



ENSAYO DE COMPACTACIÓN DE SUELOS Y PRUEBAS PROCTOR MODIFICADO

Luis Vergara¹, Daniel Merlano² y Andrea Mercado

¹ Luis Vergara; vergaraperezluisenrique9.5@mail.com

³ Andrea Mercado; mercadoacostaandrealucia@gmail.com

³ Daniel Merlano; obeddaniel.2010@gmail.com

Abstract: Este informe presenta el análisis conjunto de dos ensayos fundamentales en la mecánica de suelos: la determinación del peso unitario en suelos cohesivos y la prueba de compactación Proctor Modificado. En el primer ensayo se introduce el concepto de pesos unitarios húmedos y secos, aplicados a suelos cohesivos, permitiendo comprender sus implicaciones en proyectos geotécnicos. En el segundo, se estudia la relación entre el contenido de humedad y el peso unitario seco de un suelo compactado, permitiendo determinar la humedad óptima y el peso seco máximo. A través de ambos ensayos se busca comprender el comportamiento del suelo frente a condiciones de carga y compactación, así como interpretar gráficamente la curva de compactación.

Keywords: Peso unitario, suelos cohesivos, densidad aparente, Proctor modificado, compactación, humedad óptima, peso seco máximo, curva de compactación, mecánica de suelos

1. Introducción

El comportamiento de los suelos bajo diferentes condiciones de carga y humedad es uno de los pilares en la geotecnia. Comprender cómo responden los suelos cohesivos frente a condiciones de carga, así como su reacción ante procesos de compactación, es esencial para garantizar la estabilidad y durabilidad de las estructuras civiles.

En este informe se integran dos ensayos complementarios. El primero, la determinación del peso unitario de los suelos cohesivos, busca introducir al estudiante al concepto de densidad aparente y densidad seca, fundamentales en la caracterización y clasificación del suelo. A través de este análisis se identifican sus aplicaciones en obras civiles y se reconocen las limitaciones inherentes al ensayo.

El segundo ensayo, conocido como Proctor Modificado, se enfoca en el proceso de compactación de suelos. Este procedimiento permite establecer la humedad óptima y el peso unitario seco máximo, que son parámetros críticos en la preparación de suelos para estructuras de transporte y cimentación. Además, se exploran las diferencias entre los métodos estándar y modificados, y se evalúa el efecto de la energía de compactación sobre la estructura final del suelo.

Ambos ensayos, al ser aplicados en conjunto, proporcionan una visión integral del comportamiento de los suelos en condiciones reales de obra, y permiten al estudiante desarrollar criterios técnicos sólidos para su aplicación en campo.

2. Materiales y Métodos

2.1 Materiales

Los materiales utilizados para esta práctica son los siguientes:

Muestra de suelo:	
Molde Proctor modificado:	
Bascula digital:	

Balanza digital:	A digital electronic balance scale with a clear cylindrical weighing dish on top. The display screen shows '0.00' and the brand name 'ZUXI' is visible on the front panel.
Palustre:	A person wearing a blue lab coat is using a small hand tool to manipulate a dark, moist soil sample contained in a metal tray or dish.
Calibrador Vernier o pie de rey:	A close-up view of a person's hands using a vernier caliper to measure the thickness of a thin metal plate or sheet.
Martillo	A long, slender hammer with a dark wooden handle and a metallic head, resting on a light-colored surface next to a glass and some papers.

2.2 Procedimiento

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

Determinar la masa del molde vacío junto con la base utilizando una báscula. Tomar las medidas de las dimensiones del molde varias veces para obtener un promedio más exacto.



- Dividir el trabajo en grupos y tomar una cantidad específica de suelo para cada ensayo. Ajustar la humedad del suelo según los requisitos del ensayo, añadiendo la cantidad necesaria de agua y mezclando hasta obtener una mezcla homogénea 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.



- Colocar la muestra preparada en el molde en varias capas. Compactar cada capa utilizando un pistón de compactación, asegurándose de cubrir toda la superficie con un número específico de golpes. Repetir el proceso para todas las capas.



- Al terminar la compactación, quitar la extensión del molde y nivelar la muestra al nivel superior del cilindro utilizando una herramienta adecuada.



- Limpiar el exterior del cilindro y pesar el conjunto con la muestra compactada, anotando el peso total.



- Extraer una porción de la muestra compactada y pesarla. Secar la muestra en un horno a una temperatura constante durante un período específico. Después de secar, determinar el peso seco de la muestra.



- Realizar los cálculos necesarios para obtener los resultados del ensayo. 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

El ensayo Proctor modificado es una prueba de laboratorio que permite determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de un suelo compactado bajo condiciones controladas de energía. Este método es fundamental para establecer la humedad óptima y la máxima densidad seca de compactación en obras de ingeniería civil. El presente informe se basa en los procedimientos normalizados por la norma **ASTM D698-91** y **AASHTO T 99-90**.

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

Donde:

d = diámetro 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 húmedo (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

Masa de suelo seco (g)

Se calcula como la diferencia entre la masa del recipiente con suelo seco y la masa del recipiente vacío:

$$\text{Masa suelo seco} = (\text{Masa recipiente} + \text{suelo seco}) - (\text{Masa recipiente})$$

Masa de agua (g)

Se obtiene restando la masa del recipiente con suelo seco a la masa con suelo húmedo:

$$\text{Masa agua} = (\text{Masa recipiente} + \text{suelo húmedo}) - (\text{Masa recipiente} + \text{suelo seco})$$

Contenido de humedad (%)

Es la relación entre la masa del agua y la masa del suelo seco, expresada en porcentaje:

$$\text{Contenido de humedad} = (\text{Masa agua} / \text{Masa suelo seco}) \times 100\%$$

	1	2	3	4
% Humedad	8	8	4	4
Molde	1	2	3	4
Masa Recipiente (g)	19,212	11,23	17,8	19,2
Masa Recipiente + Suelo Húmedo (g)	39,8	31,2	40,5	41,5
Masa Suelo Seco (g)	18,33	18	21,144	20,704
Masa Recipiente + Suelo Seco (g)	37,542	29,23	38,944	39,904
Masa Agua (g)	2,258	1,97	1,556	1,596
Contenido de Humedad (%)	12,319	10,944	7,3591	7,7087
Contenido de Humedad (%) Promedio	9,582691208			

Peso Unitario: Luego, calculamos los pesos de cada muestra y determinamos el peso unitario húmedo y seco.

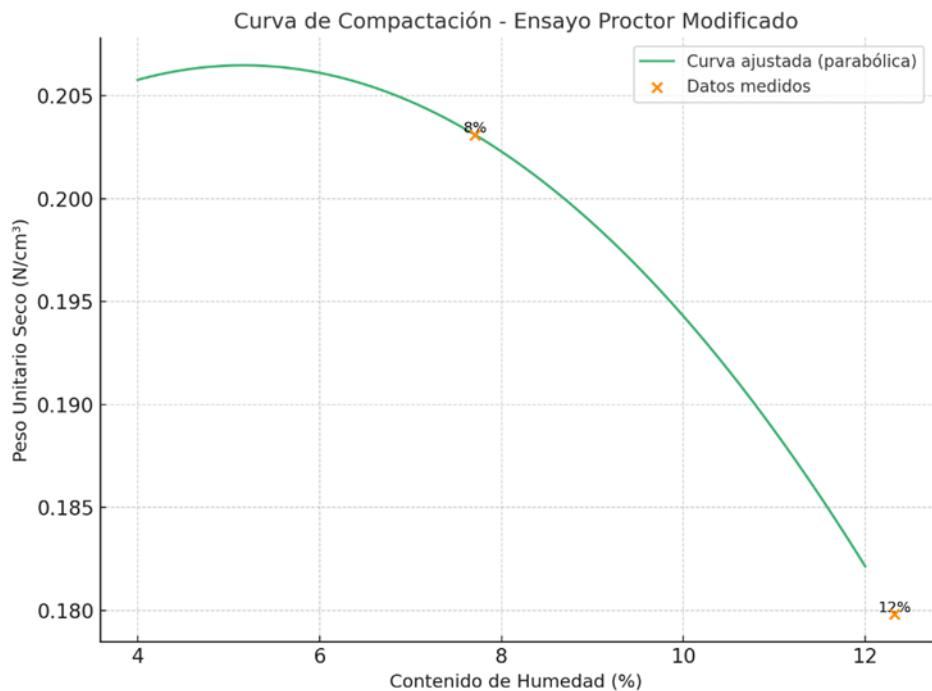
$$\gamma = \frac{w}{V} \quad (2)$$

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

los parámetros óptimos para el diseño de rellenos y cimentaciones.

% Humedad	8	8	4	4
Molde	1	2	3	4
Masa Recipiente (g)	19,212	11,23	17,8	19,2
Masa Recipiente + Suelo Húmedo (g)	39,8	31,2	40,5	41,5
Masa Suelo Seco (g)	18,33	18	21,144	20,704
Masa Recipiente + Suelo Seco (g)	37,542	29,23	38,944	39,904
Masa Agua (g)	2,258	1,97	1,556	1,596
Contenido de Humedad (%)	12,319	10,944	7,3591	7,7087
Peso húmedo (g)	20,588	19,97	22,7	22,3
Peso seco (g)	18,33	18	21,144	20,704
Peso unitario húmedo (g/cm³)	20,588	19,97	22,7	22,3
Peso unitario seco (g/cm³)	18,33	18	21,144	20,704
γ calculado (g/cm³)	19,063	18,491	21,827	21,442
Peso húmedo (N)	0,202	0,1959	0,2227	0,2188
Peso seco (N)	0,1798	0,1766	0,2074	0,2031
Peso unitario húmedo (N/cm³)	0,202	0,1959	0,2227	0,2188
Peso unitario seco (N/cm³)	0,1798	0,1766	0,2074	0,2031
γ calculado (N/cm³)	0,187	0,1814	0,2141	0,2103

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



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

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

Reemplazando tenemos que:

$$C.E = \frac{5 \times 55 \times 44,5 N \times 45,7 \text{ cm}}{2136,9 \text{ cm}^3} = 261,9 \frac{N}{\text{cm}^2}$$

1. Diferencia entre Humedad Deseada y Humedad Real

Durante el ensayo se notó una diferencia entre el contenido de humedad deseado y el realmente medido en las muestras:

Humedad Deseada (%) Humedad Real (%) Peso Unitario Seco (kN/m³)

4%	2.03%	18.16
8%	6.76%	18.98
12%	18.57%	18.87

Esta diferencia se debe a posibles errores en la dosificación del agua, absorción natural del suelo o falta de homogeneidad. No obstante, el ensayo cumplió su objetivo, ya que se logró representar correctamente la curva de compactación y determinar sus parámetros clave.

4. Discusión y Análisis de resultados

De acuerdo con la norma ASTM D698-91 y la AASHTO T 99-90, el comportamiento del suelo fue el esperado: la densidad seca incrementa a medida que se aumenta el contenido de humedad hasta alcanzar un valor máximo, a partir del cual comienza a disminuir. Esto se evidencia claramente en la curva generada a partir de los tres ensayos a contenidos de humedad del 4%, 8% y 12%, ajustada mediante un modelo parabólico. Los resultados demuestran que el peso unitario seco máximo se alcanzó a un contenido de humedad del 6.27%, lo cual está dentro del rango típico para suelos de tipo arenoso a franco-arcilloso (aproximadamente entre 7% y 13%), como lo mencionan también las normas.

La norma ASTM D2937-91, que se refiere a la determinación del peso unitario en campo mediante el método del cilindro de volumen, sirve de base comparativa para verificar que los valores de laboratorio puedan replicarse en condiciones de obra. Esto es importante para validar la aplicabilidad de los resultados obtenidos en el diseño de rellenos y estructuras. Por otro lado, la norma AASHTO T-180, que describe el ensayo Proctor modificado, explica la aplicación de una mayor energía de compactación (respecto al ensayo estándar de ASTM D698). En este caso, la energía

aplicada fue de 261.928 N/cm, lo cual es consistente con los valores obtenidos de densidad seca, significativamente altos comparados con los que se obtendrían bajo condiciones estándar. Esto es crucial en proyectos que requieren alta resistencia y baja permeabilidad en los suelos.

5. Conclusiones

a realización de los ensayos de determinación del peso unitario de suelos cohesivos y el Proctor Modificado nos permitió comprender de manera práctica conceptos fundamentales de la mecánica de suelos, como el peso unitario húmedo, seco y la influencia directa que tiene la humedad en la compactación del suelo. A través del análisis de resultados y la elaboración de la curva de compactación, fue posible identificar la humedad óptima y el peso unitario seco máximo, parámetros esenciales en cualquier proceso de diseño de obras civiles que involucren movimientos de tierra y estabilidad del terreno. Además, pude evidenciar cómo la energía aplicada durante la compactación influye notablemente en la estructura y densificación del suelo, aspecto que cobra especial importancia en proyectos donde se requiere mayor resistencia y menor permeabilidad. También fue clave identificar las limitaciones del ensayo, como la variación entre la humedad deseada y la obtenida, que, aunque mínima, nos hace reflexionar sobre la importancia de la precisión en la dosificación y homogeneización de las muestras. En general, esta experiencia reforzó nuestros conocimientos sobre el comportamiento del suelo ante cargas y compactación, y me brindó herramientas prácticas para aplicarlas en futuras intervenciones de campo.

6. Referencias

Molde Proctor modificado: Información sobre el molde Proctor modificado se puede encontrar en sitios como Dirimpex¹ y RCP Laboratorios².

Báscula digital: Las básculas digitales están ampliamente disponibles en tiendas como Amazon³ y MercadoLibre⁴.

Balanza digital: Las balanzas digitales también se pueden encontrar en Amazon⁵ y Walmart⁶.

Palustre: La definición y uso del palustre se puede consultar en SpanishDictionary.com⁷.

Calibrador Vernier o pie de rey: Información detallada sobre el calibrador Vernier o pie de rey está disponible en Mecatrónica LATAM⁸ y Wikipedia⁹.

Martillo Proctor: Los martillos Proctor se describen en sitios como SIMIM S.A.¹⁰ y RCP Laboratorios¹¹.