy se dispone para mejorar la construcción de un suelo que haya de usarse en construcción; es, además, uno de los más eficientes y de aplicación universal. La tabla IV-1, que se presenta a continuación permite situar a la compactación dentro del conjunto de métodos de mejoramiento de suelos que hoy pueden aplicarse.

TABLA IV-1

Métodos de mejoramiento de suelos (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)



Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas para presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. En ocasiones se hace necesario compactar el terreno natural, como en el caso de las cimentaciones sobre arenas

sueltas. Así, la compactación de suelos es, ante todo un problema constructivo, de campo.

La eficiencia de cualquier proceso de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan los procesos de compactación de campo en el laboratorio, en forma representativa (hasta donde ello sea posible). De esta manera, pasan a primer plano de interés las pruebas de compactación de laboratorio y los estudios que es este han de hacerse en torno a tales procesos. Comoquiera que los procesos de campo involucran costos altos, en general los estudios para proyecto habrán de hacerse con base en el trabajo de laboratorio; esta afirmación no la invalida el hecho de que en la técnica actual se haga un uso cada vez más extenso de terraplenes de prueba, en que se investigan modelos a escala natural para obtener normas de proyecto. Los estudios de compactación en laboratorio también desempeñan un papel muy importante en el control de calidad de los trabajos.

Así pues, los procesos de compactación han de estudiarse con referencia a las técnicas de campo y a todo conjunto de técnicas de laboratorio; pero además de los puntos de vista anteriores existe un tercero, relativamente descuidado hasta épocas recientes y el que se refiere a la investigación de las propiedades que es posible obtener en los suelos compactados. Este tercer punto de vista, convenientemente relacionado con los otros dos, completara el cuadro en la forma que el ingeniero requiera para establecer un criterio adecuado.

En este capítulo, los tres puntos de vista del problema de compactación se analizan en forma relativamente separada, para descartar criterios del modo más diferenciado que sea posible.

2.1. Variables que afectan el proceso de compactación de los suelos.-

Como es natural, un suelo se puede compactar de varias maneras, y en cada caso se obtendrá un resultado diferente; por otra parte, una misma forma de compactación

dará resultados distintos si se aplica a diversos suelos; por último, si una misma forma de compactación se aplica a un suelo determinado, podrán lograrse resultados muy diferentes si de un caso a otro se varían ciertas condiciones de las prevalecientes en dicho suelo.

Las afirmaciones anteriores justifican las conclusiones, obvia para quienquiera que tenga cualquier grado de familiaridad con estos problemas, de que los resultados de un proceso de compactación dependen de varios factores, unos que atañen al tipo de suelo, otros relativos al método de compactación que se emplee y, por último, varios más que se refieren a determinadas circunstancias que en ese momento pudieran prevalecer en el suelo con que se trabaja. Estos factores suelen denominarse las “variable” que rigen el proceso de compactación. Las principales de estas se reseñan a continuación.

2.1.1. La naturaleza del suelo.-

Es claro que la clase de suelo con que se trabaja influye de manera decisiva en el proceso de compactación; de hecho, a lo largo de este capítulo habrán de diferenciarse las técnicas que se empleen y los resultados que se obtengan precisamente con base en el tipo de suelo.

Prevalece aun la distinción usual entre suelos finos y gruesos o entre suelos arcillosos y friccionantes, pero en el análisis de los procesos de compactación es muy común que tal distinción se detalle bastante más, tipificando los suelos de acuerdo con las normas establecidas en el capítulo 2.

2.1.2. El método de compactación.-

En laboratorio resulta bastante fácil clasificar los métodos de compactación en uso en tres tipos bien diferenciados: la compactación por impactos, por amasado y por aplicación de carga estática. A reserva de detallar algo más estos métodos, baste por el momento la afirmación de que producen resultados diferentes tanto en la estructuración que adquiere el suelo como, en consecuencia, en las propiedades del material que se compacta. Además, ya se comienza a utilizar algunos dispositivos de

laboratorio para compactar por vibración, si bien su uso está menos extendido que el de los otros tres métodos.

Resulta bastante difícil diferenciar de un modo análogo los métodos de compactación de campo. Es común describir estos con base en el equipo mecánico que se emplee en el proceso, y así se habla de la compactación con rodillo liso, con rodillo neumático, con equipo vibratorio, etc. Se supone que los métodos de laboratorio reproducen las condiciones del proceso de campo, pero en muchos casos no es fácil establecer una correspondencia clara entre el trabajo de campo y las pruebas de laboratorio, en el sentido de contar con que estas últimas reproduzcan en forma suficientemente representativa todas las condiciones del suelo compactado en el campo.

2.1.3. La energía específica.-

Se entiende por energía específica de compactación la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico de que se trate.

Es muy fácil evaluar la energía específica en una prueba de laboratorio en que se comparte al suelo por impactos dados con un pisón; de hecho, resulta claro que para tal caso queda dada por la expresión:

$$E_e = \frac{N \cdot n \cdot w \cdot h}{V} \quad (4-1)$$

Dónde:

E_e = energía específica.

N = número de golpes del pisón compactador por cada una de las capas en que se acomoda el suelo en el molde de compactación.

n = número de capas que se disponen hasta llenar el molde.

W = peso del pisón compactador.

h = altura de caída del pisón al aplicar los impactos al suelo.

V = volumen total del molde de compactación igual al volumen total del suelo compactado.

En las pruebas de laboratorio en que se compacta el suelo con la aplicación de presión estática, en principio la energía específica se puede evaluar de manera análoga en términos del tamaño del molde el número de capas que se dispone el suelo, la presión que se aplique a cada capa y el tiempo de aplicación. Sin embargo, en este caso la evaluación no resulta ya tan sencilla y la energía específica se ve afectada por la deformabilidad del suelo y por el tiempo de aplicación de la presión.

En el caso de las pruebas en que se realiza la compactación por amasado es aún más compleja la evaluación de la energía específica, pues cada capa de suelo dentro del molde se compacta mediante un cierto número de aplicaciones de carga con un pisón que produce presiones que varían gradualmente desde cero hasta un valor máximo, y luego se invierte el proceso en la descarga. La energía de compactación no se puede cuantificar de un modo sencillo pero puede hacerse variar a voluntad si se introducen cambios en la presión de apisonado, en el número de capas, en el número de aplicaciones del pisón por capa, en el área de pisón o en el tamaño del molde.

El concepto de energía específica conserva su pleno valor fundamental cuando se relaciona con procedimientos de compactación de campo. En el caso del uso de rodillos depende principalmente de la presión y el área de contacto entre el rodillo y el suelo, del espesor de la capa que se compacte y del número de pasadas del equipo. Tampoco es sencillo evaluar la energía de compactación en términos absolutos en un caso dado, pero si varían los factores mencionados es posible hacerla cambiar, con lo que se obtienen términos de comparación entre dos trenes de trabajo diferentes.

En páginas subsiguientes de este capítulo se podrá ver la gran influencia de la energía de compactación en los resultados que se logran. Puede decirse que la energía específica de compactación es una de las variables que mayor influencia ejercen en el proceso de compactación de un suelo dado, con un procedimiento determinado.

2.1.4. El contenido de agua del suelo.-

Ya en los primeros estudios de Proctor se puso de manifiesto que el contenido de agua del suelo que se compacta es otra variable fundamental del proceso. Proctor observó

que con contenidos crecientes de agua, a partir de valores bajos, se obtenían más altos pesos específicos secos para el material compactado, si se usa la misma energía de compactación; pero observo también que esta tendencia no se mantiene indefinidamente, ya que cuando la humedad pasa cierto valor, disminuyen los pesos específicos secos logrados. Es decir, Proctor puso de manifiesto que para un suelo dado y usando determinado procedimiento de compactación, existe un contenido de agua de compactación, llamado el óptimo, que produce el máximo peso volumétrico seco que es de dable obtener con ese procedimiento de compactación.

En relación a un proceso de compactación de campo, dicho contenido de agua es óptimo para el equipo y energía correspondiente.

Lo anterior puede explicarse en términos generales si se toma en cuenta que en los suelos finos arcillosos, a bajos contenidos de agua, esta se encuentra en forma capilar, produciendo compresiones entre las partículas constituyentes del suelo las cuales tienden a formar grumos difícilmente desintegrables, que dificultan la compactación. El aumento en contenido de agua disminuye la tensión capilar y, por lo tanto, el aglutinamiento de sus grumos, lo que hace que aumente la eficiencia de la energía de compactación. Empero, si el contenido de agua es tal que hay exceso de agua libre, al grado de casi llenar los vacíos del suelo, se impide una buena compactación puesto que el agua no puede desplazarse instantáneamente a resultados del efecto mecánico que se esté aplicando. Esto es más cierto en los suelos más finos.

El contenido de agua del suelo es otra de las variables fundamentales del proceso de compactación.

2.1.5. La escala de humedades al efectuar la compactación.-

Este aspecto afecta sobre todo a las pruebas de compactación que se realizan en laboratorio, en las que es común presentar resultados con base en graficas $Y_d - w$ (peso volumétrico seco vs. humedad). Estas curvas son diferentes si las pruebas se efectúan a partir de un suelo relativamente seco al que se va agregando agua o si se parte de un suelo húmedo, que se va secando según avanza la prueba. Las

investigaciones experimentales comprueban que en el primer caso se obtienen pesos específicos secos mayores que en el segundo, para un mismo suelo y con los mismos contenidos de agua; este efecto parece ser particularmente notable en los suelos finos plásticos con contenidos de agua inferiores al óptimo. La aplicación del fenómeno podría ser que cuando el suelo está seco y se le agrega agua, esta tiende a quedar en la periferia de los grumos, con propensión a penetrar en ellos solo después de algún tiempo; por otra parte, cuando el agua se evapora al irse secando un suelo húmedo superficial de los grumos se hace menor que la interna. Se tienen entonces condiciones diferentes en los grumos del suelo con un mismo contenido de humedad; en el primer caso, en que se agregó agua, la presión capilar entre los grumos es menor por el proceso de agua, en comparación con el segundo caso, en que la evaporación hace que los meniscos se desarrollen más. Por lo tanto, en el primer caso será menor la ligazón entre los grumos y una misma energía de compactación será más eficiente para compactar el suelo que en el segundo caso.

Naturalmente que los razonamientos anteriores se ven influidos por el tiempo que se deje pasar entre la incorporación del agua y el momento en que se aplica la energía de compactación, pues si el lapso es largo, se permite la incorporación uniforme del agua a lo grumos del suelo, con la consecuente disminución de su humedad superficial y el aumento de las presiones capilares. El contenido de sales también influye, así como la naturaleza de la arcilla.

En los laboratorios es común que se proceda a partir de un suelo relativamente seco; se incorporara agua según avanza la prueba y se deja pasar el tiempo suficiente tras la incorporación para permitir la distribución uniforme del agua.

2.1.6. El contenido de agua original del suelo.-

Se refiere este concepto al contenido natural de agua que el suelo poseía antes de añadirle o quitarle humedad para compactarlo, en busca del contenido óptimo o cualquier otro con que se hubiere decidido realizar la compactación.

En los procesos de campo el contenido de agua original no solo ejerce gran influencia en la respuesta del suelo al equipo de compactación, sino que también gobierna en gran parte el comportamiento ulterior de la masa compactada. Aunque por lo general solo pueden lograrse cambios relativamente pequeños al humedecer o secar el suelo extendido en la obra, es muy aconsejable buscar siempre condiciones de humedad natural que no se aparten mucho de la óptima para el proceso de compactación que vaya a usarse.

En los procesos de laboratorio el contenido natural de agua del suelo tiene especial influencia en las compactaciones que se logren con una cierta energía, a humedades menores que la óptima, sobre todo cuando se procede a compactar el suelo inmediatamente después de la incorporación del agua. Este fenómeno se comprende si se toma en cuenta la explicación que se ofrece en el punto 5 anterior, pues en un suelo originalmente bastante seco, el agua que se añada producirá mayor diferencia inmediata entre las condiciones de humedad interna y externa de los grumos que en otro que originalmente hubiese estado más húmedo; por ello, es de esperar que los pesos volumétricos secos que se obtengan sean mayores cuando los contenidos originales de agua del suelo sean menores.

2.1.7. La recompactación.-

En muchos laboratorios es práctica común usar la misma muestra de suelo para la obtención de puntos sucesivos de las pruebas de compactación; ello implica la continuada recompactación del mismo suelo. Se ha visto que esta práctica es inconveniente en lo absoluto, toda vez que la experimentación ha demostrado, sin género de duda, que si se trabaja con suelos recompactados los pesos volumétricos que se obtienen son mayores que los que se logran con muestras vírgenes en igualdad de circunstancias, de modo que con suelos recompactados la prueba puede llegar a dejar de ser representativa.

Al parecer, una explicación sencilla de este efecto radica en la deformación volumétrica de tipo plástico que causan sucesivas compactaciones.

2.1.8. La temperatura.-

La temperatura ejerce un importante efecto en los procesos de compactación de campo, en primer lugar por efectos de evaporación de agua incorporada al suelo o de condensación de la humedad ambiente en el mismo. Además, puede llegar a ejercer algún efecto en la consistencia y manejabilidad de los suelos con que se trabaja.

2.1.9. Otras variables.-

Además de las mencionadas, existe un conjunto de variables que efectúan a las pruebas de compactación de laboratorio y campo, tales como el número y espesor de las capas en que se dispone o se tiende el suelo, el número de pasadas del equipo de compactación sobre cada punto o el número de golpes del pisón compactador encada capa, etc. Todos estos factores y su efecto se detallaran al describir los procesos de compactación de campo o las diferentes pruebas de laboratorio.

En todo proceso de compactación existe una eficiencia con la que la energía se aplica; su papel es fundamental, pero su cuantificación muy difícil.

2.2. La curva de compactación.-

Como ya hemos visto, de acuerdo con la historia los procesos de compactación comenzaron a desarrollarse en el campo, como técnicas de construcción.

Fue hasta que se trató de estudiar de un modo más riguroso los efectos de tales técnicas y de establecer procedimientos de control de calidad y verificación de resultados en el campo cuando nacieron las pruebas de compactación de laboratorio, al principio solo con base en la original desarrollada por Proctor, y después con base en toda una serie de pruebas, variantes más o menos cercanas a la primera, que se desarrollaron por el afán de ir logrando en el laboratorio mayor acercamiento a los procesos de campo, que paralelamente se ampliaron con toda una serie de equipos nuevos producidos por una tecnología cada vez más conocedora y exigente.

Como ya se dijo, Proctor visualizo la correlación entre los resultados de un proceso de compactación y el aumento del peso volumétrico seco del material compactado, y estableció la costumbre, que aún hoy se sigue, de juzgar los resultados de un procesos

de compactación con base en la variación de peso volumétrico seco que se logre; también comprendió el fundamental papel que desempeña el contenido de agua del suelo en la compactación que de él se obtiene, con un cierto procedimiento. Juntando estos dos aspectos, que considero básicos, estableció la costumbre, que también ha subsistido hasta la actualidad, de representar la marcha de un proceso de compactación por medio de una gráfica en la que se haga ver el cambio de peso volumétrico seco al compactar el suelo con diversos contenidos de agua, utilizando varias muestras del mismo suelo, cada una de las cuales proporciona un punto de la curva.

Comoquiera que diferentes procesos de compactación producen al mismo suelo compactaciones distintas, un mismo suelo podrá tener diversas curvas de compactación, correspondiente a los diferentes modos de compactarlo que puedan usarse, sea en el campo o laboratorio.

Una representación tal como la anterior (**Yd – w**) recibe por antonomasia el nombre de **curva de compactación**, pero no constituye el único medio gráfico de representar los resultados de un proceso de compactación; simplemente es el modo más usual de representación de los que hoy se utilizan, aunque podría haber otros; de hecho, en páginas subsiguientes de este capítulo se utilizarán algunas otras formas gráficas para representar o analizar algunas condiciones de interés en los procesos de compactación.

Sea cual fuere el procedimiento de compactación que se siga, la forma de la curva de compactación será parecida a la que se muestra en la Fig. IV-1.

La curva muestra un máximo absoluto, alguna vez acompañado de otro secundario, de menor valor.

El peso volumétrico seco correspondiente al máximo absoluto recibe el nombre de **peso volumétrico seco máximo**; la humedad con la que tal máximo se consigue se denomina humedad óptima y representa el contenido de agua con el cual el procedimiento de

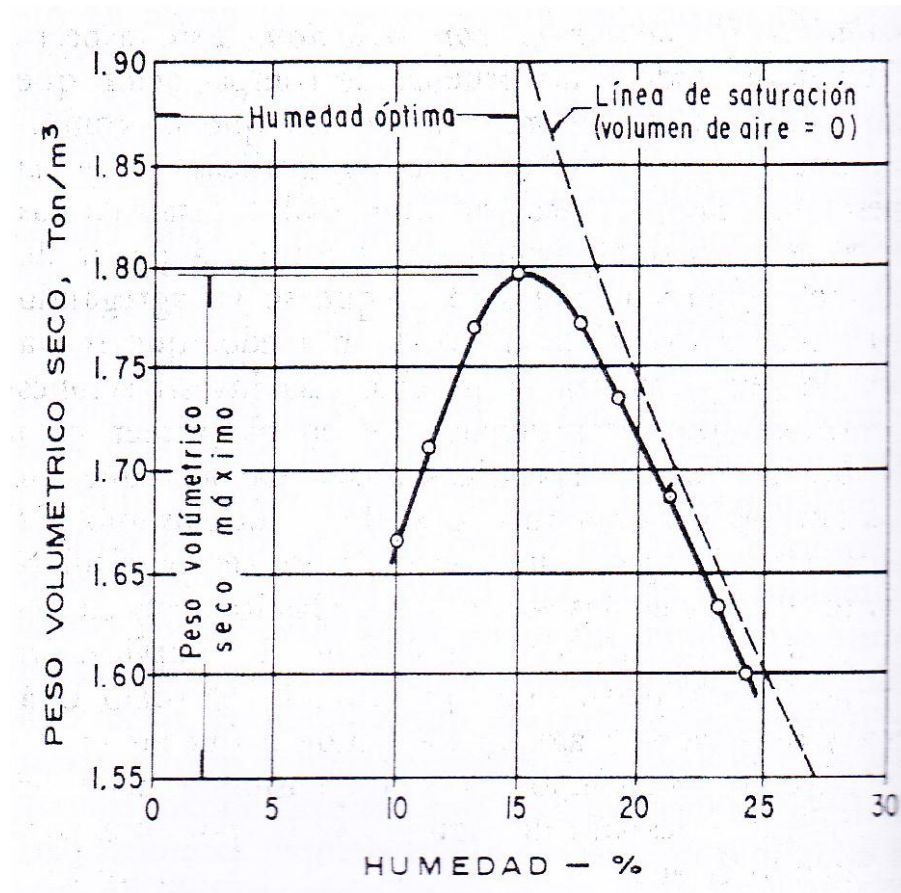


Fig. IV-1. Curva de compactación típica (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Compactación que se esté usando produce la máxima eficiencia, por lo menos si esta se juzga por el peso volumétrico seco que se logre

	<p>Por Definición:</p> $\gamma_d = \frac{w_s}{v_m} = \frac{S_s \gamma_w}{1 + \epsilon}$ <p>Según fórmula:</p> $\epsilon = w S_s \text{ (Suelo Saturado)}$ $\gamma_d = \frac{S_s \gamma_w}{1 + w S_s} \text{ (4-3)}$
--	---

Figura IV-2.Esquema de un suelo saturado y deducción de la formula (4-3) (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)

La Fig. IV-1 puede construirse, ya sea en laboratorio o en el campo, a partir de parejas de valores $Y_d - w$, los cuales se pueden obtener, como ya se dijo, si se aplica el procedimiento de compactación de que se trate a diversos especímenes del mismo suelo con diferentes contenidos de agua. La curva $Y_d - w$, puede entonces dibujarse a partir de los valores anteriores aplicando la formula

$$Y_d = \frac{Y_m}{1 + w} \quad (4 - 2)$$

Cuya obtención es mediante al aplicar las definiciones de Y_d y w . También aparece en la figura Fig. IV-1 la curva correspondiente al 100% de saturación del suelo en cada caso. Como ya se dijo, la condición de un suelo compactado en circunstancia normales es la de un suelo no saturado, razón por la cual la curva de compactación se desarrolla por debajo de la curva de saturación; si se comparan las dos es posible saber cual tendría que ser el contenido de agua que saturase a una muestra que se compactara a determinado peso volumétrico. La curva de saturación se puede obtener si se calculan los pesos volumétricos secos que corresponderán al mismo al mismo suelo supuesto, saturado con el contenido de agua correspondiente a una cierta abscisa de la curva, aplicándola formula

$$Y_d = \frac{S_s}{1 + w * S_s} Y_w \quad (4 - 3)$$

Que corresponde a suelos saturados y cuya obtención es sencilla a partir del esquema que se representa en la Fig. IV-2.

Como se verá, muchas de las curvas de compactación que se obtienen en el laboratorio se realizan en pruebas en que el espécimen se compacta por capas dentro del molde y por medio del golpe aplicado con un pisón estándar, con una energía también prefijada. Cuando una prueba de tal naturaleza (prueba dinámica) se realiza en una arena sin contenido de partículas de arcilla, la curva de compactación adquiere la forma que aparece en la Fig. IV-3.

En rigor esta forma es típica de las pruebas dinámicas que se aplican a materiales suficientemente permeables como para que no se desarrollen presiones de poro en el interior del suelo durante el proceso de compactación. La explicación de la forma pudiera ser como sigue: Cuando el contenido de agua de arena aumenta un poco, se desarrolla fuerzas capilares entre los granos, que dificultan su acomodo y la eficiencia de la compactación baja; con más agua esas fuerzas desaparecen y el proceso se hace más eficiente. Una curva como la Fig. IV-3 no define en forma clara ni el peso volumétrico seco máximo ni la humedad óptima; pero, por otra parte y desde un punto de vista práctico, que es el único en que tienen vigencia los conceptos anteriores, el asunto no tiene demasiada importancia, pues existen otras pruebas de laboratorio aplicables a arenas limpias o a mezclas de arenas y gravas sin finos en que estos materiales exhiben curvas en la forma usual; además, tales pruebas son satisfactorias desde el punto de vista de la representatividad de los procesos de campo que se usan tales materiales (pruebas de compactación con vibración).

2.3. PROCESOS DE COMPACTACION DE CAMPO

La energía que se requiere para compactar los suelos en el campo se puede aplicar mediante cualquiera de las cuatro formas que adelante se enumeran, las cuales se diferencian por la naturaleza de:

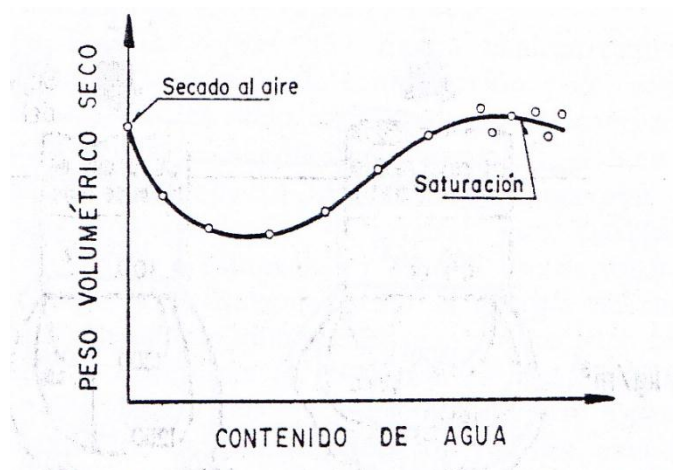


Figura IV-3. Curva de compactación obtenida en prueba dinámica de arenas limpias y gravas arenosas (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

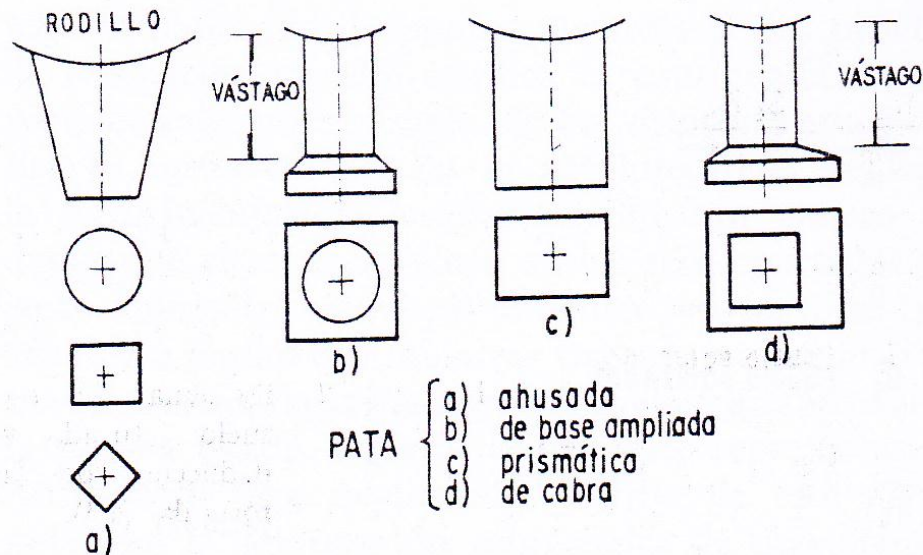


Figura IV-4. Tipos usuales de patas de rodillo pata de cabra (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Los esfuerzos aplicados y por la duración de los mismos. Estas formas son:

- Por amasado
- Por presión
- Por impacto
- Por vibración
- Métodos mixtos.

Con las tres primeras formas se aplican casi todos los métodos convencionales en uso desde hace varias décadas. La cuarta se refiere a técnicas de implantación más reciente, pero que se han popularizado mucho en los tiempos. Como es natural no representa todos los modos posibles de entregar energía de compactación a un suelo,

sino que simplemente son las soluciones comerciales e industriales que hasta el momento se han desarrollado para resolver el problema.

2.3.1. Compactadores por amasado. (Rodillos pata de cabra)

Estos compactadores concentran su peso sobre la relativamente pequeña superficie de todo un conjunto de puntas de forma variada (ver Fig. IV-4) ejerciendo presiones estáticas muy grandes en los puntos en que las mencionadas protuberancias penetran en el suelo. Conforme se van dando pasadas y el material se va compactando, las patas profundizan cada vez menos en el suelo, y llega un momento en que ya no se produce ninguna compactación adicional; en una profundidad del orden de 6 cm, la superficie queda siempre distorsionada, pero se compacta bajo la siguiente capa que se tienda.

En la Fig. IV-5 se muestra la influencia que sobre la compactación obtenida ejerce la forma de la punta del vástago, que constituye la “pata de cabra” propiamente dicha; en forma esquemática se presentan los pesos volumétricos que resultaron en un caso dado con el empleo de tres tipos de vástago, todos de sección cuadrada de 15 cm de lado.

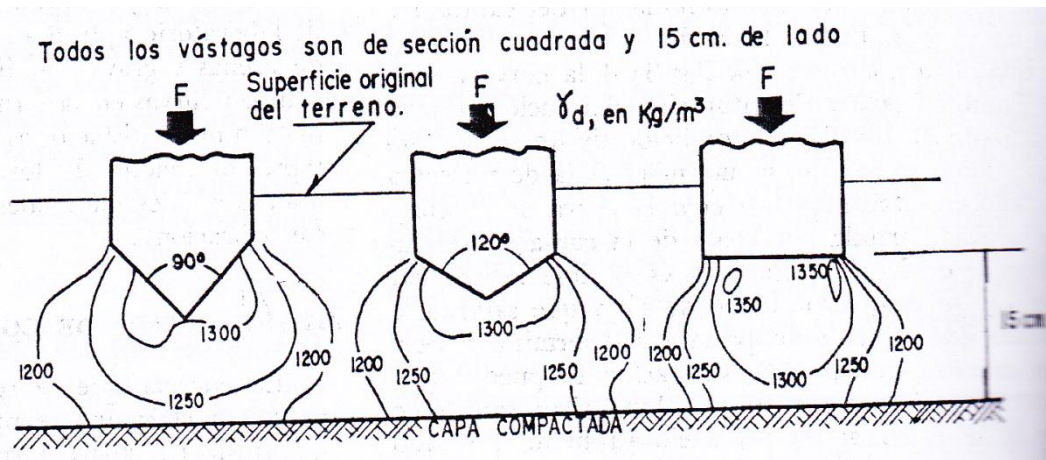


Figura IV-5. Influencia de la forma de la punta del vástago en los rodillos “pata de cabra”.

(Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

En todos los casos que se muestran, el vástago aplico la misma presión y con la misma ley a lo largo del tiempo. La mayor eficiencia del vástago plano, así como la

del que está ligeramente biselado se revelan la forma más regular de la zona más compactada y el mayor volumen representado por tal zona.

En la Fig. IV-6 se muestra esquemáticamente el resultado de una investigación particular que se realizó para estudiar el efecto de la forma de la sección recta del vástago y de su área transversal.

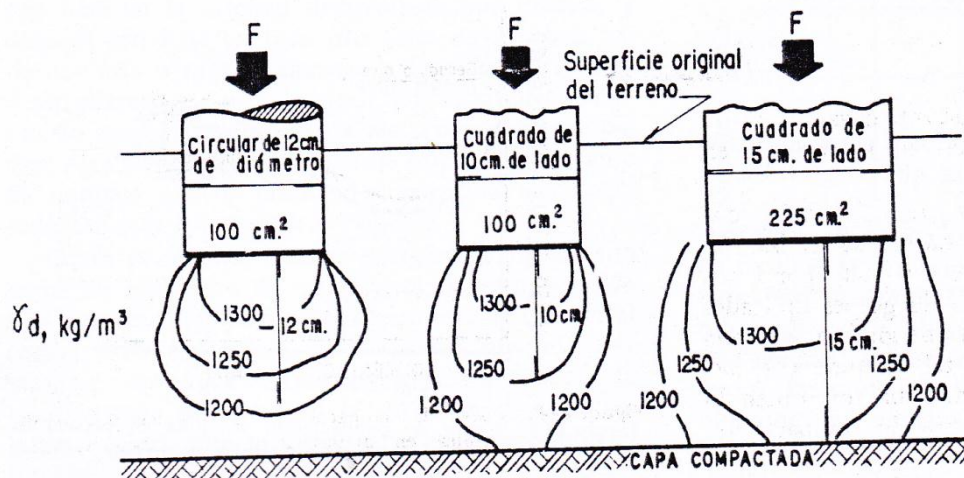


Figura IV-6. Influencia del tamaño y del área de la sección recta de los vástagos de los rodillos “pata de cabra”. (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Es notable la mayor eficiencia del vástago más grande, así como la superioridad de la sección cuadrada sobre la redonda

La presión que ejerce el rodillo pata de cabra al pasar con sus vástagos sobre el suelo no es uniforme en el tiempo; los vástagos penetran ejerciendo presión crecientes, las cuales llegan a un máximo en el instante en que el vástago está vertical y en su máxima penetración; a partir de ese momento la presión disminuye hasta que el vástago sale. Además, la acción del rodillo es tal que hace progresar la compactación de la capa de suelo de abajo hacia arriba; en las primeras pasadas las protuberancias y una parte del tambor mismo penetran en el suelo, lo que permite que la mayor presión se ejerza en el lecho inferior de la capa por compactar; para que esto ocurra el espesor de la capa no debe ser mucho mayor que la longitud del vástago. A esta peculiar manera de compactar se la denomina acción de “amasado” y en épocas recientes ha

sido tomado en cuenta en algunos equipos de compactación de laboratorio, a fin de lograr la mayor representatividad en pruebas que se realizan sobre suelos que se compactan con rodillos pata de cabra.

Los rodillos más usuales tienen vástagos de 20 a 25 cm de longitud y se usan para compactar capas de suelo suelto de alrededor de 30 cm de espesor.

Como ya se dijo, al aumentar el número de pasadas del equipo la parte inferior de la capa va adquiriendo mayor resistencia, lo que impide la penetración del rodillo y de sus vástagos, que así van compactando el suelo supra yacente. El proceso puede llegar a un límite en el cual el rodillo “camina” sobre el suelo y transmite todo su peso a través de los vástagos, pero sin que haya contacto entre el tambor y el suelo propiamente dicho. Alguna vez se ha especificado este límite como norma sencilla para control de compactación de la capa, pero en suelos con contenido de agua relativamente alto o cuando se usan rodillos pesados puede suceder que el tambor no deje de estar en contacto con el suelo, aunque el número de pasadas se incremente de manera arbitraria.

Por lo general, se considera adecuada la operación cuando el vástago penetra del 20 al 50% de su longitud, lo que depende de la plasticidad del suelo; así, para una arcilla blanda se busca hacer penetraciones menores que para una arcilla arenosa, a fin de evitar que se adhieran al vástago cantidades considerables del suelo y se reduzca el rendimiento del equipo.

En cualquier caso, según ya se dijo, siempre se produce una cierta penetración de la patas del rodillo.

El rodillo pata de cabra produce entonces dos resultados muy deseables en los terraplenes de suelos finos compactados, que son una distribución uniforme de la energía de compactación en cada capa y una buena liga entre capas sucesivas.

La Fig. IV-7 ilustra cualitativamente el efecto de la energía de compactación y del contenido de agua del suelo en un proceso de compactación de campo con rodillo pata de cabra, si bien la forma de tales curvas, obtenidas para energías de

compactación creciente, es general para cualquier tipo de rodillo o compactador. Con el uso de un mismo equipo, todo incremento en la energía de compactación hace que aumente el peso volumétrico seco máximo y disminuya el contenido de agua óptimo.

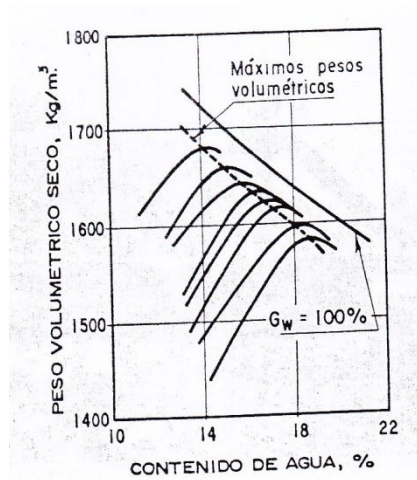
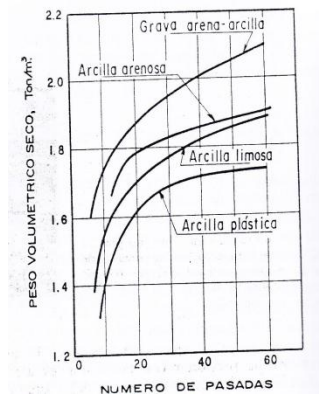


Fig. IV-7. Diagrama cualitativo de Y_d vs w para diversas energías de compactación (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)

La Fig. IV-8 analiza otro aspecto importante de la compactación con rodillos para de cabra. Se trata ahora de presentar el efecto del número de pasadas de un rodillo de tipo medio sobre diferentes tipos de suelos.



La Fig. IV-8. Compactación de rodillo pata de cabra. Efecto del número de pasadas en el grado de compactación de diversos suelos. (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)

Puede verse que por lo general, disminuye el incremento de peso volumétrico seco por pasada al aumentar la plasticidad, y que el número adecuado de pasadas depende

del tipo de suelo que se tenga en cada caso. En la tabla IV-2 se representa un resumen de la información de varias fuentes relativas al efecto de la presión de contacto bajo los vástagos del rodillo; el cálculo se hizo dividiendo el peso total del rodillo entre el producto del número de vástagos en una hilera por el área de apoyo de cada vástago. Se puede observar que con las presiones y mediante las pasadas que se indican prácticamente no cambia la compactación de los suelos probados, aun con incrementos de más de tres veces en la presión de contacto. Lo anterior parece indicar que la intensidad de la presión del vástago carece de impotencia en el proceso, pero es claro, desde luego, que ha de existir un valor mínimo necesario en dicho concepto para lograr una compactación eficiente; con la información de que hoy se dispone no es posible decir cuál sea este valor, pero en la tabla IV-2 permite pensar que no debe ser inferior a 8 kg/cm², si el área de contacto del vástago no es mayor de 75 o 90 cm².

Tabla IV-2

Rodillos pata de cabra. Efecto de la presión de contacto en el peso volumétrico seco máximo
(Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Tipo de Suelo	Presión De Contacto kg/cm ³	Área de Contacto Cm ²	Nº de Pasadas	Grado de Compactación Obtenido a la prueba de Proctor Estándar
Arena Arcillosa	17.5	43.75	9	9
	31.5	43.75	9	9
Arcilla Limosa	17.5	43.75	8	8
	35.0	43.75	8	8
	52.5	43.75	8	8
Arcilla Poco Plástica	8.7	87.5	12	12
	26.2	87.5	12	12
Arcilla Plástica	8	75.25	64	64
	17.5	31.5	64	64
Arcilla limos II	8	75.25	64	64
	17.5	31.5	64	64

Arcilla Arenosa	8	75.25	64	64
	17.5	31.5	64	64
Mezcla de grava, arena y arcilla	8	75.25	64	64
	17.5	31.5	64	64

Por otra parte, si bien el peso volumétrico seco máximo no depende de la presión de contacto, si aumenta con la presión de contacto el contenido de agua con que se obtiene tal máximo. En la práctica usual, los rodillos pata de cabra suelen quedar dentro de los límites especificados para sus diversos detalles en la tabla IV-3

Tabla IV-3

Rodillos pata de cabra (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Especificaciones comunes

Ancho de Tambor.....	1.22 a 1.98 m
Diámetro del Tambor.....	1.02 a 1.83 m
Número de Patas o Vástagos.....	64 a 144
Área de la Sección Recta de las Patas....	33 a 135 cm ²
Longitud de la Pata.....	18 a 46 cm
Peso del Rodillo Vacío.....	1.6 a 7 ton
Peso del Rodillo Lleno de Agua.....	2.5 a 11.5 ton
Presión de Contacto, Vacío.....	5.2 a 30 kg/cm ²
Presión de Contacto, Lleno de Agua.....	8 a 55 kg/cm ²

El porcentaje de cubrimiento por pasada que proporciona los rodillos para de cabra (dos aplicaciones sucesivas por el mismo punto) se encuentran por lo general entre el 4 y 12% bastante menor a los d otros equipos de compactación. Si se aumenta el número de vástagos se aumenta el porcentaje de cubrimiento, pero se disminuye la presión de contacto, por lo que el número de vástagos de los equipos comerciales ha de establecerse sopesando estos factores en forma conveniente. No debe perderse de

vista la necesidad de una separación mínima de vástagos que permita conservar siempre el rodillo, hecho que se relaciona directamente con el rendimiento del equipo de compactación.

Es importante hacer notar que, al compactar los suelos, los rodillos pata de cabra dejan en ellos un Porcentaje de vacíos mayor que los otros equipos de compactación (rodillos lisos, neumáticos de rejillas y segmentación); esta circunstancia puede ser perjudicial y puede evitarse si se combinan diversos equipos de compactación al compactar suelos cohesivos.

Los rodillos pata de cabra rinde sus mejores resultados en suelos finos. La concentración de presión que producen los vástagos se ha revelado como muy útil para la rotura y disgregación de los grumos que se forman en las arcillas homogéneas por acción de fuerzas de naturaleza capilar entre sus partículas. En suelos finos no homogéneos con diferentes rangos de tamaños, la acción de las patas de cabra también es muy benéfica para romper y disgregar las diferentes partículas y para unir entre si las distinta capas de material compactado, pues al quedar distorsionada la superficie de cada capa, se compacta junto con la siguiente, lo que elimina la tendencia a la laminación. En arcillas blandas francas, además de que tiene la posibilidad de eliminar grumos, el rodillo pata de cabra resulta muy conveniente por la acción de amasado, ya descrita. En épocas recientes incluso se ha combinado la acción de los rodillos pata de cabra con la vibración, para incrementar la concentración de fuerzas sobre áreas pequeñas y favorecer el poder rompedor y mezclador de estos equipos. Se han desarrollado también dos tipos de compactadores que pueden considerarse como variantes del rodillo pata de cabra tradicional: el rodillo de rejillas y el segmentado.

El rodillo de rejillas se ha venido utilizando con éxito en materiales que requieren disgregación, pero en realidad a dado buen resultado en una gran variedad de suelos, incluyendo arcillas homogéneas o mezcladas de arena, limos y arcillas, con abundancia de finos. La superficie de cilindro la constituye una parrilla o malla fabricada con barra de acero, que forman una cuadrícula. Suelen lastrarse con bloques

de concreto o arena húmeda. Por lo común se fabrica con alto peso (más de 14 ton. lastrados) y levadas presiones de contacto (arriba de 20 kg/cm²).

El rodillo segmentado también se ha utilizado sobre todo con materiales de requieren disgregación, pero su uso se está extendiendo a varios tipos de suelos, incluso las arcillas no muy plásticas. Cada cilindro suele estar formado por tres ruedas adosadas, de aro interrumpido, lo cual forma la segmentación que da su nombre al equipo.

2.3.2. Compactación por presión. Rodillos lisos y neumáticos

2.3.2.1. Rodillos lisos.

Se dividen en dos grupos: remolcados y autopropulsados. Los primero constan generalmente de dos tambores marcados en un marco al que se sujetan los ejes: su peso varía por lo común de 14 a 20 ton y pueden lastrarse llenando un depósito sobre el marco con agua o arena húmeda. Los autopropulsados constan de una rueda delantera y una o dos traseras (normalmente dos); se fabrican con pesos de 3 a 13 ton. El motor que los impulsa es de gasolina o diesel circular en velocidad directa o en reserva. Los rodillos lisos tienen su campo de aplicación circunscrito a los materiales que no requieren concentraciones elevadas de presión, por no formar grumos o por no necesitar disgregado; por lo general son arenas y gravas relativamente limpias. También se utilizan mucho el acabado de la superficie superior de las capas compactadas (terminación de la subrasante, de la base y de carpetas de mezcla asfáltica).

El efecto de la compactación de rodillos lisos se reduce considerablemente a medidas que se profundiza en la capa que se compacta, y el efecto de la compactación se produce de arriba hacia abajo.

La Fig. IV-12 ilustra el efecto de disipación de la presión con la profundidad y de la eficacia compactadora de un rodillo liso de tres ruedas, con peso total de 9.5 ton, que actúa sobre un material arcillo-arenoso con un contenido de agua de 13.5%.

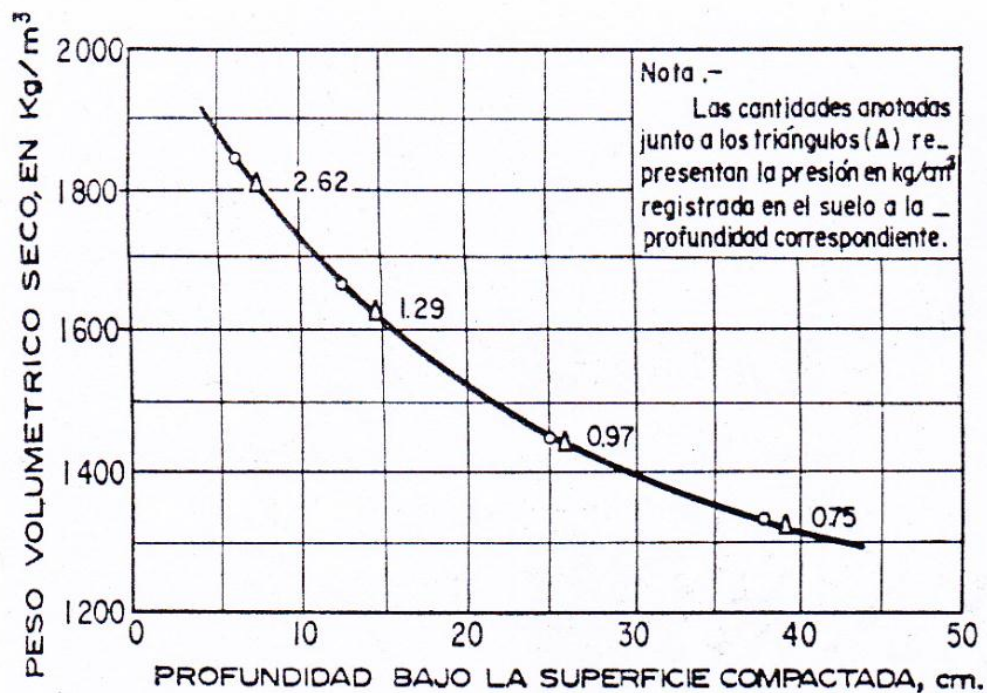


Figura IV-12. DISIPACION DE LA PRESION DE CONTACTO DE UN RODILLO LISO CON LA PROFUNDIDAD. (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Cuando se utiliza solo el rodillo liso en arcillas y limos en plásticos es común que al cabo de un cierto número de pasadas lleguen a presentarse fracturas en la parte superior de la capa, debido a la rigidez que esta zona adquiere por excesiva compactación, en compactación al lecho inferior de la misma capa, menos compactado, que adquiere una resistencia relativamente baja.

Las características principales de los rodillos lisos son su disposición, diámetro (con el que aumenta mucho la eficiencia), ancho y peso total. El espesor suelto de la capa de material que es posible compactar con rodillo liso varía de 10 a 20 cm.

En la tabla IV-4 se representa las características más sobresalientes de los rodillos lisos autopropulsados de tres ruedas.

Tabla IV-4

Rodillos lisos autopropulsados de tres ruedas (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)

Especificaciones comunes

Peso Total.....	3.0 a 13 ton
Diámetro del Rodillo Frontal.....	86 a 120 cm
Diámetro de los Rodillos Traseros.....	94 a 160 cm
Ancho del Rodillo Frontal.....	61 a 122 cm
Ancho de los Rodillos Traseros.....	38 a 58 cm
Carga por unidad de ancho de Rodillo	
Frontal.....	14 a 43 kg/cm
Carga por unidad de ancho de Rodillos	
Traseros.....	25 a 80 kg/cm

2.3.2.2. Rodillos neumáticos.

La acción compactadora del rodillo neumático (con llantas rellena de aire) tiene lugar fundamentalmente por la presión que transmite a la capa de suelo tendida, pero estos rodillos producen también un cierto efecto de amasado, que causa al suelo grandes deformaciones angulares por las irregularidades (dibujo) de las llantas; este efecto ocurre a escala mucho menor que en los rodillos pata de cabra, pero tiene cierta importancia, sobretodo en la porción más superficial de la capa que se compacta. El rodillo aplica a la superficie de la capa prácticamente la misma presión desde la primera pasada; esta presión es casi igual a la presión de inflado de la llanta, si se descuenta pequeños efectos de rigidez de la llanta misma. La superficie de contacto de la llanta depende del peso del rodillo y de la presión de inflado; su forma es más o

menos elíptica. La presión que se transmite no es rigurosamente en toda el área de aplicación, pero para simplificar suele hablarse de una presión media de contacto. Para lograr una aplicación más o menos uniforme de la presión a una cierta profundidad bajo la superficie es preciso que las llantas delanteras y trasera del equipo tengan huellas que se superpongan ligeramente; es usual buscar una disposición tal que deje a ambos lados 2/3 de huella libre entre las superposiciones.

Podría pensarse que la eficacia compactadora pudiese crecer de manera indiscriminada con la presión de inflado, pero esto no es del todo cierto, pues si la presión no es demasiado grande a ambos lados de la huella se producen concentraciones que hacen aparecer presiones horizontales adicionales que ayudan al asentamiento de las partículas de suelo y a su mezclado; así, la elección de la presión de inflado se ha de hacer con base a varios factores, a alguno de los cuales se hará referencia más adelante.

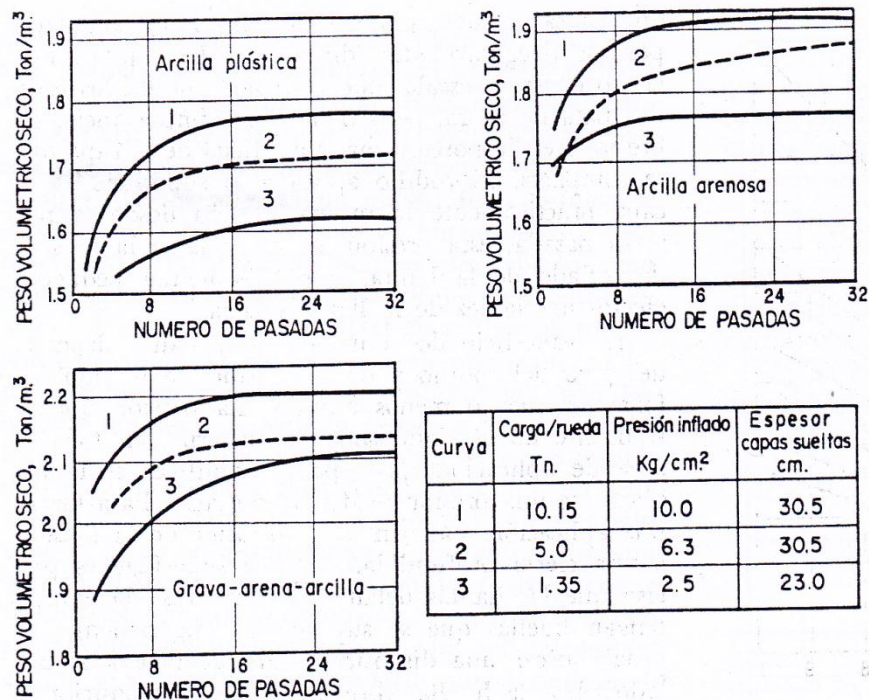


Figura IV-14 se ilustra con rodillo neumático. Efecto del número de pasadas y de la presión de inflado en el peso volumétrico seco de diversos suelos. (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

El acabado superficial de las capas compactadas con rodillos neumáticos suelen tener la rugosidad suficiente para garantizar una buena liga con la capa superior. En la Fig. IV-14 se ilustra el efecto del número de pasadas y de la presión de inflado en el peso volumétrico seco obtenido para varios suelos

Se utilizó un compactador de rodillo neumáticos de 14 ton de peso y 13 llantas repartidas en dos ejes, con aproximadamente una tonelada de carga por llanta; el área de contacto fue de 19 x 38 cm y la presión de inflado de 2.5 g/cm²; los tres suelos estudiados se colocaron en capas sueltas de 75 cm de espesor y se compactaron con 6 pasadas. Puede observarse que la eficacia del rodillo disminuye con bastante rapidez con la profundidad, si bien no tanto como en los rodillos lisos.

Los rodillos neumáticos suelen disponerse en uno o dos ejes, sobre los que normalmente existe una plataforma o depósito para el lastre; pueden ser remolcados o autopropulsados. Los rodillos ligeros por lo general son autopropulsados, pesan menos de 13 ton están provistos de 9 a 13 ruedas en dos ejes. Los de peso medio varían de 13 a 25 ton y suelen tener de 4 a 11 ruedas, en uno o dos ejes. Los pesados se fabrican con pesos de 25 a 110 ton y por lo común tienen 7 ruedas en dos ejes o 4 en un solo eje.

Existe un tipo de compactador neumático, denominado de ruedas bamboleantes, que tiene las ruedas de uno de sus ejes en posición oblicua respecto al mismo, lo que contribuye a aumentar el efecto de amasado; esto incrementa la eficiencia del equipo en los suelos finos en tal efecto es deseable.

En la tabla IV-15 se muestran las características más comunes de los rodillos neumáticos.

Tabla IV-5

Rodillos neumáticos Especificaciones comunes (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)

Ancho Total del Equipo.....	152 a 305 cm
Tamaño de Llanta.....	7.5 x 15 a 30 x 40 plg
Espaciamiento entre ruedas, centro	
A centro.....	45.6 a 76.2 cm
Peso Total del Rodillo.....	6 a 110 ton
Carga Por Rueda.....	0.6 a 27 ton
Presión de Inflado.....	1.76 a 10.6 kg/cm ²
Presión de Contacto.....	1.5 a 8.5 kg/cm ²
Área de Contacto.....	480 3730 cm ²

2.3.3. Comparación de resultados entre rodillos neumáticos y pata de cabra.

Con frecuencia no es posible distinguir los campos de aplicación práctica de los rodillos neumáticos y de los de pata de cabra, según ha quedado ya establecido, de manera que en numerosos casos, para muchas organizaciones la elección de uno u otro equipo es casi cuestión de costumbre o de preferencia particular. Se ha dicho con frecuencia que del mecanismo de compactación del rodillo pata de cabra se puede esperar una compactación más uniforme que la que es posible obtener con rodillos neumáticos; y como la uniformidad es una característica altamente deseable, en el pasado esa opinión inclinaba a muchos constructores a preferir los rodillos pata de cabra en los casos de duda. Sin embargo, los datos cuantitativos disponibles no corroboran tal opinión, sino la contraria; es decir, se inclinan a favor del rodillo neumático. Estos datos se ilustran en la tabla IV-7. En ella se ve que, con una misma presión de inflado, crece la uniformidad que se logra con los rodillos neumáticos al aumentar la carga por rueda, y que, en el caso de los rodillos pata de cabra, se insinúa una ligera ventaja a favor del vástago de forma prismática (tipo c de la Fig. IV-4).

Tabla IV-7

Variación del peso volumétrico seco con la profundidad en una capa compactada
(Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

I. RODILLO PATA DE CABRA

Espesor de la capa compactada: 15 cm

Tipo de Suelo	Relación entre el peso volumétrico medio en el tercio inferior y el peso volumétrico seco medio en el resto de la capa	
	Pata tipo "a" de la fig. IV-4 de 17.5 cm de Longitud	Pata tipo "c" de la fig. IV-4 de 19.5 cm de Longitud
Arcilla Plástica	0.88	0.88
Arcilla Limosa	0.82	0.88
Arcilla Arenosa	0.8	0.9
Mezcla de Grava, Arena y Arcilla	1.00	0.86

II. RODILLO NEUMATICO

Espesor de la capa compactada: 30 cm.

Tipo de Suelo	Relación entre el peso volumétrico medio en el tercio inferior y el peso volumétrico seco medio en el resto de la capa			
	10300 kg por Rueda 9.9 kg/cm ²	10300 kg por Rueda 6.35 kg/cm ²	5150kg por Rueda 9.9 kg/cm ²	5150 kg por Rueda 6.35 kg/cm ²
Arcilla Plástica	0.93	0.93	0.88	0.88
Arcilla Arenosa	0.95	0.94	0.9	0.89
Mezcla de Grava, Arena y Arcilla	1.00	0.95	1.00	1.00

Además de este hecho, cuyo conocimiento no parece estar suficientemente extendido, se sabe de otras ventajas de uno de estos tipos de rodillos sobre el otro.

- a. En los suelos residuales, el rodillo pata de cabra logra mayor uniformidad y es más eficiente que el neumático, debido a que la concentración de presión que producen sus patas permite desintegrar fragmentos de roca intemperizada.
- b. Por razones que ya se han mencionado, el rodillo pata de cabra produce una mejor unión entre capas sucesivas que los rodillos neumáticos.
- c. Los rodillos neumáticos pueden compactar capas más gruesas y a mayor velocidad que los rodillos pata de cabra. Además de la ventaja económica que esto implica, el mayor espesor de capa permite incluir material grueso de mayor tamaño.
- d. En suelos con grandes guijarros, las llantas neumáticas permiten una distribución de esfuerzos más uniforme, en tanto que el tambor rígido del rodillo pata de cabra suele puentearse sobre sus vástagos entre tales guijarros, dejando prácticamente sin compactar el suelo intermedio.

2.3.4. Compactación por impacto

En los procedimientos de compactación por impacto es muy corta la duración de la transmisión del esfuerzo. Los equipos que pueden clasificarse dentro de este grupo son los diferentes tipos de pisones, cuyo empleo está reservado a áreas pequeñas, y ciertas clases de rodillos apisonadores (Tamper) semejantes en muchos aspectos a los rodillos pata de cabra, pero capaces de operar velocidades mucho mayores que estos últimos, lo que produce un efecto de impacto sobre la capa de suelo que se compacta.

Los pisones pueden ir desde los de tipos más elementales, de caída libre y accionados a mano, hasta aparatos bastante más complicado movidos por compresión neumática o por combustión interna. Sobre todo por razones de costo, en todos los casos su empleo está limitado a determinadas partes de la estructura vial, tales como zanjas, desplante de cimentaciones, áreas adyacentes a alcantarillas o estribos de puentes, cobertura de alcantarillas, etc. y en donde no puedan usarse otros equipos de

compactación de mayor rendimiento, por razones de espacio o por temor al efecto de un peso excesivo. Los pisones de caída libre pueden ser desde simples mazas unidas a un mango y accionadas por un hombre, hasta mazas de 2 o 3 ton que se izan cables y se dejan caer desde uno o dos metros de altura. Estos modelos pesados, accionados por una maquina apropiada, se han usado con éxito en la compactación de grandes fragmentos de roca.

Los pisones neumáticos o de explosión se levantan del suelo por la reacción que ellos mismos generan al funcionar contra el propio suelo, lo que basta para elevarlos 15 o 20 cm. Se les considera apropiados para compactar suelos cohesivos, pero pueden resultar convenientes en otros tipos de suelos. Actualmente se fabrican pisones con pesos desde 30 hasta 1,000 kg. Pisone de media tonelada han producido excelentes compactaciones con 5 o 6 cubrimientos sobre capas de 20 a 25 cm; se ha reportado rendimientos del orden de 200 a 250 m³/h. Los rodillos apisonadores (tamper) operan a velocidades de 20 o 25 km/h, y ello, unido a la forma, las dimensiones y la separación de sus patas, hace que su efecto sobre el suelo sea básicamente el de una compactación por impacto, todavía no se han estudiado suficientemente los resultados obtenidos al usar estos rodillos, pero parece que su mejor rendimiento se logra en suelos finos con abundante contenido de grava y gujarros o en suelos finos residuales que contengan fragmentos de toca parcialmente intemperizados.

2.3.5. Compactación por vibración.

Para la compactación por vibración se emplea un mecanismo, bien sea del tipo de masas desbalanceadas o del tipo hidráulico pulsativo, que proporciona un efecto vibratorio al elemento compactador propiamente dicho. La frecuencia de la vibración influye de manera extraordinaria en el proceso de compactación, y se ha visto que su intervalo de variación optimo puede estar comprendido entre 0.5 y 1.5 veces de frecuencia natural del suelo, lo que lleva al aparato a frecuencias practicas del orden de 1,500 a 2,000 ciclos por minuto, si bien existen en el mercado equipos comerciales cuya frecuencia alcanza hasta 5,000 ciclos por minuto. El elemento compactador propiamente dicho lo constituyen reglas, placas o rodillos.

Hay varios factores inherentes a la naturaleza de la vibración que influye de manera substancial en resultados que rinde el equipo; los principales son:

- a) La frecuencia, esto es, el número de revoluciones por minuto de oscilador.
- b) La amplitud, generalmente medida por una distancia vertical en casi todos los equipos comerciales.
- c) El empuje dinámico que se genera en cada impulso del oscilador.
- d) La carga muerta, es decir, el peso del equipo de compactación, sin considerar el oscilador propiamente dicho.
- e) La forma y el tamaño del área de contacto del vibrador con el suelo
- f) La estabilidad de la máquina.

Además existen otras características de gran influencia referentes al suelo por compactar. De muchas de ellas se hablara en lo que sigue, pero conviene destacar ahora el contenido de agua del suelo y su naturaleza propiamente dicha. En el caso de la vibración, para obtener la máxima eficiencia de compactación, el contenido de agua óptimo del suelo suele ser bastante menor que el que el mismo requeriría para ser por otro procedimiento.

Quizá la ventaja principal de la aplicación de la vibración a las técnicas de compactación estriba en la posibilidad de trabajar con capas de mayor espesor que las que es común usar con otros compactadores; esto aumenta el rendimiento del proceso y reduce el costo de la operación. Por ejemplo, en suelos de tipo GW o GP, la compactación por vibración puede conseguir con facilidad el mismo resultado en capas de 60 cm que el que se lograría con el uso de rodillos neumáticos muy pesados en capas de 20 o 30 cm de espesor.

Ya se ha hablado de la práctica estadounidense de compactación de capas de 1.20 m, si bien usando rodillos vibratorios de peso excepcional.

Los procedimientos de compactación de campo combinan siempre la vibración con la presión; la vibración utilizada solo resulta poco eficiente. La presión es necesaria para vencer los nexos interparticulares que se producen tanto en los suelos gruesos como en los finos.

En los suelos gruesos, la vibración es conveniente porque reduce por instantes en forma considerable la fricción interna de los granos. La presión estática debe vencer esta fricción en todo su valor, por un mecanismo en el que incluso aumenta mucho la resistencia al deslizamiento de los granos, precisamente por el aumento en la presión normal. En el movimiento vibratorio que un suelo fricciones sufre bajo el compactador por vibración, se produce una orientación de las partículas en el momento en que tienden a separarse y una fuga de las partículas más finas hacia los huecos entre las partículas más grandes.

En diversas pruebas se ha llegado a apreciaciones cuantitativas de la reducción de la fricción interna que se consigue por un proceso vibratorio; esta ha llegado a ser de 15 veces en arenas y de 40 en grava. A este efecto reductor de la fricción se suma la presión del compactador, con sus cargas de compresión y esfuerzo cortante, las que además de mejorar el acoplamiento entre las partículas y aumentar la posibilidad de relleno de huecos, contrarrestan las fuerzas de tensión capilar que pueden existir entre los granos de arena. También esta aparente cohesión por capilaridad se ha cuantificado en forma experimental las presiones para vencerla son del orden de 0.5 a 1 kg/cm² en gravas y arenas, y de 4 a 7 kg/cm² en arcillas compactadas al 90% del peso volumétrico seco máximo correspondiente a la prueba Proctor modificada.

Las fuerzas de cohesión aparente son menor cuanto mayor sea el tamaño de las partículas predominantes en el suelo, de manera que en gravas y fragmentos de roca no son muy relevantes. Ello no obstante, se ha visto que el contenido de agua del material que se compacta juega un papel importante en estos suelos. Si el suelo grueso (arena y grava) contiene una cantidad apreciable de finos y su contenido de agua es alto, la compactación por vibración puede dificultarse notablemente. Desde el

punto de vista de la compactación por métodos vibratorios convendrá siempre que dicho contenido de finos no exceda el 10%.

Cuanto más uniforme sea la arena o la grava, más difícil será compactar intensamente la parte superficial del suelo. De hecho, un espesor quizá del orden de los 10 cm tendrá menor capacidad que zonas más profundas, pero este hecho carece usualmente de una importancia especial; si sobre la capa compactada vienen otras, al compactar esta se resolverá la situación. En el caso de las carreteras, la última capa de una base se compactara con la carpeta o con la capa de revestimiento. La compactación de los suelos gruesos uniformes con métodos vibratorios puede mejorarse humedeciéndolos en forma intensa y dando las pasadas finales a alta velocidad; también ayuda el dar las últimas pasadas con vibraciones de pequeña amplitud. No está claro por el momento el papel del agua en estos casos, pero su acción densificante podría relacionarse con el humedecimiento de las aristas de las partículas gruesas, que propicia su aplastamiento bajo las altas presiones que se producen en los contactos entre los granos en los suelos uniformes, en los que cada partícula se apoya en sus vecinas a través de pocos puntos, en los que se producen altas presiones.

El papel de agua es en cambio muy claro cuando se compactan con vibración de suelos gruesos en los que existían presiones capilares importantes entre sus granos; el añadir agua disminuye la tensión capilar y propicia el acomodo de los granos.

De hecho esta idea ha conducido a métodos prácticos para la compactación de arenas gruesas, gravas y fragmentos de roca. Otras veces se “arma” la capa por compactar donde las primeras pasadas con un contenido de humedad bajo (se usa para tal armado la cohesión aparente que da la capilaridad) y se añade agua a medida que se dan las pasadas subsecuentes, con lo que se busca eliminar los efectos de capilaridad.

En lo que se refiere a los suelos finos arcillosos que se compactan por vibración, se ha visto una influencia muy grande del contenido de agua; las arcillas poco húmedas exigen grandes energías de compactación y los equipos que los compacten han de ejercer adicionalmente grandes presiones. El compactador ha de vencer las fuerzas

internas que aglutinan los granos de arcilla, lo que exige presiones adicionales a la vibración del orden de 8 kg/cm², tal como más atrás se ha comentado. Este requerimiento hace que el espesor de las capas que pueden manejarse sea mucho menor que en el caso de arenas y otros suelos friccionantes, así como que la compactación haya de darse con equipos pesados pata de cabra o neumáticos, capaces de dar la presión requerida adicional a la vibración.

Los limos y los suelos limosos pueden compactarse adecuadamente por métodos vibratorios de más extenso uso es el manual de placa, en el que esta es accionada por un operador que utiliza un mango o manera; si se opera de modo eficiente, puede avanzar unos 10 m por minuto. Las placas vibratorias también pueden montarse en un bastidor al que remolque un tractor.

En la tabla IV-8 se dan las características más comunes de los compactadores vibratorios de placa.

Tabla IV-8

Compactadores vibratorios de placa (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Especificaciones comunes

Peso Total del Compactador.....	70 a 6000 kg
Peso de Cada Unidad vibratoria.....	70 a 204 kg
Área de Contacto de la Palanca.....	1540 a 13900 cm ²
Presión de Contacto de la Palanca.....	0.04 a 0.43 kg/cm ²
Amplitud de Vibración.....	2.03 a 12.7 mm
Frecuencia.....	420 a 2800 ciclos por minuto
Ancho de la Faja Compactada.....	38 a 380 cm
Velocidad de Operación.....	0.05 a 26.0 km/hora

2.3.6. Compactación por métodos mixtos

La tecnología actual está desarrollando un gran número de equipos en los que se busca combinar los efectos de dos o más de los sistemas tradicionales a fin de lograr una especialización de las acciones que garantice un resultado óptimo para cada caso particular. Como es natural, el uso de muchos de estos equipos difícilmente se justificara para empresas y organismos que no tengan un alto grado de diferenciación en sus trabajos; en otros casos, aun no hay suficiente experiencia acerca de los propios equipos.

En el compactador de rodillo liso vibratorio, la unidad vibrante se acopla a un equipo liso convencional. Existen remolcados y autopulsados. Su eficiencia es mayor en los suelos granulares, y pueden combinar los efectos de la vibración y la presión que ya se discutieron, aun en capas de espesor mucho mayor de las que sería capaz de compactar el rodillo liso por sí solo. Son muy eficientes para la compactación de concretos asfálticos.

Existen también de tipo manual, de muy pequeña dimensión. En la Fig. IV-26 aparecen graficas de peso volumétrico seco- contenido de agua para tres tipos de suelos, que se compactaron en capas de 23 cm, con 32 pasadas de un rodillo doble liso, con vibración en el tambor delantero; el peso del equipo era de 2.2 ton en total y tenía presiones de 12 y 17 kg/cm por unidad de ancho de los rodillos delantero y trasero, respectivamente.

Las curvas continuas se refieren al equipo con vibración, en tanto que las discontinuas dan datos de la compactación con equipo que no utiliza ese recurso. Puede verse que es menor el contenido de agua que el suelo requiere cuando se usa la vibración que cuando se emplea el mismo sistema pero sin vibración, como ya se dijo antes. En la tabla IV-9 se muestran las características más comunes de los rodillos lisos vibratorios.

Tabla IV-9

Compactadores lisos vibratorios (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Especificaciones comunes

Diámetro del Rodillo.....	53 a 122 cm
Ancho del Rodillo.....	61 a 133 cm
Peso Total del Rodillo.....	0.2 a 13 ton
Velocidad de Avance.....	0.5 a 6 km/hr
Frecuencia de Vibración.....	1050 a 5000 rpm
Presión de Contacto.....	Del Orden de 1 mm

Entre estos datos tiene especial importancia la velocidad de avance del rodillo, pues influye mucho en la energía de compactación, por ser independiente de la frecuencia.

El compactador neumático vibratorio por lo general es de tipo remolcado y encuentra su mejor aplicación en suelos arenosos bien graduados, arenas limosas e incluso, en arenas arcillosas. Es más eficiente que los rodillos lisos cuando aumenta el contenido de finos del suelo friccionantes, pues en este caso logra transmitir sus efectos a mayor profundidad.

Los rodillos pata de cabra con aditamento vibratorio generalmente son de tipo remolcado y se recomienda para compactar suelos finos arcillosos. Además de otras ventajas que ya se mencionaron, su uso permite utilizar mayor espesor de capa.

La combinación de los rodillos lisos y neumáticos es por lo común a base de ruedas con llantas en el eje trasero y rodillos lisos en el delantero. Suele ser un equipo autopropulsado y tener un aditamento que le permite alzar cualquiera de las dos clases de tambores que posee, de manera que en realidad puede operar con tres modalidades diferentes. Por esta razón, el equipo goza de amplia difusión entre las empresas constructoras.

En ocasiones esta combinación se hace aún más versátil dotándola de un vibrador, por lo general adoptado al rodillo liso.

El rodillo liso también se puede combinar con placas o plataformas vibratorias; esto los convierte en equipos muy eficientes para compactar pequeños fragmentos de roca, gravas y mezclas de estos suelos con arena, y permite manejar capas de mucho mayor espesor que las que es posible compactar solo con rodillo liso.

Los rodillos lisos también se usan combinados con rodillos lisos vibratorios, y en ocasiones incluso se añade a esta combinación un eje con rodillos segmentados. Estos equipos suelen tener mecanismos elevadores, que permiten levantar cualquier rodillo, lo que hace aún más versátil al conjunto.

2.4. Algunos Problemas Especiales De Compactación En El Campo

Se menciona brevemente algunos problemas de naturaleza especial relacionados con el problema de compactación en el campo:

2.4.1. Compactación de zonas difíciles, inaccesibles para los equipos convencionales

Estas condiciones presentan con cierta frecuencia y pueden demandar desde el uso ineficiente de equipos en distancias especiales de rendimiento reducido, a los que ya se ha hecho mención en páginas anteriores.

En la construcción de carreteras suele presentarse este problema, muy agravado en el fondo de cañadas profundas y angostas, en que no se justifican los caminos de acceso al fondo de las mismas por los pequeños volúmenes que hay que compactar. Una práctica común en tales casos es rellenar a volteo el fondo hasta un nivel a partir del cual pueda trabajarse mecánicamente. Si se tiene cierto cuidado en la operación de relleno y no se abusa de ella en cuanto a altura material colocado a volteo, este método no causa necesariamente efectos perjudiciales; el caso se complica cuando en el fondo de la barranca existe una obra de drenaje, lo cual es común; dicha obra, por su parte, impone condiciones al material que la rodea y la sobre yace. En el fondo de

barrancas y depresiones es común también, en el caso de carreteras y ferrocarriles, que el material colocado lo constituyan tamaños más o menos gruesos, incluyendo muchas veces fragmentos de roca. Las técnicas de compactación de estos materiales son las que corresponden a los Terraplenes.

2.4.2. Zonas próximas a puentes, alcantarillas, muros de retención, etc.

Ya se ha mencionado el bueno resultado que proporcionan los equipos de compactación manuales en estos casos. Un caso especial lo constituyen los colchones de protección de las obras de drenaje, los cuales han de construirse dentro de los requerimientos especiales que estas obras imponen según su tipo, los que se detallaran más adelante, en el capítulo correspondiente.

2.4.3. Compactación en los bordes de terraplenes.

A medida que la construcción de un terraplén progresa en altura, se va presentando el problema de la compactación en sus taludes, por el doble motivo de que el equipo de compactación no puede orillarse demasiado durante su operación y por la falta de confinamiento lateral que se tiene en las zonas de borde. El problema suele resolverse dando un sobre ancho a ambos lados del terraplén (quizá sean suficientes 30 o 40 cm en cada lado), el cual se puede recortar y afinar al fin de la construcción.

En terraplenes muy bajos el problema anterior puede justificarse la adopción de taludes suficientemente tendidos como para que sobre ellos circule el equipo de compactación. Las obras complementarias de drenaje y las de protección con forestación u otros medios pueden ayudar mucho a paliar los efectos de una mala compactación en los taludes.

2.4.4. Compactación de las primeras capas de un terraplén sobre terrenos blandos.

Cuando un terraplén se va a construir sobre un suelo de cimentación muy blando, suele presentarse el problema de falta de apoyo suficiente para una buena acción del equipo de compactación sobre las primeras capas de base. El desmonte y despalleo adecuados del terreno natural, seguidos de un oreo, cuando ello es posible, puede

ayudar a resolver el problema; si no es ese el caso, podrá construirse en toda la zona de desplante una plantilla de trabajo, preferentemente de material granular fino, con 20 o 30 cm de espesor; al compactar dicha capa se mejorara también la parte más superficial del suelo natural, mejorando las condiciones de conjunto. La plantilla de trabajo podrá ser bastante más potente cuando exista agua permanente, pues en tal caso deberá sobresalir algo del agua; si esta tiene tirantes de importancia, ya será económico pensar en la construcción de terraplenes u otro tipo de soluciones.

En relación con el problema presentado en el párrafo anterior ha de tenerse en cuenta que los suelos arcillosos blandos muchas veces poseen una costra relativamente más firme, producto del secado por evaporación; la remoción de esta capa o su debilitamiento contribuirá siempre a hacer más difíciles las condiciones de trabajo.

2.4.5. Suelos friccionantes que se tornan “movedizos”.

La experiencia ha demostrado que algunos suelos, tales como limos no plásticos, arenas muy finas o polvo de roca, cuando se compactan en zonas de nivel freático alto atraen agua por capilaridad hasta su superficie y se vuelven movedizos, con pérdida casi total de su resistencia. El mínimo efecto puede presentarse en tales suelos si se compactan con un excesivo contenido de agua. Al presentarse el problema, es muy fácil secar estos suelos por escarificación y oreo, si se logra eliminar la fuente de agua que los ha saturado, pero es en este punto en donde pueden surgir problemas casi insolubles; en áreas pequeñas el problema se puede eliminar con la colocación de una capa de material granular grueso que rompa la capilaridad e impida la subida del agua; en otros casos podrá abatirse el nivel freático por medio de sub drenes laterales de zanja. Cuando todo lo anterior no sea posible, deberá procurarse no alterar al terreno natural y usar sobre este material grueso apropiado, modificando el proyecto cuando sea necesario.

2.4.6. Problemas derivados de sobre compactación.

La creencia de que cualquier aumento en el peso volumétrico seco de un suelo por compactación va acompañado por un mejoramiento general de sus condiciones la

desmienten en forma drástica de sus condiciones francamente desfavorables por compactar los suelos más allá de un cierto límite. No es posible mencionar todos los casos de sobre compactación perjudicial, pero algunos de los más comunes son los siguientes:

1. Suelos en los que la sobre compactación produce un cambio estructural que los hace inadecuados. Quizá el caso más típico es el de los tezontles (espuma de basalto) que se utilizan en terraplenes ligeros sobre suelos comprensibles blandos. La sobre compactación rompe los fragmentos porosos, produciendo una granulometría mucho más variada y abundante cantidad de finos, todo lo cual puede hacer llegar al material fuertemente compactado a pesos volumétricos incluso más altos que los de cualquier material terreo convencional que se hubiere usado, haciendo perder por completo la ventaja de su utilización.
2. Materiales expansivos o con rebote elástico. Los materiales expansivos son fuente de problemas muy graves, sobre todo donde las condiciones climáticas conducen a cambios significativos en el contenido de agua en diferentes épocas del año. También lo son cuando la construcción se efectúa durante la época de secas y el suelo absorbe humedad en la subsecuente estación lluviosa. Si estos suelos se compactan en exceso, se expandirá mucho y generaran presiones de expansión muy grandes al humedecer tras la compactación; por el contrario, si se compactan con un contenido de agua apropiado y solo hasta un límite justo, las expansiones se podrán reducir al mínimo; para tal fin, el requisito de compactación en general no tendrá nada que ver con el peso volumétrico seco máximo o la humedad óptima de cualquier prueba de laboratorio que se use como prueba de control. Ahora, la humedad y el peso volumétrico apropiados para la compactación deberán determinarse en un estudio de expansión. Es

fundamental el control de la humedad de compactación durante el proceso.

Otro tanto puede decirse de los suelos que exhiben rebote elástico, por ejemplo bajo el paso de cargas en movimiento; este efecto, que conduce a la destrucción rápida de un pavimento, por ejemplo, es mucho más notable cuando el suelo se compacta más allá de un cierto límite, que deberá determinarse también con base en estudios especiales.

2.5. Pruebas de compactación en laboratorio

Los procesos de compactación de campo son en general demasiado lentos y costosos como para reproducirlos a voluntad, cada vez que se desee estudiar cualquiera de sus detalles; no proporcionan un modo práctico de disponer de una herramienta de análisis, estudio de investigación, tal como lo requiere el problema de compactación de suelos, con sus muchas complicaciones y complejidades. Así, la tendencia a desarrollar pruebas de laboratorio que reproduzcan fácil y económicamente aquellos procesos debió de ser obvia para cualquiera que se interesa (e interese) en racionalizar las técnicas de campo y en conocer más un proceso tan difícil e importante.

Las mismas razones inducen a las pruebas de laboratorio a ser base de estudios para proyecto y fuente de información para planear un adecuado tren de trabajo de campo; la alternativa sería o establecerlo sobre bases únicamente personales, fundadas en la experiencia anterior, pero sin ningún estudio para el caso, o desarrollarlo en un modelo a escala natural, verdadera duplicación de la estructura que se vaya a construir, llegando como límite al absurdo total de hacer algo para emprender a hacerlo (absurdo, naturalmente, en el caso de que se habla, pero no es relación a otras actividades humanas).

Así planteado el problema, las pruebas de compactación de laboratorio se justifican solo en términos de su representatividad de los procesos de campo que producen. Y esta representatividad ha de ser llevada a sus últimas consecuencias, sin pena de caer en un despropósito y llegar a estudiar detenida y acuciosamente en el laboratorio un proceso que no tenga nada (o no tenga mucho) que ver con el proceso de compactación de campo que se supone que reproduce; este divorcio podría llegar a tener consecuencias graves en cuanto a las conclusiones prácticas que se adopten y, desde luego, las tendría al desviar fuera de sus causas justos y razonables el criterio de aquellos ingenieros que juzgaran el proceso de compactación a través del laboratorio de manera única o principal.

En rigor, actualmente se hacen dos usos principales de las pruebas de compactación de laboratorio. En el primero, se compactan los suelos para obtener datos para proyecto de estructura de tierra; esta información se refiere a resistencia, deformabilidad, permeabilidad, susceptibilidad al agrietamiento, etc. En este caso, la representatividad de la prueba, en el sentido de que se produzca en el laboratorio un suelo con las mismas propiedades mecánicas que después se obtendrá al compactar los materiales en el campo, es obviamente esencial. Pero hay un segundo uso de las pruebas de compactación, que es el que de ellas se hace en las operaciones de control de calidad; en este caso, la prueba funciona fundamentalmente como un índice comparativo del peso volumétrico de laboratorio y de campo y la similitud de propiedades mecánicas entre ambos es mucho menos importante, siéndolo por consecuencia cualquier idea de “representatividad” referente a la prueba. Lo esencial de un índice de compactación es que sea siempre el mismo.

Ya se comentó con relativa extensión el conjunto de factores que afectan a un proceso de compactación; es obvio que todos deben contemplarse al establecer una prueba de laboratorio. Como existen tantos modos de compactar suelos en el campo, es también razonable pensar que no se lograra tener una sola prueba, con una única técnica estandarizada, que pueda representarlos a todos. Así, es lógico pensar que haya pruebas de compactación de varios tiempos. La energía de compactación influye

mucho también en los resultados del proceso, y hoy los equipos de campo la aplican en formas muy variadas, de manera que también habrá variantes en las pruebas por este concepto.

Aun cuando otros factores actúan como variables que afectan el proceso de compactación, solo los antes mencionados han sido utilizados para diferenciar pruebas de laboratorio, por lo menos las más comunes.

A partir de 1933, en que Proctor desarrollo su prueba, la primera históricamente, han ido apareciendo otras muchas; todas ellas pueden agruparse en uno de los siguientes apartados:

- Pruebas dinámicas.
- Pruebas estáticas.
- Pruebas por amasado.
- Pruebas por vibración.
- Pruebas especiales o en proceso de desarrollo.
- Pruebas dinámicas.

2.5.1. Pruebas dinámicas.

Todas las pruebas dinámicas hoy en uso participan de las siguientes características comunes:

1. El suelo se compacta por capas en el interior de un molde metálico cilíndrico, variando de unas pruebas a otras el tamaño del molde y el espesor de la capa.
2. En todos los casos la compactación propiamente dicha se logra al aplicar a cada capa dentro del molde un cierto número de golpes, uniformemente distribuidos, con un pisón cuyo peso, dimensiones y altura de caída cambian de unas variantes de prueba a otras. El número de golpes del pisón que se aplica por capa también en las diferentes pruebas.

3. En todos los casos, la energía específica se puede calcular con bastante aproximación con el empleo de la expresión 4-1, quedando definida por el número de golpes por capa del pisón compactador, el número de capas en que el suelo se dispone dentro del molde, el peso del pisón compactador, su altura de caída y el volumen total del molde.
4. En todos los casos se especifica un tamaño máximo de partícula que puede contener el suelo, y se eliminan los tamaños mayores por cribado previo a la prueba. Con frecuencia se establece también una especificación relativa al rehusó del material durante la prueba.

El valor de cada una de las variables de la prueba puede hacerse cambiar según convenga, a fin de reproducir en cada caso las condiciones de compactación de campo, pero se ha hecho costumbre que cada organismo (o grupo de ellos) de los que usan suelos compactados, fije según su experiencia una prueba patrón y que de sus resultados deriven las especificaciones para la compactación en el campo.

Desde luego que, como las propiedades mecánicas de los suelos compactados dependen de las condiciones de compactación, y en las propiedades que son deseables en cierta estructura no necesariamente lo son en otra, resulta irracional el uso de un solo patrón de laboratorio para todas las posibles situaciones de campo.

Algunas de las pruebas dinámicas que han alcanzado mayor difusión son la prueba Proctor estándar (que es la que originalmente propuso Proctor), la prueba Proctor (AASHTO) estándar (con cuatro variantes), la prueba Proctor (AASHTO) modificada (con cuatro variantes), la prueba E-10 del U.S. bureau of Reclamation, la prueba de impactos de California (en sus dos variantes) y la prueba británica estándar (B. Std.-1377.1948).

Las características principales de algunas de estas pruebas se presentan en la tabla IV-13.

Al final de la tabla IV-13 se añadió la variante Proctor S.O.P., por medio de la cual la Secretaría de Obras Públicas suele controlar los trabajos de compactación de terracerías en materiales finos.

Además de las anteriores, merece mención la variante de prueba de compactación dinámica estipulada por el Departamento de Carreteras del Estado de Texas (EE.UU.), similar hasta cierto punto a la prueba de AASHTO modificada.

Las pruebas de AASHTO estándar y AASHTO modificada se detallan en su procedimiento en el anexo IV-a de este capítulo. Ambas existen en 4 variantes generadas con el criterio que se indica a continuación. En primer se utilizan dos tipos de molde uno con diámetro de 10.16 cm (4") y otro con diámetro de 15.24 cm (6"); la razón de esto es que el primero es el molde clásico establecido por Proctor y que perdura por la costumbre, en tanto que el segundo es un tamaño que se introdujo después debido a la convivencia de realizar pruebas de valor relativo de soporte (VRS) en el material compactado, sin extraerlo del molde para estas pruebas, típicas de la tecnología de pavimentos y que se detallaran en el capítulo alusivo, el molde 4" resulta pequeño y se utiliza el de 6" (técnica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos). En segundo lugar se utilizan dos tipos de granulometrías, uno hasta el tamaño máximo de la malla N° 4 y otro hasta el tamaño máximo de la malla 3/4"; esto es con el objeto de dar mayor representatividad a la prueba y abarcar una mayor variedad de materiales.

El método por impactos de California, que se describe en el anexo IV-b de este capítulo, en realidad es anterior a la propia prueba original de Proctor en su utilización como método de control de compactación de campo. En esencia es similar a las pruebas normalizadas por la AASHTO, si bien la energía específica es distinta, como consecuencia de las diferencias anotadas en la tabla IV-13.

Tabla IV-13

Características de las pruebas de compactación por impactos de uso más generalizado

Prueba	Tratamiento del material	Molde de Diámetro Altura		Peso del Martillo	Altura de Caída	N° de Capas	N° de Golpes por Capa	Reusó del Suelo	Energía Especifica
		cm	cm	kg	c m				Kg*cm / cm3
Proctor Estándar	Cribado por la malla 1/4"	10.16	12.7	2.49	30.48	3	25	si	4.02
Prueba de E-10 del U.S.B.R	Cribado por la malla N°4, tras secado al aire y desintegración de grumos	10.8	15.24	2.49	35.72	3	25	si	6.05
Prueba (AASHTO) estándar (variante A)	Cribado por la malla N°4 Tras secado al aire	10.6	11.43	2.49	30.48	3	25	si	6.05
Proctor (AASHTO) Modificada (Variante B)	Tras secar al aire se desintegra grumos y se criba por la malla 3/4" reemplazando material retenido con igual peso del material entre las mallas de 3/4" y Núm. 4	15.24	17.78	4.53	45.72	5	55	no	27.31
California Variante A	Cribado por la malla de en estado seco	7.3	91.44	4.53	45.72	5	20	no	17.7
Variante B	Cribado por la malla de en estado Húmedo	7.3	91.4	4.53	45.72	10	20	no	35.4
Británica Estándar	Secado al Horno o al aire y cribado por la malla 3/4"	10.16	11.68	2.492	30.48	3	25	si	6.05
Variante Proctor de SOP	Secado al aire y cribado por la malla Núm. 4	10.16	11.68	2.942	30.48	3	30	si	6.65

Carreteras de California la utiliza para el control de compactación de campo y la ha mantenido en uso durante muchos años, apartándose un poco de la tendencia casi universal en los EE.UU., a favor de las pruebas Proctor, normalizadas por la AASHTO, quizá por no desaprovechar la experiencia de muchos ingenieros de campo, que al cabo de los años se va “calibrando” en el uso de una cierta prueba; la

anterior es quizá la principal razón por la que muchas instituciones mantienen en uso pruebas que en realidad difieren un poco de otras y cuyo uso no añade nada substancial a la tecnología que se emplea.

Otro tanto sucede en la Secretaria de Obras Publicas de México, que utiliza para suelos finos una prueba tipo Proctor cuya única variación notable respecto a la prueba AASHTO estándar consiste en dar 30 golpes por capa en vez de 25. Esta norma se introdujo hace más de 35 años y obedeció a que entonces se creyó que era más fácil obtener una buena repartición de los golpes por capa si se daba un número mayor; la razón para apartarse de la práctica común podrá parecer hoy excesivamente sutil o, incluso, inadecuada, pero el hecho es que la Secretaria de Obras Publicas ha desarrollado sus últimos 35 años de experiencia con base en esta prueba y de esta es la causa única de que se siga utilizando.

El departamento de Carreteras del Estado de Texas ha desarrollado otra prueba de impactos que como se dijo, tiene interés particular. El hecho esencial está en la mecanización de la prueba, por lo demás básicamente similar a la Proctor (AASHTO) modificada; mediante la mecanización se trata de eliminar la influencia del operados. Existen diferencias relativamente menores en relación al tamaño de las partículas, al tamaño del espécimen y la compactación se hace en un conjunto automático que usa pisones también automáticos; se impone el requisito de no usar el material. Se especifican 4 energías diferentes para distintos tipos de suelos, y se disminuye la energía de compactación en los suelos finos a medida que puedan desarrollar tendencia a la expansión o al agrietamiento; se tiene todo un procedimiento de compactación para las arenas limpias.

Una de las objeciones más serias que se han puesto a las pruebas de compactación por impacto estriba decir que en su representatividad esta fundamentalmente en entredicho de las condiciones de confinamiento muy rígidas que imponen el molde al suelo colocado en su interior; estas condiciones limitan las posibilidades de desplazamiento de las partículas del suelo, haciéndolas distintas de las que se tienen en el campo, donde el confinamiento lateral es mucho menor. Con base en esta idea,

Francis Hveem, uno de los cerebros más agudos y originales que han estudiado estos problemas, propuso realizar pruebas en moldes convencionales, pero con especímenes en forma de cilindro hueco, en cuyo interior se colocaría un cilindro de hule, que hiciese posible un desplazamiento de las partículas más parecido al que tienen en el campo. Los autores de este libro conocen por comunicación personal algunos resultados preliminares de esta idea, que indicaban la obtención en muchos suelos de más altos grados de compactación para menores energías, con respecto a las pruebas tradicionales; sin embargo, parece ser que estas interesantes investigaciones se interrumpieron antes de conducir a conclusión de carácter definitivo.

En la Fig. IV-7 se presentó un hecho fundamental que rige los procesos de compactación de laboratorio en pruebas dinámicas. A energía creciente, se obtiene mayor peso volumétrico seco máximo a contenido de agua óptimo decreciente. Al compactar las diferentes curvas de compactación de la Fig. IV-7 se puede ver también que arriba de la humedad óptima un fuerte aumento en la compactación tiene muy poco reflejo en el peso volumétrico seco logrado, en tanto que abajo del contenido óptimo de agua, es muy considerable el efecto del aumento de la energía de compactación.

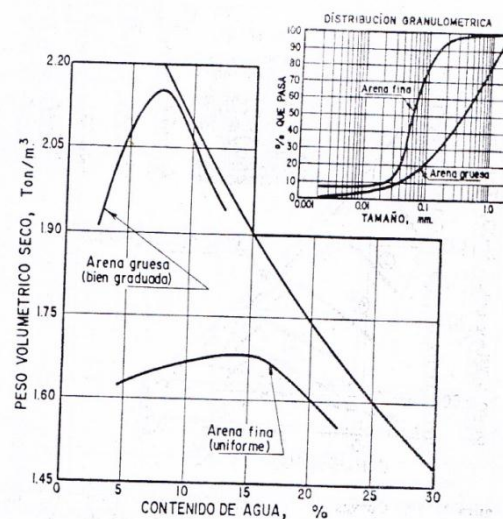


Figura IV-29. Curvas de compactación para dos arenas de diferente granulometría con la misma energía de compactación. (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

La Fig. IV-29 ilustra el efecto del tipo de suelo (en este caso la granulometría) en los resultados de la compactación lograda en dos arenas diferentes; en ambos caso se usó la prueba británica estándar.

Nótese la ventaja de la arena bien graduada, en lo que las partículas finas pueden acomodarse en los huecos entre las grandes.

La influencia del contenido de partículas gruesas en la muestra de suelo investigada por Maddison quien encontró que la mezcla de 25% de cualquier agregado de un suelo tamaño, hasta 2.5 cm, tiene poco efecto en la compactación del conjunto de suelo, pero porcentajes poco mayores de ese mismo tamaño hacen decrecer con rapidez los pesos volumétricos alcanzados, y cuando dicho porcentaje llega a ser 70%, el comportamiento del suelo es el de un conjunto de partículas gruesas del tamaño seleccionado.

La información respecto a la influencia del tipo de suelo puede complementarse si se analiza la Fig. IV-30 en la que se presentan curvas de compactación para 8 diferentes suelos, compactados con la prueba Proctor (AASHTO) estándar.

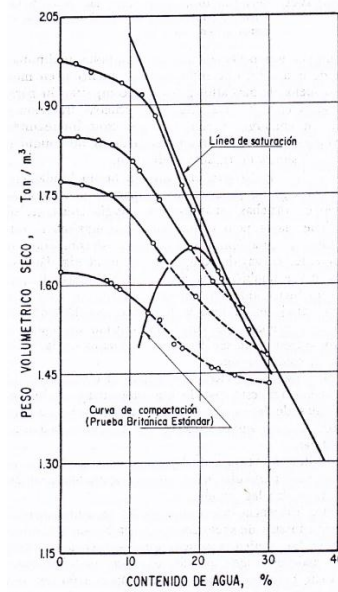


Figura IV-31. Relación entre el peso volumétrico seco y el contenido de agua en una arcilla arenosa cuando se humedece a seca lentamente después de ser compactada (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)

En la Fig. Iv-31 se muestran resultados del secado y humedecimiento de una arena arcillosa compactada con la prueba británica estándar de impactos; en la figura aparece también la curva de compactación correspondiente. A partir de diferentes puntos de dicha curva, que representan condiciones particulares del citado suelo, se secó y humedeció este; en la figura se puede ver la evaluación del contenido de agua y del peso volumétrico seco como consecuencia de tales operaciones. Los máximos cambios de volumen ocurren cuando el suelo está cerca de la saturación, pero la capacidad de absorber agua decrece cuando también disminuye el porcentaje de aire en los vacíos. Aunque los cambios de volumen más pequeños ocurren con contenidos de aire muy altos, estos suelos cuando se saturan, son los que llegan a los menores pesos volumétricos y a los mayores contenidos de agua.

La forma de las curvas de compactación obtenidas se considera “regular” cuando presentan el contorno parabólico que se muestra en muchas de las figuras presentadas, las arenas uniformes y ciertas arcillas coloidales altamente plásticas exhiben con frecuencia curvas de compactación de forma muy irregular. La forma de las curvas puede estar también ligada a la energía de compactación; por ejemplo, en las arcillas de alta plasticidad, la forma irregular obtenida en la prueba Proctor (AASHTO) estándar suele tornarse muy regular cuando se usa la prueba Proctor (AASHTO) modificada.

En una representación semi logarítmica, tal como la que se ve en la Fig. IV-32, se puede apreciar la variación de los pesos volumétricos secos máximos para 17 suelos diferentes, compactados con distintas energías de compactación. Dicha figura se obtiene al unir los valores de los máximos pesos volumétricos obtenidos en laboratorio para cada suelo y cada prueba efectuada, lo que produce una variación lineal en representación semi logarítmica como la que se muestra. En la gráfica resalta una vez más la influencia del tipo de suelo en los resultados de la compactación y el diferente efecto que puede tener sobre cada uno el aumento de la energía específica de la prueba (de la AASHTO estándar a la AASHTO modificada). Al tomar en cuenta que se está utilizando una representación semi logarítmica, podrá

observarse que para todos los suelos la eficiencia de un aumento de la energía de compactación va disminuyendo a medida que se opera a niveles más altos de energía.

La experiencia de campo indica que en muchos suelos es muy difícil sobrepasar el 100% de compactación con base en la prueba modificada, en tanto que con otros es más fácil lograrlo. La explicación al hecho se ve clara al comparar las diferentes inclinaciones de las curvas en la gráfica.

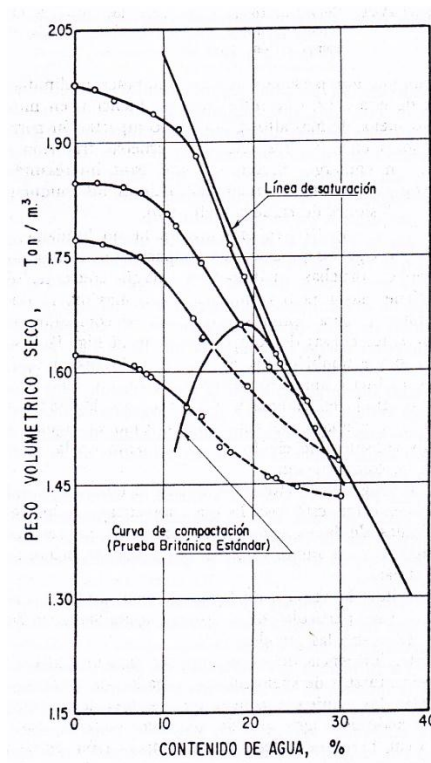


Figura IV-32. Variación del peso volumétrico máximos con la energía de compactación para diferentes tipos de suelos (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)

En la Fig. IV-33 se presenta otra comparación de interés entre las pruebas Proctor (AASHTO) estándar y Proctor (AASHTO) modificada hechas para 43 suelos diferentes. El máximo de la curva de compactación Proctor (AASHTO) estándar oscila entre el 85 y el 97% del máximo correspondiente a la prueba modificada; el tipo de suelo es el factor principal para definir la relación entre ambas pruebas. Es

notable el acercamiento que ocurre entre los resultados de las dos pruebas en materiales granulares.

Para finalizar la información que se ofrece en torno a las pruebas dinámicas, en la tabla IV-14 se representa resultados de compactación en varios tipos de suelos correspondientes a varias pruebas y a diversos equipos de compactación de campo. En la tabla se ve claramente la diferencia grande que se puede obtener para un mismo suelo, tanto en peso volumétrico seco máximo como contenido óptimo de agua, al aplicar diferentes métodos de compactación; la relatividad de los conceptos anteriores resalta como evidente una vez más. La investigación que se presenta corresponde a un caso particular, pero destaca convenientemente las tendencias generales.

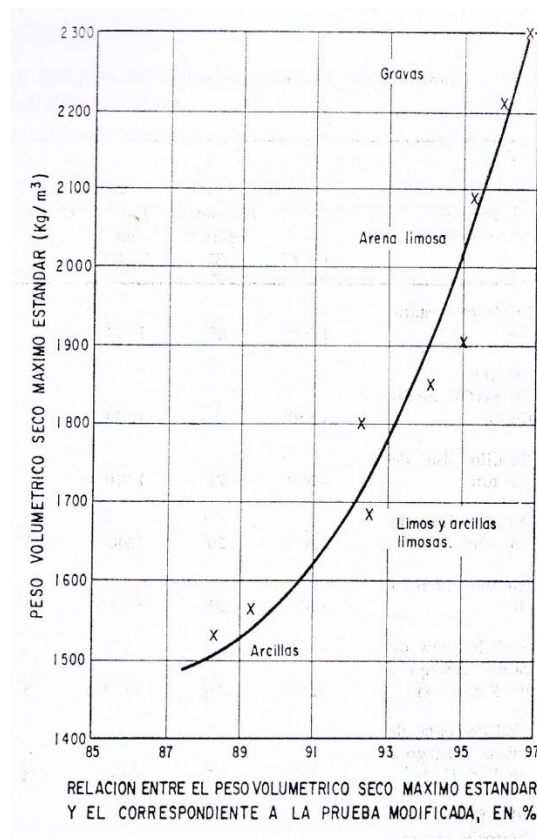


Figura IV-33. Relación entre pesos volumétricos, estándar y modificados (AASHTO). (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

2.5.2. Pruebas Estáticas

Con relación a la Fig. IV-3 ya se comentó que en suelos fricciantes es muy común que las pruebas dinámicas produzcan una curva de compactación con una forma inadecuada para la determinación de un peso volumétrico seco máximo y una humedad óptima. También se dijo que para este tipo de suelo existen otras pruebas de compactación en las que usualmente se define una curva de compactación de forma típica adaptada a los fines que se persiguen.

Una de estas es la prueba de compactación estándar, que introdujo O. J. Porter y que alcanzo su forma definitiva alrededor de 1935. En ella se compacta al suelo colocándolo dentro de un molde cilíndrico de 15.24 (6") de diámetro; el suelo se dispone en tres capas, acomodándolo con 25 golpes de una varilla con punta de bala, lo que no significa una compactación intensa, pues la varilla es ligera y la altura de caída, que no está especificada, es la mínima utilizable por el operador para una manipulación cómoda. La compactación propiamente dicha se logra aplicar al conjunto de las tres capas una presión de 140.6 kg/cm², la cual se mantiene durante un minuto. Los detalles de la prueba; se menciona allí la modalidad adoptada de la Secretaria de Obras Públicas, que esta utiliza con frecuencia para controlar los trabajos de compactación de campo con suelos predominantemente fricciantes (prueba Potter SOP).

Como se ve, en la prueba de compactación estática es tan antigua como las dinámicas; si bien no se ha extendido tanto como estas ni es de aplicación tan universal, tiene en su favor de igual manera el factor de tradición y costumbre. Además, la prueba clásica estática estaba ligada con la prueba de valor relativo soporte (CBR), muy usada en pavimentos, y esta es, quizá, otra razón de su supervivencia en la tecnología de muchas instituciones.

Es bastante dudoso, pero está relativamente poco estudiado, que una prueba estática tenga un buen índice de representatividad respecto a cualquier proceso de compactación en el campo. La aplicación de presión, que de por si no es un método eficiente para compactar suelos fricciantes (que es a los que muchas veces se les

aplica la prueba estática), no considera ni la vibración ni ninguno de los métodos modernos de compactación de estos suelos en el campo; además, hay razones para pensar que la aplicación de una presión estática puede producir cambios granulométricos importantes durante la prueba, lo que contribuye a poner en entredicho su representatividad.

Algunas instituciones tienen a la Porter como prueba estándar de compactación de suelos friccionantes y a pruebas tipo Proctor como norma en suelos finos; los resultados de un estudio como el anterior inducen a pensar sobre la conveniencia de tratar de diversificar los controles de compactación a tal grado, pues en ocasiones un cierto estándar pudiera significar un requisito elevadísimo respecto al otro, en tanto que en otras pudiera quedar muy por debajo de la necesidad real del proyecto; esto depende de si el suelo friccionantes es fino o grueso, de si contiene finos plásticos o no plásticos y de factores que en general son muy difíciles de cuantificar y que se prestan a la aparición de la multitud de casos de frontera o de casos de duda, cada uno de los cuales puede generar un problema de campo, al fijar un estándar de compactación inalcanzable por el equipo o innecesario o bien al establecer un estándar de compactación insuficiente. Estudios como el que se comenta sugiere que la mejor política puede ser la de controlar la compactación de campo con base en un solo estándar, pero que comprenda las limitaciones de este criterio, analizando cada discrepancia particular con base en una sólida comprensión de lo que es compactar un suelo y un recto juicio de cuáles son las necesidades de cada caso

2.5.3. Compactación por amasado

Con una sola excepción, los métodos de compactación por amasado son relativamente nuevos en las tecnologías de los laboratorios. La excepción la constituye la prueba denominada “miniatura” que desarrollo S. D. Wilson en la Universidad de Harvard (EE.UU.).

En todos los casos se busca reproducir en el laboratorio el efecto típico que tiene lugar en muchos rodillos de campo (pata de cabra y neumáticos, en menor escala),

con el objeto de lograr en el espécimen la misma estructuración interna que adquiere el suelo del campo.

En la prueba “miniatura” el efecto de amasado se logra al presionar un embolo de área especificada contra la superficie de las diversas capas con las que se constituye la muestra dentro de un molde, el cual tiene las dimensiones necesarias para formar un espécimen apropiado para la realización de pruebas triaxiales convencionales; en cualquier aplicación se transmite al embolo una presión constante, lo que se consigue cuando se le adopta un resorte calibrado, que permite saber el momento en que se aplica tal presión. En el capítulo siguiente se describe en detalle la prueba, que solo se puede realizar en suelos con tamaño máximo de 2 mm, lo que por otra parte no es un inconveniente grave pues, como es natural, su campo de aplicabilidad se circunscribe a suelos arcillosos.

Hveem desarrollo un compactador mecánico de laboratorio que, sin el operador, forma especímenes por medio de un verdadero proceso de amasado, independientemente de la influencia del operador, aun cuando no hay suficientes publicaciones sobre resultados y conclusiones, que permitan definir la representatividad del compactador (o por lo menos no son conocidos por los autores de este libro en cantidad suficiente), toda la institución ingenieril inclina a pensar que este método de compactación sea el que produzca los especímenes más representativos de los suelos a los que en el campo se aplican métodos de compactación con rodillo pata de cabra o rodillo neumático.

2.5.4. Compactación por vibración

Las pruebas de compactación con vibración han interesados a numerosos investigadores en los últimos años Muchas de ellas utilizan un molde Proctor montado en una mesa vibratoria; se estudia el efecto de la frecuencia, la amplitud y la aceleración de la mesa vibratoria, así como la influencia de las sobrecargas, de la granulometría del suelo y del contenido de agua. Schaffner estudio la compactación de arenas secas en mesas de vibración. La Fig. IV- 38 muestra resultados típicos;

puede verse como disminuye la relación de vacíos con la aceleración y como se obtuvieron los máximos pesos volumétricos con frecuencias del orden de 6000 r.p.m.

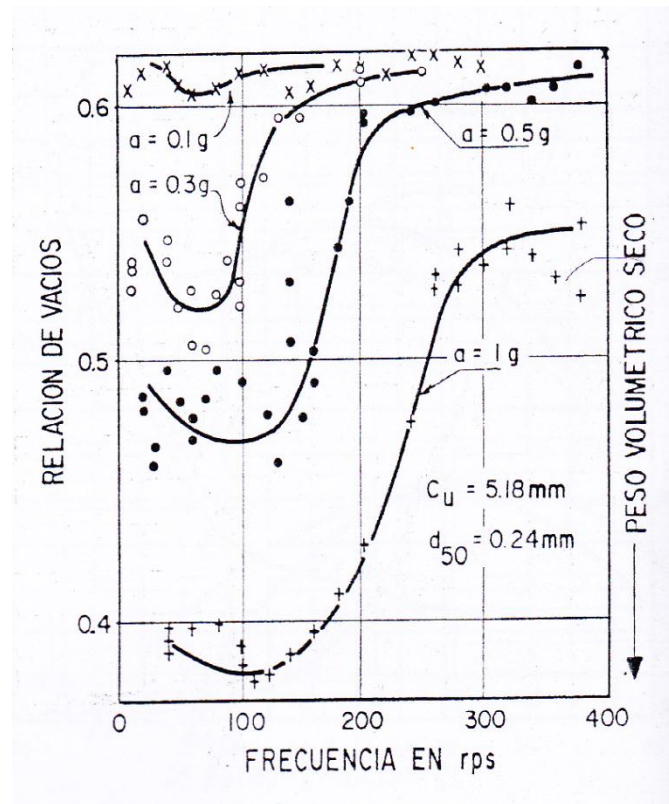


Figura IV-38. Compactación de arenas por vibración. Influencia de las aceleración y la frecuencia. (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Resultados análogos han sido reportados por Selig quien encontró que los máximos pesos volumétricos se obtienen con aceleraciones comprendidas entre 1g y 2g y que cuando crece la presión que se ejerce sobre la arena, se requiere una aceleración mayor para alcanzar un cierto peso volumétrico.

Ortigosa y Whitman encontraron que con aceleraciones arriba de 2g el peso volumétrico disminuye otra vez por efectos de la sobre compactación, pero si la arena está saturada o húmeda, el peso volumétrico sigue buscando aun con aceleraciones superiores a 3g.

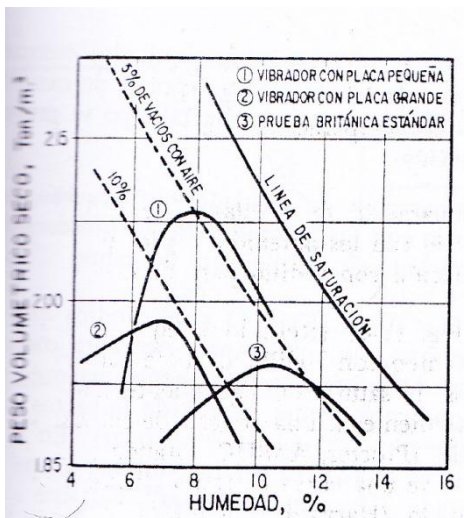


FIGURA IV-39 Curva de compactación para un suelo arenoso compactado con dos tipos de vibrados y con la prueba Británica estándar (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

La técnica sueca ha desarrollado otro tipo de prueba de laboratorio con vibración que consta en colocar un espécimen en la parte baja de un cilindro unido a un bloque masivo de concretos; sobre el espécimen y cubriéndolo en toda su superficie vibra una placa, provista de un vástago sobre el que actúa en el vibrador.

Los métodos de vibración en el laboratorio también se han estandarizado a base de una mesa vibratoria combinada con una sobrecarga o con un pisón vibratorio. En la Fig. IV-39 aparece una comparación de la eficiencia que se logra al compactar una arena en el campo con vibración y la que se puede obtener con una prueba dinámica de laboratorio; resalta en primer lugar lo mucho que influye el tamaño de la plaza del vibrador y, en segundo, la gran eficiencia que se puede conseguir al aplicar racionalmente la compactación vibratoria.

Por su importancia al especificar el rango de frecuencias con que se deben usar los compactadores en el campo o aplicarse las vibraciones en el laboratorio, se presentan a continuación, en la tabla IV-17, las frecuencias naturales de algunos suelos y rocas considerados en conjunto con un vibrador: la tabla se refiere a un determinado vibrador.

TABLA IV-17

Frecuencia natural del conjunto suelos-vibrador para varios suelos y rocas (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)

Tipo de Suelo o Roca	Frecuencia Natural RPM
2m de turba sobre arena	750
2m de relleno con arena y suelos finos	1145
Arena y grava con lentes de arcilla	1165
Terracería compactada por el paso del Transito	1280
Arcilla humedad	1430
Arena media muy uniforme	1445
Arena gruesa uniforme	1570
Arcilla casi seca	1650
Caliza	1800
arenisca	2040

Un aumento en la amplitud incrementar la eficiencia de la vibración y su efecto en profundidad a todas las frecuencias, al aumentar la deformación de las partículas del suelo. Una amplitud, así como en los materiales friccionantes más gruesos. Cuando se utilizan amplitudes muy grandes pueden reducirse las frecuencias de los equipos, lo que suele conducir a procesos de compactación más económicos.

La investigación de laboratorio ha hecho ver también que la utilización de frecuencias de resonancia par el sistema suelo-vibrador es más útil cuanto mayor sea la presión que se ejerce sobre el suelo compactado. En la práctica eso ha conducido a la utilización de frecuencias más altas en los equipos de compactación más ligeros.

2.6. Criterios para la selección de pruebas de laboratorio comparación de resultados obtenidos en el laboratorio y el campo.-

A riesgo de caer en la reiteración, conviene ahora hacer una breve recapitulación de los criterios prácticos para elegir una determinada prueba de laboratorio que haya de servir como base de proyecto o como norma de control de calidad en un proceso de compactación; como quiera que tales criterios solo se basan en la representatividad de las pruebas, se insistirá aquí algo en la presentación de información sobre resultados comparativos de procesos de compactación en el campo y en el laboratorio; también se completaran y sistematizaran algunos datos, sobre los cuales ya aparecieron algunos comentarios en páginas anteriores de este capítulo.

El problema de la selección de la prueba de laboratorio apropiada puede expresarse en términos sencillos, pues se trata de elegir la prueba que para reproducir la relación entre pesos volumétricos y contenidos de agua y la estructura del suelo en el campo permita estudiar el efecto de las condiciones de compactación en los suelos particulares que vayan a usarse, con el fin de definir en forma racional las condiciones en que se lleve a cabo el proceso de compactación de campo

En el caso de los suelos finos, con pruebas de amasado se logra la máxima aproximación a la estructura de los suelos que se vaya a compactar; esto se ha comprobado por comparación de propiedades mecánicas. La compactación por impactos es menos apropiada y menos representativa, pero es probablemente aceptable en la tecnología de Vías Terrestres, sobre todo con fine de control de calidad: la mayor parte de las diferencias con respecto a la compactación de campo quedan seguramente dentro de las variaciones y desviaciones de los procesos constructivos prácticos

De esta manera, la selección de la prueba patrón de laboratorio se reduce a escoger la energía de compactación que mejor reproduzca la relación entre el peso volumétrico y los contenidos de agua que se espera en el campo. Nótese que se recomienda siempre el uso de una prueba de amasado o, cuando menos, dinámica, y se considera

poco apropiado utilizar una prueba estática, cuya representatividad, como se dijo, es mucho más problemática.

2.7. Propiedades mecánicas de los suelos finos compactados.-

El estudio de las propiedades de los suelos finos compactados requiere un análisis previo de la influencia de las variables de compactación que condicionan las propiedades mecánicas de dichos suelos estas variables son su relación de vacíos (o peso volumétrico seco), su grado de saturación y la estructuración que adquieren sus partículas sólidas. Mucha de la información que se presenta a continuación procede del excelente ef. 13; se puede encontrar información complementaria

Ya se ha hablado en el capítulo I de esta obra de la interacción entre las fases sólida y líquida de un sistema agua, aire y arcilla. Se vio que cada cristal de arcilla pare comportarse como si tuviese una carga eléctrica negativa, trayendo una atmosfera de iones positivos (doble capa eléctrica).

Además de esa interacción existe otra de partícula a partícula, debido a fuerzas de acción a distancia; estas fuerzas se componen de una atracción electromagnética (fuerzas de Van Der Waals) y una repulsión entre los estratos positivos de las dobles capas eléctricas de cada partícula. Las fuerzas de repulsión son función exponencial de la distancia entre partículas y aumentaran al disminuir la concentración de electrolitos. Las fuerzas de Van der Waals son dependientes de la concentración de electrolitos.

La Fig. IV-51 muestra dos arreglos extremos de las partículas sólidas, entre lo que puede variar un suelo arcilloso real.

La estructura queda determinada por dos factores principales, que son la magnitud relativa de las fuerzas de atracción y repulsión de las partículas y el monto de la deformación angular que el suelo haya sufrido. A mayor grado de orientación de las partículas.

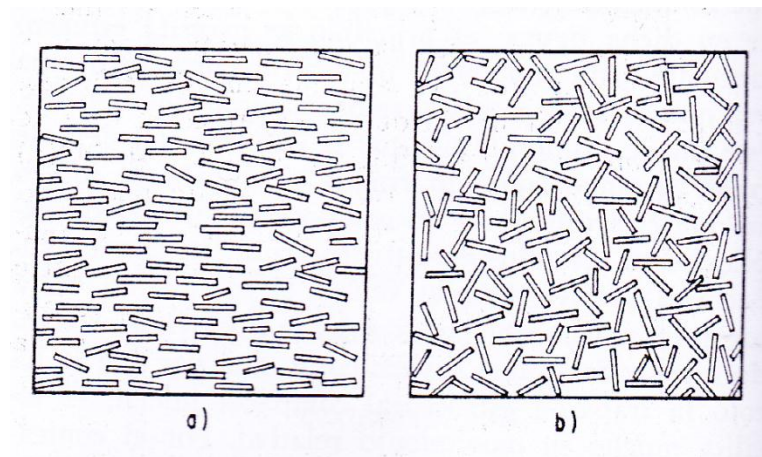


Figura IV-51. Estructuras extremas de un suelo arcilloso: a) alto grado de orientación de partículas; b) bajo grado de orientación de particular (**Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo**)

Se analiza a continuación, siempre según, el efecto de las condiciones de compactación en las variables que gobiernan el comportamiento mecánico (peso volumétrico seco, grado de saturación y grado de orientación e las partículas). Las condiciones que se consideran son el contenido de agua, la energía de compactación, el procedimiento del suelo y la proporción y características de la fracción no arcillosa.

2.7.1. Efecto del contenido de agua.-

a) En el peso volumétrico seco.

Ya quedo debidamente establecido en páginas anteriores de este capítulo. El máximo peso volumétrico seco se alcanza con el contenido de agua óptimo (Fig. IV-1)

b) En el grado de saturación

En este efecto también se puede ver en la curva de compactación. Para cualquier par de valores $\lambda_d - w_3 G_w$ puede calcularse con la expresión:

$$G_w = \frac{w \cdot Y_d \cdot S_s}{S_s \cdot Y_d - Y_d} \quad \text{Ecuación (4-7)}$$

Donde w y G_w están en porcentaje y S_s es el peso específico relativo de los sólidos. La expresión 4-7 permite dibujar en el diagrama la compactación la curva correspondiente a cualquier grado de saturación.

Ya se dijo que el grado de saturación disminuye rápidamente para contenidos de agua abajo del óptimo, pero que es casi constante para contenidos de agua arriba de dicho límite.

c) En la estructura

Cuando el contenido de agua es bajo, se limita el desarrollo de la doble capa eléctrica y la concentración de iones es muy alta. A esta situación corresponden pequeñas repulsiones entre partículas y altos esfuerzos efectivos por capilaridad; como consecuencia, se tendrá un suelo con alta resistencia a la deformación y bajo grado de orientación de partículas.

Si aumenta el contenido de agua, crecen las fuerzas de repulsión y disminuyen los esfuerzos capilares, con los que se reduce la resistencia del suelo a la deformación. Con método y energía de compactación iguales, un suelo compactado con mayor contenido de agua sufrirá mayores deformaciones angulares y alcanzara una estructura con mayor grado de orientación. Con un mayor contenido de agua, aumenta el grado de orientación de las partículas. Si se hace variar la energía de compactación, con mayor energía habrá más tendencia a lograr mayor orientación de las partículas.

2.7.2. Efecto de la energía de compactación.-

a) En el peso volumétrico seco.

En la Fig. IV-7 ya se mostró cómo cambia la curva de compactación al variar la energía específica. Al aumentar la energía, el volumen del peso volumétrico será tanto mayor cuanto menor sea el contenido de agua del suelo; cualquier incremento de energía que se aplica a un suelo con contenido de agua superior al óptimo se utiliza en producir deformación angular, pero no reducción de volumen; esto se debe

a que un suelo con contenido de agua alto es más deformable y tiene bajo contenido de aire y, por tanto, fase fluida menos comprensible.

b) En el grado de saturación.

Durante el proceso de compactación el contenido de agua de los suelos finos permanece constante, de manera que el grado de saturación crece si se incrementa la energía de compactación y se alcanza mayor peso volumétrico.

Cuando el suelo tiene un contenido de agua superior al óptimo, el aumento de energía de compactación resulta muy eficiente, como ya se dijo.

c) En la estructura.

La energía que se aplica al suelo se emplea para reducir su volumen y para deformarlo angularmente.

Por tanto, el aumento de la energía de compactación produce una orientación adicional de las partículas de arcilla, que es una función creciente del contenido de agua; si el suelo tiene humedad superior a la óptima, todo aumento de la energía de compactación se emplea en acercar al suelo a la condición de dispersión extrema que se muestra en la Fig. IV-51a.

2.7.3. Efecto del método de compactación.

Desgraciadamente no es posible comparar los diversos métodos de compactación que se utilizan al mismo nivel de energía de compactación, pues, como ya se explicó, este no puede cuantificarse con precisión en cada caso y se ve afectado por factores imponderables que influyen en la eficiencia de los procesos. Lo que se hace es comparar los procedimientos que llevan al suelo al mismo peso volumétrico seco y con el mismo contenido de agua. En tales condiciones, se espera que la diferencia de propiedades del suelo que pueda obtenerse se deba únicamente a una diferencia en las estructuras, la cual sería atribuible solo a diferencias de la magnitud de las deformaciones angulares inducidas por el método de compactación.

En el laboratorio, al mismo peso volumétrico y mismo contenido de agua, el máximo grado de orientación de las partículas se logra por amasado y el mínimo por compactación estática. La que se produce en la Fig. IV-52, se presenta una interesante investigación en la que se hace ver que con compactación completamente floculada en toda la curva de compactación; la arcilla, que tenía estructura floculada a bajas humedades, con compactación por amasado alcanza una estructura dispersa desarrollada en su totalidad (con la máxima orientación de las partículas) a contenidos de agua de compactación correspondientes aproximadamente a la humedad óptima de la prueba que se haga; esta estructura dispersa se mantiene a contenidos de agua crecientes ya en toda la curva.

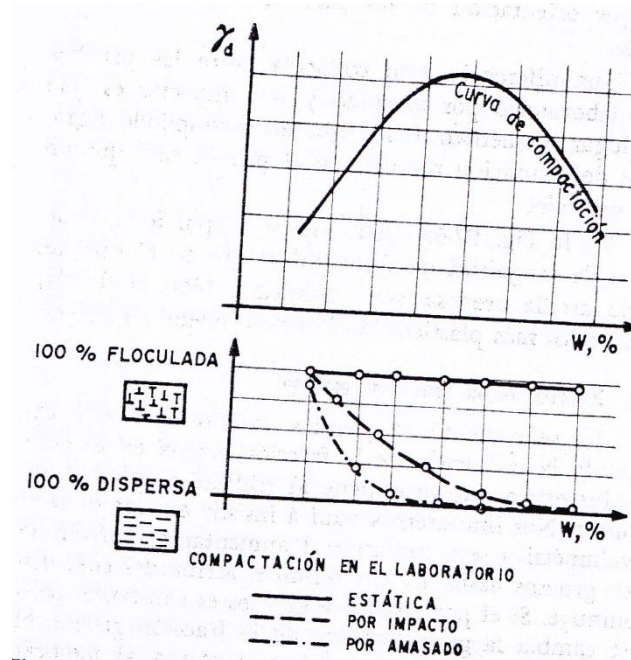


Figura IV-52. Influencia del tipo de compactación en la estructura adquirida por el suelo compactado (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

Figura IV-52. Influencia del tipo de compactación en la estructura adquirida por el suelo compactado (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

En una prueba de compactación por impactos, una estructura inicialmente floculada a contenidos de agua muy bajos, se va tornando dispersa a medida que la curva de compactación progresa con humedades crecientes, alcanzándose una estructura totalmente orientada solo con humedades mayores que la óptima, ya en la rama húmeda de la curva.

Es evidente que de lo anterior pueden extraerse conclusiones que trascienden en mucho al aspecto meramente académico de la investigación. A estructuras tan diferentes en el suelo han de corresponder propiedades fundamentales también muy diferentes (ello se comprobaba en las páginas siguientes). Por otra parte, casi todos los procesos de compactación de campo más usados, excluyendo la vibración, desgraciadamente no incluida en la investigación anterior, incluyen en mayor o menor grado efectos de amasado, en tanto que la compactación estática de laboratorio no puede considerarse representativa de ningún método actual de campo. De esta manera, puede ya intuirse que una prueba de compactación estática no podrá considerarse representativa de ningún procesos de compactación de campo y, por ende, el uso de una prueba estática de laboratorio para estudio de suelos con fines de proyectar una estructura de tierra deberá cuestionarse seriamente. En el campo, el rodillo pata de cabra produce mayor orientación de las partículas que el neumático. Una diferencia bien conocida entre las pruebas de laboratorio por amasado y por impactos es que el lugar geométrico de los óptimos corresponde a grados de saturación mayores en el primer caso que en el segundo. En la Fig. IV-53 se proporciona el orden de magnitud de dicha diferencia en el caso de una arcilla arenosa poco plástica y bien graduada; en suelos más plásticos la diferencia puede ser mayor.

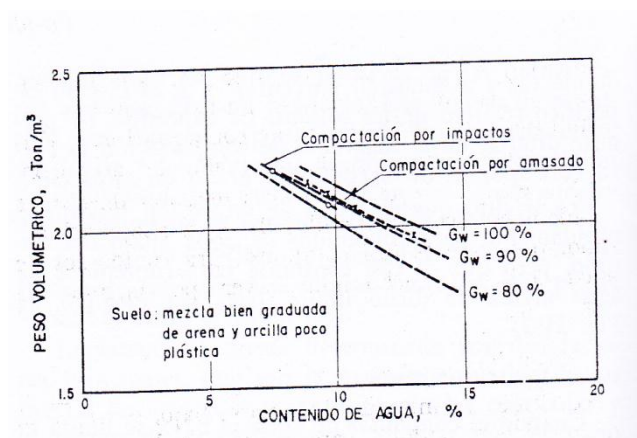


Figura IV-53. Curvas correspondientes al óptimo contenido de agua de un mismo suelo para compactación por impactos (tipo Proctor) y por amasado (tipo Harvard miniatura) (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

2.7.4. Efecto de la fracción gruesa.

Ya se comentó en páginas anteriores de este capítulo la influencia de la fracción gruesa en el peso volumétrico que se obtiene al realizar pruebas dinámicas. Nos limitaremos aquí a insistir en que el peso volumétrico seco aumenta al aumentar el porcentaje de gruesos hasta cierto límite, arriba del cual disminuye. Si el porcentaje de gruesos es constante, pero se cambia de granulometría de la fracción gruesa, el peso volumétrico seco máximo aumenta al mejorar la distribución granulométrica de dicha fracción gruesa. Por esta razón es inadecuada el procedimiento de compactación de laboratorio en que la fracción retenida en una malla (muchas veces la de $\frac{3}{4}$ ") se substituye por el mismo peso de material que pasa por dicha malla y lo retiene la N° 4; si tal método se aplica, se obtienen resultados que pudieran desviarse significativamente de lo que ocurra en el campo.

2.7.5. Efecto de la preparación de la muestra.

Como ya se ha indicado, los dos factores que más influyen son el rehúso y el logro de una homogénea distribución del contenido de agua.

Se analizan a continuación las propiedades más importantes de los suelos finos compactados.

a) Permeabilidad

La permeabilidad de un suelo compactado, como sus otras propiedades mecánicas, depende de su relación de vacíos (o su peso volumétrico seco), de su estructura y de su grado de saturación.

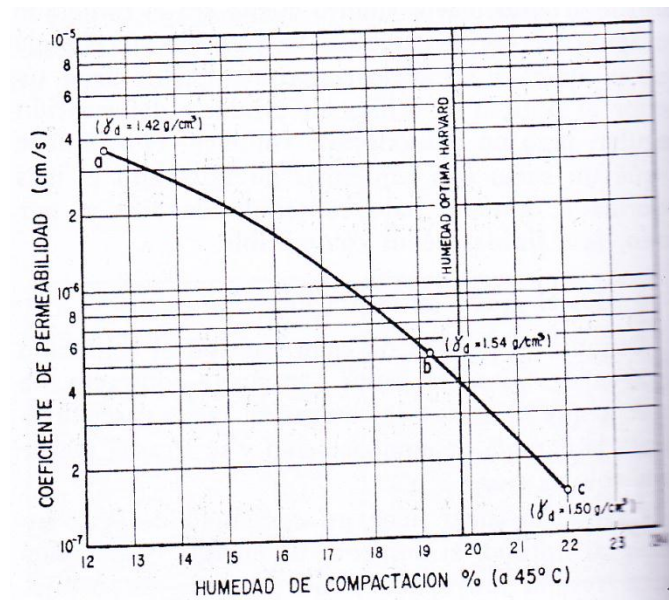


Figura IV-54. Relación entre la humedad de compactación y el coeficiente de permeabilidad en un limo yesífero saturado con contrapresión de 6 kg/cm^2 (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

La permeabilidad de un suelo arcilloso compactado puede variar mucho con las condiciones de compactación, sobre todo con las que influyen en la estructuración del suelo, que es con mucho el factor más influyente.

b) Compresibilidad y expansión

Cuando un suelo arcilloso cambia de volumen existen dos componentes de deformación a nivel estructural. En primer lugar, la correspondiente a variaciones de las distancias entre las partículas con grado de orientación constante, y en segundo, la que ocurre por reducciones de las distancias medias de las partículas, sin que cambie su distancia mínima por aumento del grado de orientación.

La segunda componente solo opera cuando ocurre una compresión en el suelo, y es irreversible, dada la complejidad estructural de un suelo compactado, de manera que las expansiones pueden atribuirse casi exclusivamente a la primera componente

Si se compacta dos muestras de un suelo arcilloso con los mismos métodos y energías y al mismo peso volumétrico seco, pero empleando en un caso una humedad menor

que la óptima y en el otro mayor, se obtienen un comportamiento en procesos de carga en que se mida la deformación volumétrica, como se muestra en la Fig. IV-58.

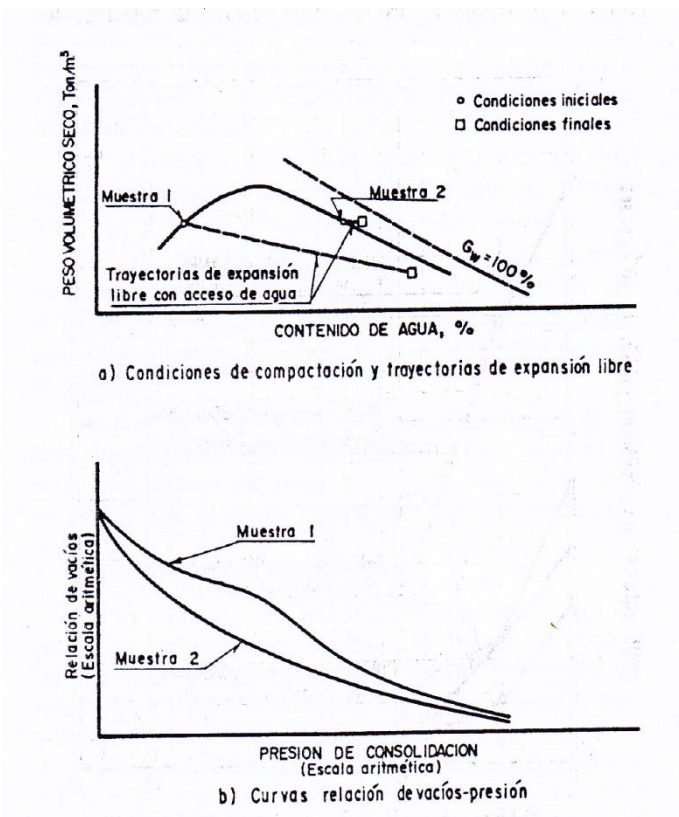


Figura IV-58. Comprensibilidad y expansibilidad de un suelo arcilloso compactado a una misma relación de vacíos con contenidos de agua a ambos lados óptimo
(Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

El potencial de expansión también varía según el método de compactación que se emplee. En la Fig. IV-61 se indica la expansión y la contracción de una arcilla arenosa que se compacto por amasado y con compactación estática; las mediciones se hicieron en muestras con el mismo peso volumétrico seco, del lado seco y húmedo del contenido de agua óptimo de compactación.

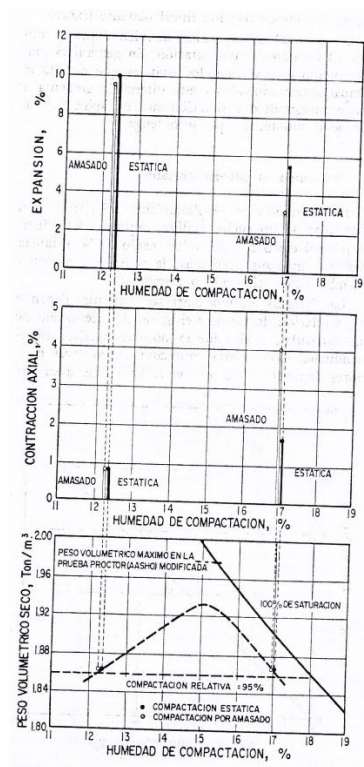


Figura IV-61. Expansión y contracción de una arcilla arenosa compactada estáticamente y por amasado (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

El potencial de expansión también depende mucho del método de compactación. En general es mayor cuando se usan métodos estáticos que cuando se compacta por amasado, y esta diferencia aumenta a mayor energía de compactación que se emplee y a mayor peso volumétrico que se obtenga.

2.7.6. Resistencia al esfuerzo cortante

La resistencia al desplazamiento relativo de las partículas de un suelo arcilloso depende del esfuerzo normal efectivo y del valor medio de la distancia mínima entre sus partículas; la resistencia aumenta cuando dicho valor medio disminuye.

La distancia mínima entre las partículas depende de la relación de vacíos y el grado de orientación de las partículas, y el esfuerzo normal efectivo correspondiente a una cierta condición de esfuerzos exteriores depende de la presión neutral que, a su vez, es función de la relación de vacíos, del grado de saturación y de la estructuración del

suelo. En consecuencia, estos últimos tres parámetros gobiernan las características esfuerzo-deformación y de resistencia de las arcillas compactadas.

2.7.7. Resistencia a la erosión interna

Se trata de analizar someramente la resistencia de los suelos finos compactados a la tubificación y otros efectos de las fuerzas de filtración.

Esta resistencia depende de la trabazón entre sus partículas, determinada por la geometría de la estructura y por la magnitud de las fuerzas electromagnéticas entre partículas tan pequeñas como para emigrar por los poros, si están en suspensión; así, para una misma permeabilidad, un suelo arcilloso sería tanto más susceptible, un suelo arcilloso sería tanto más susceptible a la tubificación cuanto mayores fueren las fuerzas de repulsión entre sus partículas.

2.7.8. Efectos de tiempo

Las investigaciones que al respecto se han realizado indican que el paso del tiempo afecta de manera significativa a la resistencia de las arcillas compactadas, descuidado casi en lo absoluto en los criterios de los ingenieros de quienes depende el manejo de dichos suelos en las grandes obras de la práctica.

Un ejemplo típico del modo en que el tiempo puede afectar a la resistencia se muestra en la Fig. IV-72 Una arcilla limosa con notables propiedades tixotrópicas se probó hasta la falla en compresión simple con velocidades de aplicación de la carga que variaron desde 5 min, hasta 10 días, en dos series de pruebas, en un caso realizadas inmediatamente después de la compactación y en el otro tras un periodo de almacenamiento de 18 días a humedad y peso volumétrico constantes. La resistencia se definió como el esfuerzo desviador requerido para causar al espécimen una deformación unitaria de 10%.

En los especímenes que se probaron inmediatamente después de la compactación se produjo una disminución ligera de la resistencia entre tiempos de carga de 5 y 100 min y un aumento continuo para pruebas que duraron más de 100min, de manera que

la resistencia fue de 30% mayor en una prueba de 10 días que en la prueba estándar, que dura alrededor de 10 min.

En los especímenes que se probaron después de 18 días de almacenamiento, a resistencia disminuyó algo con el tiempo de carga hasta un día y después aumento ligeramente hasta 10 días, pero en este caso no se produjeron diferencias de más de un 4% de la resistencia estándar.

El considerable aumento de resistencia para los especímenes en que se realizaron pruebas largas inmediatamente después de su compactación se debe sobre todo a efectos normales de tixotropía, que ocurren con rapidez y no se hacen notar en las muestras que se almacenan.

Es de notar como, en general, el suelo gana una resistencia con el tiempo. se presentan datos de la misma arcilla limosa probada después de 9 meses de almacenamiento, que indican que la resistencia siguió creciendo hasta los valores de 3kg/cm^2 .

Debe notarse que los esfuerzos a que se refieren estas resistencias son totales; los esfuerzos efectivos asociados no se conoce y probablemente esta es una línea de investigación conveniente para trabajos futuros.

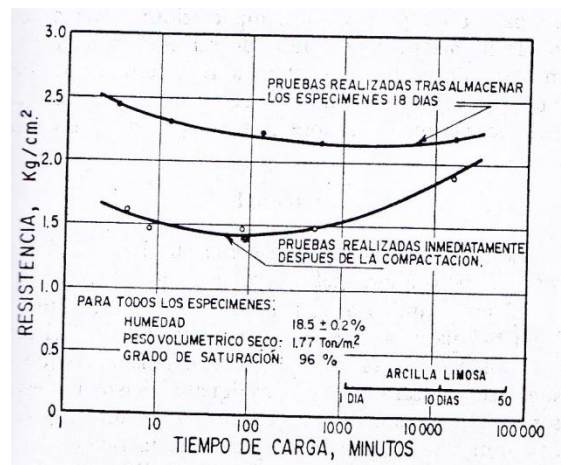


Figura IV-72 Efectos de tiempo en la resistencia de una arcilla limosa con alto grado de saturación (Ingeniería de los suelos vol. 1. Rico del Castillo)

CAPITULO III

ENSAYO HARVARD MINIATURA

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.-

3.1. Resumen de la investigación.-

Se propuso, elaborar una correlación de 2 equipos de compactación para suelos finos de carácter cohesivo como ser el método de Proctor T-99 y el ensayo de compactación por medio de amasado Harvard miniatura. Este método de prueba tiene por objeto determinar el peso volumétrico seco máximo y la humedad optima en suelos finos plásticos, con partículas menores de 2 mm los que se agregan diferentes cantidades de agua. Los especímenes se compactan dentro de un molde metálico bajo la acción de un embolo que aplica una presión transmitida por la acción de un resorte cilíndrico por lo cual se procedió a ubicar bancos que contengan los tipos de suelos mencionados para los cual se procederá a realizar una clasificación de los suelos para poder identificar 5 tipos de suelos que se usar en la investigación los suelos a utilizarse será de acuerdo a la clasificación de la AASHTO como ser: A-4, A-5, A-6, A-7-5,A-7-6 para realizar el proceso de compactación.

3.2. Caracterización de Suelos Aplicados en la Investigación

La caracterización de los suelos es muy importante en la presente investigación para poder determinar un comportamiento en los diferentes tipos de suelos utilizados se procedió a realizar el ensayo correspondiente para poder clasificarlos como ser:

- Granulometría
- Hidrómetro
- Límites de Attemberg
- Peso Especificado

Una vez obtenidos todos estos datos de los 5 bancos de materiales se procedió a clasificarlo a través del método de la AASTHO y de la S.U.C.S a continuación se adjunta una tabla con el resumen de las características de cada banco:

PROCEDENCIA		San Luis	San Blas	El Tejar	Los Chapacos	Turumayo
Humedad Natural (%)		12.9	18.1	26.3	29.3	24.3
Gravedad Especifica		2.61	2.52	2.58	2.53	2.55
Granulometría	% Pasa N° 40	97.6	99.7	99.4	96.6	99.8
	% Pasa N° 200	64.7	97.0	83.0	76.0	93.2
	% Limos	83.7	75.8	64.5	63.2	62.7
	% Arcilla	16.3	24.2	24.2	36.8	37.3
Limites	L. Liquido (%)	22	42	39	55	60
	L. Plástico (%)	16	35	27	26	37
	I. de Plasticidad (%)	6	7	12	29	24
Clasificación	AASTHO	A-4	A-5	A-6	A-7-6	A-7-5
	Índice de Grupo	6	8	9	19	18
	S.U.C.S.	ML	OL	CL	OH	CH

3.3. Características del equipo Harvard miniatura.

Partes del Equipo de Compactación Harvard Miniatura:

- Un molde cilíndrico metálico de compactación, con extensión y placa de base también metálicos, las dimensiones del molde son 3.3 cm (1 5/16") de diámetro inferior y 7.2 cm (2.816") de altura; su volumen resulta ser de 62 cm³ (1/454"); la extensión es de 3.5 cm (1.37") de altura.



MOLDE DESARMADO

COLLARINES



MOLDE ARMADO



- Un pistón metálico, con embolo en su extremo inferior, que pueda aplicar presión por la acción de un resorte (la presión que se aplique se puede hacer variar dentro de amplios márgenes con el uso de resortes de diferentes constantes elásticas). El embolo aplicador de presión es una barra metálica de 1.3 cm (1/2") de diámetro, con mango de metálico dentro de este actúa el resorte comprimido a que se hace referencia.



EMBOLO CON PISTON
METALICO

EMBOLO
DESMONTADO





RESORTED DE 20 lb D= 16 mm
e= 26mm Vueltas=46 L= 20cm



RESORTED DE 40 lb D= 22 mm
e= 39 mm Vueltas=39 L= 19.5 cm



RESORTED DE 37.5 lb D= 22 mm
e= 37 mm Vueltas= 37 L= 19.9 cm

- Un extractor, para retirar del molde la muestra compactada con una alteración mínima.



EXTRACTOR DE MUESTRA CON
ALTERACION MINIMA

3.4. Preparación de la Muestra

- Para esta prueba se requiera una muestra de suelo, debidamente cuarteada, con peso comprendido entre 1 y 1.5 kg. Se seca al horno lo necesario para facilitar su disgregación.



- Se procede a disgregar en material en fracciones más pequeñas mediante el uso de un rodillo moliendo la muestra hasta el tamaño máximo sea menor al de 2mm posteriormente a la muestra disgregada manualmente se la criba por la malla N° 4.



- Como la curva peso volumétrico seco-contenido de agua debe definirse en 6 u 8 puntos, prepárense las mismas porciones de suelo en recipientes con el contenido de agua deseado y déjense en reposo por lo menos una noche: esto facilita una buena mezcla de agua y los suelos finos. Si se trabaja con suelos que absorben el agua con rapidez, con resistencias en estado seco por lo general bajas, la mezcla de agua y suelo podrá hacerse inmediatamente antes de la prueba. De no ser posible la metodología anterior se podrá incrementar la humedad de las muestras antes de compactar con contenidos

crecientes de agua si el suelo lo permite (suelos con resistencias bajas en estado seco).



3.5. Procedimiento de prueba.

El procedimiento para realizar la prueba que se describe se ajustara a lo siguiente:

1. Con el molde ajustado a su base y provisto de su extensión, colóquese en él la cantidad que se requiera de suelo en estado suelto.



MOLDE DESARMADO



MOLDE ARMADO

2. Ajustar apropiadamente el resorte del pistón, insértese en el resorte en el embolo del pistón y presione hasta que el resorte empiece a comprimirse. Y Ajustar con las tuercas la altura de compresión del resorte y ajustar los tornillos de la base del pistón



Ensamblaje del Pistón



Ensamblaje del Pistón



3. Introducir el suelo en el molde y el embolo del pistón y presionar hasta que el resorte empiece a comprimirse. Quítase la presión, cambie ligeramente de posición el embolo y repítase la operación, repartiendo así la presión aplicada de manera uniforme en la superficie de cada capa hasta completar el numero aplicaciones que se dese (50 Aplicaciones)



4. Repetir este procedimiento para cada capa; procúrese que la capa superior sobresalga del molde por lo menos 1 cm (entrando en la extensión metálica del mismo)
5. Quitar el molde de su base y enrásese con cuidado su borde superior con una regla metálica. Verifíquese también con la regla metálica el en rozamiento del borde inferior del molde.



Extracción del Collarín Superior

Extracción del Collarín Inferior



6. Pesar el molde que contiene al suelo compactado con aproximación de 0.1 g.



7. Extraer la muestra del molde utilizando el extractor y colóquesela en un recipiente apropiado para introducirla al horno y determinar su contenido de agua. si se rehúsa el material para determinar otros puntos de la curva de compactación, el contenido de agua se determinara con el material excedente del borde superior del molde,



Extracción de la Muestra

Extracción de la Muestra





Pesado de la Muestra
Húmeda

Muestra Seca



8. Compáctese otros especímenes con contenidos de agua crecientes, hasta que el peso húmedo de la muestra vaya decreciendo, hecho que indica que se ha sobrepasado el contenido de agua óptimo.
9. Si se desea, cambiar el procedimiento de compactación variando el número de aplicaciones del pisón por capa, la presión aplicada por el resorte o el número de capas.

3.6. Procedimiento para la determinación de la densidad máxima seca y humedad óptima

3.6.1. Cálculo el Peso del Suelo húmedo:

$$W_s = W_H - W_m$$

Dónde:

W_s = Peso del Suelo Seco

W_h = Peso del Suelo Húmedo

W_m = Peso del Molde

3.6.2. Cálculo de la Densidad Húmeda:

$$P_{humedo} = \frac{W_s}{V_M}$$

Dónde:

W_s = Peso del Suelo Húmedo

P_{humedo} = Densidad del Suelo húmedo

V_m = Volumen del Molde (Volumen del Molde de Harvard Miniatura es de 62 cm^3)

3.6.3. Cálculo del Peso del Agua:

$$W_{Agua} = W_{HC} + W_{SC}$$

Dónde:

W_{AGUA} = Peso del agua

W_{HC} = Suelo húmedo más capsula

W_{SC} = Suelo Seco más capsula

3.6.4. Cálculo del Peso seco del suelo:

$$W_{s1} = W_{SC} - W_C$$

Dónde:

W_{s1} = Peso del Suelo Seco

W_C = Peso de la Capsula

W_{SC} = Suelo Seco más capsula

3.6.5. Cálculo del Porcentaje de Humedad:

$$\%W = \frac{W_{AGUA}}{W_{S1}}$$

Dónde:

W_{AGUA} = Peso del agua

W_{s1} = Peso del Suelo Seco

$\%W$ = Porcentaje de Humedad

3.6.6. Cálculo de la Densidad Seca:

$$P_{seco} = \frac{P_{Humedo}}{(100 + \%W)} * 100$$

Dónde:

$P_{húmedo}$ = Densidad del Suelo Húmedo

P_{seco} = Densidad del Suelo Seco

$\%W$ = Porcentaje de Humedad

3.6.7. Determinación de la Humedad Óptima y Densidad Máxima Seca:

$$Y = aW_{optima}^2 + bW_{optima} + C$$

Y= Densidad Máxima Seca

a = Constante de la Ecuación de Segundo Orden

b = Constante de la Ecuación de Segundo Orden

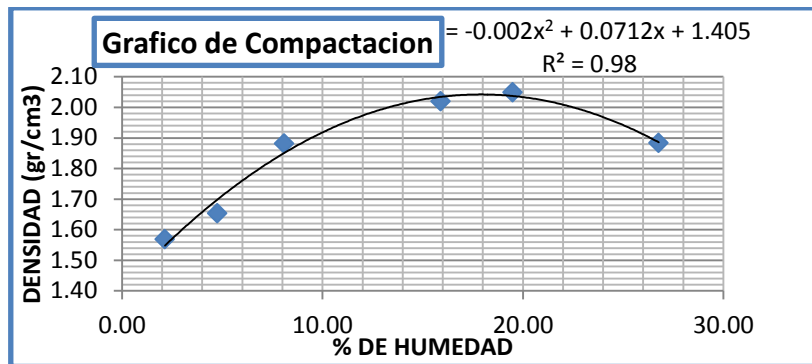
c = Constante de la Ecuación de Segundo Orden

W_{óptima}= Humedad Optima para Alcanzar la Densidad Máxima

$$W_{optima} = \frac{b}{(2 * a)}$$

Remplazar la W optima en la ecuación de segundo grado para poder hallar la densidad máxima

Nº de capas	3	3	3	3	3	3
Nº de golpes por capa	50	50	50	50	50	50
Peso suelo húmedo + molde	518.40	526.47	545.18	564.17	570.89	567.14
Peso del molde	419.10	419.10	419.10	419.10	419.10	419.10
Peso suelo húmedo	99.30	107.37	126.08	145.07	151.79	148.04
Volumen de la muestra	62.00	62.00	62.00	62.00	62.00	62.00
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.60	1.73	2.03	2.34	2.45	2.39
Cápsula Nº	1	2	3	4	5	6
Peso suelo húmedo + capsula	22.46	29.31	28.06	30.11	42.52	105.50
Peso suelo seco + cápsula	22.23	28.47	27.06	27.92	38.47	87.00
Peso del agua	0.23	0.84	1.00	2.19	4.05	18.50
Peso de la cápsula	11.45	10.78	14.69	14.14	17.69	17.90
Peso suelo seco	10.78	17.69	12.37	13.78	20.78	69.10
Contenido de humedad (%h)	2.13	4.75	8.08	15.89	19.49	26.77
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.57	1.65	1.88	2.02	2.05	1.88



Densidad Máxima

2.04 gr/cm³

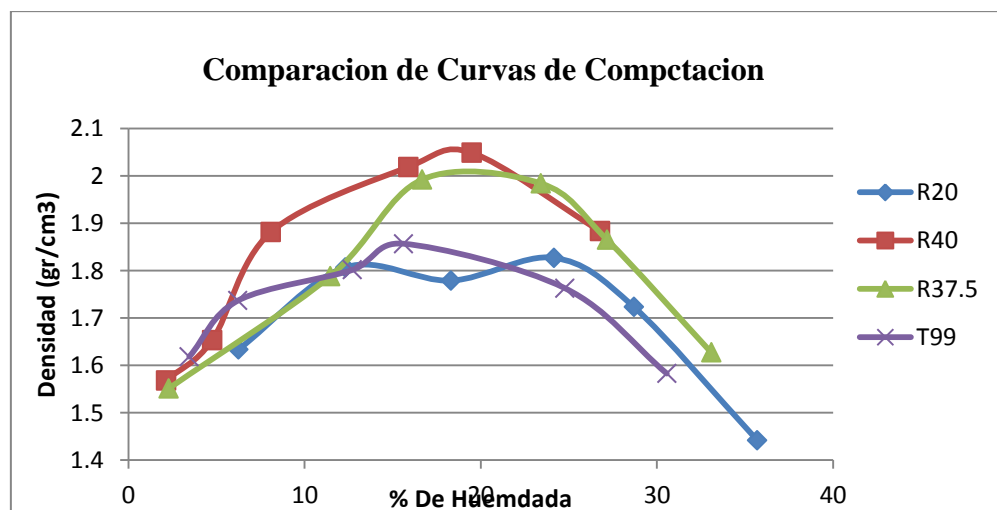
Humedad Optima

17.80 %

3.7. Resumen de Densidades Máximas y humedades Óptimas

En la presente tabla se realiza un resumen de los resultados obtenidos para distintos tipos de suelo con los diferentes resortes del equipo de Harvard miniatura y del Proctor T-99.

Se realizó un comparación de las curvas de compactación obtenidas con los 3 resortes del equipo Harvard y el T-99



Resorte de 40 libras								
PROCEDENCIA	N°1		N°2		N°3		N°4	
	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)
San Luis	2.04	17.8	2.04	17.93	2.03	18.36	2.05	17.79
San Blas	1.54	21.46	1.55	21	1.57	21.15	1.56	19.78
El Tejar	1.69	16.39	1.68	14.97	1.71	16.16	1.69	16.39
Los Chapacos	1.81	25.09	1.84	25.28	1.85	23.95	1.82	23.4
Turumayo	1.58	24.92	1.6	25.14	1.58	23.55	1.58	25.15

Resorte de 37.5 libras								
PROCEDENCIA	N°1		N°2		N°3		N°4	
	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)
San Luis	1.99	19.25	1.98	18.88	1.97	19.03	1.95	18.8
San Blas	1.55	22.98	1.55	21.88	1.55	21.3	1.57	21.52
El Tejar	1.66	15.79	1.67	17.77	1.67	16.27	1.66	15.31
Los Chapacos	1.77	25.82	1.79	23.11	1.77	23.39	1.76	23.97
Turumayo	1.56	24.85	1.58	24.47	1.56	23.73	1.58	23.9

Resorte de 20 libras								
----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

PROCEDENCIA	N°1		N°2		N°3		N°4	
	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
San Luis	1.84	18.96	1.84	17.9	1.85	17.62	1.85	18.2
San Blas	1.47	22.98	1.47	21.52	1.5	20.79	1.46	22.09
El Tejar	1.6	14.59	1.6	15.08	1.58	17.32	1.62	17.59
Los Chapacos	1.73	24.62	1.74	25.24	1.71	24.73	1.71	25.8
Turumayo	1.54	24.82	1.57	24.3	1.55	24.03	1.55	24.71

Proctor T-99								
PROCEDENCIA	N°1		N°2		N°3		N°4	
	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
San Luis	1.85	16.35	1.87	17.14	1.84	20.36	1.88	16.86
San Blas	1.48	22.52	1.52	22.54	1.5	22.21	1.51	21.28
El Tejar	1.59	14.88	1.59	14.71	1.6	15.91	1.59	14.88
Los Chapacos	1.75	23.66	1.75	24.3	1.73	26.1	1.74	25.28
Turumayo	1.47	24.72	1.47	24.62	1.44	22.29	1.47	24.28

3.8. Determinación de la Correlación entre el Harvard Miniatura y el Proctor T-99

3.8.1. Calculo del Promedio Aritmético

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n}$$

$$X = \frac{1.85 + 1.87 + 1.84 + 1.88}{4}$$

$$X = 1.86$$

Tabla Resumen de Promedios Aritméticos para distintos Resortes del Harvard Miniatura

PROCEDENCIA	40 lb		37.5 lb		20 lb	
	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)
San Luis	2.04	17.97	1.97	18.99	1.845	18.17
San Blas	1.555	20.8475	1.555	21.92	1.475	21.845
El Tejar	1.6925	15.98	1.67	16.29	1.6	16.15
Los Chapacos	1.83	24.4	1.77	23.9	1.72	25.8
Turumayo	1.585	24.69	1.57	24.24	1.55	24.47

Tabla Resumen de Promedios Aritméticos para el Proctor T-99

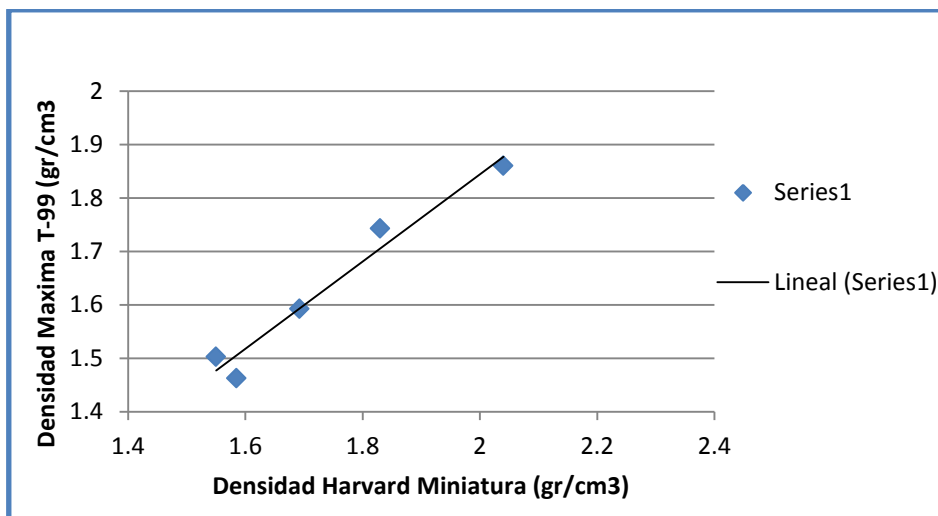
PROCEDENCIA	T-99	
	Densidad Máxima (gr/cm3)	Humedad Óptima (%)

San Luis	1.86	17.66
San Blas	1.50	22.14
El Tejar	1.59	15.10
Los Chapacos	1.74	24.83
Turumayo	1.46	24.00

3.8.2. Determinación de la ecuación de correlación de densidades máximas para resorte de 40 lb

Datos:

N°	X(Densidad Harvard)	Y(Densidad T-99)
1	2.04	1.86
2	1.55	1.5025
3	1.6925	1.5925
4	1.83	1.7425
5	1.585	1.4625



N°	x	y	XY	X^2	Y^2
1	2.04	1.86	3.794	4.162	3.460
2	1.55	1.5025	2.329	2.403	2.258
3	1.6925	1.5925	2.695	2.865	2.536
4	1.83	1.7425	3.189	3.349	3.036
5	1.585	1.4625	2.318	2.512	2.139
Total	8.6975	8.160	14.325	15.290	13.428

$$m = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$m = 0.8169$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 * \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i * \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n * \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = 0.211$$

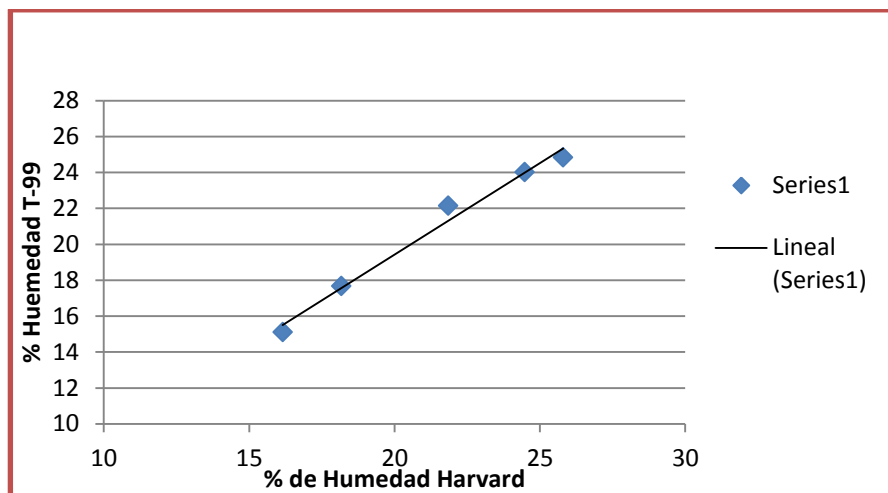
$$\rho_{T-99} = 0.8169 * \rho_{Harvard} + 0.211$$

$$R^2 = 0.9626$$

3.8.3. Determinacion de la ecuacion de Correlacion de Humedades Optimas para el Resorte de 40 lb

Datos:

N°	X(% Humedad Harvard)	Y(% Humedad T-99)
1	17.97	17.66
2	20.85	22.137
3	15.98	15.095
4	24.4	24.8275
5	24.69	24.0025



N°	x	y	XY	X^2	Y^2
1	17.97	17.66	317.350	322.921	311.876
2	20.85	22.137	461.556	434.723	490.047
3	15.98	15.095	241.218	255.360	227.859
4	24.4	24.8275	605.791	595.360	616.405
5	24.69	24.0025	592.622	609.596	576.120
Total	103.89	103.722	2218.537	2217.960	2222.306

$$m = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$m = 1.0686$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 * \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i * \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n * \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = -1.4583$$

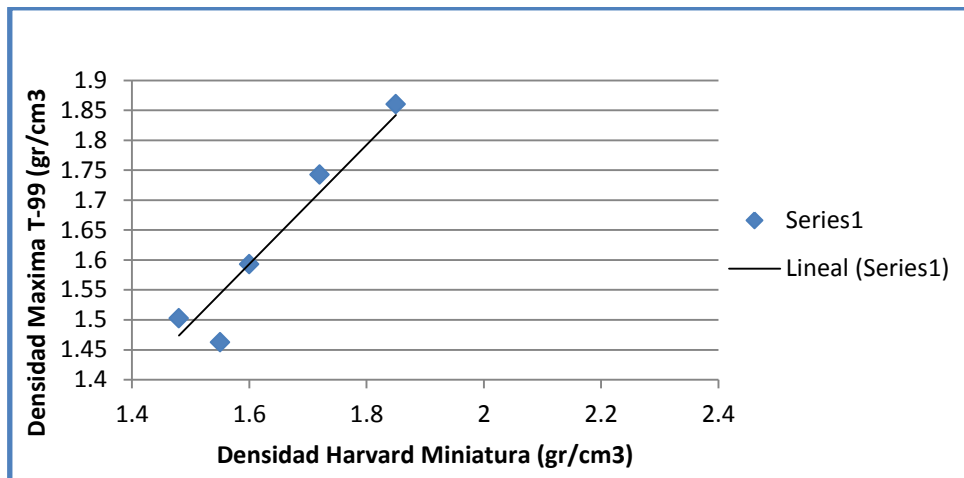
$$\%Humedad_{T-99} = 1.0686 * Humedad_{Harvard} - 1.4583$$

$$R^2 = 0.9626$$

3.8.4. Determinación de la ecuación de correlación de densidades máximas para resorte de 37.5 lb

Datos:

N°	X(Densidad Harvard)	Y(Densidad T-99)
1	1.97	1.86
2	1.56	1.5025
3	1.67	1.5925
4	1.77	1.7425
5	1.57	1.4625



N°	x	y	XY	X^2	Y^2
1	1.97	1.86	3.664	3.881	3.460
2	1.56	1.5025	2.344	2.434	2.258
3	1.67	1.5925	2.659	2.789	2.536
4	1.77	1.7425	3.084	3.133	3.036
5	1.57	1.4625	2.296	2.465	2.139
Total	8.54	8.160	14.048	14.701	13.428

$$m = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$m = 0.9631$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = -0.013$$

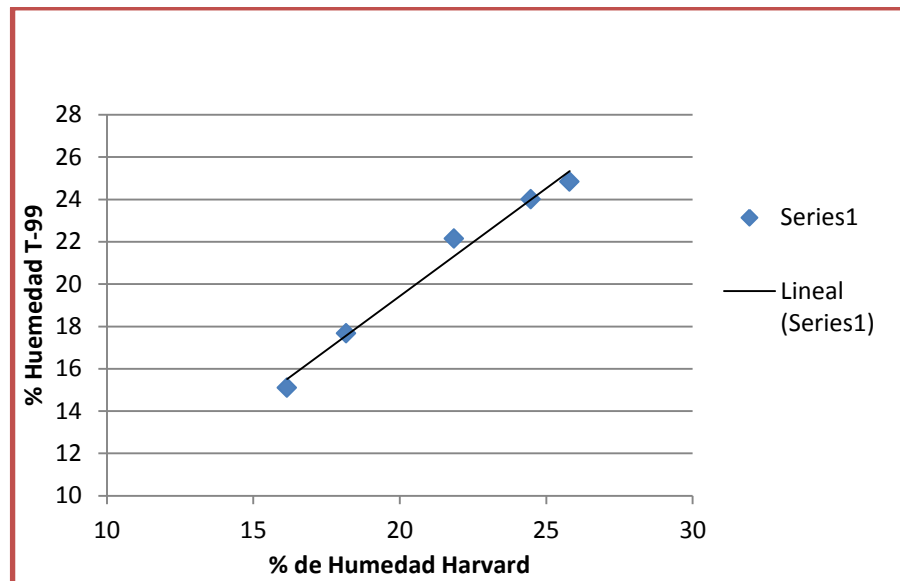
$$\rho_{T-99} = 0.9631 * \rho_{Harvard} - 0.013$$

$$R^2 = 0.9579$$

**3.8.5. Determinacion de la ecuacion de Correlacion de Humedades
Optimas para el Resorte de 37.5 lb**

Datos:

N°	X(% Humedad Harvard)	Y(% Humedad T-99)
1	18.99	17.66
2	21.92	22.137
3	16.29	15.095
4	23.9	24.8275
5	24.24	24.0025



N°	x	y	XY	X^2	Y^2
1	18.99	17.66	335.363	360.620	311.876
2	21.92	22.137	485.243	480.486	490.047
3	16.29	15.095	245.898	265.364	227.859
4	23.9	24.8275	593.377	571.210	616.405
5	24.24	24.0025	581.821	587.578	576.120
Total	105.34	103.722	2241.702	2265.258	2222.306

$$m = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$m = 1.2292$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 * \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i * \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n * \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = - 5.1518$$

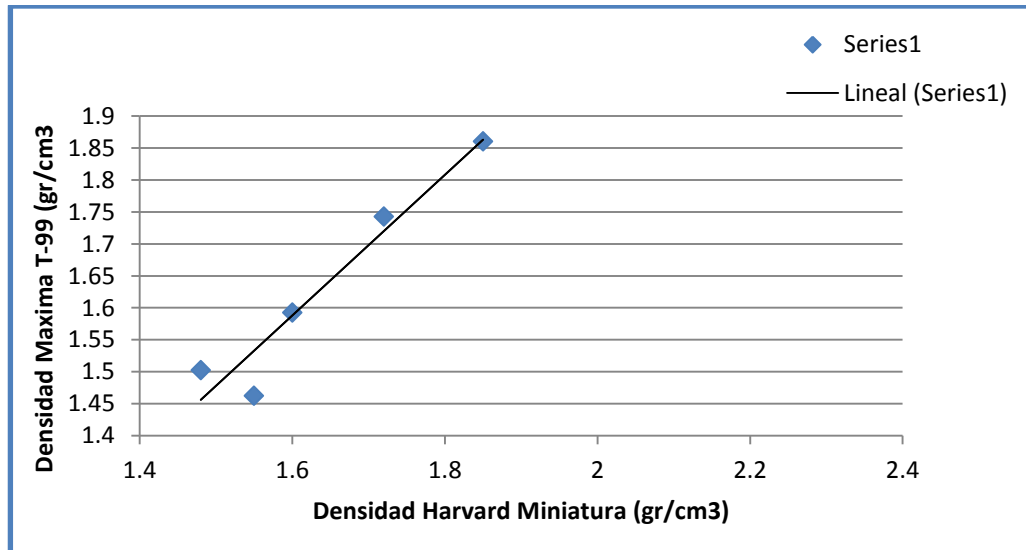
$$\%humedad_{T-99} = 1.2292 * \%humedad_{Harvard} - 5.1518$$

$$R^2 = 0.9827$$

3.8.6. Determinación de la ecuación de correlación de densidades máximas para resorte de 20 lb

Datos:

N°	X(Densidad Harvard)	Y(Densidad T-99)
1	1.85	1.86
2	1.48	1.5025
3	1.6	1.5925
4	1.72	1.7425
5	1.55	1.4625



N°	x	y	XY	X^2	Y^2
1	1.85	1.86	3.441	3.423	3.460
2	1.48	1.5025	2.224	2.190	2.258
3	1.6	1.5925	2.548	2.560	2.536
4	1.72	1.7425	2.997	2.958	3.036
5	1.55	1.4625	2.267	2.403	2.139
Total	8.2	8.160	13.477	13.534	13.428

$$m = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$m = 1.0988$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 * \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i * \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n * \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = - 0.17$$

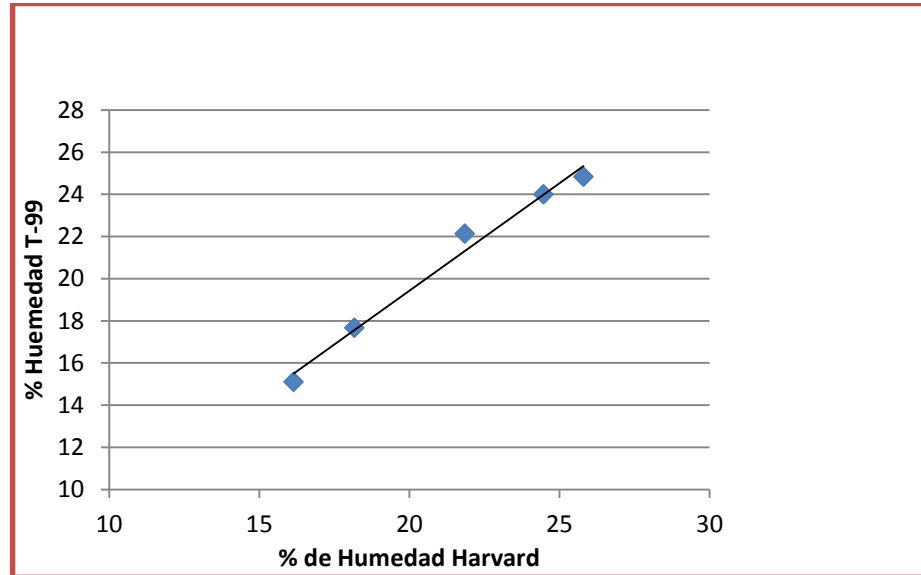
$$\rho_{T-99} = 1.0988 * \rho_{Harvard} - 0.17$$

$$R^2 = 0.9311$$

3.8.7. Determinacion de la ecuacion de Correlacion de Humedades Optimas para el Resorte de 20 lb

Datos:

N°	X(% Humedad Harvard)	Y(% Humedad T-99)
1	18,17	17,66
2	21,85	22,137
3	16,15	15,095
4	25,8	24,8275
5	24,47	24,0025



N°	x	y	XY	X^2	Y^2
1	18,17	17,66	320,882	330,149	311,876
2	21,85	22,137	483,693	477,423	490,047
3	16,15	15,095	243,784	260,823	227,859
4	25,8	24,8275	640,550	665,640	616,405
5	24,47	24,0025	587,341	598,781	576,120
Total	106,44	103,722	2276,251	2332,815	2222,306

$$m = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$m = 1.0194$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 * \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i * \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n * \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = - 0.956$$

$$\%humedad_{T-99} = 1.0194 * \%humedad_{Harvard} - 0.0956$$

$$R^2 = 0.9842$$

3.9. Prueba De Kruskal-Wallis Para La Densidad

Ho: Todas las Áreas de Estudio Tienen la misma densidad

Ha: No Todas las Áreas de Estudio Tienen la misma densidad

DENSIDAD			
procedencia	TAMAÑO DE LA MUESTRA (lb)		
	40	37.5	20
San Luis	2.04	1.97	1.845
San Blas	1.555	1.555	1.475
El Tejar	1.6925	1.67	1.6
Los Chapacos	1.83	1.77	1.72
Turumayo	1.585	1.57	1.55

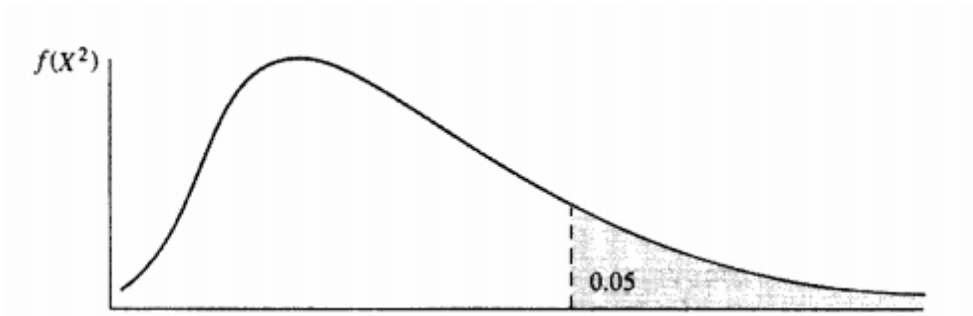
San Luis		San Blas		El Tejar		Los Chapacos		Turumayo	
DENSIDAD	RANGO	DENSIDAD	RANGO	DENSIDAD	RANGO	DENSIDAD	RANGO	DENSIDAD	RANGO

		1.475	1						
								1.55	2
		1.555	3.5						
		1.555	3.5						
								1.57	5
								1.585	6
				1.6	7				
				1.67	8				
				1.6925	9				
						1.72	10		
						1.77	11		
						1.83	12		
1.845	13								
1.97	14								
2.04	15								
$\Sigma R1$	42	$\Sigma R2$	8	$\Sigma R3$	24	$\Sigma R4$	33	$\Sigma R5$	13

$$K = \frac{12}{n(n+1)} \left[\sum \frac{R_i^2}{n_i} \right] - 3(n+1)$$

$$K = \frac{12}{15(15+1)} \left[\frac{42^2}{3} + \frac{8^2}{3} + \frac{24^2}{3} + \frac{33^2}{3} + \frac{13^2}{3} \right] - 3(3+1)$$

$$K = 49,03$$



Conclusión.- con un nivel de significancia del 5% e independientemente del tamaño de la muestra que se haya utilizado para medir la densidad,

3.10. Prueba De Bondad Para Las Humedades

PROCEDENCIA	humedad OBSERVADA	humedad ESPERADA
San Luis	17.97	20.7775
San Blas	20.8475	20.7775
El Tejar	15.98	20.7775
Los Chapacos	24.4	20.7775
Turumayo	24.69	20.7775
Σ	103.8875	103.8875

3.10.1. Prueba De Ajuste Para 40 Lb

Ho: La humedad en muestras d 40 lb es uniforme en las cinco áreas

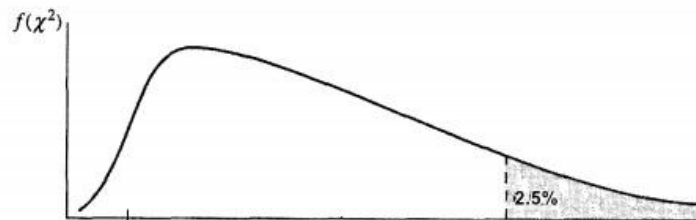
Ha: La humedad en muestras de 40 lb no es uniforme en las cinco áreas

Prueba del Chi cuadrado

$$\chi^2 = \Sigma \frac{(O - E)^2}{E}$$

$$\chi^2 = \frac{(17,97 - 20,7775)^2}{20,7775} + \frac{(20,8475 - 20,7775)^2}{20,7775} + \frac{(15,98 - 20,7775)^2}{20,7775} + \frac{(24,4 - 20,7775)^2}{20,7775} + \frac{(24,69 - 20,7775)^2}{20,7775}$$

$$\chi^2 = 2,8556$$



Conclusión.- Con un Nivel de 2.5% no se rechaza la hipótesis se supone que la humedad de una muestra de 40 lb no es la misma en las 5 áreas de estudio.

3.10.2. Prueba De Ajuste Para 37.5 Lb

Ho: La humedad en muestras d 37,5 lb es uniforme en las cinco áreas

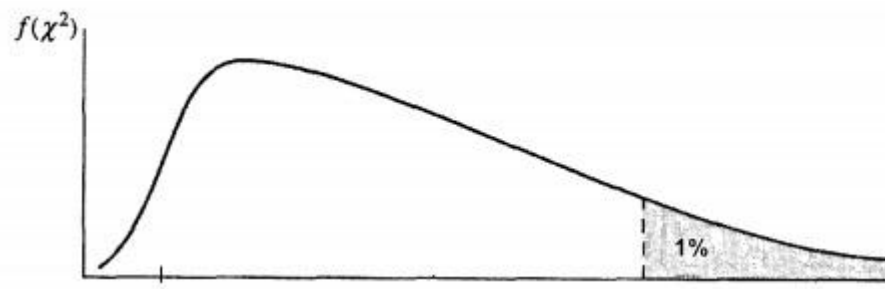
Ha: La humedad en muestras de 37,5 lb no es uniforme en las cinco áreas

Prueba del Chi cuadrado

$$\chi^2 = \Sigma \frac{(O - E)^2}{E}$$

$$\chi^2 = \frac{(17,97 - 21,068)^2}{21,068} + \frac{(20,8475 - 21,068)^2}{21,068} + \frac{(15,98 - 21,068)^2}{21,068} + \frac{(24,4 - 21,068)^2}{21,068} + \frac{(24,69 - 21,068)^2}{21,068}$$

$$\chi^2 = 2,8363$$



Conclusión.- Con un Nivel de 1% no se rechaza la hipótesis se supone que la humedad de una muestra de 37.5 lb no es la misma en las 5 áreas de estudio.

3.10.3. Prueba De Ajuste Para 20 Lb

Ho: La humedad en muestras d 20 lb es uniforme en las cinco áreas

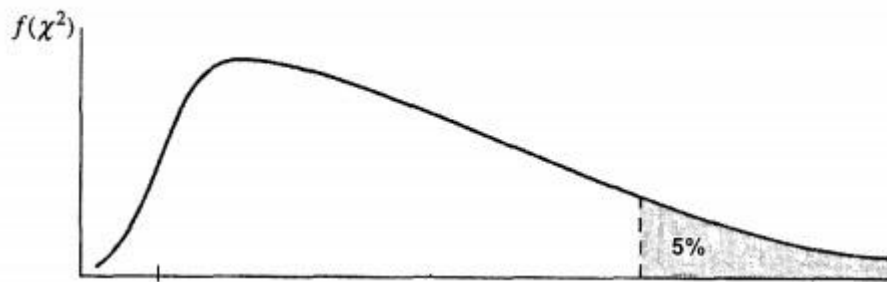
Ha: La humedad en muestras de 20 lb no es uniforme en las cinco áreas

Prueba del Chi cuadrado

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E}$$

$$\chi^2 = \frac{(18,17 - 21,287)^2}{21,287} + \frac{(21,845 - 21,287)^2}{21,287} + \frac{(16,15 - 21,287)^2}{21,287} + \frac{(25,8 - 21,287)^2}{21,287} + \frac{(24,47 - 21,287)^2}{21,287}$$

$$\chi^2 = 3,1434$$



Conclusión.- Con un Nivel de 5% no se rechaza la hipótesis se supone que la humedad de una muestra de 20 lb no es la misma en las 5 áreas de estudio.

3.11. Validación de Las Ecuaciones

Datos Obtenidos

	40 lb		37.5		20lb	
Suelo	Densidad	Humedad	Densidad	Humedad	Densidad	Humedad
1	1.67	19.21	1.64	23.8	1.45	21.12
2	1.73	14.95	1.68	16.78	1.55	15.42
3	1.92	16.85	1.87	19.3	1.68	16.89

Proctor T-99		
Suelo	Densidad	Humedad
1	1.55	20.12
2	1.6	15.2

3	1.78	17.12
---	------	-------

Ecuación Para el Resorte de 40 lb

$$\rho_{T-99} = 0.8169 * \rho_{Harvard} + 0.211$$

$$\%Humedad_{T-99} = 1.0686 * Humedad_{Harvard} - 1.4583$$

N°	Densidad	Humedad
1	1.58	19.07
2	1.62	14.52
3	1.78	16.55

Ecuación Para el Resorte de 37.5 lb

$$\rho_{T-99} = 0.9631 * \rho_{Harvard} - 0.013$$

$$\%humedad_{T-99} = 1.2292 * \%humedad_{Harvard} - 5.1518$$

N°	Densidad	Humedad
1	1.57	24.10
2	1.61	15.47
3	1.79	18.57

Ecuación Para el Resorte de 20 lb

$$\rho_{T-99} = 1.0988 * \rho_{Harvard} - 0.17$$

$$\%humedad_{T-99} = 1.0194 * \%humedad_{Harvard} - 0.0956$$

N°	Densidad	Humedad
1	1.58	20.57
2	1.69	15.62
3	1.83	17.12

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.1. Conclusiones-

En el presente proyecto de investigación se pudo llegar a la conclusión que el ensayo de Harvard miniatura aun no fue normado por lo cual existe diferentes procedimientos para realizar el ensayo de compactación Harvard Miniatura.

El ensayo de compactación de laboratorio Harvard miniatura busca el efecto típico de los rodillos de campo (pata de cabra y neumáticos, en menor escala), con el objeto de lograr que la muestra tenga la misma estructuración interna que adquiere el suelo en campo.

En la prueba miniatura el efecto de amasado se logra al presionar un embolo de área especificada contra la superficie de las diversas capas con las que se constituye la muestra dentro del molde en cualquier aplicación se transmite al embolo una presión constante, lo que se consigue cuando se le adopta un resorte calibrado, que permite saber el momento en que se aplica tal presión.

Se pudo observar que solo se puede realizar en suelos con tamaño máximo de 2 mm, lo que por otra parte no es un inconveniente, como es natural, su campo de aplicabilidad se circunscribe a suelos arcillosos.

Tras realizar varios ensayos de compactación con los diferentes tipos de resortes se pudo constatar que mediante el procedimiento de compactación por amasado miniatura se obtienen mayores densidades a menores humedades a comparación del método Proctor T-99 por lo cual se pueden obtener densidades máximas secas mayores a menor humedad óptima.

Se observó la similitud de resultados obtenidos después de compactar un mismo suelo en cuanto a las densidad máxima seca y humedad optima lo cual indica que el equipo tiene un rendimiento casi constante y no presenta mucha variación por lo que presenta una confiabilidad del equipo para realizar ensayos.

Debido aun que el equipo aun no fue normado existe un rango amplio en la metodología del procedimiento en laboratorio que varia en el numero de capas y el numero de veces que se debe compactar cada capa con el embolo por lo cual el procedimiento asumido como recomendación del libro ingenieria de los suelos vol 1

de rico del castillo que nos recomienda compactar cada capa 50 veces y 3 capas como mínimo y 5 como máximo es un método efectivo ya que el grado de correlación con el ensayo del Proctor T-99 es mayor al 93% en todos los casos

El para realizar el ensayo harvard miniatura se requiere menor cantidad de muestra y se lo puede realizar en un menor tiempo a comparación del ensayo del Proctor T-99

Una vez realizada la gráfica de dispersión de puntos se pudo notar que la ecuación que se ajustaba mejor a los resultados obtenidos tanto para la densidad máxima seca como para la humedad óptima obtenidas para los 3 resortes era una ecuación de primer orden o lineal cuyo porcentaje de correlación es mayor al 93% por lo cual las ecuaciones obtenidas son válidas.

Tras realizar los ensayos de compactación mediante el ensayo harvard miniatura se pudo notar que

1.2. Recomendaciones-

Para el procedimiento de compactación es conveniente definir como mínimo 6 puntos a diferentes humedades ya que al tener un molde de pequeño la variación de peso es muy poca por lo cual es recomendable realizar este procedimiento para poder tener una curva de compactación más clara.

Al realizar las 3 capas se recomienda que la primera capa como la última no comiencen ni terminen en la unión de los collarines para que al momento de enrasarlos no exista una pérdida excesiva de muestra que pueda ser compensada fácilmente con la muestra que pase el tamiz N°10.

Realizar la homogenización de la humedad en el suelo a través de un atomizador evitando que el suelo quede con grumos que contengan mucha humedad ya que puede hacer variar nuestros resultados. Ajustar bien el molde a su base para evitar la pérdida de muestra.

Al momento de usar el extractor de muestras se recomienda fijar bien el molde y ajustarlo al extractor y aplicar gradualmente la fuerza sobre el extractor para evitar la alteración de la muestra al momento de pesar es necesario hacerlo en una balanza de precisión de 0.01gr para poder obtener datos más precisos.

Definir con la resistencia de resorte que se procederá a trabajar y montar el equipo antes de realizar la práctica con cuidado evitando provocar torceduras al eje donde se introduce el resorte.