



ENSAYO DE COMPACTACIÓN DE SUELOS: PRUEBAS PROCTOR MODIFICADO

Yudith Aparismo¹, Alfredo Arrieta², Jerson Caicedo³ y Sara Hernandez⁴

¹ Correo 1; yudithgabriela64@gmail.com

² Correo 2; alfredoarrietam@gmail.com

³ Correo 3; jersoncaicedo1312@gmail.com

⁴ Correo 4; sara2005hernandez.15@gmail.com, Tel.: 3025426692, Colombia, MEGT

Abstract: This report investigated the compaction of soil samples using the Modified Proctor test to determine the relationship between sample moisture content and the maximum dry density of the soil, fundamental parameters in the design and construction of civil structures. Laboratory tests were conducted in accordance with ASTM D698-91 and AASTHO T 99-90 standards, using a cylindrical cylinder and a compaction piston, based on the application of energy in controlled layers.

The objective was to compact several soil samples with different moisture content percentages, determining the dry density achieved in each case. This was done so that the compaction curve could be created from the sample results, allowing for the identification of the optimal moisture content to achieve the highest possible dry density. These data are of utmost importance in geotechnical engineering, allowing for the establishment of adequate compaction conditions in projects such as roads, dams, and foundations, ensuring structural stability and strength.

Finally, the corresponding analysis of the results is presented, along with conclusions regarding the influence of moisture content and compaction energy on soil properties, highlighting the importance of the test in quality control of construction materials.

Keywords: Modified Proctor test 1; compaction 2; optimum moisture content 3; density 4; geotechnical engineering 5.

Resumen: En este informe se realizó una investigación sobre la compactación de muestras de suelos utilizando el ensayo Proctor Modificado, con el fin de determinar la relación entre la humedad de las muestras y la densidad seca máxima que posee el suelo, parámetros fundamentales en el diseño y construcción de estructuras civiles. Para esto se realizaron pruebas de laboratorio siguiendo normativas ASTM D698-91 y la AASTHO T 99-90, utilizando un molde cilíndrico y un pistón de compactación, basada en la aplicación de energía en capas controladas.

La finalidad consintió en compactación de varias muestras de suelo con diferentes porcentajes de humedad, teniendo la densidad seca alcanzada en cada caso, esto para poder con los resultados de las muestras crear la curva de compactación, permitiendo identificar la humedad óptima para lograr la mayor densidad seca posible. Estos datos obtenidos son de suma importancia en la ingeniería geotécnica permitiendo establecer condiciones adecuadas de compactación en obras como carreteras, presas y cimentaciones, garantizando estabilidad y resistencia estructural.

Al finalizar se presenta el análisis correspondiente de los resultados, además de las conclusiones sobre la influencia del porcentaje de humedad y la energía de compactación en las propiedades del suelo, destacando la importancia del ensayo en el control de calidad de materiales de construcción.

Palabras claves: ensayo Proctor Modificado 1; compactación 2; humedad óptima 3; densidad 4; ingeniería geotécnica 5.

1. Introducción

La humedad es uno de los aspectos más importantes en la construcción, puesto que, en la medida de que su contenido varíe, también variará las densidades obtenidas. Este fenómeno se da debido a que el agua llena los espacios de suelo ocupados por el aire, permitiendo una mejor acomodación de las partículas, lo que repercute en el grado de compactación; sin embargo, el exceso de agua podría provocar el efecto contrario, al aumentar exageradamente el espacio entre las partículas. Con el fin de determinar la humedad óptima requerida para una construcción, se utiliza el ensayo Proctor, ya que es necesario que las estructuras reposen sobre una base firme y resistente, para poder evitar posibles inconvenientes en la estructura, debido a un posible caso de compactación inadecuada del suelo.

El presente informe se centra en la evaluación de la compactación de suelos, para así analizar lo que comúnmente se conoce como la "curva de compactación". El objetivo principal de este informe es determinar la humedad óptima y la densidad máxima seca del suelo mediante el proceso de compactación. Estos datos son fundamentales para garantizar una buena resistencia y estabilidad del suelo antes de iniciar cualquier proyecto de construcción. La humedad óptima se refiere al contenido de agua adecuado que permite obtener la máxima densidad seca del suelo cuando se somete a un esfuerzo de compactación. Esta relación entre la humedad y la densidad proporciona información crucial para la selección de equipos de compactación, la planificación de la secuencia constructiva y la estimación de la capacidad portante del suelo.

La metodología empleada en este informe se basa en la realización de ensayos de laboratorio en los que se somete el suelo a diferentes niveles de compactación mediante la aplicación de energía controlada, utilizando moldes específicos según las normas mencionadas. Durante el ensayo, se varía la humedad del suelo y se mide el peso unitario seco para cada nivel de compactación. Estos datos se registran y se trazan en una gráfica de humedad-peso unitario, que nos permitirá determinar la humedad óptima y la densidad máxima seca del suelo. Por lo cual este informe abordará también la importancia de la compactación en la ingeniería civil y sus aplicaciones prácticas. Además, se describirán los principales factores que influyen en el proceso de compactación, como la composición del suelo, la energía de compactación aplicada, la distribución del tamaño de las partículas y las propiedades físicas del suelo. Estos factores deben ser considerados cuidadosamente durante el diseño y la ejecución de proyectos de construcción, con el fin de lograr un suelo adecuadamente compactado que proporcione la estabilidad necesaria para las estructuras.

2. Materiales y Métodos

2.1 Materiales

Para la correcta realización de la práctica, fue necesario emplear una serie de instrumentos que permitieron realizar satisfactoriamente esta, los cuales son:

Muestra de suelo: Muestra de suelo seleccionada para el ensayo Proctor modificado. Esta se tomó una fracción de 5.01 Kg.



Figura 1. Suelo.

Fuente: Registro fotográfico propio.

Charolas metálicas: bandeja fabricada de metal, se utiliza para transportar, organizar o exhibir objetos en diversos entornos, como cocina, industria, laboratorio o servicio de alimentos. Esta se utilizó para la determinar la masa de la muestra de suelo y para homogenizar la cantidad de agua añadida para que la muestra alcance el 12% de humedad.



Figura 2. Charolas metálicas.

Fuente: Registro fotográfico propio.

Molde Proctor modificado: Este tiene un diámetro de 152.4 mm, una altura de 116.4 mm y un volumen de 2,248 cm³. Además, cuenta con un collarín en la parte superior para facilitar la compactación, este collarín tiene un diámetro de 152.4 mm, igual al del molde, y una altura de aproximadamente 50.8 mm (2 pulgadas). Su función es permitir que el suelo se compacte correctamente sin que se derrame durante el proceso.



Figura 3. Molde Proctor modificado.

Fuente: Registro fotográfico propio.

Bacula digital: Esta es una balanza de 20 Kg de capacidad y 1.0 gr. de sensibilidad. Esta se utilizó para determinar la masa del material estudiado (5 kg).



Figura 4. Bacula digital.

Fuente: Registro fotográfico propio.

Balanza digital: Esta es una balanza de 500 gr de capacidad y de 0.01 gr de sensibilidad. Esta fue utilizada para determinar la masa de las muestras de suelo y sus respectivos recipientes para la determinación de la humedad en nuestras muestras.



Figura 5. Balanza digital.

Fuente: Registro fotográfico propio.

Palustre: Herramienta manual con una hoja metálica plana o en punta y un mango, utilizada en albañilería para aplicar, extender y dar forma a materiales. Esta se utilizó para enraizar el material en el molde Proctor modificado.



Figura 6. Palustre.

Fuente: Registro fotográfico propio.

Calibrador Vernier o pie de rey: es un instrumento de medición de magnitudes de alta precisión que sirve para medir las dimensiones de pequeños objetos o superficies y conocer sus diámetros interiores y exteriores con un alto grado de precisión. Este se utilizó para tomar las medidas del molde Proctor modificado.



Figura 7. Pie de rey.

Fuente: Registro fotográfico propio.

Martillo Proctor: es un instrumento utilizado en ensayos de compactación de suelos, específicamente en la prueba Proctor. Consiste en un cilindro metálico con una masa estandarizada que se deja caer desde una altura específica para compactar muestras de suelo en un molde.



Figura 8. Martillo Proctor modificado.

Fuente: Registro fotográfico propio.

Horno: Un horno que mantenga una temperatura constante entre 100 – 110° C. Este se utilizó para secar la muestra de suelo para poder determinar la humedad de nuestro suelo ensayado.



Figura 9. Horno.

Fuente: <https://www.controltecnica.com/test/producto/horno-de-secado-serie-cd/>

2.2 Procedimiento

La práctica de laboratorio realizada anteriormente se detalla en los siguientes pasos:

- Determinar la masa del molde Proctor modificado vacío junto con la base, esto lo hacemos con la ayuda de la báscula y también procedemos a tomar las medidas de las dimensiones del molde Proctor, donde esta se realizó tres veces para hacer promedio para obtener medidas más exactas.



Figura 10. Pesaje del molde Proctor.

Fuente: Registro fotográfico propio.



Figura 11. Toma de medidas del molde Proctor.

Fuente: Registro fotográfico propio.

- De la muestra de suelo cogemos 5 kilogramos por ensayo Proctor, el cual nos dividimos el trabajo en los grupos de laboratorio, en el cual se hicieron 3 ensayos Proctor modificado, donde un ensayo era con la humedad natural de la muestra de suelo donde se supone que tiene una humedad del 4%, y los otros dos ensayos se hicieron Suponiendo también un 4% de humedad y contando con esta humedad calculamos la cantidad de agua necesaria para agregar al suelo para que este tenga 8% y 12% de humedad, en nuestro grupo de laboratorio nos tocó el 12% de humedad y por lo cual procedemos a agregarle a nuestra muestra de suelo 385,321 ml de agua.
- A la muestra de suelo tomada se le esparce la cantidad de agua necesaria para llevarla de la humedad que presente, hasta la humedad deseada. Homogenizar completamente la mezcla de suelo-agua.



Figura 12. Vertido de agua en el suelo para alcanzar 12% de humedad.

Fuente: Registro fotográfico propio.

- La muestra preparada se coloca en el molde cilíndrico en cinco (5) capas, llenándose en cada capa aproximadamente 1/5 de su altura y se compacta cada capa de la forma siguiente:

Se coloca el pistón de compactar con su guía, dentro del molde; se eleva el pistón hasta que alcance la parte superior y se suelta permitiendo que tenga una caída libre de 45.7 centímetros, se cambia de posición la guía, se levanta y se deja caer nuevamente el pistón. Se repite el procedimiento cambiando de lugar la guía de manera que con 55 golpes se cubra la superficie. Esta operación de compactación se repite en las cinco capas del material.



Figura 13. Separación del suelo en 5 partes.

Fuente: Registro fotográfico propio.



Figura 14. Compactación con el martillo Proctor.

Fuente: Registro fotográfico propio.

- Al terminar la compactación de las cinco capas, se quita la extensión llamada collarín y con el palustre se enraza la muestra al nivel superior del cilindro.



Figura 15. Compactación terminada

Fuente: Registro fotográfico propio.



Figura 16. Enrasado.

Fuente: Registro fotográfico propio.

- Luego se limpia exteriormente el cilindro y se pesa con la muestra compactada anotando su peso. (Peso del material + cilindro)



Figura 17. Pesaje del molde Proctor más suelo compactado.

Fuente: Registro fotográfico propio.

- Con ayuda de la espátula se saca el material del molde y de la parte central del espécimen se toman aproximadamente 100 gr., y se pesa en la balanza de 0.1 gr., se sensibiliza anotando su peso. (Peso húmedo). A esta muestra se deposita en el horno a una temperatura de 100 a 110° C por un período de 24 horas, transcurrido este período determínese el peso seco del material.



Figura 18. Pesaje de la muestra del Proctor.

Fuente: Registro fotográfico propio.

- Este procedimiento Proctor se realiza de igual manera para el suelo con humedad natural del 4% y también para el suelo del 12% y finalmente con estos pasos logramos obtener un número de resultados que permitan trazar una curva de peso unitario seco versus contenido de humedad.
- Luego de haber terminado con los pasos anteriores, procedemos a recoger, limpiar y organizar todos los artefactos que nos fueron útiles en esta práctica, y pertenece al laboratorio, y después de haber tomado todos los datos que necesitamos, procedemos a realizar los cálculos y análisis.

3. Resultados

3.1 Cálculo de datos

Para empezar, se calcula el volumen del molde cilíndrico utilizando la fórmula

$$V = \frac{d^2\pi}{4} \times h \quad (1)$$

Donde:

d = diametro del molde

h = altura del molde

Determinamos el contenido de humedad de cada muestra.

Determinación del contenido de humedad			
Número de recipiente	1	2	3
Masa del recipiente (gr)	-	-	-
Masa del recipiente + suelo humedo (gr)	-	-	-
Masa del recipiente + suelo seco (gr)	-	-	-
Masa de agua (gr)	-	-	-
Masa de suelo seco (gr)	-	-	-
Contenido de humedad (%)	-	-	-
Contenido de humedad promedio (%)	4		12

Tabla 2. Determinación del contenido de humedad

Contenido de Humedad Real		
Recipiente	1	2
Masa del recipiente (gr)	19,6	18,42
Masa del recipiente + suelo humedo (gr)	117,26	99,9
Masa del recipiente + suelo seco (gr)	95,96	93
Masa de agua (gr)	21,3	6,9
Masa de suelo seco (gr)	76,36	74,58
Contenido de humedad (%)	27,89	9,25
Contenido de humedad promedio	18,57	

Tabla 3. Determinación del contenido de humedad de la muestra 3.

Luego, calculamos los pesos de cada muestra y determinamos el peso unitario húmedo y seco con las fórmulas 2 y 3 respectivamente.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2)$$

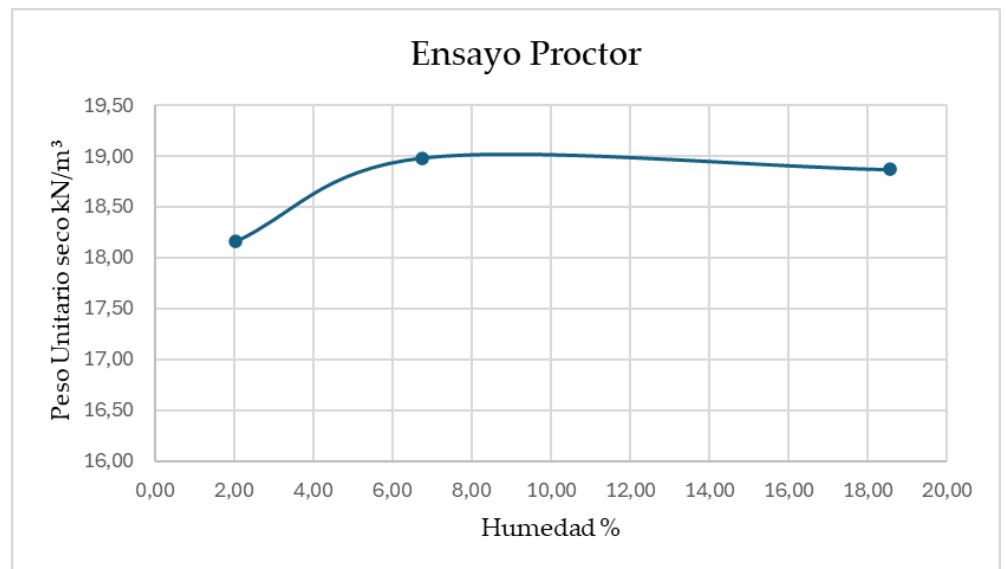
$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} \quad (3)$$

Los valores obtenidos se encuentran compilados en la tabla 3.

Datos del peso unitario			
Numero de molde	1	2	3
Humedad deseada	4%	8%	12%
Masa del molde (gr)	5004	5037	6112
Masa del suelo inicial (gr)	5050	5010	5010
Volumen del molde (cm ³)	2210,83	2254,86	2136,92
Masa del molde + suelo (gr)	9180	9695	10985
Masa del suelo compactado (gr)	4176	4658	4873
Peso unitario humedo (KN/m ³)	18,53	20,27	22,37
Humedad real de la muestra (%)	2,03	6,762	18,57
Peso unitario seco (KN/m ³)	18,16	18,98	18,87

Tabla 4. Peso Unitario.

A continuación, se muestra la gráfica 1 con los valores de los pesos unitarios y la humedad:



Grafica 1. Ensayo Proctor.

Según la gráfica la humedad óptima es aproximadamente 6,7% y el peso unitario máximo es 18,98 kN/m³.

Para concluir con los cálculos se determinó la energía de compactación suministrada al suelo durante el ensayo Proctor utilizando la siguiente formula:

$$CE = \frac{\# \text{ de capas} \times \# \text{ de } \frac{\text{golpes}}{\text{capa}} \times W_{\text{martillo}} \times H_{\text{caida del martillo}}}{\text{Volumen del molde}} \quad (4)$$

Reemplazando tenemos que:

$$CE = \frac{5 \times 55 \times 44,537 \text{ N} \times 45,7 \text{ cm}}{2136,92 \text{ cm}^3} = 261,928 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

4. Discusión y Análisis de resultados

Luego de realizar todos los cálculos para la obtención del peso unitario seco máximo y el contenido de humedad óptimo, se obtuvieron los siguientes resultados en los tres ensayos realizados:

- Para un contenido de humedad deseado del 4%, se obtuvo una humedad de 2,03% para el suelo y un peso unitario seco de 18,16 kN/m.
- Para un contenido de humedad deseada del 8%, se obtuvo una humedad de 6,762% para el suelo y un peso unitario seco de 18,98 kN/m.
- Para un contenido de humedad deseado del 12%, se obtuvo una humedad de 18,57% para el suelo y un peso unitario seco de 18,87 kN/m.

Se puede observar que el contenido de humedad real es diferente al contenido de humedad deseado; esto se debe a que nuestro material se podía encontrar con cierto contenido de humedad natural y no se encontraba completamente seco o se agregó más agua de la necesaria, por un error en los cálculos del agua necesaria a agregar a nuestro suelo.

Así mismo, en la curva de compactación se pudo determinar el peso unitario seco máximo que nos arrojó un valor de 18,98 kN/m y una humedad óptima de 6,27%. Por otro lado, la energía de compactación fue de 261,928 N/cm calculada según la norma ASTM D698-91. Esta energía elevada (típica del Proctor modificado) explica los valores altos de densidad seca alcanzados, en comparación con el Proctor estándar. Esta fue la energía aplicada para sacar los espacios vacíos en nuestro material.

5. Conclusiones

6. Referencias

- 6.1 Ensayo Proctor Normal y Modificado. Descripción e interpretación. (2018, abril 4). geotecniafacil.com. <https://geotecniafacil.com/ensayo-proctor-normal-y-modificado/>
- 6.2 Patino Fabian, H. (2012). Geotecnia. Editorial Academica Espanola.
- 6.3 (S/f). Aulacarreteras.com. Recuperado el 30 de marzo de 2025, de <https://www.aulacarreteras.com/ensayo-proctor/>