

---

## NOTAS TÉCNICAS

---

### ASPECTOS PRACTICOS SOBRE COMPACTACION DE SUELOS

Elías GUZMAN Z.\*

#### RESUMEN

*Se exponen las especificaciones que deben cumplir los materiales para rellenos de obras viales y estructurales. Se señalan las condiciones de compactación, el control de la misma con una breve enumeración de las maquinarias comúnmente usadas.*

#### INTRODUCCION

Cuando se construye un relleno el especialista en Mecánica de Suelos tiene en los asentamientos su más serio problema. Por tal motivo los compacta, tratando con ello de reducir al mínimo los huecos entre partículas; esto vale para cualquier tipo de relleno, como son, por ejemplo, los terraplenes, las plataformas, las capas componentes de pavimentos: bases, sub-bases, carpetas de rodados, etc.

Gracias a la compactación el suelo sufre una densificación mejorando sus condiciones de soporte, debido a que aquélla implica, entre otros, a los siguientes aspectos de primordial interés para lograr obtener la máxima estabilidad de los materiales<sup>1</sup>:

1. Es sabido que bajo la influencia de cargas estáticas o dinámicas el suelo colocado en o bajo un relleno presenta la tendencia a densificarse disminuyendo sus huecos, es decir, a compactarse.

Es preciso buscar el medio de situarlo en un estado de compactación en el que

---

\*Jefe del Laboratorio de la Sección Mecánica de Suelos, IDIEM.

los asentamientos posteriores sean insignificantes o poco probables, a fin de que no causen problemas posteriores.

Si en algunos casos no se pretende, o no es posible, eliminar totalmente el asentamiento, al menos se hará lo imposible por reducir al mínimo los asentamientos diferenciales.

2. No existe duda que no será suficiente evitar asentamientos y deformaciones si el relleno corre el riesgo de romperse. Es sabido que toda densificación de un suelo lleva también consigo un mejoramiento considerable de sus características mecánicas de resistencia al corte.

Los dos parámetros que esquematizan las características de estabilidad al corte de un suelo, el ángulo de fricción interna,  $\phi$ , y la cohesión,  $C$ , son mejorados considerablemente con la densificación, (especialmente en rellenos de suelos granulares constituídos por gravas o arenas).

3. Con la densificación disminuyen, en cuanto a tamaño, los huecos entre partículas y con ello se produce también, en general, una disminución de la influencia del agua y como la permeabilidad está en relación con la porosidad del material que se ha compactado, el suelo se hace menos permeable y la sensibilidad al agua disminuye normalmente.
4. Debido a la disminución de la porosidad los granos quedan mejor *empaquetados* y, por lo tanto, menos expuestos a la meteorización o a la disgregación. La obtención de grados de compactación elevados (índices de huecos bajos), se logra compactando las capas con cargas pesadas, con o sin vibración. La forma y la naturaleza de las capas de apoyo, que pueden ser muy variables, tienen cierta influencia sobre los resultados obtenidos. Los distintos tipos de máquinas se comportan mejor al compactar distintos tipos de materiales. El conocimiento de las propiedades generales del suelo, que condiciona la elección del compactador adecuado es, por lo tanto, tan importante como el de la maquinaria.

## ESPECIFICACIONES DE MATERIALES

Cuando se precisa construir un relleno, el especialista elige una mezcla de material que dé garantías de estabilidad y rigidez para soportar sin problemas la estructura que deba fundarse sobre él y estudia una combinación de materiales existentes para lograr esa mezcla. Este estudio de la calidad del material se hace en el laboratorio con el suelo a ocupar en la materialización del proyecto.

Con el objeto de garantizar que el material ocupado en obras sea similar al que sirvió de base para el cálculo, deben exigirse condiciones mínimas en cuanto a granulometría, plasticidad, clasificación, estabilidad, etc. Estas condiciones son las llamadas *especificaciones* que fijan los límites a aceptar para que con este tipo de control se asegure la calidad de la construcción y también se cumplan las hipótesis de cálculo.

En caso de rellenos estructurales bajo fundaciones, rellenos bajo radieres, etc., el especialista establece sus especificaciones generalmente basándose en su experiencia personal, pero en construcciones camineras (sub-bases, bases, capas de rodado) instituciones internacionales tales como la A.A.S.H.T.O. (American Association State Highway and Transportation Officials) y la A.S.T.M. (American Society for Testing and Materials) han confeccionado especificaciones basadas en experiencias de la práctica vial de EUA, y esas especificaciones han sido adoptadas por instituciones a nivel nacional, tales como la Dirección de Vialidad, la Dirección de Pavimentación Urbana, etc. La A.A.S.H.T.O. y la A.S.T.M. han normalizado estas especificaciones e incluso han unificado criterios con lo cual muchas de ellas son exactamente iguales.

En los párrafos siguientes se presentan especificaciones relativas al material para diferentes tipos de rellenos.

### Rellenos compactados para bases y sub-bases

Para estos rellenos se especifican las composiciones granulométricas que se presentan en la Tabla I.

TABLA I

ESPECIFICACIONES PARA BASE, SUB-BASE Y CARPETAS  
DE RODADO SEGUN DESIGNACION A.S.T.M.<sup>2</sup> D - 1241-68 Y  
DESIGNACION A.A.S.H.T.O.<sup>3</sup> M - 147

| Malla o Criba         | Tipo I        |         |         |          | Tipo II  |          |
|-----------------------|---------------|---------|---------|----------|----------|----------|
|                       | A             | B       | C       | D        | E        | F        |
| 2"                    | 100           | 100     |         |          |          |          |
| 1"                    |               | 75 - 90 | 100     | 100      | 100      | 100      |
| 3/8"                  | 30 - 65       | 40 - 75 | 50 - 85 | 60 - 100 |          |          |
| Nº 4                  | 25 - 55       | 30 - 60 | 35 - 65 | 50 - 85  | 55 - 100 | 70 - 100 |
| Nº 10                 | 15 - 40       | 20 - 45 | 25 - 50 | 40 - 70  | 40 - 100 | 55 - 100 |
| Nº 40                 | 8 - 20        | 15 - 30 | 15 - 30 | 25 - 45  | 20 - 50  | 30 - 70  |
| Nº 200                | 2 - 8         | 5 - 15  | 5 - 15  | 8 - 15   | 6 - 15   | 8 - 15   |
| Límite líquido        | inferior a 25 |         |         |          |          |          |
| Índice de plasticidad | inferior a 6  |         |         |          |          |          |

Nota: Granulometría establecida en porcentaje (en peso) de material que pasa por la criba o malla correspondiente.

### Requerimientos generales

El agregado grueso (fracción retenida en la malla Nº 10) deberá estar constituido por partículas duras y tenaces de grava natural o chancado, arena o escoria; los materiales que se dañen con ciclos de secamiento, humedad o congelación no

deben ser usados. El agregado grueso no deberá tener un desgaste según el método de Los Angeles superior a 50%.

El agregado fino (fracción que pasa por la malla N° 10) estará constituido por arena natural o chancada y partículas minerales finas que pasen la malla N° 200. La fracción del material que pasa la malla N° 200 no deberá ser mayor a los 2/3 de la fracción que pasa por la malla N° 40.

La mezcla de materiales deberá estar libre de grumo, materias vegetales, terrones de arcilla o cualquier material deleznable. Cuando el material en estudio se ocupe como carpeta de rodado expuesta al tránsito por un tiempo prolongado, se puede especificar un límite líquido máximo de 35% y un índice de plasticidad comprendido entre 4 y 9.

La Dirección de Vialidad de nuestro país tiene sus propias especificaciones relativas a la capa de base, ya sea para pavimentos rígidos (hormigón) o para pavimentos flexibles (asfalto), dos de las granulometrías más comunes se dan en la Tabla II.

**TABLA II**  
**ESPECIFICACIONES DE LA DIRECCION DE VIALIDAD**

| Criba o Malla         | Porcentaje pasa (en peso) |                    |
|-----------------------|---------------------------|--------------------|
|                       | Tamaño Máx. 2"            | Tamaño Máx. 1 1/2" |
| 2"                    | 100                       |                    |
| 1 1/2"                | 70 - 100                  | 100                |
| 1"                    | 55 - 85                   | 90 - 100           |
| 3/8"                  | 40 - 70                   | 45 - 75            |
| 10                    | 20 - 50                   | 20 - 50            |
| 40                    | 10 - 30                   | 10 - 30            |
| 200                   | 5 - 15                    | 5 - 15             |
| Límite líquido        | inferior a 25             |                    |
| Índice de plasticidad | inferior a 6              |                    |

Además, Vialidad exige un CBR mínimo de 50% para pavimentos rígidos y de 80% para pavimentos flexibles. Cabe hacer notar que para conseguir este último CBR es necesario ocupar chancado, por lo que normalmente se exige que más del 50% de la fracción retenida en la malla N° 4 (fracción grava) debe tener, a lo menos, 2 caras fracturadas.

### Rellenos estructurales

Debido a que muchos proyectos de edificios consultan apoyar sus fundaciones sobre rellenos compactados, la CORVI ha confeccionado especificaciones para este tipo de relleno, las cuales se han aplicado en una gran cantidad de obras y cuyas características de granulometría se anotan en la Tabla III.

**TABLA III**  
**ESPECIFICACIONES CORVI DE RELLENOS ESTRUCTURALES**

| Criba o Malla         | Porcentaje pasa en peso |
|-----------------------|-------------------------|
| 3" *                  | 100                     |
| 1"                    | 70 - 100                |
| 10                    | 20 - 100                |
| 40                    | 10 - 60                 |
| 200                   | 0 - 10                  |
| Indice de plasticidad | No plástico             |

\* El tamaño máximo se especifica según el espesor del relleno.

### Rellenos bajo radieres

Cuando es necesario elevar el nivel del suelo natural para fundar radieres de piso, esto se efectúa mediante un relleno debidamente compactado. El material a ocupar es generalmente un suelo granular y las especificaciones a cumplir son dadas por el proyectista de acuerdo con los materiales más económicos con que se cuenta. De acuerdo a experiencias personales del autor, el material deberá cumplir las especificaciones de la Tabla IV.

**TABLA IV**  
**ESPECIFICACIONES PROPUESTAS POR EL AUTOR**

| Item                  | Especificación |
|-----------------------|----------------|
| Pasa criba de 3" *    | 100%           |
| Pasa malla N° 200     | Menos de 35%   |
| Límite líquido        | Inferior a 35  |
| Indice de plasticidad | Inferior a 10  |

\* El tamaño máximo se especifica según el espesor del relleno.

En un buen número de poblaciones se han usado con éxito materiales que cumplan con estas características; citamos de ellas, Villa México, en Santiago, Villa Ayquina, en Calama, población construída por Vienor en El Salvador.

Normalmente, fuera de las especificaciones granulométricas y de constantes hídricas se especifican además otras condiciones, como son: el tamaño máximo del material, el que generalmente no debe exceder de 1/3 del espesor de la capa a compactar; el porcentaje (en peso) de material chancado para lograr CBR altos; granulometrías gruesas destinadas a cortar ascensos capilares del agua bajo un radier de piso, etc.

Existen, además, numerosas otras especificaciones para otros tipos de trabajo; así, no debe olvidarse, que hay especificaciones específicas para mezclas de hormigón, mezclas asfálticas, etc., y ellas son con el fin, como se dijo al comienzo, de controlar la calidad de los materiales.

### ESPECIFICACIONES SOBRE LA COMPACTACION A ALCANZAR

Es indudable que la especificación más importante a cumplir corresponde al grado de compactación a alcanzar, ya que un material, por muy buena que sea su calidad, si no alcanza un grado de compactación adecuado, podrá acarrear problemas de asentamiento o de inestabilidad al corte.

En general se exige que el grado de compactación a alcanzar sea igual o mayor al 95% de la densidad máxima seca dada por ensaye de *Relación-humedad-densidad, Proctor modificado*.

El Highway Engineering Handbook en su capítulo Earthwork, recomienda los requerimientos mínimos para compactación de terraplenes de la Tabla V.

TABLA V

#### ESPECIFICACIONES PARA TERRAPLENES; HIGHWAY ENGINEERING HANDBOOK<sup>4</sup>

| Clase de suelo | No sujeto a inundación |         | Sujeto a inundación       |          |
|----------------|------------------------|---------|---------------------------|----------|
|                | Clasificación AASHTO   | Altura  | % de compact. del Proctor | Altura   |
| A-1            | no crítica             | 95      | no crítica                | 95       |
| A-3            | no crítica             | 100     | no crítica                | 100      |
| A-2-4          | 50'                    | 95      | 10'                       | 95       |
| A-2-5          | 50'                    | 95      | 10' - 50'                 | 95 a 100 |
| A-4            | 50'                    | 95      | 50'                       | 95 a 100 |
| A-5            | 50'                    | 95      | 50'                       | 95 a 100 |
| A-6            | 50'                    | 90 - 95 | 50'                       | 95 a 100 |
| A-7            | 50'                    | 90 - 95 | 50'                       | 95 a 100 |

Nota: Las recomendaciones para la condición Sujeto a inundación dependen de la altura del relleno. Rellenos altos de 35' a 50' deben ser compactados al 100%. Los valores mínimos se ocupan en terraplenes bajos de 10' a 15' o menos, y para caminos no sujetos a inundaciones y con volúmenes bajos de tráfico pesado. Para bases, sub-bases y carpetas de rodado para caminos o calles generalmente se especifica un grado de compactación igual o superior al 95% de la compactación Proctor modificado.

#### Control de la compactación

Es indudable que no se puede tratar seriamente la compactación de un material sin haber indicado cómo se efectuará el control de ella, es decir, sin haber definido cómo se averiguará el grado de compactación obtenido y cuáles son las limitaciones del instrumento empleado en ello. En la práctica dicho grado de compactación

se define como la razón  $\gamma_d/\gamma_{d\text{ máx}}$ ; en que  $\gamma_d$  es la densidad seca con que ha quedado el material después de compactado y  $\gamma_{d\text{ máx}}$  es la densidad seca máxima dada por el ensayo estándar o modificado según sea la exigencia especificada.

Otra forma de definirlos es expresar la densidad seca, en términos de densidad relativa:

$$DR = \frac{\gamma_d}{\gamma_{\text{máx}}} \left[ \frac{\gamma_d - \gamma_{d\text{ mín}}}{\gamma_{d\text{ máx}} - \gamma_{d\text{ mín}}} \right]$$

En que  $DR$  es la densidad relativa especificada,  $\gamma_{d\text{ máx}}$  es la densidad seca máxima determinada en laboratorio por vibrado vertical de la muestra y  $\gamma_{d\text{ mín}}$  es la densidad mínima determinada en laboratorio.

Existen numerosos métodos y aparatos para controlar la compactación (determinación de  $\gamma_d$ ) pero todos ellos tienen un inconveniente común: la gran dispersión relativa de los resultados obtenidos.

En estos términos, la densidad seca, no solamente es función de la calidad de la compactación recibida, sino también, de otros factores tales como la granulometría, la humedad, espesor real de la capa en un punto dado, angularidad y disgregación del material, error accidental en la medida, etc. Todos estos factores tienen variaciones importantes de un punto a otro de la capa del suelo a compactar y ellas originan fluctuaciones de la característica física medida.

Estas fluctuaciones son en definitiva importantes, puesto que son del orden de magnitud de las diferencias creadas por la calidad misma de la compactación.

Lo anterior induciría a condenar en un primer análisis, sin apelación, al proceso de control de la compactación. Sin embargo, ello sería ignorar las posibilidades que nos ofrece la herramienta de la estadística. Con la condición de efectuar un número suficiente de medidas se puede aislar la acción del único factor que nos interesa. Esto implica un costo más elevado del control y un eventual retraso en la obtención de resultados, el cual, si no está compensado, puede ser un inconveniente más serio que el costo del control. Dicho en otras palabras, el agilizar la faena del control, aun cuando implique un mayor costo, compensa con creces los mayores costos que se producirían por retrasos en la faena constructiva.

El cuadro siguiente resume los métodos de control de compactación de relleno de suelo:

|   |  |  |
|---|--|--|
| 1º Medidas del peso unitario seco (densidad seca) | Por peso y volumen                                     | Arena, aceite, agua, membrana normal, membrana grande.     |
|   | Por métodos nucleares                                  | Sonda puntual, sonda superficial, sonda superficial móvil. |
| 2º Ensayes mecánicos                              | Aguja Proctor<br>Ensayes de placa<br>Canchas de prueba |  |

### Controles por medida del peso unitario seco

Las medidas del peso unitario seco, malamente llamado densidad seca por nuestros técnicos, pueden hacerse directamente. Para ello se excava un hoyo en la capa a ensayar, se pesan los materiales extraídos del hoyo pasando de su peso húmedo al peso seco con una medida de la humedad y se determina el volumen del hoyo.

Pesar los materiales extraídos del hoyo sólo presenta un problema: recoger la totalidad de los materiales sin pérdida ni adición (esto es sólo asunto de esmero). Más delicada es la medida del contenido de humedad, pues si no se toma una muestra bien representativa se puede caer en graves errores. Por lo tanto lo mejor es secar la totalidad del material extraído.

No obstante, es en la medida del volumen del hoyo donde residen las mayores dificultades ya que generalmente éste no tiene una forma geométrica simple y sus paredes presentan asperezas más o menos importantes que complican el problema. El método más preciso es, según el Road Research Laboratory, el método del cono de arena. Consiste en llenar el hoyo con una arena bien seca, de granulometría cortada y de densidad calibrada la que es vertida desde una altura constante. Se determina el peso de la arena seca vertida pesando el cono antes y después de efectuada dicha operación. Con este peso y la densidad dada por la calibración se calcula el volumen del hoyo.

La ventaja del procedimiento estriba en que la arena se amolda bien a las paredes del hoyo, aun cuando su forma sea desigual.

La idea de sustituir la arena por un líquido a fin de adaptarse mejor a la forma del hoyo es seductora. Este fluido debe ser viscoso para que no filtre por los poros del suelo: el agua no puede ser, de aquí la elección de aceite pesado. También debe considerarse, al ocupar líquido, la completa horizontalidad del terreno.

Existen métodos que permiten el empleo del agua. Para tal efecto la superficie del hoyo se cubre previamente con una membrana de goma y posteriormente se vierte el agua. Así se obtiene el densímetro de membrana o *volutester*, los errores susceptibles de ser cometidos son los siguientes: puede quedar aire encerrado entre la pared y la membrana, situación que se minimiza haciendo lisas las paredes del hoyo. Si la membrana no es suficientemente flexible no se adapta perfectamente a las sinuosidades del hoyo. Estos inconvenientes limitan el empleo de *volutester* sólo a suelos finos y arenas finas.

Los métodos nucleares están basados en la retrodifusión de rayos  $\gamma$  provistos por una fuente de cobalto 60 colocada en la superficie de la capa a estudiar. Los rayos  $\gamma$  emitidos son reenviados por retrodifusión y captados en un foto multiplicador. El método tiene el inconveniente de perturbar levemente el suelo al colocar los electrodos, pero por encima de todas las críticas, por el momento estos aparatos son los más cómodos, los más rápidos y los más seguros. Sin embargo debido a su alto costo aún no se han popularizado.

En Chile se usan normalmente el método del cono de arena y el del *volutester*; casi todos los otros se han empleado también, pero sólo con carácter ocasional.



### Controles por ensayos mecánicos

**Aguja Proctor.** Este método consiste en hincar una aguja de sección conocida, previamente tarada en el ensaye Proctor. Midiendo la presión necesaria para hincar la aguja una cierta longitud, es posible obtener en la curva de calibración el peso unitario seco.

Debido a factores influyentes como la humedad y la granulometría los resultados presentan una gran dispersión por lo que este método está prácticamente en desuso.

**Ensayes de placa.** En relación con la aguja Proctor, tienen el inconveniente de no eliminar la influencia del contenido de humedad que puede dar origen a graves errores. Un suelo plástico mal compactado, pero seco, conduce a un módulo elevado y nos lleva al engaño.

### Canchas de prueba

Lo ideal sería antes de comenzar la obra confeccionar uno o varios tramos experimentales para estudiar la compactación del material que se va a emplear posteriormente en la faena.

Para controlar los resultados obtenidos es necesario emplear algunos de los métodos expuestos anteriormente. Por tal motivo, lo realista es concentrar en el tramo experimental métodos de medición de la densidad seca lo suficientemente poderosos para eliminar cualquier factor de error. Con ello se pueden obtener datos muy precisos y serenos capaces de definir el equipo de compactación más adecuado, las condiciones del contenido de humedad más apropiadas para lograr como meta final una mayor compactación con una pasada mínima de maquinarias. Todavía es preciso no hacerse ilusiones. No se piense que un tramo experimental no esté cuajado de un gran número de medidas y que no debe ser ejecutado con esmero. Para convencerse basta observar algunas curvas que dan la densidad seca en función de pasadas: las caídas de densidad en el curso de la compactación, que aparecen en algunas de estas curvas, no manifiestan otra cosa que la exagerada dispersión de las medidas de densidad efectuadas y su bajo nivel de significación.

El método de tramos experimentales tendría también un interés general considerable. Recogiendo los datos obtenidos, poco a poco se podría formar un álbum de mucha utilidad en el diseño de rellenos compactados.

### Maquinaria de compactación

#### Tipos

Existe una amplia gama de equipos de compactación que sería largo enumerar uno por uno. La siguiente es una lista de los principales tipos de compactadores: **Rodillos de llantas.** Son los más antiguos y constan de 2 o de 3 llantas lisas. Actualmente su uso tiende a desaparecer y sólo se ocupan en el *alisado* o *planchado* de la capa a compactar. Su peso varía entre 3 y 20 ton.

**Rodillos pata de cabra.** Estos rodillos tienen como elementos activos unos cilindros metálicos erizados, fijos, llamados *pata de cabra*. La acción del compactador

es semejante al paso de un rebaño cuyas innumerables patas penetran en el suelo y lo compactan. La leyenda dice que se ha utilizado para compactar terraplenes precisamente la acción debida al paso del ganado.

Este tipo se ha generalizado a rodillos de Rejas y rodillos de Segmentos, pero en realidad son sólo variaciones del mismo tipo.

Este rodillo es eficaz para compactar arcillas, y limos plásticos. Su peso varía entre 3 y 15 ton y la presión en cada *pata* es del orden de 20 a 100 bars.

**Rodillos de ruedas neumáticas.** Corresponden a un chasis que constituye la capa del lastre, con dos o tres filas de 4 a 6 neumáticos generalmente lisos. Estos compactadores son de uso universal pues son eficaces en casi todos los tipos de material con excepción de arenas finas de granulometría cortada (uniforme).

**Rodillos vibradores de llanta lisa.** Es una llanta o tambor que sirve de depósito para el lastre la cual es sometida a vibraciones verticales mediante una excéntrica. Son eficaces en materiales granulares que tienen bajo contenido de finos. Su peso no pasa más allá de las 3 ton.

**Rodillos vibradores pata de cabra.** Son esencialmente iguales a los vibradores de llanta lisa con la diferencia que llevan las *patas de cabra*. Se puede decir que sirve a los mismos tipos de suelos.

**Compactadores de placa vibrante.** Son simples placas adosadas con un vibrador que sirve esencialmente para compactar suelos granulares en superficies reducidas.

**Compactadores de multiplaca vibrante y de pisón y vibropisones.** Constituyen variaciones de la placa vibrante.

**Compactadores especiales.** Existen gran variedad de máquinas especiales para compactar zanjas, juntas, revestimientos de taludes, etc. Todos ellos son simples variaciones de los tipos descritos anteriormente, pero especialmente adaptados para superficies difíciles.

#### REFERENCIAS

1. ARQUIE, G. *Compactación en carreteras y aeropuertos*. ETA, Barcelona, 1972.
2. ASTM D 1241-68 *Specifications for Soil-aggregate Subbase, Base and Surface Courses*.
3. M 147-65 *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. AASHTO, 11ª edición, septiembre 1974.
4. WOODS, K. *Highway Engineering Handbook*, Mc Graw Hill Co. Inc., 1960.

#### SOME PRACTICAL ASPECTS ON SOIL COMPACTION

##### SUMMARY:

*The specifications for materials for soil aggregate both for highway and structural works are presented. The compaction requirements, field control compaction and a brief list of compacting equipment are given.*