Horizonte Académico
Revista Multidisciplinaria
Recibido:09/04/2025 Aprobado:10/05/2025

DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n2.171

Importancia del Grado de Compactación en el Diseño de Carreteras

Wilson Ángel Gutiérrez Rodríguez
dicytfactec@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-8188-1441
Universidad Técnica de Oruro – Facultad Técnica
Bolivia – Oruro

RESUMEN

Las obras de infraestructura vial están relacionadas en forma directa al comportamiento del suelo en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y las pruebas de laboratorio de suelos correspondientes. Por lo que cuando realizamos compactación en laboratorio y in situ podemos comprobar la efectividad de la compactación y los resultados obtenidos. Por lo que el Grado de compactación estará dentro la especificación detallada en la propuesta técnica y sus especificaciones que obligatoriamente se debe cumplir. Los resultados obtenidos están circunscritos en la ciudad de Oruro y en el radio urbano en determinadas calles especificas zona norte calle Potosí entre Oblitas y Vásquez. Al realizar este análisis es importante conocer por lo menos 4 laboratorios: porcentaje de humedad, granulometría, límites de consistencia y compactación. Por lo que resulta muy interesante determinar el grado de compactación cuyo valor dará la posibilidad de continuar o revisar todo el proceso de los laboratorios anotados y su consecuente aplicación en la construcción de carreteras.

***Palabras clave**:* compactación, densidad húmeda, densidad seca, carreteras

Importance of the Degree of Compaction in Road Design

ABSTRACT

Road infrastructure projects are directly related to soil behavior in terms of its physical and chemical properties, as well as the corresponding soil laboratory tests. Therefore, when we perform compaction in the laboratory and in situ, we can verify the effectiveness of the compaction and the results obtained. Therefore, the degree of compaction will be within the specifications detailed in the technical proposal and its mandatory specifications. The results obtained are limited to the city of Oruro and within the urban area on certain specific streets, including Potosí Street between Oblitas and Vásquez streets. When performing this analysis, it is important to know at least four laboratory tests: moisture content, particle size distribution, consistency limits, and compaction. Therefore, it is very important to determine the degree of compaction, the value of which will allow us to continue or review the entire process of the listed laboratories and its subsequent application in road construction.

***Keywords**:* compaction, wet density, dry density, roads

INTRODUCCIÓN

La determinación del grado de compactación de un suelo comprende análisis del suelo desde la granulometría, límites de consistencia, compactación y consecuentemente el cálculo de la densidad máxima seca y la humedad optima del suelo y al mismo tiempo el cálculo de la densidad in situ, por lo que la relación de la densidad húmeda entre la densidad aparente del suelo seco dará como resultado el grado de compactación del suelo siendo este valor que se deberá comparar con lo solicitado de acuerdo a su especificación técnica, si cumpliese este parámetro o su valor será superior concluyendo que está dentro los parámetros y su aprobación.

Por lo que nuestra investigación será desde un punto de vista práctico con un insumo de fuentes ya experimentales que solo en laboratorio se pueden determinar por lo que es importante el cuidado necesario en el levantamiento de datos.

Al realizar la investigación tendremos la posibilidad de encontrar suelos que no cumplirán con nuestras especificaciones por lo que ahí tendremos que mejorar el material apropiado y de esta forma que su índice de compactación sea igual o mayor al propuesto en la especificación técnica.

En la construcción de carreteras, la compactación del suelo es crucial para garantizar la durabilidad y seguridad de la infraestructura. Una compactación adecuada previene asentamientos diferenciales, mejora la resistencia al corte y reduce la infiltración de agua, factores que pueden comprometer la integridad de la vía.

Los suelos durante el proceso de compactación requieren agua para que las partículas del suelo se puedan mover y lograr una estructura más densa. Es así que, si mantenemos un mismo esfuerzo de compactación y se va incrementando gradualmente el agua, la densidad seca del suelo también va aumentando hasta lograr un estado en el que el suelo alcanza una densidad seca máxima; pero esa densidad seca empieza a disminuir a medida que los incrementos de agua sean cada vez más grandes debido a que el agua ocupa los espacios que podrían ser ocupados por suelo. El contenido de agua para el cual se logra el máximo peso específico es la humedad óptima.

https://aulasvirtuales.uniquindio.edu.co/RecDigital/MecanicaDeSuelos/recursos/unidad4/Descargable_EA1.pdf

La eficacia de la compactación que se puede lograr en obra depende, entre otros factores, de: • Naturaleza del suelo a compactar. • Elección adecuada del equipo: tipo, peso, presión de inflado de neumáticos, área de contacto, frecuencia de vibración, etc. • La energía específica de compactación (energía que se le entrega al suelo por unidad de volumen durante el proceso mecánico de que se trate). • Contenido de humedad del suelo. • Cantidad y espesor de las capas del terraplén. • Número de pasadas del equipo de compactación. Los métodos usados para la compactación dependen del tipo de suelo. Los friccionales, como las arenas, se compactan eficientemente por métodos vibratorios (placas vibratorias), mientras que los suelos tipo arcillosos se compactan mejor por métodos estáticos (rodillos pata de cabra, rodillos neumáticos, rodillos lisos).

Rosetti, R. C., & Begliardo, H. F. (2005). Generalidades sobre compactación de suelos. Ingeniería Civil Laboratorio. Rafaela: Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Rafaela.

El diseño y evaluación de pavimentos con propósitos de construcción y rehabilitación requiere de una cuidadosa determinación de factores tales como propiedades de los materiales, clasificación del tránsito, volúmenes diarios y sus tasas de crecimiento reales, porcentajes de vehículos pesados, condiciones ambientales, etc. Sin duda, las propiedades de los materiales constituyen uno de los factores más importantes en el diseño estructural del pavimento, así como en el comportamiento que presente durante su vida útil. En el pasado, el diseño de pavimentos flexibles ha involucrado correlaciones empíricas, las cuales fueron obtenidas con base en el comportamiento observado en los materiales en campo.

Garnica Anguas, P., & Pérez García, N. (2001). INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE COMPACTACION EN LAS DEFORMACIONES PERMANENTES DE LOS SUELOS COHESIVOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS. Publicación Técnica, (165).

El CBR mide la resistencia del suelo a la penetración, indicando su capacidad para soportar cargas. Es especialmente útil para diseñar las capas de pavimento en función del tipo de suelo existente. Todo Ingenierías+2Wikipedia+2Repositorio Institucional+2Alicia

El ensayo Proctor es una prueba de laboratorio que determina la relación entre la densidad seca del suelo y su contenido de humedad. Existen dos variantes: Wikipedia+1Alicia+1

- Proctor estándar: Utiliza una energía de compactación menor, adecuada para suelos con cargas ligeras.
- Proctor modificado: Emplea una energía de compactación mayor, simula condiciones más exigentes como las de las carreteras.repositorio.urp.edu.pe+2Wikipedia+2Repositorio Institucional+2

Estos ensayos permiten establecer el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima seca que debe alcanzarse en campo. Repositorio USIL+3Repositorio Institucional+3Alicia+3

MATERIALES Y MÉTODOS

El método de investigación tiene un carácter experimental y la recopilación de datos tanto de laboratorio como de campo. Es importante reconocer el aporte practico de la investigación y además del análisis experimental que se tendrá al momento de la comparación de resultados. Tendremos dos enfoques en el momento de su análisis de resultados, uno el cálculo de la densidad máxima admisible del suelo y el porcentaje de humedad optimo del suelo, y estarán sujetas a dos determinaciones a asumir.

El ensayo Proctor es una prueba de laboratorio que determina la relación entre la densidad seca del suelo y su contenido de humedad.

- Proctor estándar: Utiliza una energía de compactación menor, adecuada para suelos con cargas ligeras.
- Proctor modificado: Emplea una energía de compactación mayor, simula condiciones más exigentes como las de las carreteras.

Estos ensayos permiten establecer el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima seca que debe alcanzarse en campo.

Ensayo CBR (California Bearing Ratio)

El CBR mide la resistencia del suelo a la penetración, indicando su capacidad para soportar cargas. Es especialmente útil para diseñar las capas de pavimento en función del tipo de suelo existente.

La compactación consiste en aumentar la densidad del suelo mediante la reducción de los vacíos de aire, aplicando energía mecánica.

- Mejora de la capacidad de soporte: Un suelo compactado puede soportar mayores cargas sin deformarse.
- Reducción de la permeabilidad: Disminuye la infiltración de agua, evitando problemas de erosión y debilitamiento del suelo.
- Aumento de la estabilidad: Reduce la posibilidad de asentamientos y deslizamiento.

Estos aspectos son fundamentales para la construcción de carreteras duraderas y seguras.

Procedimiento experimental

Procedimiento para el ensayo de compactación proctor AASTHO T-180

Coloque el molde con su collar sobre una base firme, plana y horizontal.

Llene el molde con una de las fracciones de muestra de acuerdo al tipo de suelo y además la proporcionalidad del agua por su granulometría.

Coloque una capa de material de aproximadamente un quinto de la altura del molde más el collar.

Compacte la capa con 25 golpes de pisón, uniformemente distribuidos en el molde de 100 mm y 56 golpes en el molde de 150 mm.

Repita cuatro veces las operaciones, escarificando ligeramente las superficies compactadas antes de agregar una nueva capa. Al compactar la última capa debe quedar un pequeño exceso de material por sobre el borde del molde.

Terminada la compactación, retire el collar y enrase cuidadosamente con la regla al nivel del borde del molde. Tape con material más fino los agujeros superficiales que resulten de la remoción de partículas gruesas en el enrasado.

Pese el molde con el suelo compactado. Reste la masa del molde para determinar la masa de suelo compactado que llena el molde.

Determine la densidad húmeda del suelo compactado, dividiendo la mas de suelo compactado que llena el molde por la capacidad volumétrica del molde.

Retire el material del molde y extraiga dos muestras representativas del suelo compactado. Coloque en recipiente hermético y efectué dos determinaciones como humedad del suelo compactado.

Repita las operaciones con cada una de las fracciones restantes, hasta que haya un decrecimiento en la densidad húmeda del suelo, con un mínimo de cuatro determinaciones. El ensayo se debe efectuar desde la condición más seca a la condición más húmeda.

Procedimiento para el ensayo in situ cono de la arena

Se selecciona el lugar y se alisa la superficie del terreno, de ser necesario, para la posterior colocación del plato metálico con perforación central.

Luego se excava a través de esta perforación un orificio con una profundidad similar a la capa de control.

A continuación, se procede a colocar el cono, bien sea cono convencional o macrocono, de manera invertida sobre el agujero, se abre la válvula de este y se deja caer en caída libre la arena de densidad conocida (una arena estandarizada compuesta por partículas cuarzosas, sanas, no cementadas, de granulometría redondeada) hasta el agujero para determinar el volumen.

La densidad húmeda del suelo se determina dividiendo la masa húmeda del material que fue removido entre el volumen del orificio. Luego utilizando la masa húmeda del suelo, el contenido de humedad y volumen del orificio, se puede calcular el volumen del agujero excavado, la masa seca del material extraído y las densidades húmedas y secas “in situ” del suelo ensayado.

Cada muestra fue sometida a un proceso de compactación en laboratorio para determinar la curva de compactación, de donde se obtuvo la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptima. Posteriormente, se comparó con la densidad seca obtenida en campo tras simular procesos de compactación con diferentes niveles de energía a continuación se detalla el proceso realizado en

laboratorio sobre una muestra, para la realización del cambio de capa rígida en las calles potosí entre Oblitas y Vásquez.

Gráfico 1

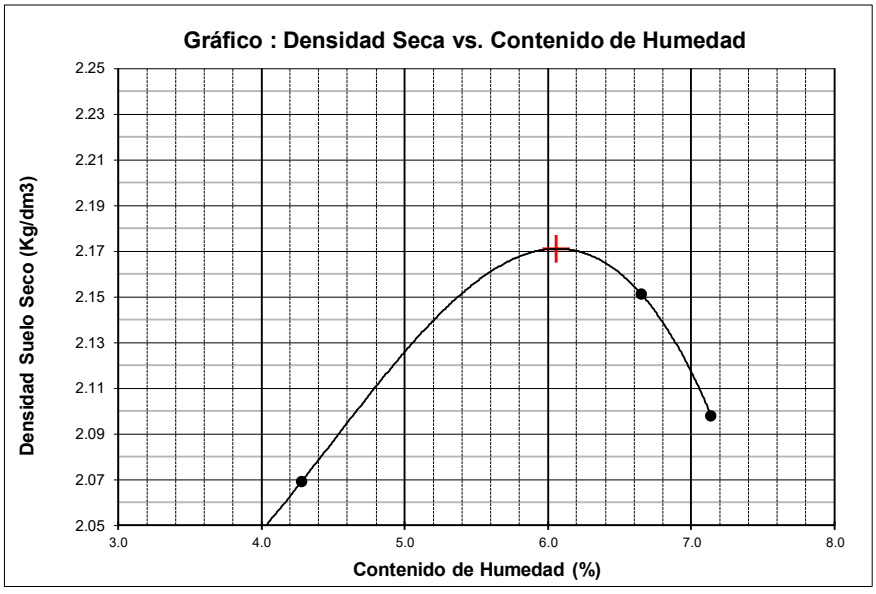
CONSTRUCCION ASFALTADO DE LAS CALLES OBLITAS Y VASQUEZ ENSAYO DE COMPACTACION AASHTO T - 180 MATERIAL DE BANCO	**REGISTRO** COMPACTACIÓN T-180	

RELACION DE PESO UNITARIO-HUMEDAD METODO MODIFICADO DE SUELOS AASHTO T-180

PROYECTO : CONSTRUCCION ASFALTADO DE LAS CALLES OBLITAS Y VASQUEZ
REG. LAB. :
TRAMO :
PROCEDENCIA : MAT. DE BANCO
PROF. :
MUESTRA :
CAPA : SUB BASE
FECHA : 20-oct-20

	Molde No.	1				
	Volumen	2114	cc	Peso	3298	gr
No. de capas		5	5	5	5	
No. de golpes por capa		56	56	56	56	
Peso suelo húmedo + molde (gr)	*	7721	7860	8148	8050	
Peso del molde (gr)		3298	3298	3298	3298	
Peso suelo húmedo (gr)		4423	4562	4850	4752	
Volumen de la muestra (cc)		2114	2114	2114	2114	
Densidad suelo húmedo (gr/cc)		2.092	2.158	2.294	2.248	
Cápsula No.	*	20	19	18	9	
Peso suelo húmedo + cápsula (gr)	*	300.5	310.5	310.9	316.6	
Peso suelo seco + cápsula (gr)	*	292.6	300.8	296.6	300.9	
Peso del agua (gr)		7.9	9.7	14.3	15.7	
Peso de la cápsula (gr)	*	71.5	74.3	81.6	81.0	
Peso suelo seco (gr)		221.1	226.5	215.0	219.9	
Contenido de humedad (%)		3.6	4.3	6.7	7.1	
Densidad suelo seco (gr/cc)		2.020	2.069	2.151	2.098	

* Datos de Laboratorio



Humedad óptima T-180 6.1 %

Densidad máxima T-180 2.171

De la gráfica podemos establecer que la humedad optima es de 6.1 % y la densidad máxima es igual a 1.171.

Extrayendo la fórmula del Excel se tiene:

$$Y = -0.0248\ x^2 + 0.293\ x + 1.2818$$

Derivando se tiene

$$0 = -\ 2\ (0.248)\ x + 0.293$$

De donde x = 5.9 redondeando será igual a 6,0

Reemplazando el valor de x en la ecuación original

$$y = 2{,}147$$

Los valores obtenidos tanto en forma gráfica y analítica deberán ser iguales, en este caso se cumple con este enunciado.

Obteniendo estos resultados se realizará el compactado del suelo tomando para una longitud de 100 m y 10 m de ancho, con un espesor de sub base igual 0.30 m.

$$\text{Área} = 10 * 100 = 1000\ m^2$$

$$\text{Volumen} = 300\ m^3$$

$$\text{Peso del suelo seco} = 300\ m^3 * 2{,}147\ t/m^3 = 644{,}1\ t = 644.100{,}00\ kg$$

$$\text{Agua necesaria} = 64.410{,}00\ \text{litros}$$

Posterior a esta actividad se procederá a realizar el ensayo in situ del cálculo de la densidad método del cono de la arena AASHTO T 191 ASTM D1556-64.

Dentro de su especificación Técnica para uno de los puntos de este sector nos piden el cumplimiento del grado de compactación que debe ser igual a 97 %, por lo que procedemos al ensayo correspondiente con el cono de la arena además utilizamos para el porcentaje de humedad el Speedy.

DENSIDAD APARENTE MAXIMA	2.171
% DE HUMEDAD OPTIMA	6.0

RESULTADOS DEL ENSAYO DENSIDAD IN SITU METODO CONO DE LA ARENA

Peso del frasco + arena antes del ensayo	7837
Peso del frasco + arena después del ensayo	2283
Peso de la arena utilizada	5554

Peso de la arena en el cono	1757
Peso de la arena en el pozo	3797
Densidad de arena	1512
Volumen del hoyo	2,511
Porcentaje de humedad Speedy	7,9
Peso del suelo del pozo	5730
Densidad humeda	2281,74
Densidad aparente suelo seco	2114,68
% grado de compactación	**97,40**

Siendo que 97,40 es mayor a la solicitación de 97 % corresponde a su aprobación en el sector donde se realizó la prueba del cono de la arena.

RESULTADOS

Es importante mencionar que el conocimiento del estudio granulométrico determina qué tipo de suelo tenemos en cualquiera de las clasificaciones que conocemos asstho o sucss, para el caso tratado el material fue un suelo A-1 con sus características propias. Al mismo tiempo para que resulte un suelo bien compactado se tendrá que recurrir a la prueba del cono de la arena en varios sectores del área donde se realizó el compactado, y dependerá del uso del tipo de compactadora controlando el número de pasadas.

DISCUSIÓN

Los resultados corroboran la influencia decisiva del contenido de humedad y del tipo de suelo en la eficiencia del proceso de compactación. Suelos finos, como los arcillosos, requieren un control más estricto del contenido de humedad, mientras que suelos gruesos pueden tolerar mayores variaciones. Además, el tipo de energía aplicada en el campo influye en el grado de compactación logrado.

Se destaca la necesidad de controlar la compactación en capas delgadas, especialmente en rellenos estructurales y cimentaciones, para evitar fallas estructurales futuras.

CONCLUSIONES

El grado de compactación es una variable crítica en el diseño y ejecución de obras civiles.

La densidad seca máxima y el contenido de humedad óptima dependen del tipo de suelo y del método de ensayo.

Se recomienda alcanzar un grado de compactación del 95% o más para garantizar la estabilidad de las estructuras.

La supervisión en campo debe incluir controles continuos de humedad y densidad para asegurar la calidad del relleno compactado.

Es importante mencionar que el ensayo de compactación desarrollado en Laboratorio deberá considerar diferentes aspectos desde la utilización de elementos importantes como ser el empleo del equipo necesario, precauciones antes, durante y luego del laboratorio.

Los cálculos deberán realizarse en precisa para la planilla respectiva

La aplicación de Excel tanto para la representación gráfica de la curva de compactación en su caso debe ser realizada de acuerdo al conocimiento de dicha aplicación.

En su caso deberá usar papel milimetrado con la ayuda de la cercha para graficar correctamente la curva de compactación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D698 – Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.

Das, B.M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.

Coduto, D.P. (2001). *Foundation Design: Principles and Practices*. Prentice Hall.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., & Sheahan, T.C. (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Pearson.

https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Begliardo/publication/264847957_GENERALIDADES_SOBRE_COMPACTACION_DE_SUELOS/links/5502dc770cf231de076fb5c3/GENERALIDADES-SOBRE-COMPACTACION-DE-SUELOS.pdf

Control de Compactación de Rellenos In-Situ Mediante el uso de Cono y Arena y Equipo LWD y su Compatibilidad

Molina, O. M. B. Control de Compactación de Rellenos In-Situ Mediante el uso de Cono y Arena y Equipo.

Evaluación del grado de compactación en la red de caminos vecinales de Riobamba comparando métodos convencionales y alternativos in situ

Paredes Leon, L. C., & Peñafiel Mesache, P. J. (2024). Evaluación del grado de compactación en la red de caminos vecinales de Riobamba comparando métodos convencionales y alternativos in situ (Bachelor's thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo).

http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23016

http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23016

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA UTILIZACIÓN DEL MÉTODO DE CONO DE ARENA Y DENSÍMETRO NUCLEAR PARA DETERMINAR DENSIDADES DE CAMPO EN SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES PROCEDENTE DE LA CANTERA RAMIREZ UBICADA EN EL KM 7+000 DE LA CARRETERA PIURA-PAITA. PERÚ. 2019

Zeta Eche, D. G. (2019). Análisis comparativo de la utilización del método de cono de arena y densímetro nuclear para determinar densidades de campo en suelos cohesivos para terraplenes procedente de la cantera Ramírez ubicada en el km 7+ 000 de la carretera Piura-Paita. Perú. 2019.

https://revistanothofagus.ulagos.cl/index.php/nothofagus/article/view/4

http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4093