



Ensayos de compactación en carreteras: Proctor Normal y Modificado

| | |
|--------------------------|--|
| Apellidos, nombre | López Maldonado, Griselda (grilomal@tra.upv.es) |
| Departamento | Ingeniería e Infraestructuras de los Transportes |
| Centro | Universitat Politècnica de València |



1 Resumen de las ideas clave

Los materiales que se utilizan para la construcción de terraplenes en las obras de carretera deben tener cierta resistencia mecánica. Mediante el proceso de compactación se mejoran entre otras, las propiedades resistentes de los suelos. En este artículo se presentan los ensayos de compactación, Proctor Normal y Proctor Modificado, describiéndose el objetivo de los mismos, cómo se realizan y cuáles son sus principales diferencias. Además, se muestra cómo tratar los resultados de los mismos y cómo se trasladan estos resultados a la obra de carreteras.

2 Introducción

En las obras de tierra, los materiales que se utilizan para la formación de los terraplenes deben presentar indeformabilidad volumétrica, para que la explanada no varíe sus dimensiones a lo largo del tiempo; inalterabilidad físico-química, que afectaría a la deformabilidad de las obras de tierra; así como resistencia mecánica para resistir el peso del firme y del tráfico.

La compactación de un suelo produce un incremento en la densidad del material, produciendo importantes beneficios sobre el mismo:

- Incrementa su resistencia al corte, dado que produce mayor unión entre las partículas, obteniéndose así, mayor resistencia del conjunto.
- Disminución de la permeabilidad, dado que se dificulta la penetración de agua en el material. La presencia de agua en materiales granulares puede provocar su deterioro, tanto por el arrastre de partículas como por las posibles variaciones volumétricas ante la presencia de heladas.
- Reduce su compresibilidad y, por tanto, el número de huecos presentes en el suelo (sobre los que el agua podría acumularse).
- Impide el hundimiento del suelo. Una mala compactación del suelo puede dar lugar a asientos diferenciales, y a hundimientos localizados en el firme, provocando a largo plazo, la aparición de patologías.

De este modo, la compactación de los suelos uno de los métodos más utilizados para mejorar las propiedades de un suelo. Por ello, es primordial conocer cómo se realizan los ensayos en laboratorio, y cuáles son los parámetros que sirven de referencia en el proceso de compactación en obra y control de calidad.

Los ensayos de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado son dos de los ensayos más utilizados en el estudio de compactación de suelos en la construcción de obras de carretera.

3 Objetivos

Una vez que el alumnado se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Definir cuál es el objetivo de la compactación y para qué se realiza.
- Identificar las fases necesarias en laboratorio para realizar el Ensayo Proctor Normal y Proctor Modificado.
- Determinar la curva de compactación.
- Calcular los parámetros de referencia de los ensayos de compactación.

4 Ensayo Proctor

El ensayo Proctor se emplea para determinar la relación entre la densidad seca y la humedad de compactación de los materiales a utilizar tanto en explanadas como en capas granulares de firmes. Así, los resultados del ensayo serán utilizados como referencia para el control de calidad de la compactación en obra.

Existen dos ensayos Proctor, el ensayo Proctor Normal que se rige por la norma UNE 103-500-94, y el ensayo Proctor Modificado que se rige por la norma UNE 103-501-94.

El objeto de ambos ensayos es determinar, en un suelo o capa granular, la relación entre la densidad seca y la humedad para una energía de compactación dada (definida en la norma UNE correspondiente), y definir la densidad seca máxima y su humedad correspondiente, denominada óptima, que se puede conseguir con ese suelo en el laboratorio.

Para realizar el ensayo, además del equipamiento de laboratorio común a muchos ensayos como son una báscula, una estufa de secado o pequeño material (bandejas, mazo de goma, palas, etc.), se requiere el equipamiento específico que se muestra en la imagen 1.



Imagen 1. Equipamiento de laboratorio para realizar el ensayo.

Cabe destacar que el procedimiento de realización de los ensayos Proctor Normal y Proctor Modificado es el mismo, y las diferencias principales radican en los valores de los parámetros básicos. Veamos estas diferencias tratando de observar la Imagen 2.



A la vista de la imagen, ¿podrías identificar en qué se diferencian el Ensayo Proctor Normal y el Modificado?

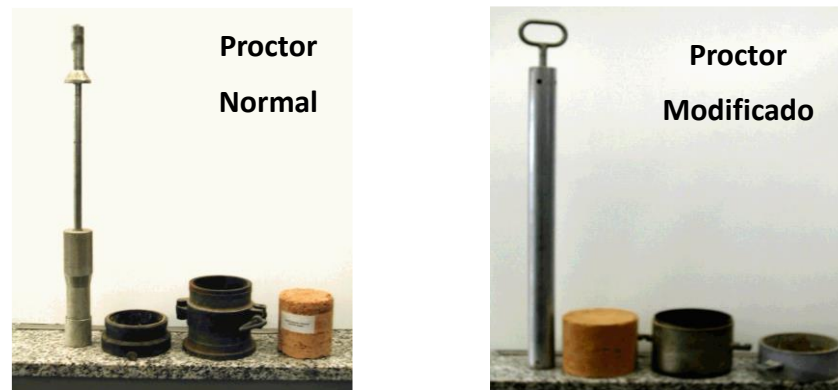


Imagen 2. Material de laboratorio para realizar el ensayo Proctor Normal y Modificado.

A la vista de la Imagen 2, podemos observar que las diferencias radican en la maza y en el molde de las probetas. Por ello, cada ensayo se realiza sobre un determinado tipo de probetas, que se fabrican aplicando diferente energía. A continuación, se describen las principales características de ambos ensayos, sin embargo, el paso previo a su realización es la obtención de la muestra de ensayo.

4.1. Muestra de ensayo

El primer paso en todo ensayo es preparar la muestra a ensayar. Si el material presenta excesiva humedad, se requiere un secado previo del mismo en estufa. Una vez se ha secado la muestra, es necesario desmenuzar el material (utilizando un mazo de goma), para posteriormente obtener una muestra mediante un previo cuarteo de la misma.

Para la realización del ensayo Proctor se requieren aproximadamente unos 3 kg de muestra, dado que es necesario hacer al menos 4 probetas diferentes (en las que se variará el contenido de humedad en variaciones de no más de un 3%).

En la Imagen 3 se pueden observar las cuatro muestras representativas de un suelo sobre el cual se han realizado variaciones de humedad de un 3% (la muestra 1 del suelo tiene una humedad natural conocida, para las siguientes muestras se calcula el agua que hay que añadir para que la humedad de la muestra aumente en un 3%)



Imagen 3. Muestras de suelo con diferente contenido de humedad.

4.2. Ensayo Proctor Normal

El objetivo del ensayo es obtener la densidad máxima de un suelo y la humedad óptima que es necesaria aportar para alcanzar dicha densidad.

Una vez preparadas las muestras del suelo a ensayar, se determina el peso y el volumen del molde donde se realiza la probeta. Y se inicia el proceso de compactación.

Para la realización del ensayo Proctor Normal se requiere un molde cilíndrico con una capacidad de 1.000 cm³. El molde se rellenará con 3 capas de material granular debidamente compactado con una maza tipo de 2,5 kg de peso. Para compactar cada capa del material, se deja caer libremente 26 veces la maza sobre una altura de 30,5 cm. Los golpes deben distribuirse uniformemente sobre la superficie del suelo que se está compactando.

Una vez que se han compactado las 3 capas del suelo, se retira el collar del molde y se enrasa el suelo (con el borde del molde). A continuación, se obtiene la masa del conjunto.

Posteriormente se desmonta la muestra del molde con el objetivo de tomar una muestra de la zona central (que se obtiene tallando la probeta). Sobre esta muestra se determina la humedad siguiendo la Norma UNE 103 300 y la densidad. En la imagen 4 se muestran las principales fases para la realización del ensayo.



Imagen 4. Fases de procedimiento operatorio del ensayo Proctor.

Como mínimo este ensayo debe repetirse sobre 4 muestras, sin embargo, es habitual repetirlo sobre 5 muestras.

4.2. Ensayo Proctor Modificado

Como se ha comentado anteriormente, el procedimiento para realizar en el ensayo Proctor Modificado es el mismo que se ha descrito en el ensayo Proctor Normal, modificando algunos parámetros fundamentales.

En este ensayo se utiliza un molde y una maza de mayores dimensiones: molde de capacidad de 2.320 cm³ y maza de 4,535 kg. La altura normalizada desde la que se deja caer la maza es de 4,57 cm, lo que implica una mayor energía de compactación. Para la formación de la probeta, en lugar de compactar 3 capas de material granular, se

compactan 5 capas, siendo necesario dar a cada capa 60 golpes que deben distribuirse uniformemente sobre la superficie del material.

Al igual que en el caso del ensayo Proctor Normal, se requieren un mínimo de 4 muestras para ensayarlas con distintas humedades. El objetivo es poder representar la curva de compactación a partir de varios pares de valores densidad-humedad.

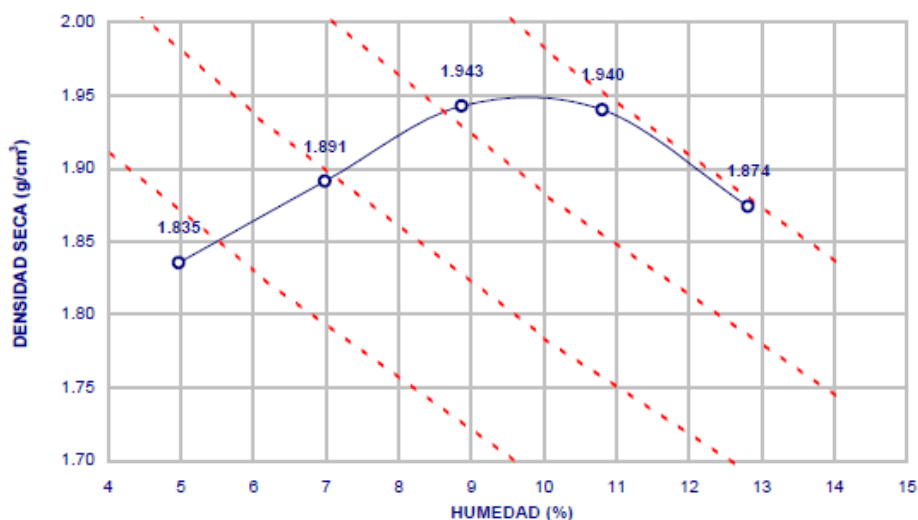
¿Cuándo se emplea cada ensayo?



El proyecto (o Director de las obras) debe definir el ensayo de referencia: el ensayo Proctor Normal o Proctor Modificado. En la mayoría de los casos, el ensayo de referencia es el Proctor Modificado, ya que recrea con mayor fidelidad las condiciones de compactación de una obra. Sin embargo, en suelos expansivos se recomienda el Proctor Normal. Este ensayo también tiene mayor utilidad en compactaciones menores, como son las correspondientes a relleno de zanjas o ejecución de caminos.

5 Resultados del ensayo

Como resultados del ensayo se obtiene la densidad seca y la humedad para cada punto ensayado. Estos pares de valores deben representarse en un diagrama densidad (gr/cm^3) – humedad (%), y representarán la curva de compactación. La Imagen 4 muestra un ejemplo de este diagrama.



A la vista de este diagrama, tómate un momento para contestar a la siguiente pregunta:



¿Cuáles crees que son los parámetros que se utilizan para el control de la compactación en obra?

Como resultado del ensayo hemos obtenido la curva de compactación. Sobre esta curva podemos obtener de un modo gráfico, la densidad máxima del suelo, y la humedad óptima con la que alcanzar dicha densidad.

Según el artículo 330 del PG3, en obra se exige alcanzar un porcentaje mínimo de densidad seca máxima y una humedad de compactación próxima a la humedad

óptima. Por ello, no se habla de valores absolutos sino de grado de compactación (que es una proporción alcanzada de una densidad de referencia obtenida con cada suelo en un ensayo normalizado de compactación). En el caso de la coronación del terraplén se establece que se debe alcanzar un valor $\geq 100\%$ de la densidad máxima del Proctor de referencia. En el caso del núcleo y cimiento del terraplén el valor debe ser $\geq 95\%$ de la densidad máxima del Proctor de referencia.

CUIDADO!!!



Para determinar la curva de compactación necesitamos que los puntos ensayados se sitúen tanto en la rama ascendente de la curva (con menos humedad de la óptima al compactar todavía tenemos huecos, la compactación todavía no es máxima); como en la rama descendente (al ir subiendo la humedad, el agua rellena los huecos de la muestra y al pasarnos de agua se desplaza parte del suelo y la densidad disminuye). Si el ensayo se hace utilizando 4 muestras de suelo y no conseguimos puntos en ambas ramas, no se podría determinar el máximo de la curva. Dicho problema se resuelve ensayando una muestra más.

6 Conclusión

En este documento se ha mostrado cuáles son las ventajas que del proceso de compactación sobre un suelo o un material granular; y qué ensayos se realizan en laboratorio para controlar el proceso de compactación. Además, se han analizado los resultados obtenidos en los ensayos, y la validez de los mismos.

Con estos conocimientos básicos, es posible calcular los valores de referencia para el control de la compactación en obra.



Vamos a comprobarlo:

Se tiene un suelo con los siguientes resultados en su ensayo Proctor Modificado:

| | | | | | |
|----------------|------|------|------|------|------|
| Humedad (%) | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 |
| Peso molde (g) | 4095 | 4305 | 4415 | 4420 | 4268 |

Se pide:

- Determinar la densidad seca de cada punto.
- Dibujar la curva Proctor y determinar la densidad y humedad óptima de compactación.

Nota:

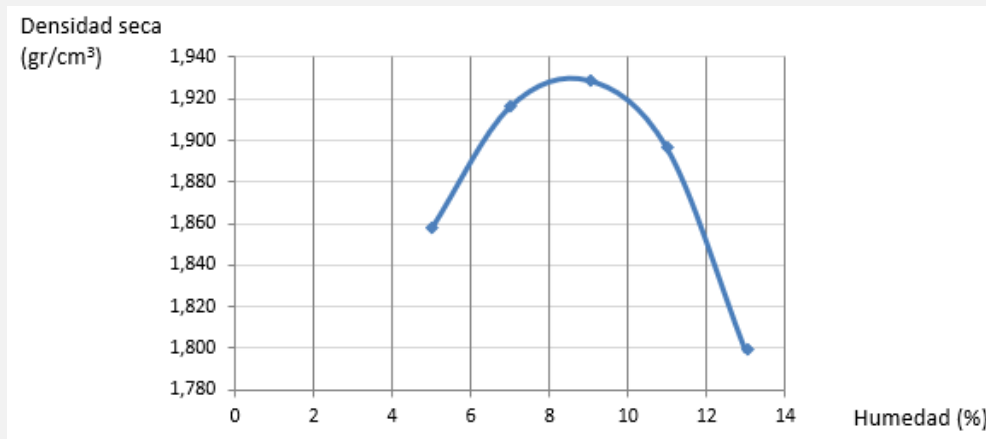
$$\gamma_{seca} = \frac{\gamma_{natural}}{1 + humedad} \quad \gamma_{natural} = \frac{\text{Peso total}}{\text{Vol total}}$$

a. Determinar la densidad seca de cada punto.

Se sabe que se ha realizado un ensayo Proctor Modificado, por tanto, se conoce el volumen del molde: 2100 cm³

| Humedad | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | 0,13 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Peso molde (gr) | 4095 | 4305 | 4415 | 4420 | 4268 |
| Densidad natural (gr/cm ³) | 1,950 | 2,050 | 2,102 | 2,105 | 2,032 |
| Densidad Seca (gr/cm ³) | 1,857 | 1,916 | 1,929 | 1,896 | 1,799 |

b. Dibujar la curva Proctor y determinar la densidad y humedad óptima de compactación.



El máximo de la curva coincide con los valores del control de la compactación en obra:

- Densidad seca = 1,93 gr/cm³
- Humedad óptima = 8,4 %

7 Bibliografía

Kraemer, C. et al. (2004). "Ingeniería de Carreteras. Vol. 2". McGraw-Hill.

Lorente, G. y Garach, L. (2016). "Fundamentos de la Ingeniería de las Obras Lineales". Editorial Técnica Avicam

UNE 103 – 500 – Ensayo de compactación Proctor Normal

UNE 103 – 501 -94 – Ensayo de compactación Proctor Modificado